

Révision des modèles d'estimation du soulèvement au gel utilisés au Québec

Mustapha Abdellaziz
Ingénieur., Ph. D., chargé de projets Secteur sols et granulats
Ministère des Transports et de la Mobilité durable
Québec (Québec)
mustapha.abdellaziz@transports.gouv.qc.ca

Jean-Pascal Cloutier
Ingénieur, M. Sc., Responsable du Secteur sols et granulats, p.i.
Ministère des Transports et de la Mobilité durable
Québec (Québec)
jean-pascal.cloutier@transports.gouv.qc.ca

Exposé écrit préparé pour la séance Infrastructures et gestion des actifs (Comité des chaussées)
Congrès-exposition 2025 de l'Association des transports du Canada (ATC)
Ville de Québec (Québec)

Remerciements

Remerciements à Mme Anne-Marie Boulé, statisticienne au MTMD pour les analyses statistiques et son étroite collaboration dans le développement du nouveau modèle. Remerciements également aux techniciens du laboratoire des sols et granulats, notamment M. Christian Bédard, et à M. Jérôme Fortin, étudiant à l'Université du Québec à Chicoutimi, qui ont contribué au succès de ce projet.

Résumé

L'estimation du potentiel de ségrégation (SP) est l'un des problèmes majeurs rencontrés lors de la conception des chaussées dans les régions froides. Ce paramètre peut être quantifié directement en laboratoire, par des mesures in situ ou indirectement en utilisant les modèles simplifiés de la littérature. Plusieurs modèles ont été proposés ces dernières années pour évaluer ce paramètre, principalement basés sur des mesures en laboratoire. Cependant, malgré ces efforts, ces modèles présentent encore des lacunes et des divergences avec les mesures in situ. Un projet de recherche a donc été mené au laboratoire des sols et granulats du ministère des Transports et de la Mobilité durable du Québec afin d'analyser les mesures du SP en laboratoire et de les comparer aux estimations réalisées à l'aide des modèles simplifiés de la littérature. Les résultats des analyses montrent des écarts importants entre les mesures du SP en laboratoire et les estimations des modèles de la littérature. Ces derniers ont souvent tendance à surestimer le SP. Les analyses ont révélé que les principaux paramètres de sol contrôlant le SP sont la granulométrie, la surface spécifique des particules inférieures à 400 µm et le diamètre moyen des

particules fines ($<80\ \mu\text{m}$). Sur la base de ces analyses, un nouveau modèle d'estimation du SP a été proposé. Bien que ces paramètres soient inclus dans certains modèles simplifiés d'estimation du SP, la comparaison avec des mesures de laboratoire montre qu'ils présentent une imprécision significative et doivent être améliorés. En outre, le calcul à rebours du SP à l'aide de la mesure in situ du soulèvement d'une chaussée dû au gel a confirmé que les modèles de la littérature surestiment le SP et que le modèle proposé dans cette étude semble plus représentatif.

Abstract

Estimating segregation potential (SP) is one of the challenging problems in pavement design in cold regions. This parameter can be quantified directly in the laboratory, in-situ measurements or indirectly using the simplified literature models. Several models have been proposed in the recent years, mainly based on laboratory measurements, to assess this parameter. Nevertheless, despite these efforts, these models still present some shortcomings and discrepancies with the in-situ measurements. A research project was therefore carried out at the soils and aggregates laboratory of the Quebec Ministry of Transportation and Sustainable Mobility to analyze the laboratory measurements of SP and compare them with estimates using the simplified literature models. The analyses revealed that the main parameters controlling the SP are the grain size distribution, the specific surface of the $400\ \mu\text{m}$ particles and the mean particle diameter of the fine fraction ($<80\ \mu\text{m}$). Although these parameters are included in some simplified SP estimation literature models, the comparison with laboratory measurements shows that these models present significant inaccuracy and often overestimate of the SP. Moreover, the back-calculation of the SP using the in-situ measurement of the frost heave confirmed that the literature models overestimate the SP and that the model proposed in this study seems to be more representative.

Introduction et mise en contexte

Le réseau routier du ministère des Transports et de la Mobilité durable du Québec (MTMD), étant exposé à des sols susceptibles de se soulever en période hivernale et à des conditions climatiques intenses, a adopté au fil des ans différentes approches visant à prédire le soulèvement au gel des chaussées souples. Les approches utilisées consistent à mesurer le soulèvement d'un sol en laboratoire, à le mesurer de manière in situ sur une chaussée existante ou à l'approximer au moyen de corrélations empiriques. La gélivité en fonction de la sollicitation thermique est ensuite exprimée au moyen du paramètre de potentiel de ségrégation sans surcharge (SP_0) exprimé en $\text{mm}^2/^\circ\text{C}\cdot\text{h}$. Ce paramètre a été étudié par plusieurs chercheurs dans les dernières décennies. Le SP_0 est utilisé dans le logiciel de conception CHAUSSEE 2 du Ministère, qui permet de calculer le soulèvement en fonction, notamment, de l'épaisseur de la chaussée et des températures et indices de gel appropriés. Au fil des ans, le Ministère a toutefois constaté que l'approche d'estimation au moyen des corrélations empiriques surestimait considérablement le soulèvement au gel par rapport aux deux autres approches utilisées.

Le Ministère a donc entrepris, il y a une dizaine d'années, une révision de la méthode d'essai pour la détermination du potentiel de ségrégation et a augmenté le nombre d'essais réalisés dans ses laboratoires. Tous les échantillons soumis aux essais ont fait l'objet d'une caractérisation physique complète, ce qui a permis de développer une banque de données considérable. Les résultats et les caractéristiques compilés ont permis d'évaluer la précision des modèles empiriques existants et de développer un nouveau modèle. Le nouveau modèle et les mesures de SP_0 en laboratoire ont également été comparés à des mesures in situ sur des chaussées existantes afin d'évaluer la représentativité des différentes approches.

La méthodologie utilisée, la banque de données de 40 échantillons, la comparaison des SP_0 déterminés en laboratoire avec ceux estimés par les modèles empiriques existants, le développement d'un nouveau modèle empirique d'estimation du SP_0 en fonction des caractéristiques physiques des sols et, finalement, la comparaison des valeurs mesurées en laboratoire, in situ et les résultats calculés par les modèles empiriques pour trois chaussées existantes sont présentés.

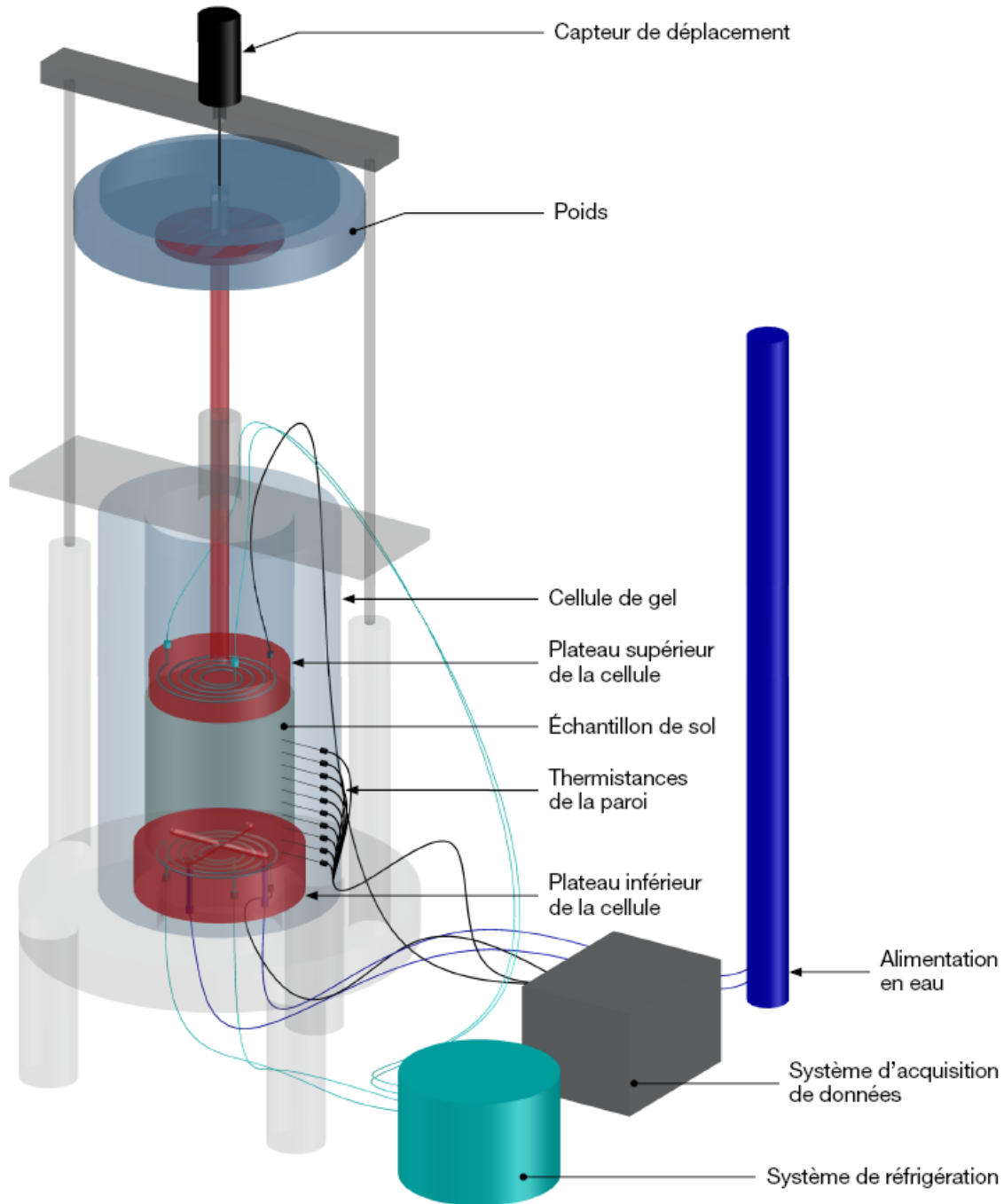
Méthode d'essai du MTMD pour la détermination du potentiel de ségrégation

Appareillage

L'essai de mesure du potentiel de ségrégation des sols réalisé au MTMD a été élaboré sur la base des travaux de Konrad (1980; 1999). Une photo de l'appareil est présentée dans la Figure 1. L'appareil consiste en une cellule cylindrique à paroi rigide munie de plateaux supérieur et inférieur capables d'appliquer et maintenir des températures entre $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ et $+10\text{ }^{\circ}\text{C}$. Les températures sont contrôlées via des bains réfrigérants dans lesquels circule un liquide caloporteur maintenu à une température déterminée. Le liquide circule dans un réseau de conduites à l'intérieur des plateaux supérieur et inférieur de la cellule. La cellule est munie de plusieurs sondes de température, de type thermistances, installées uniformément sur la paroi de la cellule avec un espacement vertical n'excédant pas 10 mm. Des sondes de température sont également installées sur les plateaux inférieur et supérieur de la cellule afin d'assurer le suivi et le contrôle des conditions appliquées aux extrémités de l'échantillon.

Le plateau supérieur est muni d'un support permettant d'appliquer une charge verticale sur l'échantillon afin de reproduire les conditions de consolidation à la pression désirée. La hauteur de l'échantillon lors des phases de consolidation, de gel et de dégel est mesurée via un capteur inductif (LVDT) installé sur le plateau supérieur de la cellule. La base de la cellule est connectée à un réservoir d'eau qui permet de maintenir une nappe d'eau à une hauteur de $5 \pm 1,5\text{ mm}$ au-dessus de la base de l'échantillon et ainsi assurer un apport constant en eau à l'échantillon. L'appareil est muni d'un système d'acquisition de données des lectures de température et de soulèvement à des intervalles réguliers.

Figure 1. Appareil de mesure du potentiel de ségrégation des matériaux



Procédure d'essai

Les essais de mesure du potentiel de ségrégation effectués au MTMD sont réalisés conformément à la méthode d'essai *LC 22-331 Détermination du potentiel de ségrégation des sols* sur des échantillons de sols intacts ou remaniés. Dans le cadre de cette étude, les essais ont été réalisés sur des échantillons remaniés puisque l'échantillonnage a été réalisé au moyen de tarières. Les échantillons sont d'abord écrêtés au

tamis de 5 mm, puis humidifiés uniformément à la teneur en eau désirée, généralement légèrement inférieure à la limite de liquidité du sol. L'échantillon humidifié est entreposé dans un contenant étanche et à température ambiante pendant au moins 24 h avant sa mise en place dans la cellule. Par la suite, l'échantillon est placé et compacté à l'intérieur de la cellule en plusieurs couches de 25 à 35 mm d'épaisseur. La hauteur finale de l'échantillon est comprise entre 120 à 130 mm. Une fois l'échantillon en place, le système de contrôle de la température du liquide caloporteur est mis en marche avec une température maintenue à $1,0 \pm 0,5$ °C dans les plateaux supérieur et inférieur de la cellule. L'échantillon est consolidé ensuite verticalement à la pression désirée via des poids installés sur le plateau supérieur. L'échantillon est par la suite soumis au gel en ajustant la température du plateau supérieur à $-4,0 \pm 0,5$ °C et en maintenant la température de la base à $1,0 \pm 0,5$ °C. La période de gel est maintenue pendant au moins 50 heures afin d'obtenir un régime thermique permanent, puis l'échantillon est soumis à une période de dégel en imposant une température sur le plateau supérieur de $5,0 \pm 0,5$ °C. Plusieurs cycles de gel et de dégel peuvent ainsi être appliqués. Lors de la phase de gel, les échantillons susceptibles d'avoir un potentiel de ségrégation élevé développent des couches de lentilles de glace au front de gel qui provoquent un soulèvement de l'échantillon, qui est mesuré via le capteur de déplacement installé au plateau supérieur. La Figure 2 montre un exemple d'échantillon à la fin de l'essai de mesure de potentiel de ségrégation où on peut voir des lentilles de glace qui ont été formées aux environs du front de gel, indiquant un potentiel de ségrégation élevé. L'échantillon est soumis à plusieurs cycles de gel et de dégel afin de le conditionner, donc de le rapprocher des conditions in situ et de simuler l'effet de plusieurs périodes de gel. Dans le cas d'une route construite en déblai où le sol sera exposé pour la première fois aux cycles de gel, des précautions particulières doivent être prises pour éviter des problématiques de tassement lors du premier dégel (St-Laurent, 2006).

La Figure 3 montre les résultats typiques d'un essai de mesure du potentiel de ségrégation d'un sol avec les mesures de température, de soulèvement, de la profondeur de gel et du gradient thermique. Une fois que ces données sont obtenues, le potentiel de ségrégation du matériau peut se calculer à l'atteinte du régime thermique permanent en suivant l'équation 1 :

$$SP = \frac{\nu}{\Phi} \quad (1)$$

Où SP représente le potentiel de ségrégation du matériau ($\text{mm}^2/\text{C}\cdot\text{h}$), ν la vitesse d'écoulement de l'eau vers le front de gel (en mm/h) et Φ le gradient thermique ($^{\circ}\text{C}/\text{mm}$).

La vitesse d'écoulement de l'eau vers le front de gel est calculée en suivant l'équation 2 :

$$\nu = \frac{T_{soul}}{1,09} = \frac{S_2 - S_1}{1,09(t_2 - t_1)} \quad (2)$$

Où S_2 et S_1 sont les soulèvements mesurés au temps t_2 et t_1 respectivement. Les temps t_2 et t_1 sont sélectionnés de manière à tracer une droite tangente au soulèvement mesuré à l'atteinte du régime thermique permanent.

Le gradient thermique est mesuré suivant l'équation 3 :

$$\Phi = \frac{T_2 - T_1}{P_2 - P_1} \quad (3)$$

Où T_2 et T_1 sont les températures mesurées aux profondeurs P_2 et P_1 de l'échantillon.

Figure 2. Exemple d'échantillon à la fin de l'essai de mesure du potentiel de ségrégation

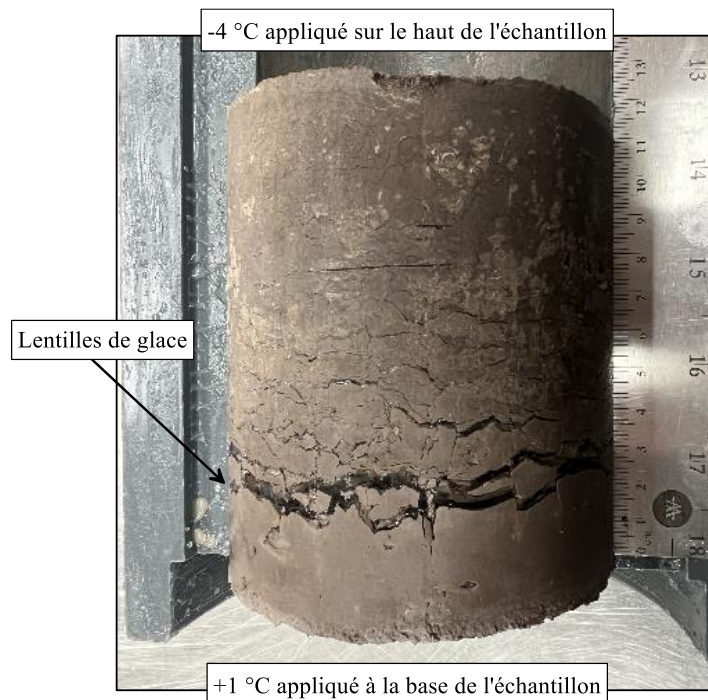
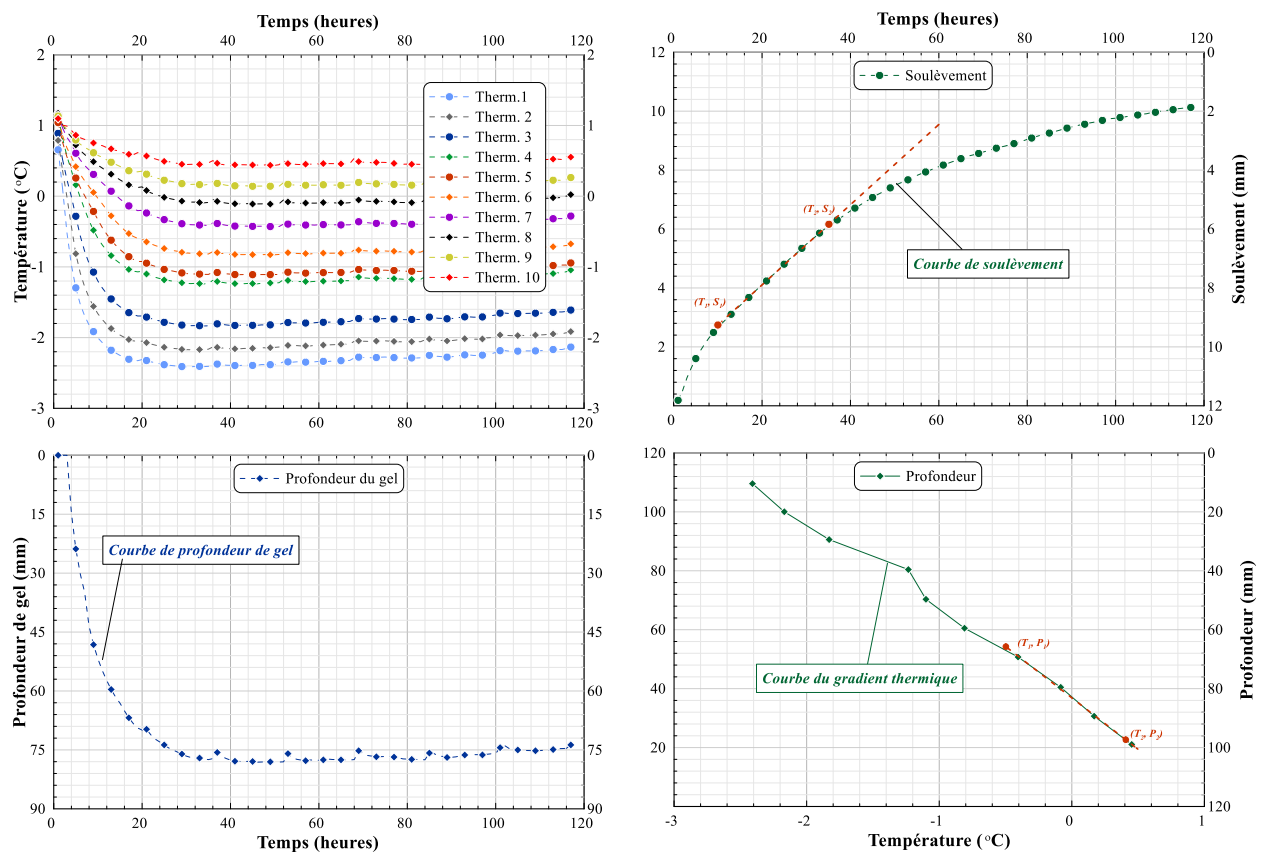


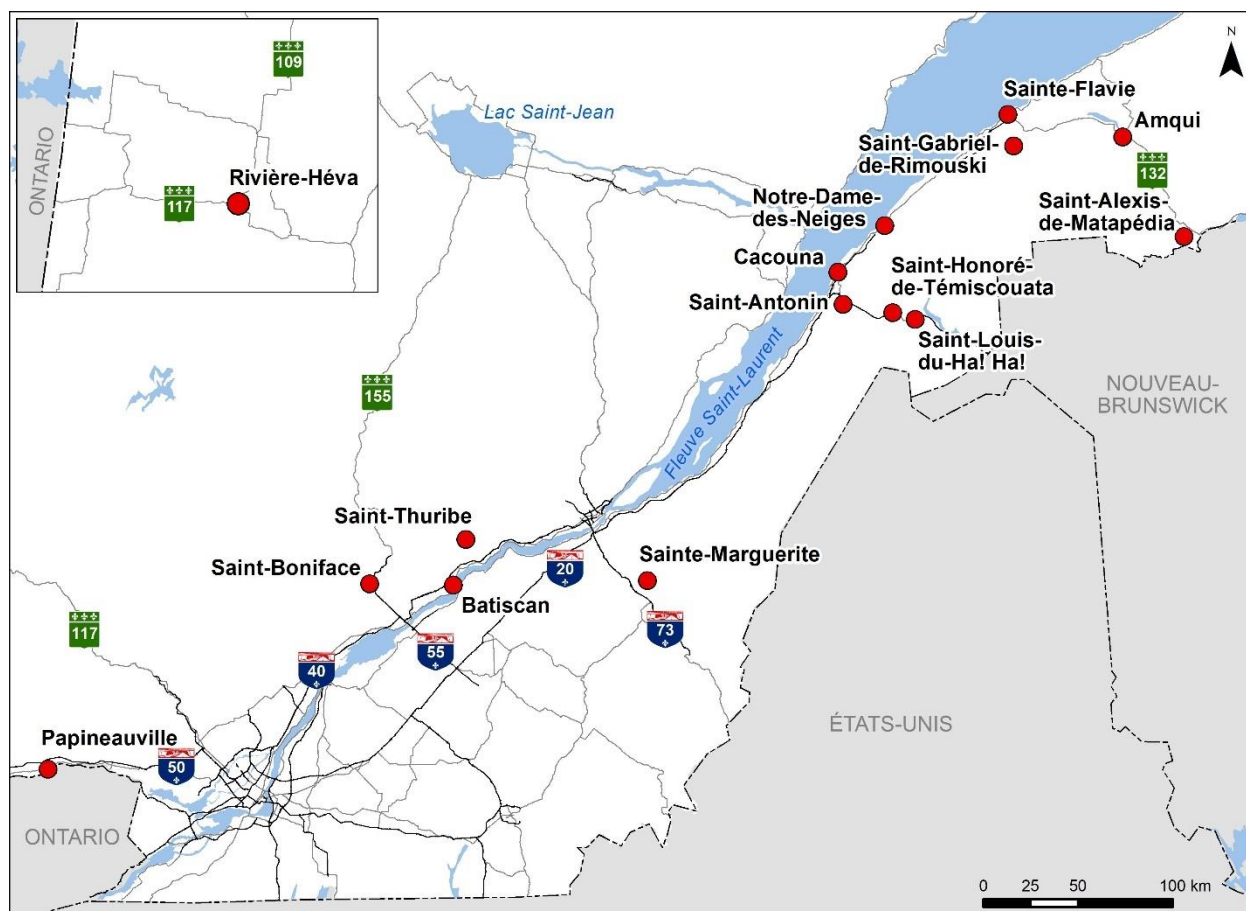
Figure 3. Résultats typiques d'un essai de mesure du potentiel de ségrégation d'un sol



Sols testés et programme d'essais

Dans la présente étude, les résultats des essais de laboratoire réalisés sur 40 échantillons sont présentés. Les échantillons sont majoritairement des sols naturels, en général présentant une proportion de silt considérable, et qui ont été prélevés à différentes localités du Québec dans le cadre de campagnes d'investigation du MTMD (Figure 4). Les échantillons ont d'abord été soumis à une série d'essais de caractérisation, dont l'analyse granulométrique par tamisage et sédimentométrie, les limites d'Atterberg, la densité relative, et les valeurs de bleu de méthylène, qui ont été réalisés conformément aux normes BNQ 2501-025, BNQ 2501-092, BNQ 2501-070, et LC 21-255, respectivement. Les échantillons ont par la suite été écrêtés au tamis 5 mm puis soumis à l'essai de mesure du potentiel de ségrégation, réalisé conformément à la méthode d'essai LC 22-331.

Figure 4. Localisation de la provenance des échantillons soumis à l'essai de mesure du potentiel de ségrégation



Résultats

Le tableau 1 présente un résumé des résultats des essais de caractérisation et de potentiel de ségrégation et la Figure 5 présente les courbes granulométriques des échantillons testés.

Les résultats des analyses granulométriques montrent que les échantillons testés présentent un fuseau de courbes granulométriques large avec un pourcentage de particules fines (diamètre <80 µm) allant de 19 à 94 % et un pourcentage d'argile (diamètre <2 µm) allant de 5 jusqu'à 61 %. Les résultats des limites d'Atterberg montrent que les échantillons ont des indices de plasticité variés allant de non-plastique jusqu'à 36 %. D'autre part, le ratio de la teneur en eau sur la limite liquide w_n/w_{LC} varie entre 0,47 et 1,14. Les résultats des essais de valeur au bleu de méthylène montrent que les échantillons sont caractérisés par des VB entre 0,31 et 3,23 g de bleu par 100 g d'échantillon. Il convient de mentionner que cet essai est réalisé sur la fraction passant le tamis 400 µm ($P_{400\mu m}$).

Les résultats des essais de mesure du potentiel de ségrégation sont présentés en termes de SP_0 , qui est le potentiel de ségrégation à une contrainte de consolidation nulle (sans surcharge). Le SP terrain (SP_{field}) est relié au SP_0 à partir de l'équation 4 proposée par Konrad (1999) :

$$SP_{field} = SP_0 \cdot e^{-a \cdot Pe} \quad (4)$$

Où la constante a est une constante reliée à la sensibilité du soulèvement au gel du sol à la pression de confinement et Pe la contrainte de confinement. La constante a a été estimée en utilisant la corrélation proposée par Konrad (2005) qui relie le diamètre moyen des particules fines d_{50ff} à cette constante. Il convient de mentionner que le SP_0 présenté dans le tableau 1 représente la valeur calculée lors du dernier cycle de gel effectué au cours des essais, et que ce nombre de cycles est généralement de 3. De plus, la contrainte de confinement appliquée lors des essais est généralement de 19,8 kPa.

Les résultats des essais montrent que le SP_0 des échantillons testés varie considérablement avec des valeurs allant de 1,6 à 17,1 mm²/°C•h. En utilisant l'échelle de gélivité proposée par St-Laurent (2006), la gélivité varie de faible à très élevée.

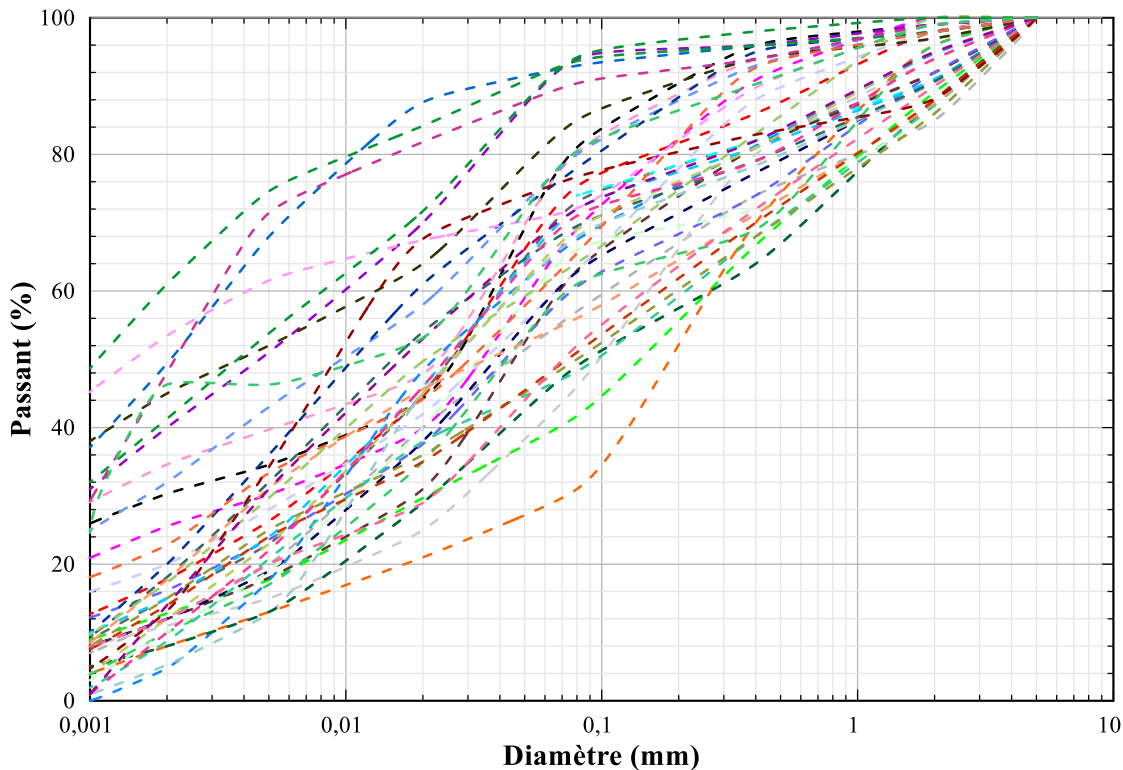
Tableau 1. Résultats des essais de caractérisation et de potentiel de ségrégation des échantillons testés

Localisation	N° d'échantillon	Classification	w_n (%)	w_{LC} (%)	w_p (%)	I_p (%)	w_n/w_{LC}	VB $\frac{g}{100g}$	Granulométrie, en % passant (mm)				SP_0 $\left(\frac{mm^2}{^\circ C \cdot h}\right)$
									0,4	0,08	0,02	0,002	
Amqui	SG-6509-23	ML	24,7	31	NP	NP	0,80	0,75	82,0	73,0	45,0	15	2,1
	SG-6510-23	CL	23,4	32	23	9	0,73	0,74	81,0	72,0	46,0	15	5,1
	SG-6511-23	ML	23,8	23	NP	NP	1,03	0,65	77	62,8	38,0	12	4,6
	SG-6512-23	ML	24,3	24	NP	NP	1,01	0,74	79	69,5	54,0	18	5,9
	SG-6534-23	SM	23	44	29	15	0,52	0,79	74	57,0	40,0	12	2,0
	SG-6535-23	CL-ML	19,1	25	18	7	0,76	0,71	81	63,0	31,0	12	4,0
Batisca	SG-3839-15	CL	56,3	49	13	36	1,15	1,69	90	72,1	67,5	53	8,1

Localisation	N° d'échantillon	Classification	w _n (%)	w _{LC} (%)	w _p (%)	I _p (%)	w _n /w _{LC}	VB $\frac{g}{100g}$	Granulométrie, en % passant (mm)				SP ₀ $\left(\frac{mm^2}{^\circ C \cdot h}\right)$
									0,4	0,08	0,02	0,002	
Cacouna	SG-6502-23	SC	16,1	28	16	12	0,58	1,2	67	41,7	29,7	13	3,1
	SG-6503-23	CL	24,1	46	17	29	0,52	2,14	96	94,0	70,0	40	3,0
	SG-6505-24	CL	20,9	40	18	22	0,52	1,71	93	80,0	58,0	32	3,4
	SG-6506-24	SM	16,1	26	NP	NP	0,62	0,46	70	31,0	21,0	8	3,3
	SG-6507-24	CL	16,7	29	15	14	0,58	1,15	88	63,0	42,0	20	3,5
Notre-Dame-Des-Neiges	SG-6178-22	CL ou OL	26	29	20	9	0,90	1,74	99	98,4		51	4,4
Papineauville	SG-3837-15	CL	58,2	58	36	22	1,00	1,71	98	94,2	71,7	41	8,5
Rivière Héva	SG-5299-19	ML	22,1	26	NP	NP	0,85	0,45	81	67,5	48,3	5	5,0
	SG-5300-19	CL	39	44	18	26	0,89	1,45	94	90,4	81,8	48	12,4
Saint-Antoine	SG-4530-17	CL	25,7	26	14	12	0,99	1,06	93	66	44	23	8,5
Saint-Boniface-de-Shawinigan	SG-0724-12	CL	26,8	33	18	15	0,81	1,34	90	81	53	46	6,5
St-Alexis-de-Matapédia	SG-6773-24	ML	19	30	NP	NP	0,63	0,38	79	71	46	10	7,9
	SG-6774-24	SM	22,4	29	NP	NP	0,77	0,31	69	61	35	10	6,1
	SG-6832-25	SM	20	33	24	9	0,61	0,51	72	66	40	10	7,1
	SG-6833-25	CL	15,9	34	23	11	0,47	0,40	82	72	53	14	17,1
	SG-6834-25	ML	32,1	40	NP	NP	0,80	0,39	81	69	45	12	5,5
Ste-Flavie	SG-5544-19	CL	37,1	38	23	15	0,98	2,23	96	93	88	49	5,0
	SG-5549-19	CH	43,6	50	21	29	0,87	3,23	96	94	84	61	6,0
Ste-Marguerite	SG-6723-24	SM	21,7	33	24	9	0,66	0,41	80	46	25	11	1,7
	SG-6724-24	CL-ML	16,7	24	17	7	0,70	1,13	95	78	61	20	2,9
St-Gabriel de Rimouski	SG-6385-23	ML	25,8	32	23	9	0,81	1,09	86	75	45	18	3,2
	SG-6386-23	ML	25	32	23	9	0,78	1,16	74	61	38	16	3,7
St-Honoré de Témiscouata	SG-4952-18	SC	18	23	15	8	0,78	0,59	68	50	36	15	7,2
	SG-4953-18	CL	21,1	25	17	8	0,84	0,65	70	51	35	14	10,1
	SG-5001-18	CL-ML	20,2	23	16	7	0,88	0,53	72	52	29	12	13,4
St-Louis-du-Ha! Ha!	SG-4691-17	CL	22,4	29	17	12	0,77	0,58	71	56	46	18	11,2
	SG-4692-17	CL	20,9	26	16	10	0,80	0,66	83	64	50	17	9,2
	SG-4717-17	SC-SM	18,7	23	17	6	0,81	0,44	68	48	38	9	8,7
	SG-4886-17	ML	22	26	NP	NP	0,85	0,35	78	68	45	5	6,2
	SG-4920-18	ML	30,1	33	NP	NP	0,91	0,53	83	77	68	13	15,3
St-Thuribe	SG-5961-21	CL	21,4	38	17	21	0,56	1,65	94	80	48	35	3,4
	SG-5962-21	CL	16,3	28	17	11	0,58	1,43	91	69	40	26	3,4
	SG-5963-21	CL	22,1	37	18	19	0,60	1,78	96	81	44	30	1,7

NP : Sol non plastique

Figure 5. Courbes granulométriques des échantillons testés



Analyse des résultats de laboratoire

Les résultats obtenus dans le cadre de cette étude ont été comparés aux critères et méthodes d'estimation du SP_0 présents dans la littérature. Trois modèles ou études de la littérature ont été choisis pour la comparaison avec les données obtenues au laboratoire, à savoir la charte du CRREL, la tendance de données présentée par Knutsson et coll. (1985), et la méthode d'estimation du SP_0 présentée par Konrad (2005). Il convient de noter que d'autres modèles et études d'estimation du potentiel de ségrégation existent dans la littérature, toutefois, les études choisies pour la comparaison sont celles souvent citées et utilisées lors de la conception de chaussée souple au Québec.

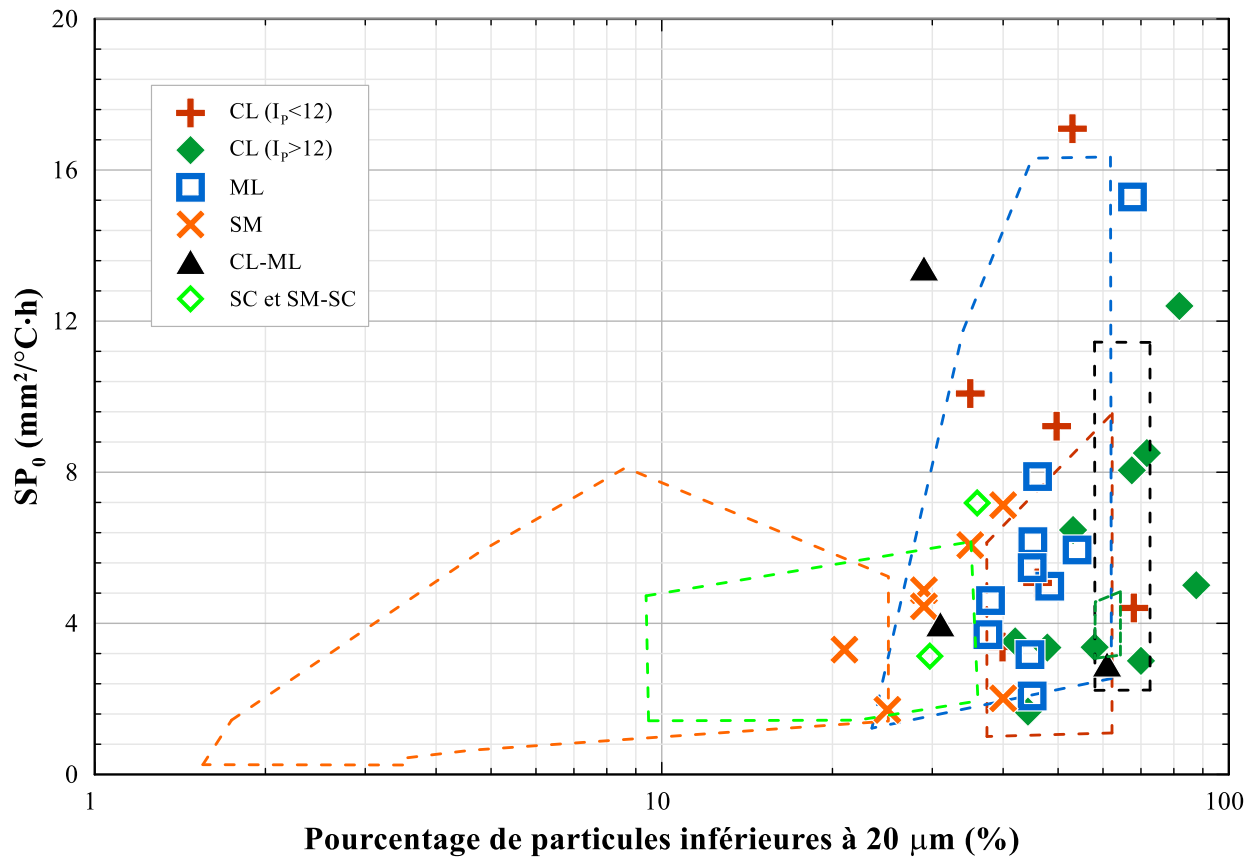
Charte du CRREL

Le laboratoire de recherche en région froide du Corps des ingénieurs de l'armée américaine (CRREL) a présenté une charte sous forme d'enveloppes regroupant les sols selon leurs classifications USCS dans un graphique du taux de soulèvement en fonction du pourcentage du passant de 20 μm . La charte a été convertie au concept du potentiel de ségrégation sans surcharge SP_0 par St-Laurent (2006). La charte montre que les classes de sols avec un pourcentage de silt élevé tel que ML, ML-OL, ML-CL peuvent présenter un potentiel de ségrégation élevé et très variable.

Les résultats des mesures du potentiel de ségrégation en laboratoire ont été comparés à la charte proposée par le CRREL dans la Figure 6. La figure montre certains écarts et disparités entre les résultats obtenus au laboratoire du MTMD et les enveloppes de la charte du CRREL. Les couleurs permettent de relier les points aux enveloppes correspondant au même type de sol. Les écarts sont notamment

importants pour les sols classifiés CL avec un $I_p > 12$ où aucun résultat de laboratoire n'est situé dans l'enveloppe définie par la charte. Des écarts de résultats sont aussi observés pour d'autres sols tels que ceux classifiés SM, CL-ML, ainsi que SC et SM-SC. Ces résultats montrent que la charte proposée par le CRREL est moins adaptée aux sols testés dans cette étude et par conséquent, elle devrait être utilisée avec précaution.

Figure 6. Comparaison du SP_0 estimé en laboratoire en fonction du pourcentage du passant 20 μm aux enveloppes de la charte du CRREL adaptées par St-Laurent (2006)



Corrélation R_f-SP_0

Sur la base des essais de laboratoire et mesures in situ, Knutsson et coll. (1985) ont présenté une corrélation entre le potentiel de ségrégation et le facteur des fines (R_f) qui est défini comme suit :

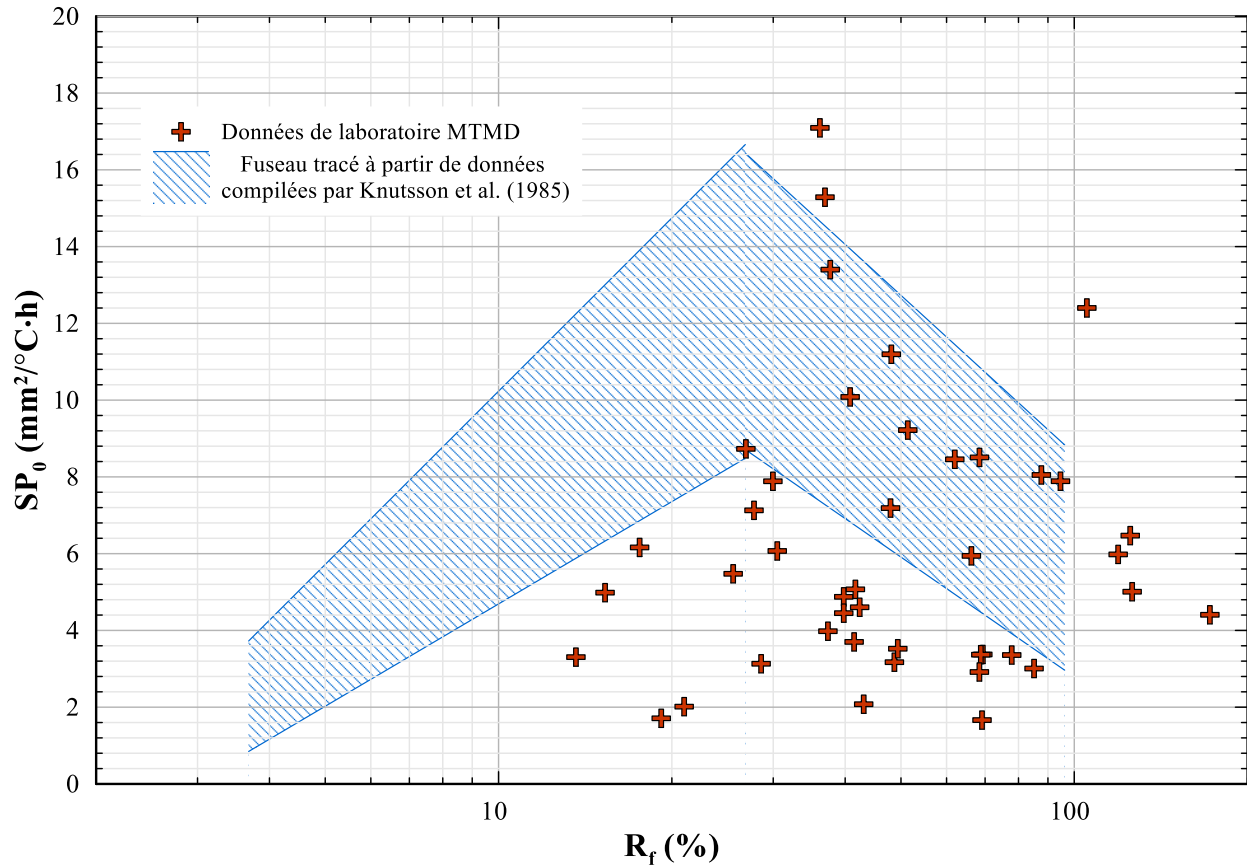
$$R_f = \frac{(\% < 2 \mu m) \cdot (\% < 74 \mu m) \cdot 100}{(\% < 400 \mu m) \cdot w_L} \quad (4)$$

Il convient de noter que ce facteur a d'abord été présenté par Rieke (1983), puis redéfini sous cette forme par Knutsson et coll. (1985). La corrélation montre que le SP_0 augmente avec R_f jusqu'à environ $R_f = 30 \%$. Ensuite, une tendance à la diminution du SP_0 avec R_f est observée pour des valeurs de $R_f > 30 \%$.

La Figure 7 présente la corrélation entre les valeurs du potentiel de ségrégation obtenues dans la présente étude et le facteur des fines. Les données de laboratoire sont comparées avec le fuseau tracé à partir des

données compilées par Knutsson et coll. (1985). La comparaison montre que, bien que certains points se situent à l'intérieur du fuseau de données de Knutsson et coll. (1985), les données de laboratoire sont généralement inférieures au fuseau notamment pour des R_f inférieurs à 30 %. De plus, les résultats n'indiquent pas une tendance ou une corrélation entre le facteur des fines R_f et le SP_0 des échantillons testés dans cette étude.

Figure 7. Corrélation entre le potentiel de ségrégation sans surcharge et le facteur des fines

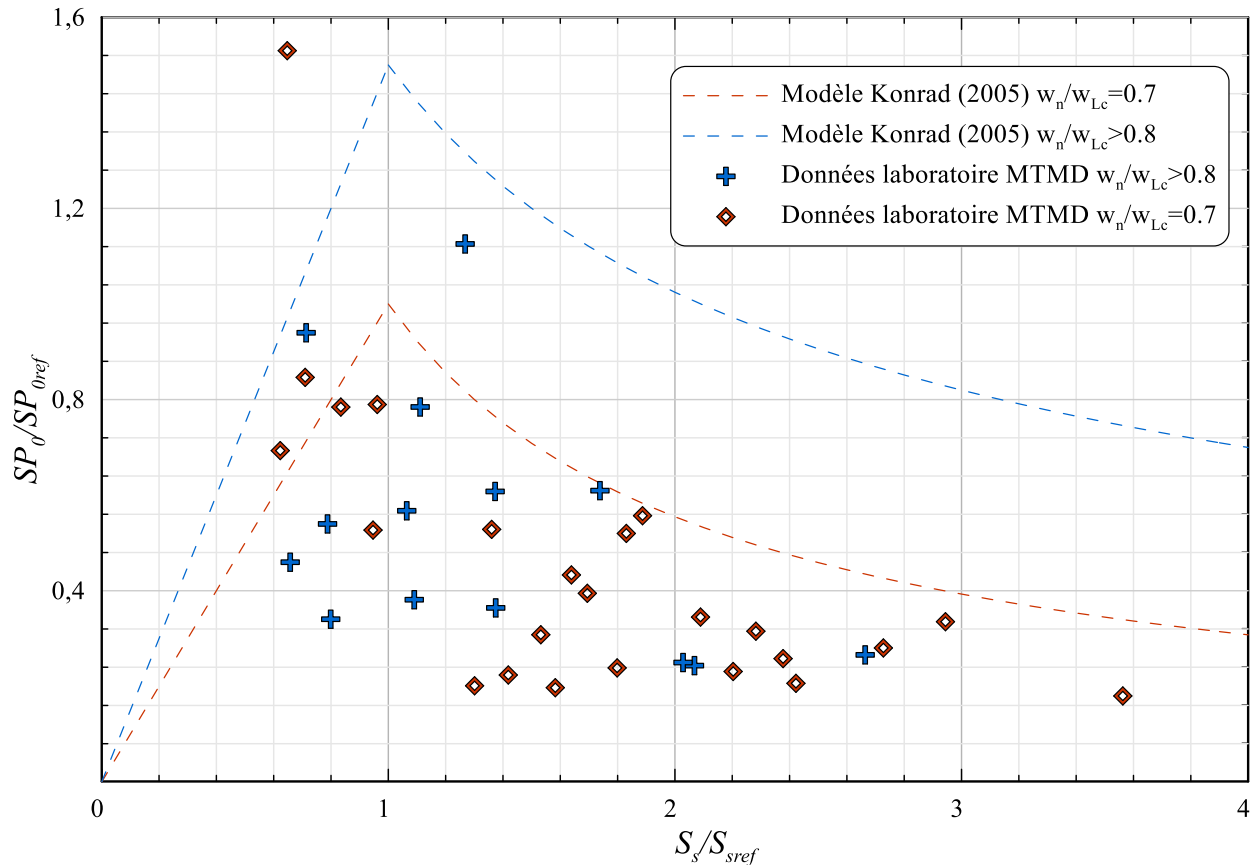


Méthode d'estimation du SP_0 selon Konrad (2005)

Konrad (2005) a présenté une méthode d'estimation du potentiel de ségrégation des sols en utilisant la réponse au gel de deux sols de référence (SP_{0ref}). La méthode est basée sur une relation entre le potentiel de ségrégation, la surface spécifique du sol à l'essai (S_s) et du sol de référence (S_{sref}), et le diamètre moyen des particules fines (d_{50ff}). Les relations ont été développées pour deux tendances, soit les sols avec $w_n/w_{Lc} = 0,7 \pm 0,1$ et les sols avec $w_n/w_{Lc} > 0,8$.

La Figure 8 présente une comparaison des résultats des essais de potentiel de ségrégation obtenus dans cette étude avec les courbes de tendance du modèle proposé par Konrad (2005). La comparaison montre que les données de laboratoire obtenues dans cette étude sont généralement inférieures aux courbes de tendances du modèle, notamment pour les sols avec $w_n/w_{Lc} > 0,8$. Malgré les écarts observés, les résultats du MTMD montrent une tendance à l'augmentation du SP_0/SP_{0ref} avec la diminution du ratio S_s/S_{sref} .

Figure 8. Comparaison entre les résultats du SP_0 du laboratoire et le modèle d'estimation proposé par Konrad (2005)



Revue du modèle d'estimation du SP_0

L'examen des relations d'estimation du potentiel de ségrégation présenté dans la littérature et la comparaison de ces relations avec les données de laboratoire du MTMD montrent que la relation $SP_0/SP_{0ref} - S_s/S_{sref}$, qui utilise le d_{50ff} et la surface spécifique du sol, présente la meilleure estimation du SP_0 du sol. Cependant, une dispersion importante des données expérimentales demeure observée dans cette relation et l'estimation reste peu précise. Dans ce sens, une analyse de l'effet des différents paramètres du sol sur le potentiel de ségrégation des échantillons testés a été réalisée dans le cadre de cette étude afin de peaufiner l'estimation du SP_0 . En plus de la surface spécifique et du diamètre moyen des particules fines, les effets du pourcentage de passant par les différents tamis normalisés de granulométrie, du nombre de cycles de gel et de w_n/w_{Lc} ont été analysés.

Pour des raisons de simplifications, seuls les résultats d'analyses significatifs sont présentés dans l'article. Les analyses de données issues des essais de laboratoire réalisés au MTMD montrent que, malgré une certaine influence observée qualitativement des limites d'Atterberg des ratios w_n/w_{Lc} , les analyses statistiques indiquent que ces deux paramètres sont non-significatifs ($p > 0,05$). De ce fait, ces deux paramètres n'ont pas été inclus dans les analyses de régressions afin d'éviter une surparamétrisation de l'équation du SP_0 .

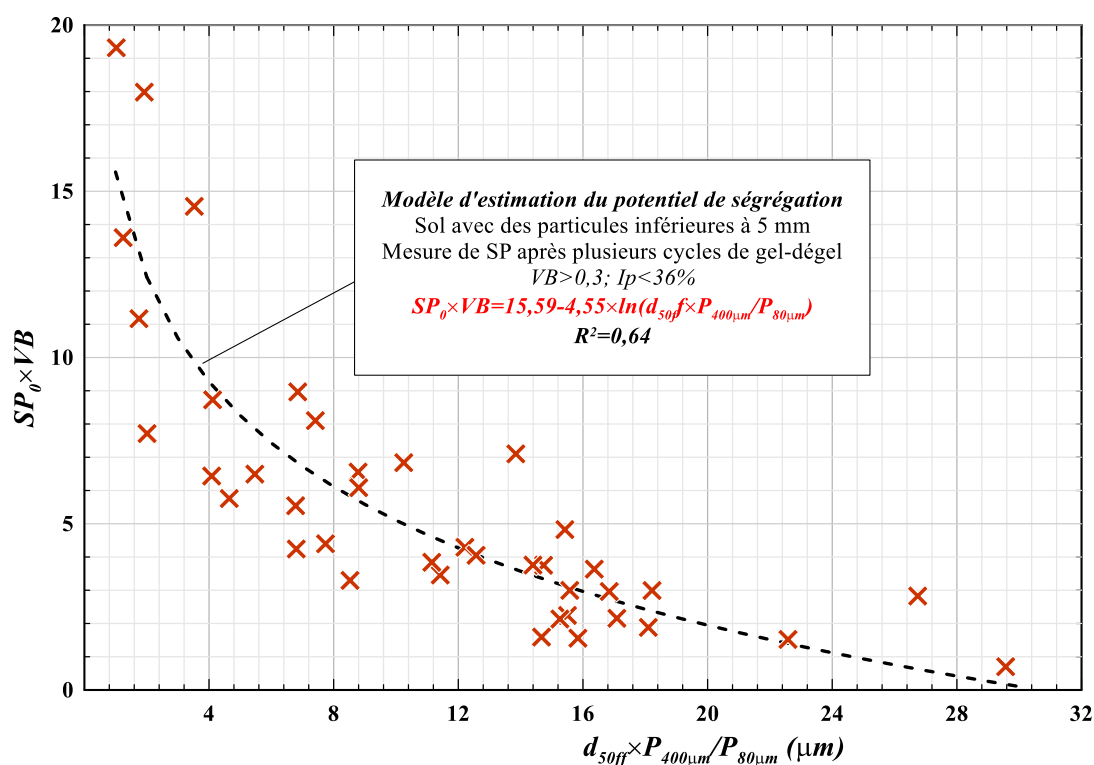
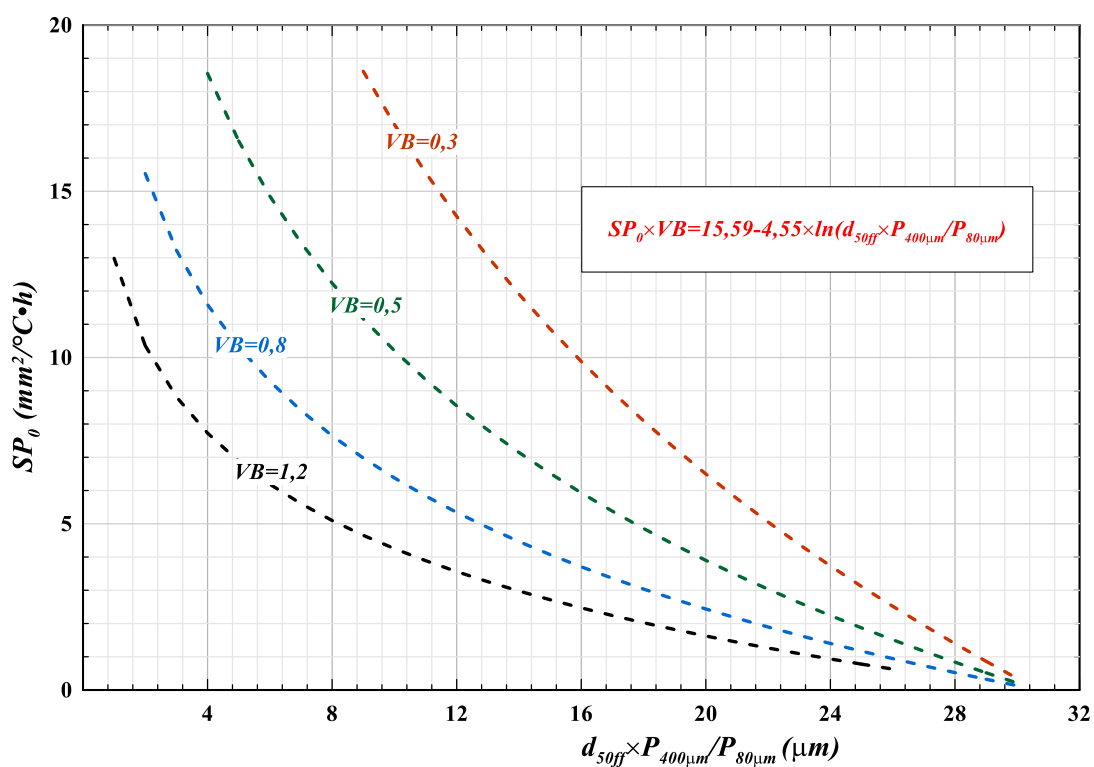
Les analyses de régressions de la fonction SP_0 ont été réalisées en utilisant des paramètres représentant la granulométrie ainsi que la perméabilité et la succion du sol. Ces propriétés influencent grandement le SP_0 et peuvent être corrélées à plusieurs caractéristiques physiques de base du sol. Les analyses de régressions réalisées montrent que le SP_0 est significativement corrélé au d_{50ff} , à la VB, au $P_{400\mu m}$ et au pourcentage passant $80\mu m$ ($P_{80\mu m}$). En plus d'être des caractéristiques de base du sol simples à déterminer, ces quatre paramètres reflètent l'influence de la granulométrie qui est représentée par le d_{50ff} et le $P_{80\mu m}$ en ce qui a trait à sa partie fine et le $P_{400\mu m}$ pour sa partie sableuse, ainsi que l'influence de la succion et perméabilité qui est reflétée en partie par la valeur au bleu (VB). L'équation (5) présente la fonction du SP_0 en $mm^2/^\circ C \cdot h$ estimé par les analyses de régressions alors que le Tableau 2 présente les résultats détaillés de l'analyse de régression de la fonction SP_0 ou α et β sont les deux coefficients déterminés dans l'analyse.

$$SP_0 = \frac{\alpha - \beta \cdot \ln\left(\frac{d_{50ff} \times P_{400\mu m}}{P_{80\mu m}}\right)}{VB}, \text{ mm}^2/^\circ C \cdot h \quad (5)$$

Tableau 2. Coefficients de l'équation (5) du SP_0

Coefficient	Estimé	Déviations standard	Valeur p
α	15,59	0,94	2e-16
β	4,55	0,41	1,2e-13

Le tableau 2 présente les valeurs des facteurs α et β de chaque segment de la courbe obtenu avec les analyses de régressions sur la courbe de tendance du SP_0 . La Figure 9 présente la relation $SP_0 \times VB$ en fonction du $d_{50ff} \times P_{400\mu m} / P_{80\mu m}$. Malgré une certaine dispersion, le modèle empirique est assez représentatif des mesures de laboratoire avec un coefficient de détermination R^2 de 0,64. Les analyses de régression indiquent également des valeurs p associées au coefficient α et β proches de 0, reflétant le caractère statistiquement significatif de ces coefficients. Finalement, la figure 10 présente la relation SP_0 en fonction du $d_{50ff} \times P_{400\mu m} / P_{80\mu m}$ selon différentes plages de VB. Cette représentation permet de mieux visualiser l'impact de la valeur au bleu de méthylène sur le soulèvement au gel.

Figure 9 : Relation $SP_0 \times VB$ en fonction du $d_{50ff} \times P_{400\mu m} / P_{80\mu m}$

 Figure 10 : Influence de la VB sur la relation du SP_0 versus $d_{50ff} \times P_{400\mu m} / P_{80\mu m}$


Comparaison des $SP_{0\text{-labo}}$, $SP_{0\text{-empirique}}$ et $SP_{0\text{-in situ}}$

Une analyse comparative des SP_0 mesurés en laboratoire ($SP_{0\text{-labo}}$), approximés par les équations empiriques ($SP_{0\text{-empirique}}$) de Konrad (2005) et de l'équation (5) et calculés à rebours à l'aide de mesures in situ du soulèvement ($SP_{0\text{-in situ}}$) de trois chaussées existantes a été complétée. Les calculs à rebours ont été réalisés selon la méthodologie présentée dans Info DLC (2010). En résumé, cette approche consiste à mesurer les élévations de surface à la fin de l'hiver, où le soulèvement est proche du maximum, et en période estivale ou automnale en l'absence de soulèvement. La stratigraphie sous la chaussée est également établie au moyen de sondages et d'essais de caractérisation physique des sols en laboratoire. À l'aide des relevés d'élévations, des données stratigraphiques du site étudié, de la profondeur de gel et des stations météorologiques, une calibration à l'aide du logiciel CHAUSSÉE 2 est réalisée afin de reproduire les mêmes soulèvements mesurés sur la chaussée en faisant varier la valeur de SP_0 des couches de sols.

Dans le cadre de trois sites, il avait été prévu de réaliser les calculs à rebours aux emplacements précis des prélèvements des échantillons utilisés pour les essais de détermination du SP_0 en laboratoire. Cependant, la profondeur de gel n'a pas atteint la profondeur du sol prélevé et les calculs à rebours à ces endroits n'étaient pas représentatifs. À partir de la stratigraphie des sols, les calculs ont plutôt été réalisés à des emplacements sur la chaussée où les sols étaient jugés comparables aux sols soumis aux essais LC 22-331 et pour lesquels la profondeur de gel était suffisante.

La méthode de calculs à rebours des mesures in situ nécessite des hypothèses et approximations, dont les SP_0 des autres couches de la chaussée, les propriétés des sols, la stratigraphie entre les sondages, et les conditions de terrain au moment des mesures. Le tableau 3 présente les résultats des SP_0 obtenus selon les différentes méthodes. Pour les calculs à rebours, des intervalles de valeurs sont présentés puisque les relevés de l'élévation de la chaussée variaient en fonction de l'emplacement sur la chaussée. L'intervalle a donc été déterminé à partir des relevés effectués aux endroits où la nature des sols correspondait le mieux à celle des échantillons prélevés.

Tableau 3. Comparaison des $SP_{0\text{-labo}}$, $SP_{0\text{-empirique}}$ (Konrad, 2005 et modèle proposé) et $SP_{0\text{-in situ}}$

Sites	N° d'échantillon	SP_0 (mm ² /°C•h)			
		Laboratoire (LC 22-331)	Modèle de Konrad 2005	Modèle proposé (eq. 6)	Calculs à rebours (in situ)
Papineauville	SG-3837-15	8,5	10,8	5,6	5,5-7,2
Rivière-Héva	SG-5300	12,4	13,5	8,7	4,9 à 10,0
St-Thuribe	SG-5961-21	3,4	6,2	4,2	3,7 – 3,9
	SG-5963-21	1,7	3,1	1,5	3,35 – 3,55

Pour les chaussées étudiées, les résultats présentés au Tableau 3 se situent généralement à l'intérieur ou très près de l'intervalle défini par les mesures in situ. Le modèle empirique proposé dans cet article (Figure 9) donne généralement des résultats plus représentatifs des $SP_{0\text{-labo}}$ et $SP_{0\text{-in situ}}$ que ceux du modèle

de Konrad (2005). Ces observations sont similaires à celles de Blanchet (2010) qui a observé que le modèle de Konrad 2005 surestimait le SP_0 par rapport aux résultats de laboratoire.

Également, on constate que les SP_0 mesurés en laboratoire sont généralement supérieurs aux SP_0 in situ obtenus par calculs à rebours. Cette différence peut s'expliquer par le fait que les essais de laboratoire sont réalisés sur des sols remaniés et dans des conditions critiques et propices aux soulèvements au gel alors que les conditions sur le terrain varient. Des analyses comparatives additionnelles entre les $SP_{0\text{-labo}}$ et $SP_{0\text{-in situ}}$ devraient permettre de mieux définir cette différence.

Pour les SP_0 considérés comme étant très élevés, le modèle proposé semble donner des résultats inférieurs à ceux mesurés en laboratoire pour le site de Rivière-Héva et pour Papineauville. Cette différence peut s'expliquer par le fait que la banque de données contient une quantité d'essais limitée pour les sols très gélifs présentant des SP_0 supérieurs à $10 \text{ mm}^2/^\circ\text{C}\cdot\text{h}$. Il serait donc intéressant d'investiguer davantage le potentiel de ségrégation des sols très gélifs afin d'améliorer son estimation par le modèle empirique proposé.

Conclusions

Le potentiel de ségrégation d'échantillons prélevés dans différentes localités au Québec a été déterminé au laboratoire des chaussées du ministère des Transports et de la Mobilité durable du Québec. Les essais réalisés ont permis de construire une base de données des mesures du potentiel de ségrégation avec les caractéristiques physiques de base de chaque échantillon testé. Les résultats recueillis dans cette base de données ont été d'abord comparés aux estimations du SP_0 en utilisant les modèles déjà existants dans la littérature. Cette comparaison montre des écarts importants entre les estimations du SP_0 de différents modèles de la littérature et les mesures directes du SP_0 au laboratoire. Par la suite, des analyses de données statistiques ont été réalisées dans cette étude afin d'établir les propriétés physiques de base du sol qui ont le plus d'influence sur le SP_0 . Les analyses montrent que le diamètre moyen des particules fines $d_{50\text{ff}}$, la valeur au bleu de méthylène mesurée sur le passant $400 \mu\text{m}$ d'un échantillon, ainsi que le ratio des pourcentages du passant $400 \mu\text{m}$ et $80 \mu\text{m}$ exercent une influence importante sur le SP_0 . Sur la base de ces analyses, un nouveau modèle de SP_0 en fonction de ces quatre paramètres a été proposé. L'estimation du SP_0 par le nouveau modèle a été comparée aux mesures de laboratoire, aux estimations des modèles de la littérature et aux calculs à rebours du SP_0 en utilisant les mesures du soulèvement in situ. Les résultats montrent que le nouveau modèle améliore grandement la précision des estimations du SP_0 et semble assez proche des mesures in situ. De ce fait, il est suggéré que le modèle proposé est plus représentatif aux sols et aux matériaux du Québec, et qu'il est mieux adapté aux études préliminaires de conception des chaussées au Québec.

Il convient de noter que l'étude porte sur les sols du Québec, constitués en majorité de particules inférieures à 5 mm . De plus, l'étude ne considère pas l'effet du nombre de cycles de gel et dégel, notamment dans le cas de la construction de route en déblai où le sol peut être exposé pour la première fois au gel. Il revient au concepteur de s'assurer de la représentativité du modèle et de considérer les conditions in situ.

Références

- Blanchet, F. Gélivité des sols d'infrastructure sur deux sites routiers à St-David et Cap-Santé. Mémoire de maîtrise, Université Laval. (2010).
- Bureau de normalisation du Québec. CAN/BNQ 2501-025 : Sols –Analyse granulométrique des sols inorganiques. Bureau de normalisation du Québec. (2013).
- Bureau de normalisation du Québec. CAN/BNQ 2501-070 : Sols –Détermination de la densité des particules solides. Bureau de normalisation du Québec. (2023).
- Bureau de normalisation du Québec. CAN/BNQ 2501-092 : Sols –Détermination de la limite de liquidité à l'aide d'un pénétromètre à cône et de la limite de plasticité. Bureau de normalisation du Québec. (2023).
- INFO DLC. Étude de la gélivité sur chaussée existante. *Bulletin d'information technique*, Ministère des Transports du Québec, vol. 15, n° 4. (2010).
- Knutsson, S., Domaschuk, L., Chandler, N. Analysis of large-scale laboratory and in situ frost heave tests. *International symposium on ground freezing*. p. 65-70. (1985).
- Konrad, J.-M. Estimation of the segregation potential of fine-grained soils using the frost heave response of two reference soils. *Revue canadienne de géotechnique*. vol. 42, n° 1, p. 38-50. (2005).
- Konrad, J.-M. Frost heave mechanics. Thèse de doctorat, Département de génie civil, University of Alberta, Edmonton, Alberta. (1980).
- Konrad, J.-M. Frost susceptibility related to soil index properties. *Revue canadienne de géotechnique*. vol. 36, n° 3, p. 403-417. (1999).
- Ministère des Transports et de la Mobilité durable. Méthode LC 21-255 : Détermination de la valeur au bleu de méthylène des sols et des granulats. Recueil des méthodes LC. (2024).
- Ministère des Transports et de la Mobilité durable. Méthode LC 22-331 : Détermination du potentiel de ségrégation des sols. Recueil des méthodes LC. (2024).
- Rieke, R. D. The role of specific surface area and related index properties in the frost susceptibility of soils. Mémoire de maîtrise. Oregon State University. (1982).
- Saint-Laurent, D. CHAUSSÉE 2 : Logiciel de dimensionnement des chaussées souples. Guide de l'utilisateur. Ministère des Transports du Québec. (2006).