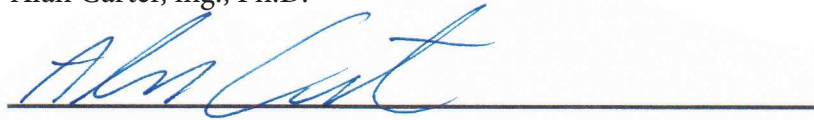
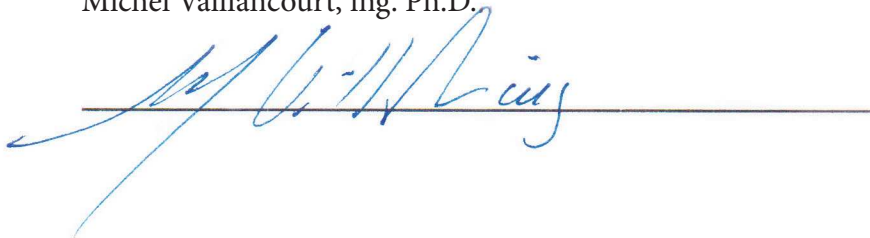


**RAPPORT D'EXPERTISE SUR LA CARACTÉRISATION DE PANNEAUX EN
POLYMÈRE EXPANSÉ GATOR (PPE) BASE ET ÉTUDE DU COMPORTEMENT
MÉCANIQUE D'UN SYSTÈME DE PAVÉS DE BÉTON DE CIMENT AVEC
FONDATION EN PANNEAUX GATOR BASE**

Alan Carter, ing., Ph.D.



Michel Vaillancourt, ing. Ph.D.



MONTRÉAL, NOVEMBRE 2014



Base gator panneaux

École de technologie supérieure

1100, rue Notre-Dame Ouest
Montréal, (Québec), Canada
H3C 1K3

Téléphone : 514 396 8800

Télécopieur : 514 396 8584

Département de génie de la construction

Monsieur Jack Tutino
Vice-président ventes et marketing
225, Boulevard Bellerose O.
Ville de Laval, Québec, Canada
H7L 6A1
Tél : (450) 624-1611
Fax : (450) 624-1622
Courriel : jack@alliancedp.com

Objet : Offre de service pour un mandat d'expertise sur la caractérisation mécanique et thermique du panneau de polymère Alliance Gator Base entrant dans la construction de terrasse en pavé de béton

Monsieur,

Vous trouverez dans ce document les résultats des essais réalisés dans le cadre du mandat octroyé au Laboratoire sur les Chaussées et matériaux bitumineux (LCMB) de l'École de Technologier Supérieure, le 9 janvier 2014. Le projet était défini comme suit :

Votre entreprise, Alliance, veut mettre en marché un panneau de polymère expansé « Gator Base » entrant dans la composition de structure de terrasse en pavé de béton. Vous désirez que l'ÉTS étudie certaines caractéristiques de ce panneau afin que vous puissiez en faire la promotion. Vous pensez que ce panneau peut remplacer, d'un point de vue mécanique et thermique, l'équivalent de 125 mm (5 po) de pierre concassée 0-20mm placée sous une terrasse (patio) piétonne. Vous trouverez dans les paragraphes suivants comment nous pensons pouvoir répondre à vos attentes.

Vous trouverez dans les sections suivantes la description des essais réalisés ainsi que les résultats obtenus.

En espérant le tout a votre entière satisfaction, veuillez agréer, M. Tuttino, l'expression de nos sentiments les meilleurs.

Michel Vaillancourt, ing. Ph.D. Alan Carter, ing. Ph.D.
Professors, Construction Engineering Department
École de technologie supérieure.

1. DESCRIPTION ET RÉSULTATS DES ESSAIS

Dans le cadre de ce projet de caractérisation des panneaux polymère expansé (PPE) Gator Base de Alliance, plusieurs essais normalisés et non normalisés ont été réalisés. Certains de ces essais avaient été envisagés dans le mandat initial, plusieurs ont été ajoutés. Plusieurs essais portant spécifiquement sur la caractérisation des propriétés des matériaux ont été réalisés directement sur les panneaux. D'autres essais portant sur le comportement mécanique du système Gator Base de pavé en béton ont été réalisés sur une planche d'essais construite en laboratoire.

Les essais réalisés directement sur les panneaux font partie d'un groupe d'essais relativement standard pour ce type de matériaux. Sauf pour l'essai de chargement statique de longue durée qui n'est pas normalisé, les essais normalisés sont présentés ici avec la norme suivie.

- Essais de densité (LC20-067);
- Essais d'absorption (ASTM D2842-12);
- Essais de stabilité aux produits chimiques (ASTM D543-06);
- Essais de flexion (ASTM C203-05a);
- Essais de compression (ASTM D1621-10);
- Coefficient de dilatation thermique (ASTM D696-08);
- Conductivité moyenne; Conductance thermique; Résistance thermique (ASTM C518-04);
- Essais de charge statique de longue durée.

Les essais réalisés sur la planche d'essais ont permis d'évaluer et de comparer un système de pavé de béton avec le système PPE Gator Base avec un système de pavé de béton sur fondation granulaire conventionnelle de pierre concassée. Les essais ont permis de mesurer la déformation des systèmes sous chargement statique et chargement dynamique et d'en évaluer le module élastique ainsi que le module de surface.

1.1 Essais sur le PPE Gator Base

Les essais normalisés et non normalisés sont décrits dans les paragraphes suivants. On y présente l'objectif de l'essai, la procédure suivie ainsi que les résultats obtenus. Un tableau récapitulatif est présenté à la fin de cette section.

1.1.1 Dimension du PPE Gator Base

Le PPE Gator Base étudié à une dimension de 90 cm par 59,5 cm (36 po x 24 po) et possède une épaisseur de 19,05 mm (0,75 po). Sa masse totale est de 598,7 g soit un poids de 1,32lb.

1.1.2 Densité

L'essai a pour but de déterminer la masse volumique ou densité du PPE Gator Base. La densité a été déterminée par différence de pesée hydrostatique en s'inspirant de la norme LC 20-067 du Ministère des Transports du Québec. L'essai consiste à peser un échantillon du matériau à l'état sec puis de le rendre à l'état saturé superficiellement sec (SSS) en l'asséchant en surface après une immersion dans l'eau d'une durée de 24 heures. L'essai est réalisé à plusieurs reprises et la densité est prise comme la moyenne de 5 essais. Les résultats sont présentés au tableau suivant.

Tableau 1. Résultats des essais de densité

	Masse sèche, g (lb)	Volume, cm ³ (po ³)	Densité g/cm ³ (once/po ³)
Essai 1	26.2 (0.92)	429.0 (26.2)	0.0611 (0.035)
Essai 2	25.0 (0.88)	421.9 (25.7)	0.0593 (0.034)
Essai 3	25.2 (0.89)	419.3 (25.6)	0.0601 (0.035)
Essai 4	25.2 (0.89)	421.5 (25.7)	0.0598 (0.035)
Essai 5	25.3 (0.89)	416.6 (25.4)	0.0607 (0.035)
Moyenne	25.4 (0.90)	421.7 (25.7)	0.0602 (0.035)
C.V. ¹	1.86%	1.10%	1.21%

¹ C.V : Coefficient de variation = écart type relatif

Par exemple, pour l'essai 1, la densité est obtenue en faisant le rapport de la masse sèche et du volume (26,2 / 429,0 = 0,0611). La valeur de densité obtenue est de 0,0602 g/cm³ (0.035 once/po³) ou 60,2 g/litre et est conforme à ce qui était attendu. À titre de comparaison la densité de l'eau est de 1000 g/litre (578 once/po³) à 20° C.

1.1.3 Essai d'absorption

Cet essai vise à déterminer le pourcentage massique d'eau absorbé par le PPE Gator Base. Cet essai a été réalisé selon la norme ASTM D2842-12 Standard Test Method for Water Absorption of Rigid Cellular Plastics. Un échantillon du matériau est placé à 5,1cm (2 po) sous la surface de l'eau pendant 96 heures (Figure 1). La différence de masse avant et après trempage représente la quantité d'eau absorbée.

Comme le volume exact de l'échantillon ne peut pas être connu parfaitement compte tenu de ses irrégularités, il s'agit de déterminer le poids du matériau sec (Wd) et ensuite de déterminer son poids initial dans l'eau (Wi). La force de poussée d'un matériau moins dense que l'eau est égale au volume d'eau déplacé moins la masse du matériau. L'eau absorbée par le matériau diminue ainsi la force de poussée en augmentant la masse du matériau. En connaissant la force de poussée initiale ainsi que la masse sèche, il est possible de déterminer la force de poussée après la période d'immersion (Wf). La différence entre la force de poussée initiale et la force de poussée finale représente la quantité d'eau absorbée.

$$\text{Volume de l'échantillon (cm}^3\text{)} = W_i + W_d$$

$$\text{Absorption} = \left\{ \frac{W_i - W_f}{W_i + W_d} \right\} \times 100$$

Le Tableau 2 présente les résultats d'absorption des PPE Gator Base après 96 heures d'immersion. On ne peut que constater un très faible tût d'absorption de 0,26% en moyenne.

Tableau 2. Absorption du matériau

	Masse sèche g (once)	Poids dans l'eau g (once)	Poids dans l'eau après 96h g (once)	Pourcentage (%) d'absorption
Essai 1	25.8 (0.89)	384.3 (13.6)	383.3 (13.5)	0.24
Essai 2	25.3 (0.89)	390.5 (13.8)	389.4 (13.7)	0.26
Essai 3	25.2 (0.89)	391.1 (13.8)	390.0 (13.8)	0.26
Moyenne				0.26
C.V. ¹				1.15%

¹ C.V : Coefficient de variation = écart type relatif

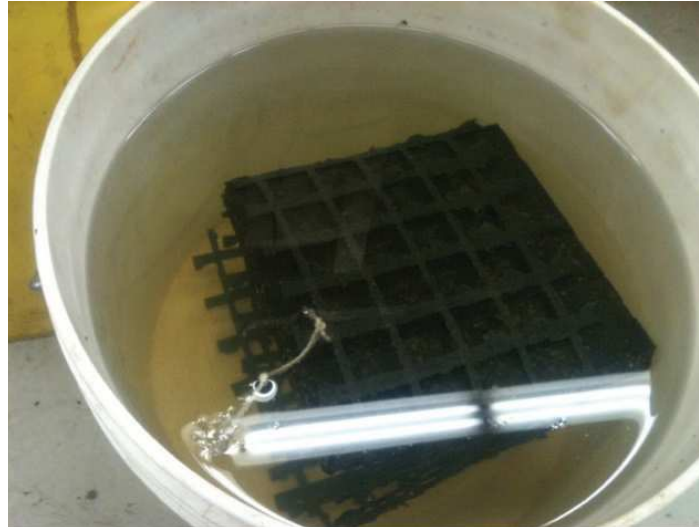


Figure 1. Essai d'absorption

1.1.4 Essai en flexion

Cet essai vise à déterminer la réponse en flexion du PPE Gator Base sous l'effet d'une force. L'essai est réalisé suivant la norme ASTM C203-05a; (Standard Test Methods for Breaking Load and Flexural Properties of Block-Type Thermal Insulation). L'échantillon de forme rectangulaire a été coupé de façon à ce qu'il puisse être mis en place sur deux appuis écartés de 200mm (8 po). Les échantillons utilisés pour l'essai font 120mm (4,7 po) de largeur par 280mm (11 po) de longueur et 19,05 mm (0,75 po) d'épaisseur. Une presse vient appliquer une force croissante sur l'échantillon au centre des deux appuis. La relation force-déplacement est enregistrée et mise sous forme graphique jusqu'à un déplacement maximum de 25 mm (1 po). Étant donné la grande flexibilité du matériau, l'essai n'a pas permis d'amener l'échantillon jusqu'à la rupture. Ces résultats ont aussi permis de déterminer le module élastique du matériau. Avec l'équation $E=PL^3/48ID$ où P désigne la charge, L la longueur de l'échantillon, I son moment d'inertie et D la déflexion à son centre et sachant que le pourcentage de déplacement du matériau est supérieur à 5% et, on obtient un module élastique de 7,51 MPa (1095 psi).

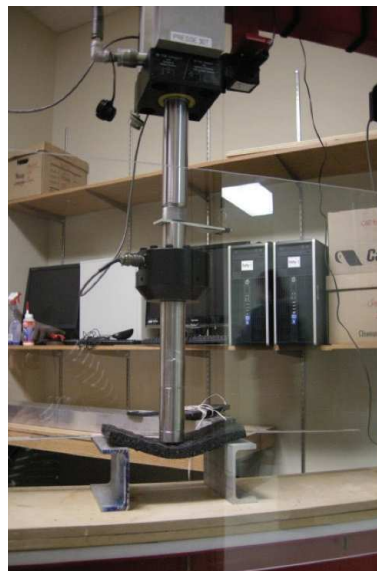


Figure 2. Essai de flexion

1.1.5 Essai de compression

L'essai vise à évaluer la compressibilité du PPE Gator Base sous chargement. L'essai est réalisé selon la norme ASTM D1621-10; (Standard Test Method for Compressive Properties of Rigid Cellular Plastics) au moyen d'une presse MTS 810 (Material Test System). Cet essai permet de déterminer la force nécessaire pour comprimer le panneau à 25%, 50% et 75% de son épaisseur initial. La force est appliquée sur un panneau taillé de 150 mm x 150 mm (6 x 6 po.) avec une surface de contact de la charge sur le panneau de 63 cm² (9.8 po²).

Tableau 3. Essai en compression sur PPE Gator Base

	25% de déformation		50 % de déformation		75% de déformation	
	Force, kN (lb)	Contrainte, kPa (PSI)	Force, kN (lb)	Contrainte, kPa (PSI)	Force, kN (lb)	Contrainte, kPa (PSI)
Essai 1	2.54 (571)	399.26 (57.91)	3.55 (798)	557.55 (80.87)	5.96 (1340)	937.48 (135.97)
Essai 2	2.42 (544)	380.40 (55.17)	3.45 (776)	542.31 (78.65)	5.90 (1326)	926.64 (134.40)
Essai 3	2.52 (567)	396.12 (57.45)	3.50 (787)	550.17 (79.79)	5.23 (1176)	821.95 (119.21)
Essai 4	2.54 (571)	399.26 (57.91)	3.60 (809)	565.88 (82.07)	6.72 (1511)	1056.16 (153.18)
Essai 5	2.48 (558)	390.15 (56.59)	3.55 (798)	558.03 (80.93)	6.06 (1362)	952.57 (138.16)
Moyenne	2.50 (562)	393.04 (57.01)	3.53 (794)	554.79 (80.47)	5.97 (1343)	938.96 (136.18)
C.V. ¹	2.0%	2.0%	1.6%	1.6%	8.9%	8.9%

C.V. ¹ Coefficient de variation = écart type relatif

Comme on peut le voir dans le Tableau 3, il faut en moyenne 393 kPa (57 psi) pour créer 25% de déformation. Pour mettre ça en perspective, les plus petits pavés qui utilisés de nos jours mesurent 300mm x 165mm (12 x 6.5 po.) pour une surface totale de 495 cm² (78 in²). Pour atteindre 393 kPa (57 psi) de contraintes, il faut appliquer une masse de 2182 kg (4800 lb) sur le pavé. De plus fortes masses sont nécessaires pour atteindre les 50% ou 75% de déformation.

Ces mêmes résultats sont présentés sur la Figure 4. On peut y voir le fait que la relation entre la contrainte et la déformation est linéaire. Grâce à ça, il est possible d'évaluer la déformation qui serait mesurée pour différentes contraintes. Par exemple, pour une pression de 55 kPa (8 psi), la déformation serait de moins de 1%.



Figure 3. Compression test

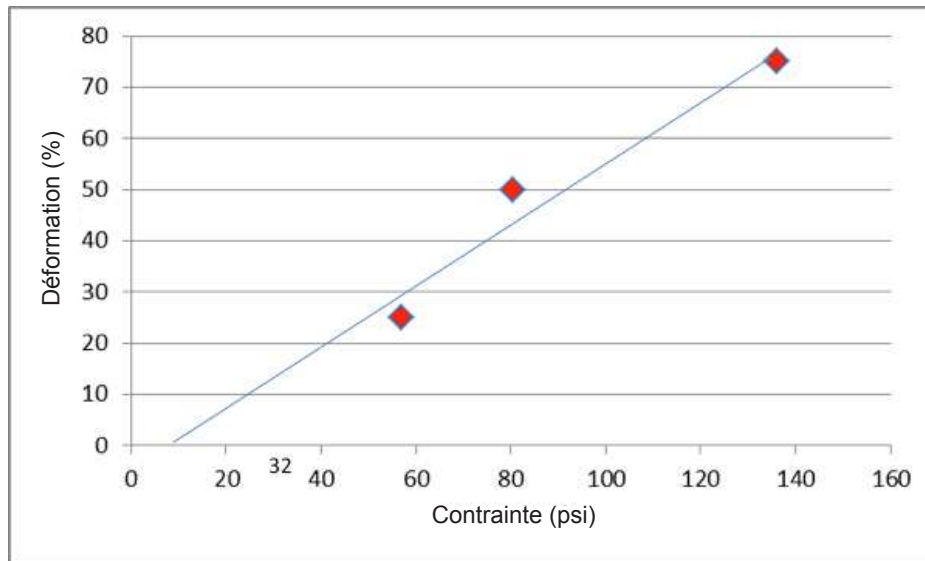


Figure 4. Contrainde vs Déformation pour l'essai de compression

1.1.6 Essai de déformation sous charge statique de longue durée

L'objectif de l'essai non normalisé consiste à évaluer la déformation produite par une masse de 11,34 kg (25 lb) appliquée uniformément de manière statique pendant 28 jours sur une section du PPE Gator Base de 15cm x 15cm. Cela représente une contrainte de 4,94 kPa ou 0,69 psi. Le Tableau 4 montre les déformations observées immédiatement après déchargement et 90 jours après déchargement. Les écarts montrent qu'en moyenne il y a 0,16 mm (0,006 po) de déformation immédiatement après le déchargement et 0,02 mm (0,0007 po) après 90 jours. Le PPE Gator Base a donc retrouvé presque entièrement son épaisseur initiale, mais conserve une déformation permanente d'environ 0,1% après 90 jours.

Tableau 4. Déformation du panneau après chargement statique de 28 jours et 90 jours après le déchargement

	Initialement mm (po)	Après 28 jours mm (po)	Écart mm (po)	Après 90 jours après déchargement	Écart mm (po)	Rétablissement après 90 jours en % ¹
Mesure 1	19.18 (0.76)	19.03 (0.75)	0.15 (0.006)	19.16 (0.76)	0.02 (0.0008)	99.9
Mesure 2	19.13 (0.75)	18.95 (0.75)	0.18 (0.007)	19.12 (0.75)	0.01 (0.0004)	99.9
Mesure 3	19.16 (0.76)	19.01 (0.75)	0.15 (0.006)	19.13 (0.75)	0.03 (0.001)	99.8
Mesure 4	19.07 (0.75)	18.91 (0.74)	0.16 (0.006)	19.06 (0.75)	0.01 (0.0004)	99.9
		Moyenne	0.16 (0.006)		0.02 (0.0008)	99.9
		C.V.	1.41% (0.05%)		0.96% (0.03%)	0.05%

¹ % Rétablissement = épaisseur après 90 jours / épaisseur initiale

1.1.7 Stabilité aux produits chimiques

Cet essai consiste à déterminer si certains produits chimiques pourraient détériorer ou altérer les PPE Gator Base. Étant donné que ces panneaux sont destinés à être utilisés sous des pavés de béton pour terrasse extérieure, seuls les principaux produits chimiques susceptibles d'être en contact avec ceux-ci ont été testés. Les essais ont été réalisés selon la norme ASTM D543-06 Standard Practices for Evaluating the Resistance of Plastics to Chemical Reagents par la méthode de trempage qui consiste à tout simplement laisser tremper l'échantillon dans la substance sur une période de 48 heures. La dimension des échantillons utilisés est de 25,4mm x 76,2mm x 19,06mm (1po x 3po x ¾po). L'observation des dégradations présentée dans le Tableau 5 se fait surtout de façon visuelle et tactile.

Tableau 5. Réaction du matériau aux substances chimiques

Type de produits chimiques	Réaction
Hydrocarbure (Essence ordinaire sans plomb)	Non réactif
Lave-glace (avec antigel)	Non réactif
Huile à moteur (5W-30)	Non réactif
Sel de déglçage (10% de concentration)	Non réactif
Diluant à peinture	Le matériau perd de sa rigidité
Nettoyeur d'efflorescence pour pavés et dalles	Non réactif

Comme on peut le voir grâce au Tableau 5, les panneaux ne réagissent pas avec les substances chimiques que l'on trouve habituellement dans les structures de terrasse. La seule réaction a été celle obtenue avec du diluant à peinture qui semble quelque peu assouplir les panneaux. Il faut néanmoins noter que pour ces tests, les panneaux sont trempés dans les substances chimiques, ce qui représente une agression plus importante que celle que l'on serait susceptible de trouver in situ.

1.1.8 Coefficient de dilatation thermique

L'essai de détermination du coefficient de dilatation thermique vise à connaître le changement de longueur d'un PPE Gator Base en fonction de la température. L'essai a été réalisé selon la norme ASTM D696-08 (Standard Test Method for Coefficient of Linear Thermal Expansion of Plastics Between -30 °C (-22°F) and 30 °C (86°F) with a Vitreous Silica Dilatometer). L'essai consiste à mesurer la dilatation thermique pour diverses températures. Ici, l'échantillon a été installé sous un dilatomètre et mis dans une chambre environnementale dans laquelle la température peut être modifiée. La longueur du matériau est prise à une température de -30 °C (-22°F) et de 30 °C (86°F). Le coefficient de dilatation thermique exprimé en mm/mm par °C est obtenu en calculant la différence des longueurs obtenues à ces températures dans l'équation suivante, $\alpha = \Delta L / L_0 \Delta T$. Le résultat de ce test est de 0,00037 mm/mm/°C (0,0002 po/po/°F). Cela peut être comparé avec le coefficient de dilatation thermique du béton qui est en moyenne de 0,000012 mm/mm/°C (0,000007 po/po/°F).



Figure 5. Dilatomètre

1.1.9 Conductivité, Conductance et Résistance thermique

Les essais d'évaluation permettant de déterminer la conductivité, la conductance et la résistance thermique ont été réalisés par un tiers selon la norme ASTM C518. Le rapport est présenté en annexe. A noter que ces essais ont été réalisés en dehors de l'ETS.

Tableau 6. Propriétés thermiques

Propriétés thermiques		Valeurs
Conductivité thermique, k		0,03990 W/(m*K) (0,0231 BTU/(hr*°F*pi))
Conductance thermique, C		1,97815 W/(m2*K) (0,34835 BTU/(hr*°F*pi2))
Résistance thermique	Facteur R (panneaux)	0,50552 (m2*K)/W (2,87066 (hr*°F*pi2)/BTU)
	Facteur R par pouce d'épaisseur	0,6319 (m2*K)/W par 25.4 mm (3,61745 hr*°F*pi2/BTU) par pouce

Les résultats des propriétés thermiques sont utilisés dans la partie sur la protection contre le gel que l'on trouvera plus loin dans ce rapport.

Le Tableau 7 suivant présente la compilation des résultats obtenus des essais énumérés.

Tableau 7. Résumé des essais de caractérisation du PPE Gator Base

	Unité métrique (impérial)	Norme
Type de matériaux	Polystyrène expansé	
Caractéristiques intrinsèques		
Épaisseur	19,05 mm (0,75' po)	LC21-067
Densité	60 g/l (3,74 lb/ft ³)	
Dimension	90cm x 59,5 cm (3ft x 2ft)	
Masse	598,7g (1,32lb)	
% Absorption	0,255%	ASTM D2842-12
Propriétés thermiques		
Conductance thermique	0,506 (m ² •K)/W (0,348 BTU/(hr•°F•pi ²))	ASTM C518-04
Résistance thermique et facteur R par po d'épaisseur	0,632 W/(m ² •K) (3,62 (hr•°F•pi ² /BTU))	ASTM C518-04
Coefficient de dilation thermique par 1°C	0.00037 mm/mm (0,0002 po/po/oF)	ASTM D696-08
Caractéristiques mécaniques		
Module élastique	7.51 MPa (1095 psi)	ASTM C203-05a
Résistance en compression		ASTM D1621-10
@25% force	393 kPa (57psi)	
@50% force	555 kPa (80psi)	
@75% force	939 kPa (136psi)	
Résistances aux produits chimiques		
Sel de déglçage (NaCl à 10% de concentration)	Non-réactif	
Hydrocarbure (essence ordinaire sans plomb)	Non-réactif	
Diluant à peinture (Térébenthine)	Le matériau perd de la rigidité	
Huile à moteur (5W-30)	Non-réactif	
Lave-glace avec antigel	Non-réactif	
Nettoyeur d'efflorescence pour pavé et dalles	Non-réactif	

1.2 Essais réalisés sur banc d'essai

1.2.1 Objectifs du banc d'essai

Afin d'évaluer le comportement des PPE Gator Base dans un système de chaussée en pavés de béton, un banc d'essai a été construit en laboratoire. Les essais réalisés sur ce banc ne sont pas normalisés et visent à mesurer les paramètres mécaniques des PPE Gator Base en remplacement d'une fondation granulaire standard. Deux types d'essais de chargement ont été réalisés sur deux systèmes différents. Des essais de chargement statiques et dynamiques ont été réalisés sur un système avec PPE Gator Base et un autre système avec fondation granulaire de 125mm (5 po) d'épaisseur.

1.2.2 Montage et instrumentation du banc d'essai

La réalisation des essais a nécessité la construction d'un banc d'essai pouvant être modifié afin d'obtenir les deux types de fondation à comparer, soit la première avec les PPE Gator Base et la seconde avec de la pierre concassée 0-20mm (0-3/4 po). Dans un premier temps, un bac d'une dimension de 1,81m par 1,81m (6 po x 6 po) par 0,30m (12 po) d'épaisseur en polyéthylène haute densité a été utilisé pour constituer la base du montage. Ce bac est disposé directement sur le sol du laboratoire constitué d'une dalle de béton. Afin de permettre la pose de chacune des couches des systèmes de pavés, des panneaux de bois de 2cm (3/4 po) d'épaisseur de 60 cm (2 pieds) de hauteur ont été posés sur le pourtour du bac et maintenu par des cornières d'acier et par une courroie tendue qui maintenait solidement le tout en place.

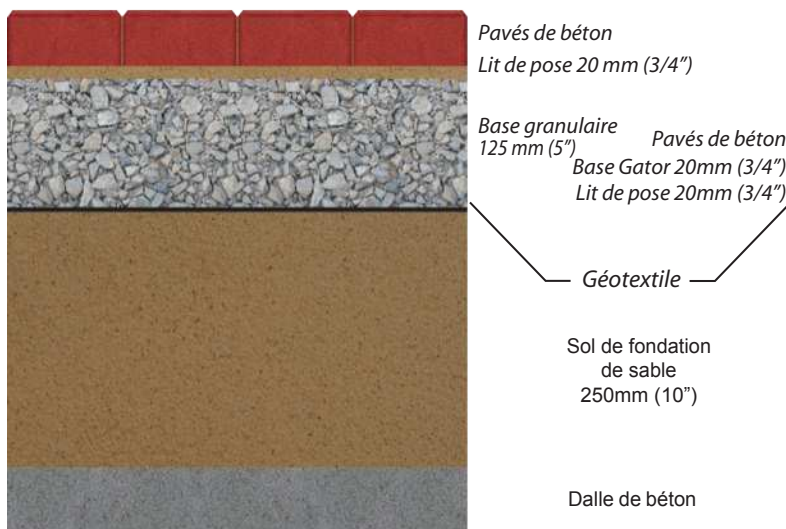
Une couche de 250mm (10 po) de sable a été utilisée de manière à reproduire le sol d'infrastructure. Des essais de mesure de la masse volumique in-situ au cône de sable (ASTM 1556-90) ont été réalisés sur le sable afin de déterminer la teneur en eau optimum et la masse volumique sèche maximum de ce matériau.

Trois cellules de charges ont été placées durant cette étape, l'une au fond du bac, la deuxième à une hauteur de 12,5cm (5 po) à partir du fond, au centre de la couche de sable et la troisième à la surface de la couche de sable, c'est-à-dire à 250mm (10 po) à partir du fond. Ces cellules de charge, qui sont reliées à un système d'acquisition, servent à déterminer la contrainte en kPa exercé par le poids du sol, du système et des charges qui seront appliqués sur les pavés durant les essais statiques. La couche de sable a été compactée à une valeur Proctor modifiée de 93%.

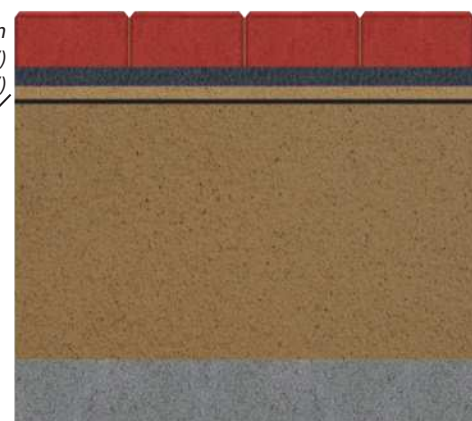
Le montage avec les PPE Gator Base a été réalisé comme suit. D'abord, un géotextile a été installé sur le sable compacté. Un lit de pose de sable d'environ 75mm (3/4 po) a été mis en place et compacté avec le pilon manuel. À l'aide d'un niveau à bulle, la surface a été nivelée afin d'enlever toutes irrégularités sur le sol.

Par la suite, les PPE Gator Base ont été installés suivant la configuration montrée à la Figure 7. Quatre jauges de déformation ont également été disposées sur le panneau central et connecté à un système d'acquisition afin de déterminer les forces en flexion que subit le panneau lors des chargements.

INSTALLATION TRADITIONNELLE



INSTALLATION DE LA BASE GATOR



*Les dimensions exactes du système complexe sont : installation traditionnelle : 450 mm (17,7 po) et l'installation avec PPE Gator Base est de 345 mm (13,6 po)

Figure 6. Banc d'essai

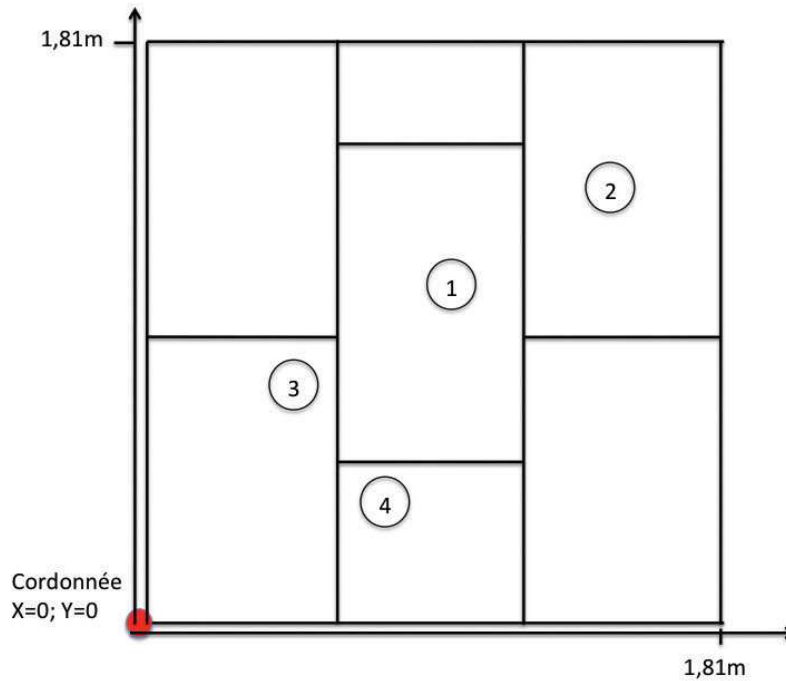


Figure 7. Configuration de la disposition des PPE Gator Base

Les pavés de béton ont ensuite été disposés selon la configuration de la Figure 8. Le modèle a été établi en prenant compte de différentes dimensions des blocs ainsi que de son agencement avec la position des PPE Gator Base. Une fois tous les blocs installés un sable polymère (sable polymère Gator Maxx) a été répandu et étendu avec un balai afin que celui-ci remplisse bien tous les joints et qu'il y ait une cohésion entre les pavés de béton. A l'aide d'un arrosoir de jardin, une petite quantité l'eau a été répandue sur la surface pour faire durcir le sable polymère Gator Maxx.

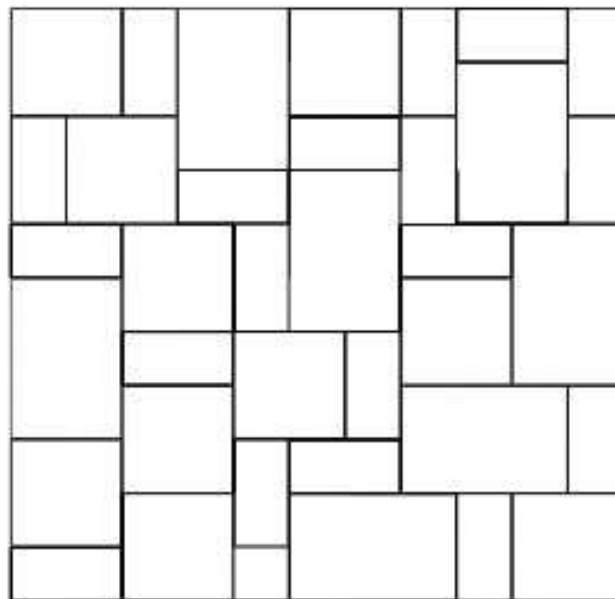


Figure 8. Configuration des pavées de béton

Le montage avec fondation de pierre concassée est très semblable au précédent. Après avoir établie la teneur en eau optimum et la masse volumique sèche maximum de la pierre concassée, elle a été mise en place en une seule couche compactée à 95,6% de la densité Proctor modifiée sur une membrane géotextile. Un lit de pose de sable d'environ 20mm (3/4 po) a été mis en place et compacté avec le pilon manuel et nivelé. Les pavées ont par la suite été déposées sur le lit de pose en respectant le même modèle qu'avec les PPE Gator Base, c'est-à-dire en suivant la configuration de la Figure 6. Ceux-ci ont ensuite compacté pour faire contact avec le sol. Un sable polymère a été étendu sur la surface dans les joints et humidifié avec de l'eau.

1.2.3 Essais de chargement sur les systèmes

Des essais de chargement statiques ont été réalisés sur le banc d'essai. Le banc d'essai est gradué en coordonnées cartésiennes à partir du coin inférieur gauche. Compte tenu des dimensions du bac, le point central se situe aux coordonnées 96,5 en X et 97,5 en Y (96,5 ; 97,5). Un capteur LVDT (Linear Variable Differential Transformer) a été fixé à une cornière d'acier ajustable lui permettant un mouvement selon le déplacement des pavés. Les essais ont été réalisés à différents points sur le montage et sur différentes surfaces de contact afin d'avoir une bonne représentativité dans les résultats. Les essais étaient effectués à des distances de 20 , 30, 40 , 50 , 60 et 70 cm (7.9, 11.8, 1.7, 19.7, 23.6 and 27.6 po) de la charge de manière à tracer le bassin de déflexion. Les pavés de béton qui n'ont pas servis au montage ont été utilisés comme chargement statique en les empilant les uns sur les autres pour une charge maximale de 266 kg (586 lb). Dans le cadre de ces essais, deux valeurs de chargement ont été appliquées, 113,4kg (249,5 lb) et 264,9 (582,8 lb). Deux surfaces de chargement ont également été considérées, 0,11m² (avec un diamètre de 374 mm (15 po)) et 0,018m² (diamètre de 151mm (6 po)).

Le capteur LVDT est placé en contact avec la surface (Figure 9) à une des distances énumérées précédemment par rapport à un point de chargement déterminé sur le montage et montré à la Figure 10. Le capteur est ensuite initialisé à zéro sur le système d'acquisition relié à celui-ci. Une plaque de dimension déterminée est ensuite déposée sur un mince lit de sable directement sur le point où se trouvera la charge. Plusieurs pavés sont ensuite placés sur la plaque de façon à avoir le chargement visé tel que montré à la Figure 11. Le chargement a été réalisé à quatre endroits selon des coordonnées précises tel qu'indiqué sur la Figure 10.

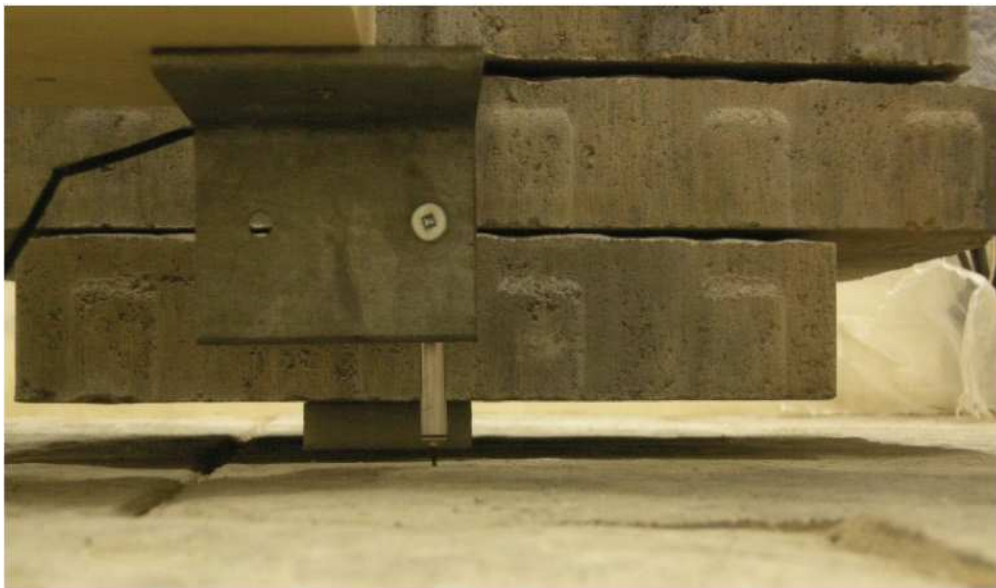


Figure 9. Exemple de chargement statique et vue du LVDT

Les essais ont été faits suivant un patron de chargement préétabli comprenant différents agencements de pavés et panneaux, c'est-à-dire :

1. Charge entièrement sur un pavé et vis-à-vis un panneau complet ;
2. Charge entièrement sur un pavé et sur le joint de deux panneaux ;
3. Charge entre plusieurs pavés et vis-à-vis un panneau complet ;
4. Entre plusieurs pavés et vis-à-vis un joint de deux panneaux.

Les résultats sont récapitulés dans le Tableau 8.

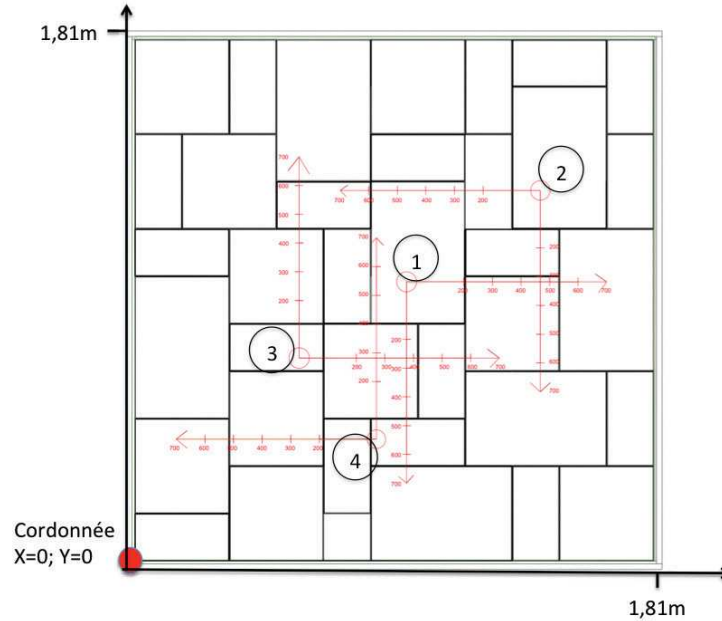


Figure 10. Emplacement des essais de chargement statiques et dynamiques

Tableau 8. Essais de chargement statique sur planche d'essai

	Épaisseur totale mm (pc)	Charge kg (lb)	Déplacement mm (pc)	Déformation %	Module de surface EV2 Mpa (psi)
Installation Gator Base PPE	345 (13.6)	113.4 (250)	0.040 (0.0016)	0.01	67.3 (9761)
		264.9 (584)	0.093 (0.0037)	0.027	65.3 (9471)
Installation traditionnelle	450 (17.7)	113.4 (250)	0.032 (0.0013)	0.007	84.1 (12201)
		264.9 (584)	0.051 (0.002)	0.01	119.1 (17280)



Figure 11. Exemple de la mesure du bassin de déflexion pour un chargement statique

1.2.4 Essais à chargement dynamique

Des essais de charge dynamique ont aussi été réalisés à l'aide d'un déflectomètre à masse tombante portable le LWD (Light Weight Deflectometer) (Figure 12). En laissant tomber sur une plaque une masse connue d'une hauteur connue, cet appareil crée un bassin de déflexion à la surface du pavé. Cette déflexion est mesurée au moyen de trois géophones placés à intervalle régulier à partir du dessous de la plaque. Le LWD est branché à un système d'acquisition de données qui indique la force appliquée ainsi que le déplacement à l'endroit de l'impact ainsi qu'à 30 cm (12 po) et 60 cm (24 po) de centre de la plaque. À partir de ces données, le logiciel de l'appareil calcul le module équivalent en surface et par rétro-calcul permet d'estimer le module de rigidité de chacune des couches de la structure.

Lors des essais dynamiques sur le montage avec pierre concassée, les charges ont été laissées tomber au même endroit, et ce même si la configuration des panneaux n'était plus un en jeu.



Figure 12. Exemple d'un essai de chargement dynamique au moyen d'un LFWD

Le Tableau 8 et 9 présentent un résumé des résultats obtenus des essais de chargement statiques et dynamiques réalisés sur la planche d'essais en pavés de béton. Ces essais avaient pour but de comparer le système de pavés conventionnels avec 125 mm (5 po) de pierre concassée 0-20 mm (0-3/4 po) comme fondation avec le système de PPE Gator Base.

Tableau 9. Essais de chargement dynamique LWD sur planche d'essai

	Épaisseur totale mm (pc)	Contrainte kPa (psi)	Déflexion mm (pc)	Module dynamique Elfdw Mpa (psi)
Installation Gator Base PPE	345 (15,6)	279 (40.5)	0.554 (0.021)	88.1 (12 778)
Installation traditionnelle	450 (17.7)	279 (40.5)	0.446 (0.018)	113.9 (16 520)

2. ANALYSE DES RÉSULTATS

Dans cette section, une analyse des résultats est présentée. Plusieurs aspects des résultats obtenus seront discutés. Dans un premier temps la protection contre le gel des panneaux de polymère comparé à la pierre concassée sera discutée. Par la suite, l'influence de la position et de la grandeur de la charge sera analysée pour les deux systèmes de pavés et les deux types de chargement.

2.1 Protection contre le gel

Le gel du sol d'infrastructure sur lequel est construit le système de pavés de béton peut entraîner des déformations à la surface du pavage. Bien que les deux systèmes étudiés n'offrent qu'une protection partielle contre le gel, il apparaît que la résistance thermique (pouvoir isolant) des PPE Gator Base est meilleure que celui de la pierre concassée. En fait, selon la porosité de la fondation granulaire, son épaisseur doit être plus grande que celle d'un PPE Gator Base afin d'assurer le même degré d'isolation. La Figure 13 nous indique, selon la porosité de la fondation granulaire, quelle épaisseur de pierre concassée est équivalente au pouvoir isolant d'un seul panneau. Par exemple, une pierre concassée 0-20mm (0-3/4 po) sèche et bien compactée (95% Proctor) possède une porosité de 0,2 (20%). Il faut donc près de 400mm (15,7 po) de pierre concassée pour égaler le pouvoir isolant d'un seul PPE Gator Base. Notons que le pouvoir isolant de la pierre concassée humide diminue.

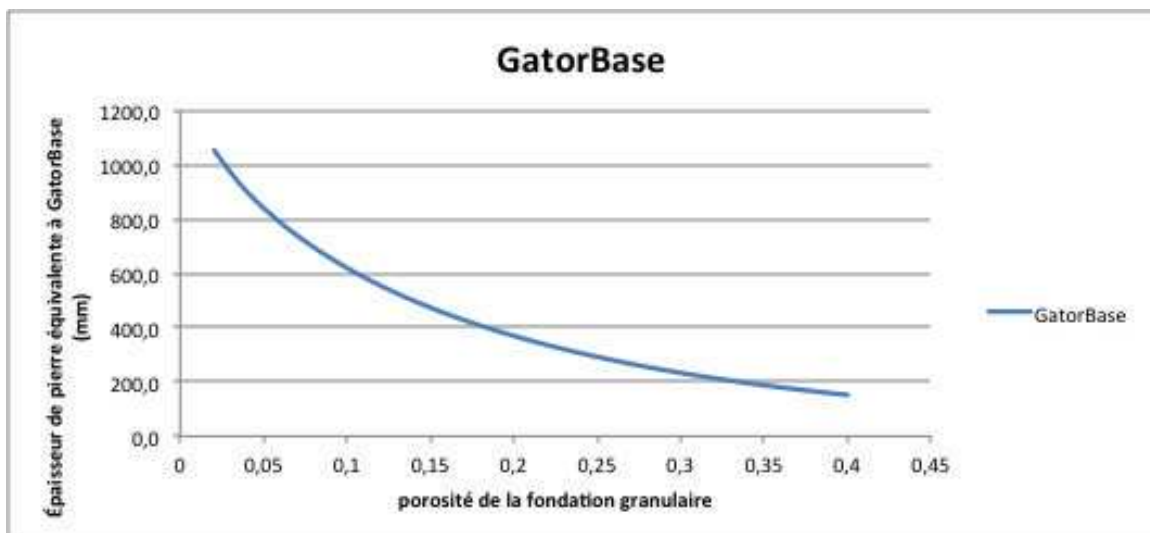


Figure 13. Graphique de l'épaisseur équivalente de fondation granulaire 0-20mm (0-3/4 po) selon sa porosité comparée à l'épaisseur d'un PPE Gator Base.

2.2 Essais de chargements statiques

Dans le cadre des essais à chargement statique, plusieurs grandeurs de contraintes ont été appliquées à différentes positions de la surface des systèmes de pavés. Comme il a été mentionné précédemment, la position des chargements couvre plusieurs cas possibles, dont le chargement sur un pavé, entre deux pavés, vis-à-vis d'un PPE Gator Base ou entre deux PPE Gator Base.

Les figures 14a, 14b et 14c présentent les bassins de déflexion de trois charges statiques à quatre positions différentes et selon les axes X et Y. La première constatation qui est faite et que les bassins de déflexions mesurés sont très semblable les uns par rapport aux autres et ce peu importe leur position. Les figures 14a et 14b indiquent des tassements allant de 0,05mm environ à proximité de la charge et tendant vers 0,0 à 700mm de la charge. On peut constater que la position d'application de la charge ne joue pas ou très peu sur le bassin de déflexion.

Ces mêmes figures montrent la faible importance de la pression appliquée sur le bassin de déflexion. Comme on le constate, les bassins de déflexion de la Figure 14a sont très semblables à ceux de la Figure 14b. Pourtant la pression de contact pour les essais montrés à la Figure 14a est de 10,56 kPa et la pression des essais montrés à la figure 14b est de 63,1 kPa. De plus les bassins de déflexion montrés en 14c sont deux fois plus grands que les deux autres avec une pression de contact de 23,67 kPa, ce qui est plus petit qu'en 14b. Ce qui influence le plus les bassins de déflexion dans ce type de chargement n'est donc pas la surface de contact, mais bien la charge appliquée. En effet, la charge appliquée de la Figure 14c est de 264, 9 kg ce qui est plus de deux fois la charge appliquée en 14a et 14b. Les bassins de déflexion sont aussi deux fois plus grands.

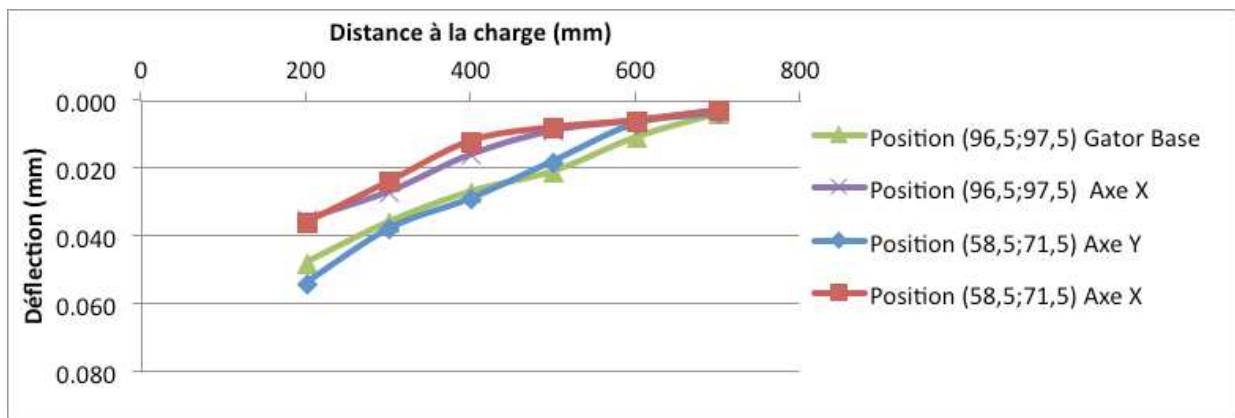


Figure 14a Bassins de déflexion pour deux positions (96,5 ; 97,5) et (58,5 ; 71,5) ainsi qu'une contrainte de 10,56 kPa (1,53 psi) (113,4 kg (250 lb) sur une surface de 0,11m² (170,5 po²)) appliquée sur un système avec PPE Gator Base

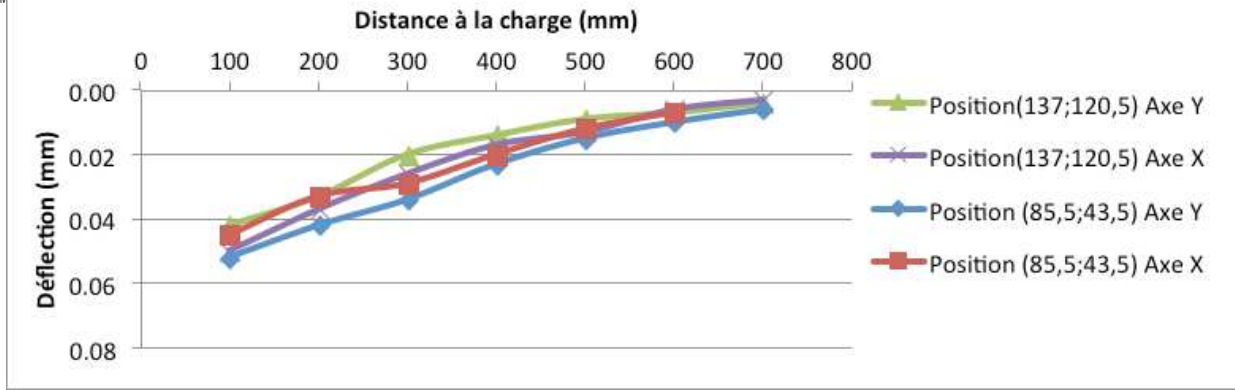


Figure 14b Bassins de déflexion pour deux positions (137,0 ; 120,5) et (85,5 ; 43,5) ainsi qu'une contrainte de 63,1 kPa (9,15 psi) (113,4 kg (250 lb) sur une surface de 0,018m²) appliquée sur un système avec PPE Gator Base

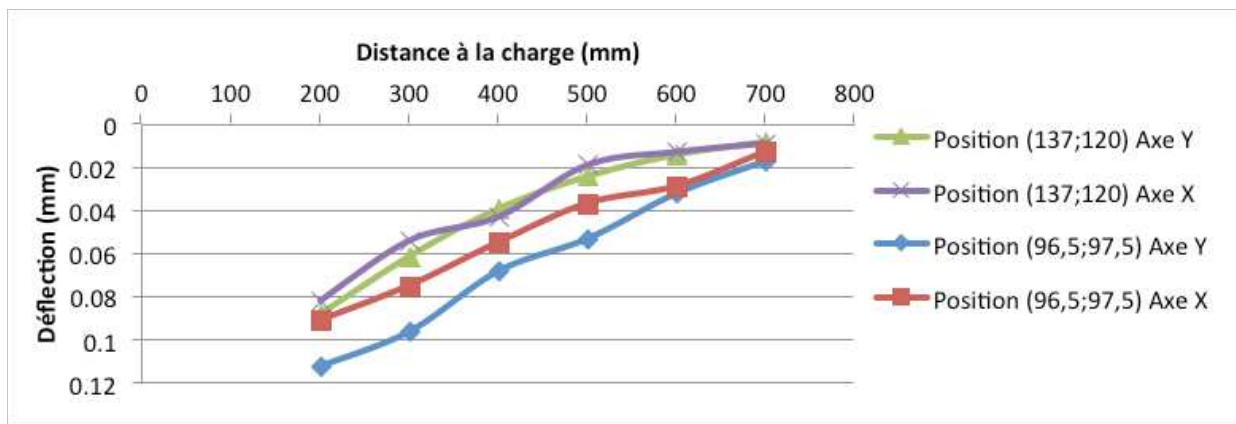


Figure 14c Bassins de déflexion pour deux positions (137,0 ; 120,5) et (96,5 ; 97,5) ainsi qu'une contrainte de 23,67 kPa (3,43 psi) (264,9 kg sur une surface de 0,11m²) appliqués sur un système avec PPE Gator Base

Des résultats équivalents en termes de forme et de comportement des bassins de déflexion ont été observés sur le système avec fondation granulaire. Cependant l'importance des bassins de déflexion est légèrement moindre dans le cas de système avec fondation granulaire. Comme l'indique la Figure 15, pour une même position d'essai, une même charge et une même pression de contact, la déflexion est de 0,004mm (0,00015 po) à 0,019mm (0,00075 po) Il faut mentionner que ces déformations sont élastiques et sont dans le domaine des petites déformations.

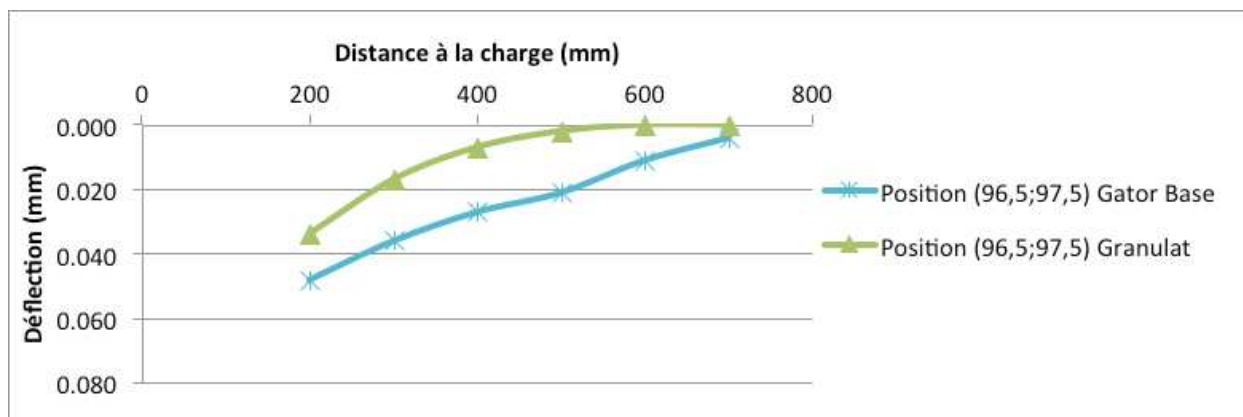


Figure 15 Comparaison des déflexions des systèmes PPE Gator Base et Granulat sur l'axe Y à la position (96,5 ; 97,5) et pour une charge de 20,56 kPa (2,98 psi) (113,4 kg (250 lb) sur une surface de 0,11 m² (170 po²))

2.3 Essais de chargements dynamiques

Les essais de chargement dynamique par déflectomètre à masse tombante portable (LFWD) ont été réalisés de manière ponctuelle sur chacune des couches de chacun des systèmes. L'objectif étant de mesurer la réponse de la couche en terme de déplacement et de module dynamique ELFWD sous un impact et de comparer le système de pavés de béton avec PPE Gator Base avec celui avec fondation granulaire de pierre concassée 0-20mm (0-3/4 po).

2.3.1 Essais sur le sable

Les essais ont été réalisés sur la couche d'infrastructure en sable compacté à 93% de la densité Proctor modifiée. Les résultats sont présentés à la Figure 16. Cette figure, ainsi que les suivantes, montre le lien direct entre la déformation et le module ELFWD sous l'application d'une masse tombante dont la force d'impact varie entre 264 kN (59 350 lb) et 283 kN (63 621 lb). Cette variation de la force d'impact s'explique principalement par la légère variation du contact entre la plaque de l'appareil qui est de 200mm (7,9 po) de diamètre et la surface de la couche sur laquelle est réalisé l'essai. Cette surface de contact va varier d'un essai à l'autre. Sur le sable, la déformation moyenne mesurée est de 799µm (0,031 po) pour un module moyen de 60,6 MPa (8789 psi). Cette valeur de module est de l'ordre de grandeur attendu pour un sable dans cet état de compacité.

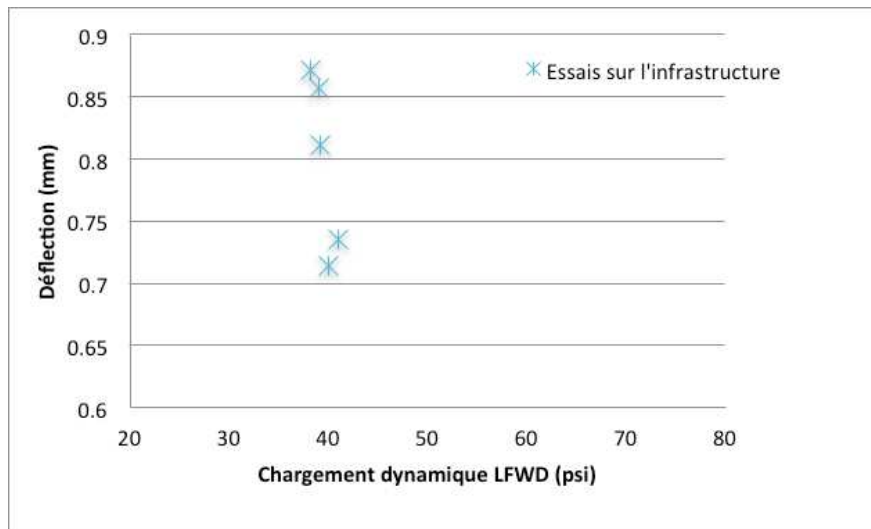


Figure 16. Résultats des essais de LFWD sur la couche d'infrastructure (sable).

2.3.2 Essais sur le système avec PPE Gator Base

Après avoir mis en place les PPE Gator Base sur la couche de sable, une nouvelle série d'essais LFWD

a été réalisée directement sur les PPE Gator Base. Par la suite, le montage a été achevé avec les pavés de béton et le sable polymère durcit. La Figure 17 montre les résultats de l'ensemble des séries d'essais comprenant la série sur le sable, la série sur les PPE Gator Base et la série sur le système final.

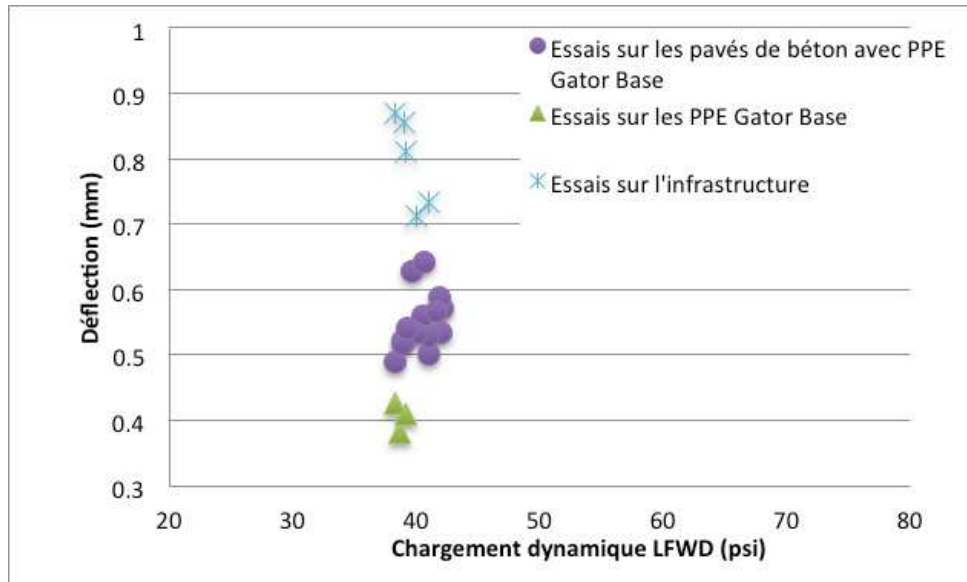


Figure 17. Séries d'essais sur chacune des couches composant le système de pavés de béton avec PPE Gator Base

Une analyse la Figure 17 montre que la déformation obtenue sur les pavés dans ce système (554µm (0,02 po) en moyenne) est plus importante que la déformation obtenue directement sur les panneaux (408µm (0,016 po) en moyenne). Le corolaire de cette observation est que le module obtenu sur les PPE Gator Base (115 MPa (16679 psi)) est plus grand que celui obtenu sur les pavés (88,1 MPa (12778 psi)).

2.3.3 Essais sur le système avec fondation granulaire 0-20mm

Une analyse similaire a été réalisée sur le système de pavés de béton avec fondation granulaire de 0-20mm (0-3/4 po). La Figure 18 illustre les résultats obtenus en termes de déplacement et de module. On observe ici que le déplacement moyen de la surface sous l'impact de la masse diminue avec l'ajout des couches supplémentaires. Le déplacement passe de 799µm (0,031 po) sur le sable à 732µm (0,029) sur la fondation granulaire à 446µm (0,018 po) sur les pavés jointés la rigidité du système. En termes de rigidité, l'ajout des couches de la structure augmente le module moyen ELFWD qui passe de 60,6 MPa (8789 psi) sur le sable à 64,8 MPa (9398 psi) sur la fondation granulaire à 113,6 MPa (16476 psi) sur les pavés jointés.

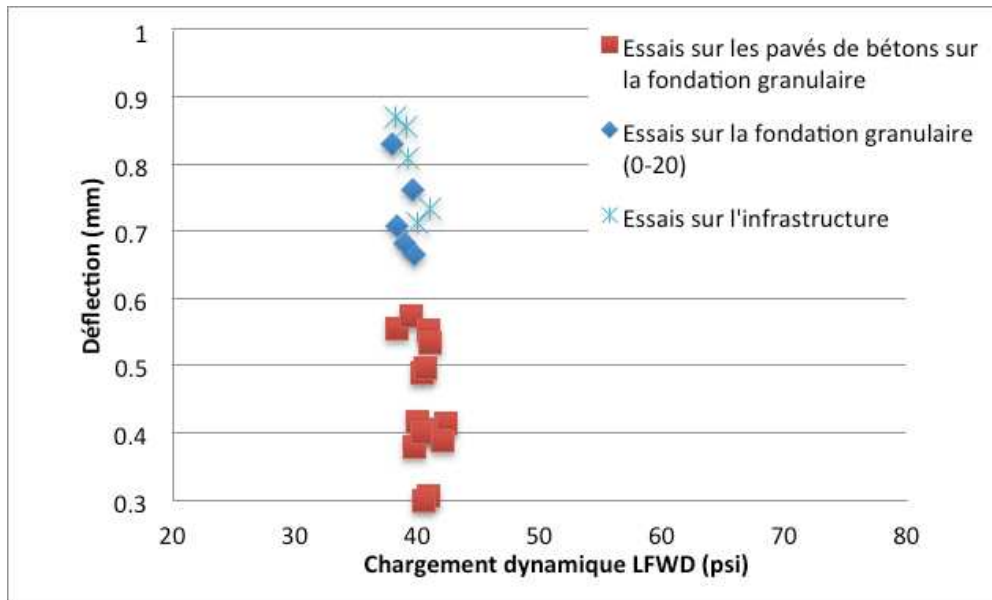


Figure 18. Comparaison des déflexions obtenues sur l'infrastructure, la fondation granulaire et sur les pavés de bétons.

2.3.4 Comparaison entre le système avec PPE Gator Base et le système avec fondation granulaire

Tel que l'on observe aux Figures 17 et 18 et qui est mis en évidence à la Figure 19, les résultats d'essais de LFWD réalisés directement sur les PPE Gator Base ou sur la fondation granulaire sont très différents. Les déplacements mesurés sur les PPE Gator Base sont beaucoup plus faibles que ceux sur la fondation granulaire. De même, les modules ELFWD sur PPE Gator Base sont plus élevés que sur fondation granulaire.

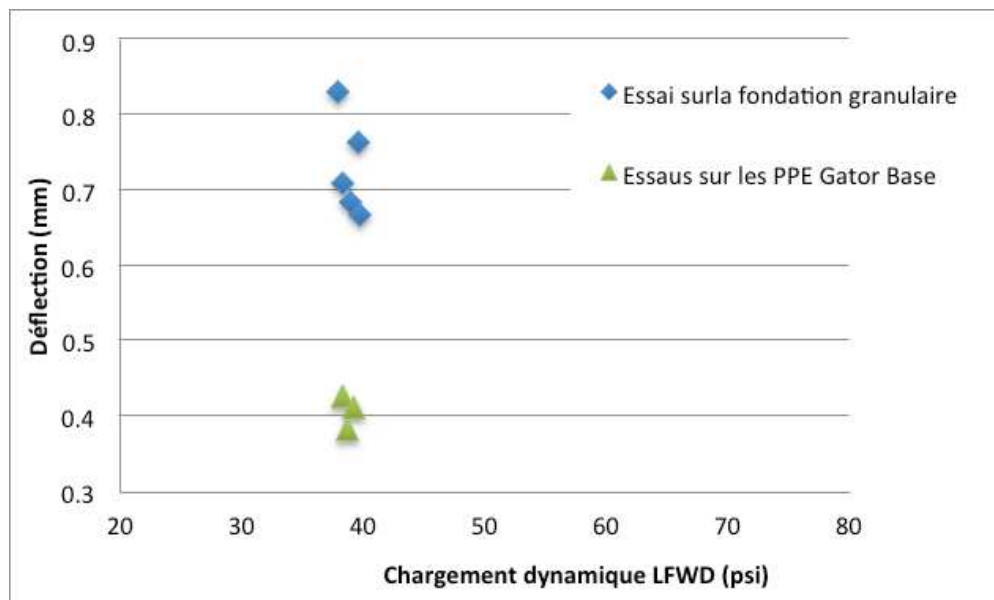


Figure 19. Résultats d'essais directement sur PPE Gator Bas et sur fondation granulaire

D'après ces résultats, on peut dire que les PPE Gator Base répartissent la charge de manière efficace lorsqu'elles sont surjetées à des chargements dynamiques.

Finalement, la Figure 20 permet de comparer les résultats des essais sur le système avec PPE Gator Base et le système avec fondation granulaire. La déformation moyenne du système avec panneaux est de $554\mu\text{m}$ (0,02 po) et le module moyen ELFWD est de 88,1 MPa (12778 psi). Pour le système avec fondation granulaire la déformation moyenne est de $446\mu\text{m}$ (0,018 po) et le module moyen ELFWD est de 113,6 MPa (16476 psi).

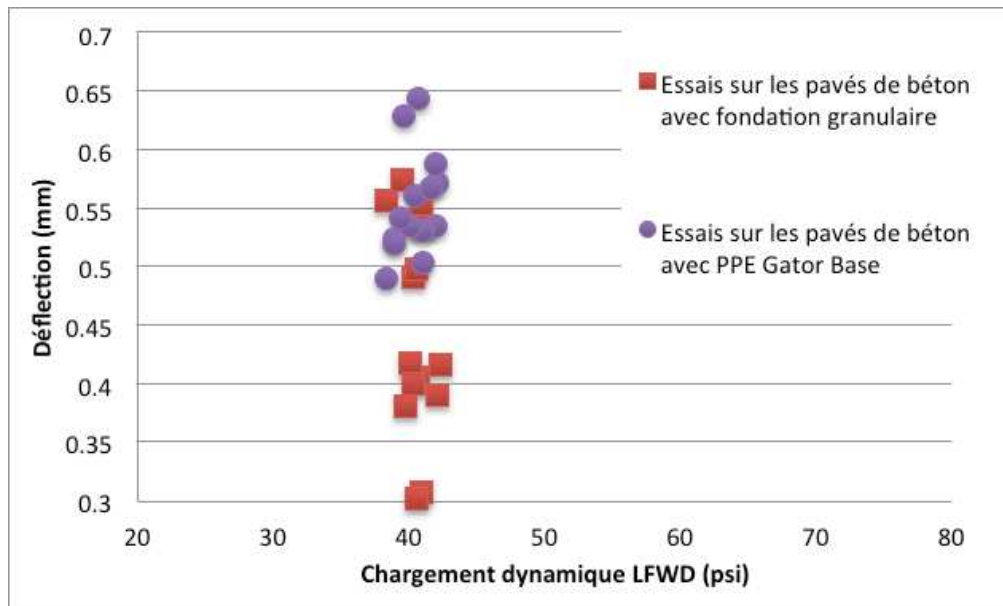


Figure 20. Comparaison des résultats des essais réalisés sur pavés pour les systèmes avec PPE Gator Base et fondation granulaire

On se rencontre que même si les résultats moyens vont en faveur du système avec fondation granulaire, certains résultats se chevauchent. Selon cet ordre de grandeur, les résultats obtenus indiquent des systèmes de fondation de pavés de béton comparable.

Normalement on devrait s'attendre à ce que l'augmentation de l'épaisseur de la structure du système de pavés augmente sa rigidité et diminue sa déformation tel qu'on peut l'observer sur la Figure 17. Cependant ce n'est pas le cas pour le système avec PPE Gator Base. Une explication probable porte sur la mobilisation de la surface impliquée lors de l'impact de la masse tombante. Sur le sable et la fondation granulaire, l'impact de la masse est transféré au matériau par l'entremise de la plaque du LFW de manière très localisée. Étant donné que les matériaux granulaires n'ont pas de résistance en traction, la plaque de l'appareil poinçonne la surface granulaire et déforme localement le matériau. Sur les PPE Gator Base, étant donné qu'il s'agit d'un matériau lié, de bonne dimension et interconnectée de surcroît, la surface mobilisée au moment de l'impact répartit la force sur une plus grande surface. La contrainte est donc dissipée verticalement et horizontalement dans les panneaux. Le déplacement est donc moindre et le module plus élevé. Cependant, cette capacité à répartir la force est annulée par le système de pavés qui augmente la friction entre les panneaux et le sable et limite donc la mobilisation de l'ensemble des panneaux au moment de l'impact. La contrainte est dissipée plutôt verticalement dans une couche plus mince que pour la fondation granulaire et donc le déplacement est plus important.

CONCLUSIONS

Les résultats comparatifs entre les systèmes de fondation de pavés de béton avec fondation granulaire et avec PPE Gator Base sont très intéressants. On se rend compte qu'il peut-être envisageable d'utiliser des PPE Gator Base en remplacement d'une fondation granulaire.

Afin d'assurer un meilleur comportement, le système actuel de pavé de béton avec fondation de PPE Gator Base ne devrait être utilisé que pour les terrasses piétonnes et de jardin.

Dans des conditions similaires à celles recréées en banc d'essai, les déformations d'un système de pavés de béton avec PPE Gator Base sous charges statiques ou dynamiques sont équivalentes à celles d'un système avec fondation granulaire. Cependant, compte tenu de la plus grande résistance thermique des PPE Gator, la protection au gel devrait être meilleure avec ces derniers qu'avec une fondation granulaire conventionnelle.

Les sols d'infrastructure devraient être compacté à au 93% de sa densité Protor. On doit prévoir un géotextile et un coussin granulaire sous les panneaux afin d'avoir une surface homogène et uniforme.