MÉTHODE SHERBROOKE DE CONTRÔLE DE COMPACTAGE Projet R864.1

Alexandre R. Cabral, ing., Ph.D. Professeur titulaire Département de génie civil et de génie du bâtiment Faculté de génie Université de Sherbrooke

> Amadou Lotfi Sangaré Étudiant à la M.Sc.A.

Serge-Étienne Parent, ing. Ph.D. Professionnel de recherche

Réalisé pour le compte du ministère des Transports et de la Mobilité durable du Québec (MTMD)

Juin 2023

La présente étude a été réalisée à la demande du ministère des Transports et de la Mobilité durable du Québec (MTMD) et elle a été financée par le Ministère.

Les opinions exprimées dans le présent rapport n'engagent que la responsabilité de leurs auteurs et ne reflètent pas nécessairement les positions du ministère des Transports et de la Mobilité durable du Québec.

© Université de Sherbrooke, 2021-2023

Remerciements

Ces essais ont pu avoir lieu grâce au ministère des Transports et de la Mobilité durable du Québec (MTMD) en collaboration avec les entrepreneurs présents sur chantier, notamment L.A. Hébert, EXP et FNX-Innov. Nous remercions aussi la compagnie Meter Inc. pour les sondes et enregistreurs de données fournis lors des premières étapes du projet, il y a quelques années. Nous remercions également le Conseil de recherches en sciences naturelles et en génie du Canada (CRSNG) pour les sommes accordées à Alexandre Cabral (RGPIN-2018-05374) depuis 2018; celles-ci lui permettent de financer des étudiantes et étudiants qui ont participé ou participent encore au projet. Finalement, nous remercions aussi la candidate au doctorat, Vanessa Corrêa de Andrade Torres, pour son apport fondamental au projet.

Sommaire

Notre projet de recherche propose que la densité d'un sol puisse être calculée en mesurant la teneur en eau volumétrique d'un sol préalablement mouillé. En effet, sachant la teneur en eau volumétrique et le degré de saturation attendu, il est possible de calculer la porosité d'un sol. Puis, sachant la densité spécifique des particules du sol, on peut calculer la masse volumique apparente. Au cours des dernières années, notre équipe de recherche à l'Université de Sherbrooke a testé et perfectionné une méthode comprenant une sonde de teneur en eau et un équipement pour mouiller une zone de sol, un protocole d'exécution, ainsi qu'un ensemble de calcul comprenant la calibration de la sonde et une estimation du degré de saturation attendu (qui n'est pas de 100%), le tout constituant la méthode Sherbrooke.

Le développement de la Méthode Sherbrooke a débuté vers 2007, puis abandonné en 2008, faute de ressources. Depuis 2015, les travaux ont repris. Ce n'est qu'en 2018 qu'un financement du CRSNG a permis d'embaucher une étudiante au doctorat (Vanessa Andrade, 2019). Par la suite, le MTMD s'est intéressé au développement et au potentiel de cette méthode.

À la base, le problème soulevé a trait à l'utilisation du nucléodensimètre (ND), qui est l'équipement le plus accepté par l'industrie de la construction au Québec pour le contrôle du compactage. Toutefois, comme cet équipement contient des matériaux radioactifs, son utilisation cause certaines inquiétudes relatives à la santé humaine (opérateur) et à l'environnement. De plus, les contrôles exigés engendrent d'importants coûts opérationnels.

Un grand nombre d'études portant sur des méthodes de remplacement au ND ont été réalisées (références dans le rapport d'étape 2 : McLain and Gransberg, 2019; Abyad. *et al.*, 2018, Nazzal, 2014; Rathje *et al.*, 2006). Cependant, jusqu'à présent, aucune méthode n'a été largement adoptée par l'industrie. Parmi les problèmes rencontrés, on dénombre : les coûts (par exemple, si on exige plusieurs opérateurs), la difficulté ou complexité d'exécution, la difficulté d'analyse ou d'interprétation des résultats, le temps nécessaire pour produire une réponse, la précision, etc.

Ce rapport présente les résultats d'une étude dont l'objectif était d'évaluer le potentiel de la méthode Sherbrooke comme solution de rechange au contrôle du compactage des sols communément employés dans la construction d'infrastructures routières. Le recours à cette méthode se veut simple, rapide et peu coûteuse. Elle se base sur l'utilisation d'équipements facilement disponibles commercialement et sur des modèles mathématiques aptes à être distribués localement comme sur un serveur, et ne contient aucun matériau nocif à la santé humaine ou à l'environnement.

La méthode Sherbrooke a été calibrée et validée dans le cadre d'un projet de recherche, où l'on compare des valeurs de masse volumique sèche et de teneur en eau obtenues avec la méthode Sherbrooke, avec celles obtenues par des

méthodes reconnues, c'est-à-dire au moyen d'un appareil ND ou de mesures directes comme le cône de sable et le ballon volumétrique (méthode physique, MP).

Dans ce rapport final, des phases importantes du développement ont été franchies en termes de modélisation. Les résultats montrent que la méthode Sherbrooke, bien que perfectible, fonctionne pour les matériaux de classes MG20, MG112 et MR5. La quantité d'essais effectués avec le MR5 ne permet pas de conclure sur les capacités de la méthode, surtout lorsqu'il y a présence de bitume. La modélisation est conçue pour prédire la masse volumique sèche d'un sol et sa teneur en eau massique grâce à des réseaux de neurones utilisant des indicateurs granulométrique, la densité spécifique des grains et la teneur en eau avant le mouillage du sol.

Synthèse des conclusions et recommandations

Les modèles de lissage par processus gaussiens et par réseaux de neurones ont démontré leur capacité à calibrer la sonde Teros 12 et à prédire le degré de saturation attendu après une minute de mouillage pour un sol de granulométrie et de densité relative connues, et dont la teneur en eau avant mouillage est mesurée. La modélisation par apprentissage machine a permis de diminuer les écarts entre les mesures indirectes effectuées par la méthode Sherbrooke et les mesures directes par des méthodes physiques (ou mesure directe, par cône de sable ou ballon volumétrique). En ce qui a trait aux réseaux de neurones, une proportion de 89 % des prédictions se situait sous 5% d'écart. Des résultats similaires ont été obtenus en menant l'apprentissage machine par processus gaussiens. Pour le nucléodensimètre, la même proportion était de 69 %.

Toutes les méthodes de mesures testées lors de notre projet éprouvent néanmoins des difficultés à capter des gradients sur le site. L'acquisition de davantage de données, notamment des mesures sur un même site pour des gradients de compaction, permettra de valider davantage la méthode Sherbrooke. L'accumulation de davantage de données permettra également à la méthode Sherbrooke de fournir des mesures plus justes et plus précises. De nouvelles données permettront d'explorer des zones de granulométrie, de densité spécifique et de teneurs en eau initiales jusqu'alors non documentées, et de rendre compte de l'incertitude des résultats en zone connue.

De même, le développement d'une sonde dédiée sur mesure pour la Méthode Sherbrooke pourrait permettre des mesures plus exactes et plus précises, en plus d'être plus robuste (donc durable). Il serait recommandé aussi de développer un kit complet pour la méthode dont les composantes seraient plus robustes. Des améliorations pourraient être apportées aussi sur la méthodologie d'essai comme telle.

Table des matières

1	Intr	oduction	1
2	État	t des connaissances	1
	2.1 2.1.1 2.1.2 2.1.3 2.1.4	Contrôle du compactage Ballon volumétrique Cône de sable Nucléodensimètre Méthode Sherbrooke	1 2 2 2
	2.2	Principes des réseaux de neurones	4
	2.3	Principes des processus gaussiens	5
3	Mét	thodologie	7
	3.1	Essais de laboratoire	7
	3.2	Essais de terrain	8
	3.3	Schéma de calcul	10
	3.4	Courbe de calibration	10
	3.5	Paramètres granulométriques	11
	3.6	Analyse comparative	12
	3.7	Calculs de phase	12
	3.8	Logiciels	12
4	Rési	ultats	13
	4.1	Lissage granulométrique	13
	4.2	Analyse comparative	13
	4.3	Prédiction des densités	13
	4.4	Degré de saturation optimisé	17
	4.5	Étude de sensibilité sur le degré de saturation optimisé	18
	4.6	Logiciel	19
5	Rec	ommandations	20
6	Réfe	érences	21
A	nnexe	A	23
	Prépar	ration des échantillons	23
	Granul	lométrie	23
	Densit	é spécifique des grains (<i>Gs</i>)	23

Proctor modifié	23
Essais à court terme pour la calibration de la sonde Teros 12	23
Essais à long terme pour la calibration de la sonde Teros 12	24
Essais à injection de CO2 pour la calibration de la sonde Teros 12	26
Annexe B	3
Équipement nécessaire pour les mesures avec la méthode Sherbrooke	3
Annexe C	6

1 INTRODUCTION

Le rapport d'étape 2 (avril 2023) incluait la calibration de la sonde Teros 12 pour la mesure de la teneur en eau des matériaux granulaires MG112, elle-même reliée à sa densité. Nous avions alors annoncé pour le rapport final l'arrivée d'une nouvelle approche englobante, dont la calibration de la sonde et l'inférence sur la densité seraient fonction de paramètres granulométriques et de la densité spécifique des sols. De cette façon, on évitait une classification par type de matériau. Dans certains cas, comme pour le MG20 et MG112, les fuseaux granulométriques se superposent. Les matériaux recyclés (MR) sont dorénavant inclus dans nos données, et sont analysés communément avec l'ensemble des sols étudiés dans le cadre de ce projet. Nous avions de même proposé d'utiliser les réseaux de neurones pour effectuer la calibration ainsi que l'inférence.

Le rapport final consiste en l'exécution de schémas d'apprentissage machine par réseaux de neurones et par processus gaussiens. La compréhension des schémas de calcul demande des connaissances de base en apprentissage machine, sujets que nous abordons dans l'état des connaissances.

2 ÉTAT DES CONNAISSANCES

2.1 Contrôle du compactage

Cette section présente les principales méthodes de contrôle de compactage utilisées ou étudiées dans le milieu de la construction.

2.1.1 Ballon volumétrique

La méthode du ballon volumétrique, aussi appelée le densitomètre à membrane, demande de creuser dans le sol une cavité, de récupérer et peser la totalité de la matière extraite, puis de mesurer le volume de la cavité grâce au densitomètre. Le volume obtenu, calibré empiriquement, est conjugué avec les masses humide et sèche obtenues en laboratoire pour obtenir la masse volumique sèche du sol, ainsi que sa teneur en eau, et ce, selon la norme CAN/BNQ 2501-058 (Bureau de normalisation du Québec, 2022). En plus d'engendrer des cavités dans l'ouvrage en terre, l'équipement du ballon volumétrique inclut une membrane en caoutchouc fragile. Ainsi, la méthode du ballon volumétrique est difficilement utilisable sur les sols contenant des particules avec un diamètre supérieur à 5 mm, à cause du risque que la membrane soit percée. (Tremblay et Robitaille 2014). Notre choix initial s'est basé sur la norme ASTM-D 2167, qui donne des indications sur le volume nécessaire du ballon, selon la taille des particules.

2.1.2 Cône de sable

L'essai par cône de sable consiste à mesurer le volume d'une petite excavation de sol en la comblant avec un sable de densité étalonnée, puis à peser les masses humide et sèche du sol excavé selon la norme CAN/BNQ 2501-060 (Bureau de normalisation du Québec, 2023a). Nous obtenons ainsi une valeur de masse volumique du sol et de sa teneur en eau. Les essais au cône de sables sont valides pour des sols ayant des particules ayant un diamètre inférieur à 56 mm en raison des dimensions de l'appareil et de l'équipement standard de fonction. On recommande également d'utiliser cette méthode dans des zones sans vibration (Tremblay & Robitaille, 2014). La méthode par cône de sable demande de nombreuses manipulations, des arrêts de chantiers pour réduire les vibrations et une perturbation localisée des ouvrages en matériaux granulaires dus aux petites excavations.

2.1.3 Nucléodensimètre

Le nucléodensimètre (ND) mesure la masse volumique (densité) et la teneur en eaux des matériaux granulaires. C'est l'appareil le plus utilisé au Canada pour le contrôle de compactage du sol en construction depuis les années 1990 du fait de son efficacité et de sa rapidité à donner les résultats afin de s'assurer du niveau de compactage reguis et nécessaire pour la stabilité des ouvrages. Il mesure des masses volumiques sèches sur une plage de 1120 à 2720 kg/m³ (Ministère des Transports du Québec, 1989). La méthode consiste à enfoncer une tige robuste dans le sol testé pour créer une ouverture dans laquelle une sonde radioactive, placée au bout d'une tige, est enfoncée. La transmission du rayonnement entre la sonde et un capteur situé à la base de l'appareil est indicatrice de la masse volumique et de la teneur en eau. Dans le cas où la surface ne permet pas l'enfoncement de la sonde, par exemple avec les enduits bitumineux, des mesures de transmission indirecte des rayonnements sont possibles, ceux-ci étant émis par la sonde, réfléchissants dans le matériau testé avant t'être détectées par le capteur. Les radio-isotopes du césium de la sonde du nucléodensimètre émettent des particules a, ß et y, correspondant à une radioactivité suffisante pour constituer un risque pour les personnes exposées (CCOHS, 2019).

2.1.4 Méthode Sherbrooke

Les limitations importantes liées à l'utilisation du ballon volumétrique et du cône de sable, ainsi que les risques et les coûts importants liés à l'utilisation du nucléodensimètre, engendrent une demande pour des méthodes alternatives. La méthode Sherbrooke (MS) est l'objet du projet de recherche dont ce rapport fait état. Le principe consiste à mesurer la teneur en eau volumique d'un sol inondé, qui est égale à la porosité du matériau poreux, de laquelle on peut inférer la masse volumique sèche, telle que

Équation 1

$$\rho_d = G_s \rho_w \left(1 - \frac{\theta}{Sr} \right)$$

où ρ_d est la densité sèche, G_s est la densité spécifique, ρ_w est la densité de l'eau, θ est la teneur en eau volumique et Sr est le degré de saturation.

La densité particulaire relative peut être mesurée en laboratoire. La densité de l'eau a été fixée à 1000 kg/m³. Toutefois, la densité de l'eau varie en fonction de la température, allant d'un maximum de 1000 kg/m³ à 4°C à 992 kg/m³ à 40°C. L'ajout d'une sonde de température pourrait réduire les erreurs jusqu'à 0.8 %, mais son utilisation n'a pas été jugée nécessaire dans le cadre de ce projet. Avant l'élaboration de l'optimisation développée pour ce rapport, le degré de saturation obtenu par la méthode Sherbrooke, après une minute d'inondation, était évalué approximativement à 80 %. Ce Sr a été déterminé grâce à des essais en laboratoire qui consistait à réaliser plusieurs tests d'inondation pendant une minute. Ces essais ont été majoritairement sur le MG20. Cependant, lors de l'étude du MG112, il est apparu que ce paramètre est très variable et dépend de plusieurs paramètres comme le degré de saturation initiale avant inondation, la teneur en eau initiale, la granulométrieeffectués du sol, le chemin préférentiel pris par l'eau lors de son intrusion dans le sol, le réaménagement des grains du sol lors du compactage. Dans ce rapport, le degré de saturation attendu après une minute d'inondation a plutôt été optimisé selon la granulométrie, la densité spécifique et la teneur en eau initiale du matériau.

Quant à la teneur en eau volumique, elle peut être mesurée en impliquant différentes technologies. La sonde Teros 12 utilisée dans le cadre de la méthode Sherbrooke est propulsée par le principe de réflectométrie du domaine fréquentiel (FDR, *frequency domain reflectometry*). L'analyse de l'onde permet d'évaluer la proportion du volume occupée par l'eau aux alentours de la sonde. La valeur donnée par la sonde Teros 12 est un indice composite qui peut être calibré pour être lié à la teneur en eau volumique d'un milieu poreux donné.

Une telle calibration a fait partie du projet dont ce rapport fait état. Ainsi, la mesure de la sonde à une teneur en eau connue pour les sols MG20 (matériau granulaire, dont la taille maximale nominale est de 20 mm et dont la taille maximale est de 31,5 mm) et MG112 (sable et gravier naturel de 0 à 4 po). Les fuseaux granulométriques du MG20 et du MG112 sont présentés à la figure 1. Également, des essais de terrain ont permis d'évaluer la justesse et la précision de la MS.



Figure 1. Fuseaux granulométriques du MG20 et du MG112.

Lors du rapport d'étape 2, nous avons présenté les résultats d'une régression quadratique sur le MG112. Nous avions également annoncé qu'une version plus aboutie de la calibration pourrait passer par une optimisation sur des réseaux de neurones. Ce rapport contient une utilisation des réseaux de neurones ainsi que d'une autre méthode, les processus gaussiens.

2.2 Principes des réseaux de neurones

Typiquement, un réseau de neurones est une suite d'opérations linéaires effectuées sur des matrices, dont le schéma de calcul peut être représenté par des neurones interconnectés par des synapses (respectivement les cercles et les lignes à la figure 2. On attribue un *poids* à chacune des synapses (w_1 , w_2 et w₃ à la figure 2). Le nombre qui entre dans un neurone est la combinaison linéaire des nombres qui sortent des neurones connectés et des poids des synapses, auguel on ajoute un nombre optimisé similaire à une ordonnée à l'origine, appelé biais, b₁. Par exemple, le neurone du haut, situé sur la première couche, recoit les sommes des sorties du vecteur X formant les variables prédictives multipliées par leur poids. Si $x_1=0,5, x_2=-1$ et $x_3=2$, et que $w_1=3, w_2=1$, w₃=-2 et b₁=5, la valeur d'entrée dans le neurone encerclé de pointillés sera de $(0.5 \times 3) + (-1 \times 1) + (2 \times -2) + 5 = 1.5$. Les neurones peuvent également transformer le chiffre entrant. Une fonction de transformation commune. ReLU (rectified layer unit) prend le maximum entre 0 et le chiffre entrant. À la figure 2, prenant le ReLU comme fonction f, la sortie du neurone sera égale au maximum entre 0 et 1.5, donc 1.5. Ces calculs sont effectués sur chaque neurone de la couche, puis d'une couche à l'autre pour aboutir à un nombre (ou une matrice), y. Des solveurs itératifs permettent d'ajuster les poids w et les biais b d'un réseau de neurones pour faire en sorte que sa prédiction soit la plus proche possible de la valeur attendue.



Figure 2. Schéma d'un réseau de neurones typique

Les réseaux de neurones sont une forme de graphes orientés acycliques. Typiquement, chaque couche (comprenant les poids, le biais et la fonction d'activation) est un objet lié à un autre. À la figure 2, la première couche, en jaune, est un objet d'entrée, les couches en vert sont des couches cachées et le y, en rouge, est la sortie. Les modules de calcul de réseaux de neurones comme Tensorflow (Abadi et al., 2016) ou MXNet (Chen et al., 2015) permettent l'aménagement d'architectures de réseaux complexes, tels que ceux utilisés pour prédire la teneur en eau, puis la densité des sols selon des paramètres facilement mesurables.

2.3 Principes des processus gaussiens

Les processus gaussiens (Rasmussen & Williams, 2006) sont une généralisation de la distribution normale, aussi appelée distribution gaussienne, une courbe en forme de cloche largement utilisée en probabilités et statistiques. Alors qu'une distribution normale est décrite par une moyenne et une variance, une loi binormale est décrite par un vecteur de deux moyennes et d'une matrice de corrélation de dimension 2×2 . Ainsi, une loi multinormale de *n* variables est décrite par un vecteur de longueur *n*, et d'une matrice de corrélation carrée de *n*×*n*. Un processus gaussien est une loi normale avec une infinité de dimensions, dont la moyenne et la matrice de corrélation sont décrites par des fonctions. Un processus gaussien devient une méthode d'apprentissage machine lorsqu'il est conditionné. On peut conditionner une loi binormale en cherchant la distribution de la deuxième variable en sachant la valeur de la première variable (une distribution multinormale conditionnée est toujours normale ou multinormale).

On peut de même conditionner un processus gaussien à des valeurs finies connues que sont les données. Lorsque la moyenne d'une variable à prédire est de zéro, ce qui est le cas lorsque la variable est centrée, et on peut se passer de la fonction de moyenne du processus gaussien pour ne s'intéresser qu'à la fonction de la matrice de corrélation, qui sera le noyau (*kernel*) du modèle. En définissant un noyau a priori, qui sera conditionné aux données, on obtient un modèle de type bayésien, qui est apte à exprimer une prédiction sous une distribution de probabilité. Un modèle basé sur un processus gaussien peut ainsi répondre à une question comme « quelle est la probabilité que la densité du sol soit inférieure à 2200 kg/m³? ».

Les réseaux de neurones et les processus gaussiens offrent tous les deux des réponses lisses et continues. Bien qu'il soit possible de créer des réseaux de neurones probabilistes, ceux-ci demandent des étapes computationnelles supplémentaires. Il en va de même pour les processus gaussiens, qui pourraient, en approfondissant les travaux de recherche, être aménagés en graphes orientés acycliques. De plus, la modélisation empirique par apprentissage machine est susceptible de générer des problèmes de mésapprentissage, en particulier le surapprentissage, qui a lieu lorsqu'un modèle considère du bruit comme étant une tendance. Un exemple est présenté à la figure 3.



Figure 3. Cas de figure de mésapprentissage. À gauche, sous-apprentissage. Au centre, apprentissage valide. À droite, surapprentissage. Source : Parent (2021)

3 MÉTHODOLOGIE

Les différents paramètres recherchés pour effectuer un contrôle de compactage sur un sol sont la masse volumique sèche (ρ_d) et la teneur en eau gravimétrique (*w*). Dans la méthode Sherbrooke, ces paramètres sont déduits à partir des équations de phase de la géotechnique. Ces équations font intervenir la masse volumique de l'eau (ρ_w), la teneur en eau volumétrique du sol (θ), la teneur en eau volumétrique saturée (θ_{sat}) et la densité spécifique des grains du sol (G_s). L'équation 1 (page 2) permet de calculer la densité sèche du sol, et l'équation 2, la teneur en eau massique.

$$w = \frac{\theta \times \rho_{\omega}}{\rho_{d}}$$
Équation 2

où w est la teneur en eau massique.

La sonde Teros 12 émet un indice composite que l'on peut faire correspondre à une teneur en eau volumétrique grâce à un modèle de calibration. Des essais de laboratoire ont été menés pour faire correspondre les mesures de la sonde Teros 12 à des teneurs en eau connues. De plus, la méthode Sherbrooke menée avec la sonde Teros 12 a fait l'objet d'essais de terrain de manière à évaluer les prédictions de densité de la méthode Sherbrooke à celles mesurées au nucléodensimètre.

Tant pour les essais de laboratoire et les essais de terrain, les granulométries des sols faisant partie de ce projet ont été mesurées selon la norme CAN/BNQ 2501-025 (Bureau de normalisation du Québec, 2013). De même, les essais de densité relative des grains, nécessaire dans l'estimation de la densité sèche tel que définie dans l'annexe A, sont menés selon la norme CAN/BNQ 2501-058 (Bureau de normalisation du Québec, 2022).

3.1 Essais de laboratoire

La calibration de la sonde Teros 12 a été effectuée dans des moules suivant la procédure du Proctor modifié. Pour chaque essai Proctor, une mesure de teneur en eau volumétrique était liée à une mesure de sonde. La densité a également été consignée. Ainsi, chaque observation consistait en une valeur de la sonde et une valeur de teneur en eau, pouvant être liée à un sol de granulométrie et de densité relative connues.

De plus, nous désirions obtenir des valeurs de sonde pour des teneurs en eau plus près de la saturation que celles obtenues par compactage Proctor. Des essais d'inondation ont conséquemment été réalisés. Pour limiter les effets de bordure, nous avons compacté les sols dans des moules de PVC de diamètre plus grand que celui du Proctor modifié, tout en suivant la même méthodologie

expérimentale que celle du Proctor modifié et en augmentant l'énergie de compactage avec une augmentation de la masse. La durée de chaque inondation était d'un mois. Afin d'accélérer la procédure, nous avons conduit des essais d'inondation avec la même méthodologie, mais en substituant d'abord l'air des pores du sol par du CO₂. Celui-ci se dissolvant rapidement dans l'eau, il est ainsi expulsé des pores et ainsi entraîne l'obtention d'un haut degré de saturation plus rapidement.

Nous avons effectué un total de 304 essais Proctor modifié sur 31 sols, 30 essais d'inondation, dont 4 essais au CO_2 sur 15 sols. Les méthodologies de mesures destinées à la calibration sont présentées à l'annexe A.

L'obtention d'une fonction de calibration permet de prédire la densité sèche grâce à des essais de terrain.

3.2 Essais de terrain

Nous avons effectué du contrôle du compactage sur 23 sites (identifiés dans le tableau 3-1) pour 35 matériaux granulaires, à l'aide de trois méthodes.

- 1. La méthode Sherbrooke (MS, la méthodologie de mesure de la densité sèche à l'aide de la méthode Sherbrooke est présentée à l'annexe B).
- 2. Le nucléodensimètre (ND, mesures effectuées par un technicien certifié à l'aide d'appareils de différentes marques).
- 3. La méthode physique (MP, mesurée au densitomètre à membrane, aussi nommé ballon volumétrique, ou par le cône de sable).

Pour chaque point d'essai de chacun des sites, nous avons pris une mesure ND et/ou MP, puis 2 à 3 mesures avec la MS. Les mesures ND et MP précèdent celles de la MS étant donné que cette dernière requiert une altération du milieu par inondation. La version actuelle de la MS inclut deux mesures de sonde. La première valeur notée P_{R1} est la valeur prise après le compactage (soit à notre arrivée sur le site) et la deuxième valeur, P_{R2} , est la valeur prise après inondation pendant une minute. Des échantillons des sols étudiés sont prélevés pour des tests au laboratoire (Proctor, calibration de la sonde, granulométrie, densité des grains solides).

Tableau 3-1: Sites d'étude

Sols						
Sols ID	Nom	Туре	Metatype	Sites		
1	Bassin Versant	CG14	MG112	Université de Sherbrooke		
2	Campagne Magog	CG14	MG112	345, chemin Fitch Bay, Magog, QC J1X 0Z5		
3	Rue St. Gabriel	CG14	MG112	Rue St. Gabriel, Mascouche		
4	Bassin Versant	MG20	MG20	Université de Sherbrooke		
5	Magog	MG20	MG20	Magog		
6	Rue Jeannine	MG20	MG20	Drumondville		
7	Rue Louise	MG20	MG20	Sherbrooke		
8	Rue Triest	MG20	MG20	Sherbrooke		
9	Voie 3_UdeS	MG20	MG20	Université de Sherbrooke		
10	Campagne Magog	MG112	MG112	345,chemin Fitch Bay,Magog,QC J1X 0Z5		
11	Rue Toutant	MG112	MG112	Drummondville		
12	Dieri	Latérite	Latérite	Burkina Faso		
13	Niangoloko	Latérite	Latérite	Burkina Faso		
14	Sarfalao	Latérite	Latérite	Burkina Faso		
15	École primaire à Beauce	MG20	MG20	Beauce		
16	Rue Fortier Sud	MG20	MG20	Sherbrooke		
17	Cabane à sucre Beauce	MG112	MG112	Beauce		
18	Planche de référence	Sable	MG112	Beauce (St Prosper)		
19	Bassin Versant	Till	MG112	Sherbrooke		
20	Rue Aberdeen	MG20	MG20	Sherbrooke		
21	Planche de référence	MG20	MG20	Beauce (St Prosper)		
22	École primaire à Beauce	MG112	MG112	Beauce		
23	Rue Boulogne	MG20	MG20	Sherbrooke		
24	Planche St-Nicéphore	MG20	MG20	Drummondville		
25	Rue Darche	MG20	MG20	Sherbrooke		
26	Rue-Wallace	MG20	MG20	Sherbrooke		
27	Autoroute 10	MG20	MG20	Granby		
28	Autoroute 10	MG112	MG112	Granby		
29	Rue Darche	MG112	MG112	Sherbrooke		
30	Rue Bérubé	Sable	MG112	Victoriaville		
31	Rue Chalmers	CG14	MG112	Sherbrooke		
32	Rue Watkins	MG112	MG112	Drummondville		
33	Rue Attateken	MG20	MG20	Montréal		
34	Planche de référence	MG112	MG112	La Tuque		
35	Planche de référence	MR-5	MG112	La Tuque		

3.3 Schéma de calcul

Nous avons discuté à la section 2.2 que la structure d'un réseau de neurones est adaptable au problème à solutionner. Dans notre cas, nous désirons optimiser les paramètres d'une courbe de calibration selon les caractéristiques du sol qui permettront de déterminer les teneurs en eau en début et en fin d'essai, selon les mesures de la sonde Teros 12. L'estimation de paramètres d'une courbe de calibration plutôt qu'une estimation directe de la teneur en eau permet une réponse plus robuste, moins prompte au surapprentissage. Les caractéristiques du sol ainsi que la teneur en eau en début d'essai permettent d'inférer le degré de saturation obtenu après une minute d'inondation pour un sol donné. En ayant la densité spécifique des grains du sol (Gs), la distribution granulométrique, la densité de l'eau, le degré de saturation et la teneur en eau en fin d'essai, il est possible de calculer la densité sèche à l'aide de fonctions de phase (équation 1). Dans notre modèle, nous optimisons le degré de saturation attendu (Sroot) de manière à minimiser l'erreur sur la prédiction de la densité. Le schéma de calcul par réseaux de neurones a été présenté au MTMD. Ce schéma fut codé dans un logiciel – auguel le MTMD a accès – et qui fait présentement l'objet d'une demande de propriété intellectuelle.

Le problème peut être exprimé de manière différente grâce aux processus gaussiens. Contrairement à l'approche utilisée avec les réseaux de neurones, la teneur en eau y est prédite directement.

3.4 Courbe de calibration

Pour le réseau de neurones de la courbe de calibration, nous avons lié la valeur de la sonde et une variable transformée de la teneur en eau (équation 3), par une association exponentielle (équation 4). La transformation de équation 3 était nécessaire, car les fonctions précédemment adoptées comme courbes de calibration pouvaient mener à des valeurs négatives de teneur en eau. Transformer la teneur en eau en un log-ratio de sa valeur complémentaire (proportion du volume occupé par l'amalgame sol et air) permet de contraindre le modèle à prédire des teneurs en eau se situant entre 0% et 100% (Aitchison, 1986).

$$lre = ln\left(\frac{\theta}{1-\theta}\right)$$
 Équation

où θ est la teneur en eau volumique, *lre* est le log-ratio sur l'eau. Une fois que le log-ratio sur l'eau est calculé, on obtient la teneur en eau par une transformation retour.

Les paramètres du sol étaient utilisés pour calculer les paramètres de l'association exponentielle. Pour le processus gaussien, nous avons lié directement les paramètres du sol, ainsi que la valeur de la sonde, à la variable transformée de teneur en eau. L'association exponentielle est une forme de

3

courbe à rendement décroissant. Un exemple d'application de cette courbe est présenté à la figure 4, lié par exemple le log-ratio sur l'eau (*Ire*) et la valeur de la lecture donnée par la sonde.

$$lre = (lre_{max} - lre_{min}) \times (1 - exp(-pente \times P_R)) + lre_{min}$$
 Équation 4

où P_R est la lecture de la sonde, et *Ire_{max}, Ire_{min}* et la *pente* sont des paramètres d'une association exponentielle à rendement décroissant.



Figure 4. Exemple de courbe de type association exponentielle

3.5 Paramètres granulométriques

L'utilisation d'un modèle de lissage permet de synthétiser la distribution granulométrique d'un sol en deux variables ou plus (Esmaeelnejad et al., 2016). Nous avons sélectionné le modèle de distribution granulométrique de Roser et Rammler (1933) pour sa simplicité :

% passant =
$$1 - exp(-g_1 d^{g_2})$$
 Équation 5

où g_1 est lié au diamètre d'inflexion (de hautes valeurs de g_1 sont liées à des sols plus fins) et g_2 est lié à la pente (de hautes valeurs de g_2 sont liées à des pentes plus abruptes, donc des distributions plus uniformes).

Il est possible de démontrer de manière arithmétique que des indicateurs usuels en géotechnique, tels que le coefficient d'uniformité ($Cu = D_{60}/D_{10}$) et le D_{85} , peuvent être déduits des paramètres g_1 et g_2 , le g_2 étant directement lié au Cuet le g_1 étant lié au D_{85} et au g_2 . Pour isoler le D_{85} , il s'agit de remplacer le % passant de l'Équation 5 par 0,85, puis d'isoler la variable *d*, qui devient D_{85} . Pour le *Cu*, il s'agit d'effectuer les mêmes opérations que pour le D_{85} , mais cette fois pour le D_{60} et le D_{10} , puis d'en faire le ratio.

$$\begin{split} D_{85} &= \left(-\frac{\ln(1-0.85)}{g_1}\right)^{1/g_2} & \text{Équation 6} \\ Cu &= \left(\frac{\ln(1-0.6)}{\ln(1-0.1)}\right)^{1/g_2} & \text{Équation 7} \end{split}$$

3.6 Analyse comparative

Les résultats du modèle par réseau de neurones est comparé à la procédure préalablement établie, qui liait la teneur en eau à une régression quadratique sur les échantillons étiquetés MG20 et une autre sur les échantillons étiquetés MG112, tel que

$$\theta = a_M P_R^2 + b_M P_R + c_M$$
 Équation 8

où P_R est la mesure de la sonde, a_M , b_M et c_M sont les paramètres de la régression quadratique du matériau M.

La comparaison des modèles effectuée sur le R^2 .

3.7 Calculs de phase

L'optimisation des modèles de prédiction de la densité est effectuée en minimisant les erreurs de prédiction sur le degré de saturation (S_r). En effet, sachant la densité sèche de référence, en l'occurrence celui de la méthode physique, et sachant la teneur en eau volumétrique obtenue après l'inondation, il est possible d'obtenir le degré de saturation (Équation 9) :

$$S_r = \frac{\theta_{R2}}{1 - \frac{\rho_d}{G_s \rho_w}}$$

Équation 9

En retour, sachant la teneur en eau volumétrique obtenue par la méthode Sherbrooke, il est possible d'estimer le degré de saturation grâce au modèle prédictif (quadratique, processus gaussien ou réseau de neurones), puis calculer la densité sèche grâce à l'Équation 1 (page 2).

3.8 Logiciels

Nous avons effectué les calculs en langage Python 3.10 (Python Software Foundation, 2021), effectué la régression quadratique grâce au module

statsmodels (Seabold & Perktold, 2010), effectué les calculs nécessaires aux réseaux de neurones avec *Tensorflow* (Abadi et al., 2016) et aux processus gaussiens avec *GPFlow* (Matthews et al., 2017). Puisque les données sont peu nombreuses, nous n'avons pas séparé les données en blocs d'entraînement et de test, mais plutôt effectué une validation croisée sur les modèles *GPFlow*.

4 RÉSULTATS

4.1 Lissage granulométrique

Une boucle itérative a permis de lisser les courbes granulométriques grâce à l'équation de Rosin et Rammler (1933) (Équation 5, page 11). Ainsi, pour chaque sol, nous avons pu obtenir les paramètres g_1 et g_2 , décrivant respectivement le diamètre de l'inflexion de la courbe et l'uniformité de la distribution. Les courbes granulométriques lissées sont présentées à la figure 5.

4.2 Analyse comparative

Les résultats des régressions quadratiques, par processus gaussiens et par réseau de neurones sont présentés respectivement à la figure 6a, b et c. Notez que le processus gaussien et le réseau de neurones étant modulés par la densité spécifique et la granulométrie, nous avons présenté une courbe par essai.

Les figure 6b et c montrent l'effet de transformation en log-ratio, qui empêche des extrapolations de valeurs de teneur en eau volumiques vers des valeurs négatives.

Le gain entre les régressions quadratiques et les méthodes d'apprentissage machine sont importants. Bien que les R² du processus gaussien et du réseau de neurones soient équivalents, le réseau de neurones a pu capter l'effet d'un essai sortant du lot, démarrant avec une mesure de la sonde de près de 2200 malgré une teneur en eau se situant environ à 0,05, ce qui pourrait être imputé à un surapprentissage.

Les R^2 des trois approches de modélisation sont présentés à la figure 7.

4.3 Prédiction des densités

À la figure 8, les prédictions de densités obtenues grâce à la MS sous différents algorithmes, ainsi que ceux obtenus par le nucléodensimètre, sont comparées aux valeurs obtenues par la méthode physique. Nous avons également inclus la prédiction obtenue par réseaux de neurones que nous avions présentée lors d'une rencontre de suivi le 8 mai 2023 (figure 8D).

Une prédiction parfaite alignerait les points sur une ligne à 45 degrés. Les résultats montrent une agglomération des points de part et d'autre de la ligne de 45 degrés pour les modèles par processus gaussiens (figure 8B) et par réseaux de neurones (figure 8C), ainsi que par mesures au nucléodensimètre (figure 8E), mais une prédiction peu fiable pour le modèle quadratique (figure 8A). Une version précédente par réseaux de neurones prédisait la saturation optimisée en étant entraînée sur les densités du nucléodensimètre (figure 8D). La version plus aboutie (figure 8C) a été entraînée sur le degré de saturation des tests physiques.

La coloration des points selon le site montre que la méthode Sherbrooke donne des densités plutôt constantes par sites pour les processus gaussiens (figure 8B), alors que les prédictions par réseaux de neurones (figure 8C) et les mesures par le de nucléodensimètre (figure 8E) montrent des gradients. Notons d'abord qu'il est attendu que les points se regroupent puisque chaque chantier de construction vise une densité décrite dans les devis de construction. Cela peut être causé par un bruit du nucléodensimètre qui n'est pas observé avec les processus gaussiens, ou bien à des gradients réels captés par le nucléodensimètre, mais pas par les processus gaussiens. Malgré une précaution prise pour limiter le nombre de paramètres du réseau de neurones et pour limiter les inflexions abruptes du processus gaussien dans la prédiction du degré de saturation optimisé, il est possible que l'entraînement des modèles ait généré du surapprentissage.



Figure 5. Lissage des courbes granulométrique selon l'équation de Rosin et Rammler (1933) effectué dans l'objectif d'obtenir les paramètres g1 et g2 de chaque sol. Le fuseau granulométrique en vert est le fuseau du MG112, et celui en magenta est celui du MG20. N.B. : La dernière courbe représente un MR5.



Figure 6. Résultat des régressions (A) quadratique, (B) par processus gaussien et (C) par réseau de neurones.



Figure 7. R² des trois approches de modélisation de calibration de la sonde Teros 12



Figure 8. Densité prédite (ordonnées) et densité obtenue par la méthode physique (abscisses).

Le tableau 4-1 montre les erreurs de mesure de la méthode Sherbrooke (différents algorithmes) et de la méthode par nucléodensimètre, par rapport à la méthode physique (MP). Une nette amélioration de la méthode Sherbrooke a été obtenue grâce aux développements en modélisation, ce qui a ramené ses erreurs en deçà de ceux du nucléodensimètre. Toutefois, davantage de données sont nécessaires pour s'assurer que ses résultats ne sont pas causés par du surapprentissage, et afin de généraliser son utilisation sur un plus large éventail de matériaux granulaires.

Tableau 4-1 : Erreurs relatives inférieures au délimiteur entre les méthodes She	rbrooke
(avec Tensorflow) et par nucléodensimètre, par rapport à la méthode physique.	_

Délimiteur	MS, quadratique	MS, processus gaussiens	MS, réseaux de neurones	Nucléodensimètre
2 %	42 %	63 %	64 %	48 %
3 %	49 %	71 %	72 %	53 %
5 %	65 %	83 %	83 %	69 %
7 %	72 %	90 %	89 %	80 %
10 %	82 %	95 %	97 %	89 %

4.4 Degré de saturation optimisé

En utilisant la calibration avec la régression quadratique, les degrés de saturation optimisés pour minimiser les écarts entre la méthode Sherbrooke et la méthode physique étaient de 67,6 % pour le MG20 et de 74,9 % pour le MG112. La sortie nommée Sr_{opt} est, comme défini auparavant, le degré de saturation le plus probable après une minute d'inondation selon les paramètres granulométriques Cu et D₈₅. Le Gs, ainsi que la teneur en eau initiale mesurée avec la sonde (transformé en log-ratio, Équation 3). Nous présentons à la figure 9 les distributions du Sr_{opt} obtenues avec les processus gaussiens et les réseaux de neurones, stratifiées selon les matériaux à l'étude. L'optimisation du Sr est une nouveauté dans le cadre de ce projet de recherche.





Bien que les distributions semblent bien segmentées par type de sol, il est important de considérer la contribution des variables confondantes. La moyenne des degrés de saturation optimisés par processus gaussiens et réseau de neurones étaient respectivement de 66 % et 57 % pour le MG20 et 79 % et 76 % pour le MG112, des valeurs concordantes avec celles trouvées avec les modèles quadratiques. Note importante, les modélisations par processus gaussiens ou par réseaux de neurones incluent des processus randomisés. Les distributions des degrés de saturation optimisés diffèrent d'une simulation à l'autre. Il est attendu que les degrés de saturation optimisés deviendront plus stables d'une optimisation à l'autre avec l'accumulation de données.

4.5 Étude de sensibilité sur le degré de saturation optimisé

L'étude de sensibilité a été menée sur les modèles par processus gaussien et par réseau de neurones. Pour ce faire, nous avons fait varier un seul paramètre à la fois, en gardant les autres à leur valeur moyenne. Les résultats sont présentés à la figure 10.

Le degré de saturation optimisé varie de manière non linéaire selon les conditions de modélisation. Ces comportements peuvent être attribués à un certain surapprentissage du modèle. L'accumulation de données permettra de mieux cerner l'effet des caractéristiques géotechniques.



Figure 10. Étude de sensibilité du degré de saturation optimisé par les modèles par processus gaussien (*gp*) et par réseau de neurones (*nn*), où chaque paramètre varie sur la plage des données observées, en gardant les autres paramètres à leur moyenne.

4.6 Logiciel

Nous avons développé une application permettant d'explorer l'effet du coefficient d'uniformité de la distribution granulométrique (*Cu*), du D_{85} , de la densité spécifique des grains (*Gs*) et des mesures de terrain (P_{R1} et P_{R2}) sur la courbe de calibration de la sonde, sur le degré de saturation optimisé et sur les prédictions en termes de densité sèche et de teneur en eau gravimétrique. Cette application permet une appréciation visuelle du modèle. Elle a été programmée en JavaScript sur la plateforme en ligne *Observable*. L'application est basée sur une version simplifiée du modèle par réseaux de neurones. La simplification consistait à renoncer à la contrainte faisant en sorte que $y_{min} < y_{max}$, et à diminuer le nombre d'itérations, le but étant de rendre public un modèle sous-optimal. Le développement d'une application plus aboutie n'est pas prévu dans le cadre du présent projet. Une capture d'écran du modèle est présentée à la figure 11.



Teneur en eau massique avant innondation: 8.39 %

Figure 11. Capture d'écran de l'application en ligne de la méthode Sherbrooke

5 **RECOMMANDATIONS**

Les données de laboratoire montrent que la MS répond bien aux attentes. Les modèles de lissage par réseaux de neurones ont démontré leur capacité à réduire les erreurs, en particulier en optimisant le degré de saturation attendu après une minute d'inondation pour un sol de granulométrie et de densité relative connues (obtenues par le biais de la méthode physique), et dont la teneur en eau avant inondation est mesurée.

Toutefois, dans l'objectif de diminuer les risques de surapprentissage, l'accumulation de plus de données dans le futur permettrait d'obtenir un modèle plus exact et plus précis, que l'on pourra tester sur des sites qui n'ont pas servi à entraîner le modèle. Ainsi, nous pourrions évaluer si le modèle est en mesure de prédire des valeurs dans un contexte où il ne connaît pas la réponse. Tester un modèle d'IA sur des données n'ayant pas servi à l'entraîner est une étape cruciale pour conférer à un modèle le qualificatif de prédictif, au-delà de la validation croisée. Des données de calibration de la sonde pourraient notamment être recueillies lors des essais de terrain.

Dans les modèles d'apprentissage machine classiques, la prédiction est donnée par une seule valeur. La modélisation probabiliste, par exemple avec les processus gaussiens, permet de prédire également l'incertitude de la prédiction.

Grâce aux processus gaussiens, nous sommes en mesure de prédire un risque que la densité mesurée soit inférieure à une valeur prescrite selon le sol et les mesures de la sonde. Cet aspect, bien qu'intéressant, n'a toutefois pas été exploré lors de nos travaux.

Également, la MS éprouve des difficultés à capter des gradients sur le site, surtout dans le cas du MG112 (les résultats avec le MG20 étaient plus concluants, comme discuté dans le rapport d'étape 1). Dans l'objectif d'évaluer la performance des méthodes sur un même site, nous recommandons d'effectuer des mesures sur des plages de densité avec la MS, au ND et avec la MP, par exemple lors de passages successifs de compacteur.

Nous avons pu effectuer un nombre limité d'essais avec des matériaux recyclés, notamment le MR5. Il en découle qu'il n'est pas possible de conclure sur les capacités de la méthode pour ce matériau, surtout lorsqu'il y a présence de bitume. Notre base de connaissances est insuffisante pour expliquer davantage comment la présence de bitume pourrait influencer les mesures faites avec la Méthode Sherbrooke.

De plus, des modifications sur la méthodologie de terrain pourraient améliorer la précision et l'exactitude de la MS. Ces améliorations devraient être faites – de préférence – en partenariat avec le personnel technique du MTMD.

Enfin, il est possible que des améliorations technologiques apportées à la sonde puissent lui permettre de donner des valeurs plus précises, surtout proche du point de saturation, qui nous est très important. Ainsi, un projet mariant géotechnique, physique, informatique et électronique pourrait permettre de mener la MS à un point tel qu'il serait envisageable de substituer la méthode du nucléodensimètre. Nous ne pouvions pas imaginer un tel scénario en début de projet.

6 RÉFÉRENCES

Abadi, M., Barham, P., Chen, J., Chen, Z., Davis, A., Dean, J., Devin, M., Ghemawat, S., Irving, G., Isard, M., & others. (2016). Tensorflow : A system for large-scale machine learning. 12th Symposium on Operating Systems Design and Implementation, 265-283.

Aitchison, J. (1986). The statistical analysis of compositional data. Chapman and Hall.

Bureau de normalisation du Québec. (2013). *BNQ* 2501-025 : Sols—Analyse granulométrique des sols inorganiques. https://www.bnq.qc.ca/fr/normalisation/genie-civil-et-infrastructuresurbaines/sols/sols-analyse-granulometrique-des-sols-inorganiques.html

Bureau de normalisation du Québec. (2014). CAN/BNQ 2501-070: Sols— Détermination de la densité relative des grains solidesDétermination de la densité des particules solides—BNQ. https://www.bnq.qc.ca/fr/normalisation/genie-civil-et-infrastructuresurbaines/sols/determination-de-la-densite-des-particules-solides.html

- Bureau de normalisation du Québec. (2022). *CAN/BNQ* 2501-058 : Sols— Détermination de la masse volumique du sol en place à l'aide d'une membrane flexible (volume d'eau). https://www.bnq.qc.ca/fr/normalisation/genie-civil-etinfrastructures-urbaines/sols/sols-determination-de-la-masse-volumique-dusol-en-place-a-l-aide-d-une-membrane-flexible-volume-d-eau.html
- Bureau de normalisation du Québec. (2023a). *CAN/BNQ 2501-060 : Détermination de la masse volumique du sol en place selon la méthode du cône de sable*. https://bnq.qc.ca/fr/normalisation/genie-civil-et-infrastructures-urbaines/sols/sols-determination-de-la-masse-volumique-du-sol-en-place-selon-la-methode-du-cone-de-sable.html
- Bureau de normalisation du Québec. (2023b). *CAN/BNQ* 2501-255: Sols— Détermination de la relation teneur en eau-masse volumique sèche—Essai avec énergie de compactage modifiée—BNQ. https://www.bnq.qc.ca/fr/normalisation/genie-civil-et-infrastructuresurbaines/sols/sols-determination-de-la-relation-teneur-en-eau-massevolumique-seche-essai-avec-energie-de-compactage-modifiee.html
- Chen, T., Li, M., Li, Y., Lin, M., Wang, N., Wang, M., Xiao, T., Xu, B., Zhang, C., & Zhang, Z. (2015). *MXNet : A Flexible and Efficient Machine Learning Library for Heterogeneous Distributed Systems* (arXiv:1512.01274). arXiv. https://doi.org/10.48550/arXiv.1512.01274
- Esmaeelnejad, L., Siavashi, F., Seyedmohammadi, J., & Shabanpour, M. (2016). The best mathematical models describing particle size distribution of soils. *Modeling Earth Systems and Environment*, 2(4), 1-11. https://doi.org/10.1007/s40808-016-0220-9
- Matthews, A. G. de G., Wilk, M. van der, Nickson, T., Fujii, K., Boukouvalas, A., León-Villagrá, P., Ghahramani, Z., & Hensman, J. (2017). GPflow: A Gaussian Process Library using TensorFlow. *Journal of Machine Learning Research*, 18(40), 1-6.
- Ministère des Transports du Québec. (1989). *Guide d'utilisation des nucléodensimètres*. Ministère des Transports du Québec. http://www.bv.transports.gouv.qc.ca/mono/1154367.pdf
- Parent, E. (2021). Analyse et modélisation d'agroécosystèmes: Vol. https://github.com/essicolo/ecologie-mathematique-R/commit/a3d3a01265ab8c5dac3c15bd5368333e1b973ee7. https://essicolo.github.io/ecologie-mathematique-R/
- Python Software Foundation. (2021). *Python Language* (3.10) [Software]. www.python.org
- Rasmussen, C. E., & Williams, C. (2006). *Gaussian Processes for Machine Learning*. MIT Press. http://www.gaussianprocess.org/gpml/chapters/
- Rosin, P., & Rammler, E. (1933). The Laws Governing the Fineness of Powdered Coal. Journal of the Institute of Fuel, 7, 29-36.
- Seabold, S., & Perktold, J. (2010). *statsmodels : Econometric and statistical modeling with Python*. 9th Python in Science Conference.
- Tremblay, D., & Robitaille, V. (2014). *Mécanique des sols. Théorie et pratique. 2e édition* (Modulo).

ANNEXE A

Essai en laboratoire

Les essais en laboratoire ont pour but de calibrer le signal de la sonde de teneur en eau Teros 12, produites par la compagnie Meter Group.

Préparation des échantillons

Le quartage qui consiste à mélanger tous les échantillons d'un même sol prélevé sur chantier afin que les échantillons sur lesquels seront effectués nos essais soient le plus représentatifs de la réalité que possible.

Granulométrie

L'analyse granulométrique qui consiste à identifier les différentes répartitions des particules du sol en fonction de leurs diamètres selon la norme CAN/BNQ 2501-025 (Bureau de normalisation du Québec, 2013), par tamisage.

Densité spécifique des grains (Gs)

L'essai de densité spécifique des grains permet de déterminer la densité brute et la densité apparente du sol, et ce, selon la norme CAN/BNQ 2501-070 (Bureau de normalisation du Québec, 2014).

Proctor modifié

L'essai Proctor modifié, effectué selon la norme CAN/BNQ 2501-255 (Bureau de normalisation du Québec, 2023b), consiste à compacter les échantillons de sol en laboratoire afin d'obtenir le graphe de la masse volumique sèche en fonction de la teneur en eau. Cela permet d'obtenir la teneur en eau optimale de nos matériaux granulaires pour avoir la masse volumique sèche la plus élevée.

Essais à court terme pour la calibration de la sonde Teros 12

La lecture de la sonde de teneur en eau Teros 12 est un indice composite qui est lié à la teneur en eau à l'aide d'une fonction de calibration. Pour ce faire, le sol (dont la granulométrie, la densité spécifique des grains et la teneur en eau donnant une densité maximale sont connues) est compacté à différentes teneurs en eau dans un moule selon la norme du Proctor modifié (Bureau de normalisation du Québec, 2023b). Un module comportant trois tiges de longueur et de diamètre légèrement inférieurs aux tiges de la sonde (2,5 po) est utilisé

pour créer des ouvertures facilitant l'enfoncement de la sonde (figure 12). La mesure de la sonde est consignée et liée à une teneur en eau obtenue par séchage.



Figure 12. Calibration de la sonde Teros 12 par essai Proctor modifié.

Essais à long terme pour la calibration de la sonde Teros 12

Afin d'atteindre des valeurs d'indice composite de la sonde à des teneurs en eau plus élevées, nous avons réalisé des essais d'inondation de longue durée. Les données obtenues permettent d'affiner la courbe de calibration en fournissant des points à des teneurs en eau élevées.

Compacter le sol à une densité de 95% du Proctor modifié dans un moule en PVC. Ce moule, de diamètre plus grand que celui associé au Proctor modifié, permet de diminuer de potentiels effets de bordure (figure 13).



Figure 13. Compactage du sol dans un moule de PVC.

Insérer la sonde (figure 14), et inonder le sol, puis attendre que la mesure se stabilise (figure 15).



Figure 14. Insertion de la sonde.



Figure 15. Début d'inondation.

Mettre au four l'échantillon afin de mesurer sa teneur en eau et sa saturation (figure 16).



Figure 16. Mise à l'étuve de l'échantillon entier.

Compter 3 à 4 semaines d'inondation continue pour obtenir une saturation évaluée à 85-90 %.

Essais à injection de CO₂ pour la calibration de la sonde Teros 12

Dans le but de réduire le délai nécessaire pour obtenir des mesures à saturation élevée, purger l'air contenu dans les pores vides de l'échantillon compacté par du CO₂ avant l'inondation. Le CO₂ étant plus dense et plus soluble que l'air, le délai nécessaire pour atteindre un même degré de saturation est réduit.

Des essais préliminaires ayant été concluants, nous avons construit des cellules en PVC de plus grandes dimensions (figure 17) sans toutefois nécessiter des pressions de CO₂ susceptibles de modifier le réseau des pores dans le matériau. La cellule est hermétique, à l'exception de deux perforations latérales, au bas et au haut de la cellule, munies d'embouts permettant respectivement l'entrée de CO₂ et la sortie de l'air (figure 17 et figure 18).



Figure 17. Plan des cellules.

Figure 18. Cellule hermétique avec embouts pour l'entrée du CO2 (bas) et la sortie de l'air (haut).

La méthodologie des essais avec injection de CO_2 est la même que celle des premiers essais d'inondation, à l'exception de l'injection de CO_2 dans l'échantillon. Un rotamètre (un tube translucide dans lequel s'écoule un fluide poussant un élément mobile qui indique le débit) est installé dans la canalisation d'entrée du CO_2 et permet de mesurer le volume de CO_2 injecté, qui doit être 15 à 20 fois le volume des vides de l'échantillon.

On peut ainsi déterminer le temps nécessaire pour que l'air soit purgé par le CO_2 . Dans le but d'assurer une purge effectuée dans une cellule hermétique, l'embout final de la ligne de sortie est submergé dans un bécher, dans lequel des bulles apparaissent si le gaz y est effectivement expulsé. L'inondation avec de l'eau désaérée est effectuée dès que le volume de CO_2 visé est atteint. La photo de la figure 19 donne un aperçu du montage.

Figure 19. Montage pour l'injection de CO2.

L'eau désaérée, sous pression, est connectée à embout auparavant utilisé comme entrée du CO₂. La sortie submergée servira encore de témoin assurant

que l'inondation est effective. L'échantillon est considéré saturé lorsqu'aucune bulle n'est visible dans le bécher, et lorsque la mesure de la sonde de teneur en eau est stable.

ANNEXE B

Essais de terrain

L'objectif des essais de terrain est de consigner des données de contrôle du compactage selon trois méthodes : la méthode Sherbrooke (MS), le nucléodensimètre (ND) et la méthode physique avec densitomètre à membrane (MP). Les données sont utilisées pour calibrer la méthode sur des mesures de densité *in situ*.

Premièrement, des essais au nucléodensimètre sont réalisés par un technicien certifié (figure 20a) sur le sol. Ensuite, effectuer des essais de densitomètre à membrane (figure 20b). Enfin, appliquer la méthode Sherbrooke (MS). Pour chaque point d'essai de ND et/ou de densitomètre à membrane (MP), 2 essais de MS sont effectués, tel qu'indiqué à la figure 20c.

Figure 20. Disposition des essais : a) ND; b) MP; c) MS (3 essais).

Équipement nécessaire pour les mesures avec la méthode Sherbrooke

La sonde Teros 12 fourni par Meter qui permet de mesurer la constante diélectrique du sol (figure 21). Le volume de sol mesuré par la sonde est un cylindre elliptique, tel que présenté à la figure 22. Un lecteur Pro-Check, fournie par Meter, permet de lire la lecture de la sonde (figure 23). Un guide métallique munit de trois clous (2 - 1/2 " (8d)), légèrement plus longs que les tiges de la sonde et de diamètre légèrement inférieur, permet de perforer des pré-trous avant d'insérer la sonde sans la briser (figure 24). Une burette Mariotte remplie d'eau permettra d'inonder le sol sous une pression constante (figure 25). Un anneau en PVC dont le diamètre intérieur est de 15 cm permet de contenir l'eau (figure 26). Un marteau est nécessaire pour enfoncer le guide métallique, et un chronomètre précis à la seconde est nécessaire pour monitorer le temps

d'inondation. Enfin, il est prudent d'apporter des clous (2 - 1/2 " (8d)) dans l'éventualité d'un bris du guide métallique.

Figure 21. Sonde Teros 12.

Figure 22. Zone d'influence de la sonde.

Figure 23. Pro-Check.

Figure 24. Guide métallique.

Figure 25. Burette Mariotte.

Figure 26. Anneau en PVC.

ANNEXE C

Protocole de la Méthode Sherbrooke

Les étapes suivies pour la réalisation des tests avec la MS sont les suivantes.

- Sur la surface du sol, placer un anneau en PVC de 6 po de diamètre à plat et en douceur pour ne pas causer de perturbations dans la zone d'essai. L'anneau en PVC permet de délimiter le volume de sol à inonder. L'anneau est déposé à côté de l'endroit où le trou ND et les tests physiques ont été effectués (figure 27b).
- 2. Insérer le guide métallique (figure 27a) pour faire un pré-trou dans le sol.
- 3. Insérer la sonde Teros 12 (distribuée par Meter Inc.) dans le sol compacté (figure 27b). Prendre la première lecture (P_{R1}). Si les valeurs lues avec l'enregistreur de données oscillent, adopter la moyenne comme P_{R1} sur un intervalle de 3 secondes. Pour cette étude, l'enregistreur de données adopté était le Pro-Check (Meter Inc.; cet appareil a été discontinué. Maintenant, il faut utiliser un des acquisiteurs de données que cette compagnie fabrique, dont le ZL6).
- 4. Inonder le volume délimité par l'anneau pendant 1 min. Il a été démontré que les fluctuations du niveau d'eau provoquent des oscillations importantes dans les relevés de la sonde. Pour maintenir un niveau d'eau constant, une burette Mariotte a été utilisée, comme montré dans la figure 27c. Plusieurs tests ont été effectués au laboratoire et, pour la sonde utilisée, le niveau d'eau adopté a été de 5 mm au-dessus de la surface. M³/m³
- Une fois la burette Mariotte en place, un minuteur est mis en marche. Après 1 minute, une lecture est effectuée. Si elle oscille, on considère la moyenne des lectures maximum et minimum à l'intérieur de 3 secondes. Cette moyenne devient P_{R2} (pas d'unité; lecture directe du Pro-Check).
- 6. Entrer dans une application de calcul les paramètres du sol (coefficient d'uniformité, D_{85} et G_s) ainsi que les mesures P_{R1} et P_{R2} pour obtenir la densité et la teneur en eau massique.

Figure 27. a) Guide métallique; b) Sonde FDR insérée dans le sol et anneau PVC; c) Burette Mariotte

L'ordre de réalisation des tests était important, car l'exécution des essais selon la MS inclut une étape d'inondation, qui altère la teneur en eau tout autour. Aussi, les essais étaient réalisés assez près les uns des autres pour minimiser les erreurs associées à une potentielle hétérogénéité localisée.

Finalement, des échantillons des sols étudiés sont prélevés pour des tests au laboratoire (Proctor, calibration de la sonde, granulométrie, densité des grains solides).

Notons que toutes ses étapes ont été réalisées dans le but de la recherche.