



Valorisation des bardeaux d'asphalte dans les routes non pavées

Rapport final

Marie-Hélène BEAUDOIN-GAGNON et Mayka THIBODEAU (CERMIM)

Février 2020



Affilié à l'UQAR

Les partenaires du CERMIM



Valorisation des bardeaux d'asphalte dans les routes non pavées - Rapport final

Marie-Hélène BEAUDOIN-GAGNON, Agente de recherche – Gestion environnementale¹

Mayka THIBODEAU, Directrice associée – Recherche et contenu scientifique¹

En collaboration avec Marc-Olivier MASSÉ¹, Isabelle CUMMINGS¹, Olivier RICHARD, ¹,
Etienne PICHÉ¹ et Mathieu NUTH²

Révisé par Audrey MERCIER REMILLARD ¹ et Haingonarivo RABENASOLO ¹

¹ Centre de recherche sur les milieux insulaires et maritimes (CERMIM)

37, chemin Central

C.P. 2280, Havre-aux-Maisons

Îles-de-la-Madeleine (Québec) G4T 5P4 Canada

Courriel : cermim@uqar.qc.ca

² Université de Sherbrooke

2500, boulevard de l'Université

Sherbrooke (Québec) J1K2R1 Canada

Février 2020

Partenaires du projet



Ce document doit être cité comme suit :

Beaudoin-Gagnon, M.-H., Thibodeau, M. (2020). *Valorisation des bardeaux d'asphalte dans les routes non pavées – rapport final : Initiative de recyclage et de valorisation des résidus provenant du secteur de la construction, de la rénovation et de la démolition*. Centre de recherche sur les milieux insulaires et maritimes, Îles-de-la-Madeleine (Québec), xiii, 75 p. + annexes.

REMERCIEMENTS

Le présent projet a été réalisé par le Centre de recherche sur les milieux insulaires et maritimes (CERMIM) en collaboration avec la *Municipalité des Îles-de-la-Madeleine*, l'*Université de Sherbrooke*, *Terrassement Maxime Deblois*, *P&B Entreprises* et grâce à l'appui financier de *RECYC-QUÉBEC* et de la *Municipalité des Îles-de-la-Madeleine*.

Les auteurs du rapport souhaitent remercier sincèrement tous les partenaires qui ont partagé leurs connaissances techniques et leur expérience au bénéfice du projet : les Services techniques et réseaux publics de la *Municipalité des Îles-de-la-Madeleine*, le département de génie civil et de génie du bâtiment de l'*Université de Sherbrooke*, *Terrassement Maxime Deblois* et *P&B Entreprises*.

TABLE DES MATIÈRES

REMERCIEMENTS.....	V
TABLE DES MATIÈRES.....	VII
LISTE DES TABLEAUX.....	IX
LISTE DES FIGURES	X
LISTE DES ANNEXES	XI
LISTE DES SIGLES ET DES ACRONYMES	XIII
SOMMAIRE	1
1. INTRODUCTION	5
1.1. Contexte	5
1.2. Objectifs et retombées du projet.....	7
1.3. Objectifs du présent rapport	7
1.4. Partenaires techniques	8
2. RÉSUMÉ DES ÉTAPES DU PROJET.....	8
3. ÉTAPES DU PROJET	11
3.1. Évaluation des différentes avenues de valorisation	11
3.1.1. Mélange d'enrobés bitumineux à chaud	11
3.1.2. Rapiéçage des nids-de-poule	13
3.1.3. Routes non pavées.....	14
3.2. Recherche et développement.....	14
3.2.1. Recommandations et prédictions	17
3.3. Identification d'un équipement de conditionnement	17
3.3.1. Critères du granulat	18
3.3.2. Enjeux et particularités liés au choix de l'équipement	18
3.3.3. Équipements évalués	19
3.4. Identification d'un lieu pour le banc d'essai	23
3.5. Détermination des exigences légales.....	24
3.6. Aménagement du site de conditionnement	26
3.7. Conditionnement des bardeaux d'asphalte	27
3.7.1. Tri des bardeaux d'asphalte	27
3.7.2. Broyage des bardeaux d'asphalte	28
3.7.3. Analyse du taux de contamination.....	32
3.7.4. Entreposage des bardeaux d'asphalte broyés	35
3.8. Réalisation d'un banc d'essai	36
3.8.1. Organisation des travaux.....	36
3.8.2. Travaux préparatoires.....	37
3.8.3. Planche d'essai.....	38
3.8.4. Transport des bardeaux d'asphalte	40
3.8.5. Retrait des clous	40
3.8.6. Réalisation des mélanges de gravier et de bardeaux d'asphalte	41
3.8.7. Compaction.....	42

3.9. Analyse économique de la filière	44
3.9.1. Réception des bardeaux d'asphalte	44
3.9.2. Activités de conditionnement	44
3.9.3. Activité de valorisation	52
3.9.4. Rentabilité de la filière	52
3.10. Évaluation d'autres équipements de broyage	53
3.11. Mise en place de la filière.....	54
3.11.1. Exigences réglementaires.....	54
3.11.2. Élaboration du fonctionnement de la filière.....	57
3.12. Évaluation d'autres avenues de valorisation.....	58
3.13. Étape après-projet.....	59
4. MÉTHODOLOGIE POUR LA QUANTIFICATION DES OBJECTIFS MESURABLES.....	59
4.1. Taux de substitution et propriétés mécaniques	60
4.2. Quantité de bardeaux d'asphalte valorisés	60
4.3. Émissions de GES évitées	60
4.4. Économie pour la municipalité.....	61
4.5. Gains économiques pour les partenaires industriels	61
4.5.1. Conditionneur	61
4.5.2. Valorisateur.....	61
5. RETOMBÉES DU PROJET	62
5.1. Définition de la filière et du potentiel de développement	62
5.2. Développement d'une avenue de valorisation.....	63
5.3. Matières résiduelles détournées de l'enfouissement et GES évité	63
5.4. Retombées économiques	63
6. RECOMMANDATIONS POUR LA MISE EN PLACE D'UNE FILIÈRE.....	65
6.1. Aspects réglementaires	65
6.2. Dimensionnement de l'équipement	65
6.3. Entreposage des bardeaux d'asphalte broyés	65
6.4. Rentabilité.....	66
6.5. Qualité du tri	66
6.6. Risque de contamination à l'amiante.....	67
6.6.1. Coût d'entrée au CGMR	67
6.6.2. Création d'un comité	67
7. CONCLUSION.....	68
RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES	70
ANNEXES.....	75

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1. Retombées mesurables du projet.....	4
Tableau 2. Objectifs mesurables	7
Tableau 3. Activités réalisées et à venir dans le cadre du projet	9
Tableau 4. Informations sur les planches d'essai.....	39
Tableau 5. Résultats des tests de compaction.....	43
Tableau 6. Analyse économique du broyage avec le broyeur Packer 750	46
Tableau 7. Analyse économique du broyage avec le broyeur Jeffrey.....	47
Tableau 8. Analyse économique du broyage avec le broyeur AK-230.....	49
Tableau 9. Analyse économique du broyage avec le broyeur BM-309	51
Tableau 10. Analyse économique liée à la valorisation des BAPC dans une route	52
Tableau 11. Répartition des apports en BAPC par mois.....	56
Tableau 12. Gains et économies potentiels pour les partenaires.....	64

LISTE DES FIGURES

Figure 1. Bardeaux d'asphalte accumulés au CGMR	6
Figure 2. Utilisation d'asphalte à sollicitation légère (Rectiligne, s.d.).....	12
Figure 3. Rapiéçage des nids-de-poule avec mélange contenant des BAPC (Permaroute, s.d.)	13
Figure 4. Mélange de sable silteux et de BAPC (30 %) (Nuth, 2019)	16
Figure 5. Granulat de BAPC.....	18
Figure 6. Broyeur AK - 230.....	20
Figure 7. Broyeur Morbark 3600.....	21
Figure 8. Broyeur Peterson Pacific 2400B	22
Figure 9. Broyeur BM-309	23
Figure 10. Plan des aires de conditionnement, d'entreposage et d'utilisation des BAPC	25
Figure 11. Plan du nouveau tracé	26
Figure 12. Site de conditionnement.....	27
Figure 13. Contaminants retirés lors du deuxième tri.....	28
Figure 14. Schéma du système de broyage.....	29
Figure 15. Tamis perforés suite au broyage des BAPC	30
Figure 16. Trémie d'alimentation du broyeur tordue.....	31
Figure 17. Couteaux avant et après broyage des BAPC.....	32
Figure 18. Contaminants retirés des BAPC broyés.....	33
Figure 19. Super-sacs contenant des BAPC broyés	36
Figure 20. Fondation du banc d'essai	38
Figure 21. Vue du plan du banc d'essai	39
Figure 22. Transport des super-sacs.....	40
Figure 23. Convoyeur aimanté installé sur le convoyeur de sortie de la benne de mélange ...	41
Figure 24. Benne de mélange utilisée pour réaliser le mélange de gravier et de BAPC	42
Figure 25. Coupure entre deux planches d'essai.....	43
Figure 26. Gicleur installé sur le broyeur pour contrôler les poussières.....	54
Figure 27. Conteneur (AGB, 2018).....	58

LISTE DES ANNEXES

Annexe 1 – Rapport de l’UdeS

Annexe 2 – Devis-pilote

Annexe 3 – Avis de non-assujettissement

Annexe 4 – Rapport d’analyse sur l’amiante

Annexe 5 – Plans de coupe

Annexe 6 – Preuves de dépenses relatives au projet

Annexe 7 – Diagramme de Gantt

LISTE DES SIGLES ET DES ACRONYMES

AM22	Autorisation en vertu de l'article 22 de la Loi sur la qualité de l'environnement
BAPC	Bardeaux d'asphalte postconsommation
BNQ	Bureau de normalisation du Québec
CERMIM	Centre de recherche sur les milieux insulaires et maritimes
CGMR	Centre de gestion des matières résiduelles
CRD	Construction, rénovation et démolition
GES	Gaz à effet de serre
GÎM	Gaspésie-Îles-de-la-Madeleine
GMR	Gestion des matières résiduelles
ÎdM	Îles-de-la-Madeleine
ÎPE	Île-du-Prince-Édouard
LET	Lieu d'enfouissement technique
LQE	Loi sur la qualité de l'environnement
MELCC	Ministère de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques
MTMDET	Ministère du Transport, de la Mobilité durable et de l'Électrification des transports
MR	Matières résiduelles
UdeS	Université de Sherbrooke
UQAR	Université du Québec à Rimouski

SOMMAIRE

Aux Îles-de-la-Madeleine (ÎdM), entre 300 et 400 t de bardeaux d'asphalte sont générées annuellement par le secteur de la construction, rénovation et démolition (CRD). La masse importante de cette matière rend l'exportation très coûteuse. Pour cette raison, elle est accumulée au Centre de gestion des matières résiduelles (CGMR) en attente de trouver une solution pour la valoriser. Pour remédier à cette problématique, le Centre de recherche sur les milieux insulaires et maritimes (CERMIM) a réalisé un projet dans le cadre d'un appel de propositions de *RECYC-QUÉBEC* pour soutenir des initiatives de recyclage et de valorisation des résidus provenant du secteur de la CRD. Le présent projet vise la mise en place d'une filière durable de valorisation des bardeaux d'asphalte postconsommation (BAPC).

Les objectifs du projet sont les suivants :

- 1) Élaborer une procédure de conditionnement et d'entreposage des BAPC;
- 2) Déterminer une méthode de valorisation des BAPC;
- 3) Déterminer et acquérir les équipements de conditionnement;
- 4) Élaborer les demandes de certificats d'autorisation environnementale pour la poursuite de la filière.

Le projet s'appuie sur l'expertise technique de ses partenaires. L'*Université de Sherbrooke (UdeS)* a réalisé les travaux de recherche dans ses laboratoires de génie civil et de génie du bâtiment. *Terrassement Maxime Deblois* a effectué le conditionnement des BAPC et *P&B Entreprises* a fait le mélange de graviers et de BAPC broyés. Le banc d'essai a été réalisé avec la collaboration et sous la supervision du département des services techniques et des réseaux publics de la *Municipalité des Îles-de-la-Madeleine*.

Initialement, l'intégration des BAPC dans l'asphalte à sollicitation légère était envisagée. Toutefois, le *Ministère de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques (MELCC)* n'étant pas favorable à ce projet, l'équipe a dû explorer d'autres avenues de valorisation pour cette matière. L'intégration de cette matière dans un revêtement de route non pavée a ainsi été ciblée. Des recherches ont été effectuées dans les laboratoires du département de génie civil de l'*UdeS* afin de tester plusieurs mélanges à différentes teneurs en BAPC dans le but de déterminer la proportion idéale pour la

réalisation du banc d'essai. Des tests de granulométrie, de compaction et de perméabilité réalisés ont démontré que 15 % du gravier pourraient être remplacés par du BAPC.

Une prise de contact avec le MELCC a permis d'évaluer les exigences en lien avec la réalisation de ce projet, soit l'obtention d'un avis de non-assujettissement nous permettant de réaliser le banc d'essai sans avoir l'autorisation ministérielle en vertu de l'article 22 de la *Loi sur la qualité de l'environnement* (AM22). La mise en place de la filière nécessite toutefois l'obtention d'une AM22 ainsi que la mise en place de mesures de mitigation telles que des abris étanches pour l'entreposage et le conditionnement de cette matière résiduelle (MR). De plus, les matériaux granulaires doivent respecter les normes du *Ministère des Transports, de la Mobilité durable et de l'Électrification des transports* (MTMDET) afin de pouvoir être utilisés à grande échelle.

Un lieu pour la réalisation du projet de démonstration a été ciblé avec l'équipe des Services techniques et réseaux publics de la *Municipalité des Îles-de-la-Madeleine* : il s'agit d'une route d'accès pour le nouveau parc industriel. Le banc d'essai a été divisé en trois planches afin de tester trois mélanges différents.

Un équipement de conditionnement a été ciblé et acquis par le CERMIM. Il s'agit d'un équipement de laboratoire permettant de faire la démonstration des méthodes de conditionnement et de valorisation : le broyeur BM-309. Pour réaliser le banc d'essai, 60 t de BAPC ont été triées et broyées. Un aimant a également été acquis afin de retirer les clous encore présents après le broyage. Les copeaux de BAPC ont été mélangés au gravier dans une benne de mélange conçue par *P&B Entreprises*. Comme recommandé par l'*UdeS*, deux mélanges ont ainsi été réalisés, soit un mélange contenant 5 % de matières recyclées, et un autre en contenant 15 %. La mise en place a été réalisée par des sous-traitants mandatés par les Services techniques et réseaux publics de la municipalité sous la supervision du contremaître municipal et de Mathieu Nuth, Ph. D., ing., professeur responsable des travaux de recherche à l'*UdeS*. Les tests de compaction réalisés sur les planches d'essai ont montré de bons résultats; les taux de compaction variaient entre 91 % et 100 % (compaction visée : 95 %). L'analyse du comportement de la route dans le temps nécessitera la réalisation de plusieurs tests un an après la construction de la route. Ces tests permettront de vérifier que ce matériau granulaire respecte les caractéristiques géotechniques prescrites par la norme BNQ 2560-114 du Bureau de normalisation du Québec (BNQ).

Une analyse économique a été réalisée : elle considère l'ensemble des étapes, les équipements, les infrastructures et les autorisations ministérielles nécessaires à la mise en place de la filière. Elle a permis de cibler le broyeur Packer 750, un équipement qui permet de réaliser le conditionnement des BAPC au coût de 100 \$ par tonne (\$/t). L'intégration des BAPC au gravier dans une benne de mélange peut être réalisée au coût de 33 \$/t. Ainsi, la réception, le conditionnement et la valorisation des BAPC pourraient être réalisés pour un coût de 133 \$/t, soit 17 \$ de moins que le coût de l'exportation. Les frais d'entrée du CGMR de moins de 20 \$/t pour les particuliers et de 150 \$/t pour les entrepreneurs ne permettent pas de couvrir le coût de la valorisation. Pour que la filière soit rentable, la municipalité devra augmenter les frais d'entrée au CGMR pour les particuliers à 125 \$/t; le coût pour les entrepreneurs restant le même.

Afin de documenter les retombées du projet, des méthodologies ont été élaborées pour chacun des indicateurs. Les MR sorties du CGMR pour le projet ont été pesées avec la balance municipale. Une méthodologie basée sur les analyses de cycle de vie a été utilisée pour quantifier les émissions de GES évitées par la valorisation locale de ce résidu de CRD.

La réalisation du projet a généré plusieurs retombées. Les principaux résultats sont l'identification et la démonstration de la faisabilité technicoéconomique de l'intégration des BAPC dans une route non pavée et le développement d'une filière de valorisation autonome pour une MR problématique aux Îles-de-la-Madeleine (ÎdM). Les travaux de l'*UdeS* ont démontré que les mélanges respectent les normes du *MTMDET* en laboratoire. Les travaux réalisés à la suite du projet permettront de confirmer que ces normes sont également respectées sur le terrain. Les retombées mesurables du projet sont présentées au tableau 1.

Tableau 1. Retombées mesurables du projet

Retombées du projet		Indicateur
Environnementale	Matières résiduelles détournées de l'enfouissement	60 t 350 t/an*
	Émissions de GES évitées	0,8 t éq CO ₂ 5 t éq CO ₂ /an*
Économique	Économies pour la Municipalité des Îles-de-la-Madeleine	12 720 \$ 74 200 \$/an*
	Gains pour les partenaires	35 000 \$ - pour le conditionneur 37 500 \$ - pour le valorisateur
	Création d'emplois	1 emploi consolidé 1 emploi consolidé*

*Retombées potentielles à la suite du projet

La réussite d'une filière de valorisation des BAPC en milieux insulaires ou en régions éloignées repose sur plusieurs facteurs clés. L'identification d'un équipement de conditionnement qui est bien dimensionné en fonction des besoins est primordiale pour assurer sa rentabilisation. L'équipement devrait également permettre de broyer d'autres résidus de CRD. La qualité du tri est indispensable pour assurer que la matière puisse être utilisée dans les routes, puisque le MELCC exige que les taux de contamination soient inférieurs à 1 % massique. Il est également proposé de mettre en place des méthodes de gestion de l'amiante. De plus, la création d'un comité de gestion pour assurer que la filière soit mise en place à la suite du projet est recommandée.

1. INTRODUCTION

Chaque année, entre 170 000 et 200 000 tonnes (t) de bardeaux d'asphalte sont générées au Québec. À l'heure actuelle, plusieurs avenues de valorisation pour cette matière résiduelle (MR) issue de travaux de construction, de rénovation et de démolition (CRD) ont été démontrées, notamment la valorisation énergétique ou l'intégration dans les mélanges bitumineux à chaud (*RECYC-QUÉBEC, 2018*). Cependant, les règlements québécois contraignent la mise en place de cette dernière méthode. La valorisation énergétique reste donc la principale voie.

Faute de méthode de valorisation pour cette matière aux Îles-de-la-Madeleine (ÎdM), le Centre de recherche sur les milieux insulaires et maritimes (CERMIM) a développé un projet visant la mise en place d'une filière de valorisation des bardeaux d'asphalte dans les routes non pavées. *RECYC-QUÉBEC* a retenu ce projet dans le cadre d'un appel de proposition visant à soutenir des initiatives de recyclage et de valorisation des résidus provenant du secteur de la CRD. Le présent document vise à présenter l'ensemble du travail effectué pour mener à bien ce projet de valorisation des bardeaux d'asphalte postconsommation (BAPC).

Ce rapport est divisé en quatre sections. L'ensemble des étapes réalisées dans le cadre du projet sont d'abord détaillées. Ensuite, les méthodologies utilisées pour quantifier les retombées sont exposées. Puis, les retombées du projet sont présentées. Finalement, des recommandations sont proposées pour la suite de la filière.

1.1. Contexte

Aux ÎdM, l'éloignement géographique contribue à accentuer les enjeux liés à la gestion des matières résiduelles (GMR) puisque les coûts qui y sont associés sont décuplés en raison de leur exportation jusqu'au lieu d'enfouissement technique de l'Île-du-Prince-Édouard (ÎPE).

Les bardeaux d'asphalte constituent une problématique importante au Centre de gestion des matières résiduelles (CGMR) en raison de la masse du matériau qui augmente les coûts d'exportation. Cette matière est donc accumulée sur le site du CMGR dans l'attente de la mise en place d'une filière de valorisation ou de leur exportation (figure 1). La quantité de BAPC accumulée est inconnue; cette masse est en constante évolution en raison des apports annuels. Les coûts associés à l'exportation des BAPC sont évalués à

200 \$ par tonne (\$/t) s'ils sont exportés au lieu d'enfouissement technique (LET) de Saint-Rosaire et de 150 \$/t s'ils sont enfouis à ÎPE. À ce coût s'ajoutent les émissions des gaz à effet de serre (GES) générées par le transport et la gestion en fin de vie évaluées à 232 kg éq CO₂ par tonne.

Dans son nouveau plan de gestion des matières résiduelles, la municipalité mentionne d'ailleurs la nécessité de trouver de nouvelles filières de valorisation pour cette matière (*Municipalité des Îles-de-la-Madeleine, 2016*). Par ailleurs, les techniques atypiques d'installation de bardeaux d'asphalte aux ÎdM complexifient le broyage puisque le goudron augmente les risques d'agglomération des particules. En effet, les bardeaux d'asphalte sont entièrement recouverts de goudron afin de résister aux forts vents. Cette distinction pourrait toutefois constituer un avantage pour la méthode de valorisation visée.

En somme, l'accumulation de BAPC, l'apport annuel, les coûts d'exportation et les émissions de GES générées par le transport accentuent la nécessité de trouver une solution de valorisation locale. Le présent projet constitue une solution partielle et pourrait permettre de valoriser le gisement annuel de BAPC ainsi qu'une partie de l'accumulation.



Figure 1. Bardeaux d'asphalte accumulés au CGMR

1.2. Objectifs et retombées du projet

Le présent projet vise la mise en place d'une filière durable de valorisation de BAPC. Pour y parvenir, les objectifs suivants ont été définis :

- 1) Élaboration d'une procédure de conditionnement et d'entreposage des BAPC;
- 2) Détermination d'une méthode de valorisation pour les BAPC;
- 3) Identification et acquisition d'équipements permettant de faire le conditionnement;
- 4) Élaboration des demandes d'autorisation environnementale pour la poursuite des activités après la fin du projet.

Le tableau 2 décrit les objectifs mesurables ciblés lors du dépôt du projet. En outre, la méthodologie permettant de les quantifier est présentée à la section 4. **Méthodologie pour la quantification des retombées mesurables.**

Tableau 2. Objectifs mesurables

Indicateurs	Objectifs mesurables ciblés	Retombées du projet
Quantité de bardeaux d'asphalte valorisés	Entre 100 et 300 t	60 t 350 t*
Quantité de gravier extrait évitée	Entre 100 et 300 t	50 t 350 t*
Émissions de GES évitées par la valorisation	Entre 5 et 15 t éq CO ₂	13,9 t éq CO ₂ 81 t éq CO ₂ *
Économie pour le CGMR en GMR	Entre 20 000 \$ et 60 000 \$	5 110 \$ 29 800 \$*
Revenus pour <i>P&B Entreprises</i>	Non identifiés	35 800 \$*
Revenus pour <i>Terrassement Maxime Deblois</i>	Non identifiés	35 000 \$*
Création d'emplois durables	1 technicien	1 emploi consolidé 1 emploi consolidé*

*Retombées potentielles du projet advenant la valorisation du gisement annuel de BAPC

1.3. Objectifs du présent rapport

Le présent rapport a pour objectif de décrire l'ensemble du travail effectué dans le cadre du projet et de présenter les embûches rencontrées afin de permettre de reproduire ce projet dans d'autres régions où les BAPC constituent une matière problématique.

1.4. Partenaires techniques

Afin de mener à bien ce projet, l'équipe du CERMIM s'appuie sur l'expertise technique de plusieurs partenaires. Un chercheur du département de Génie civil de l'*Université de Sherbrooke* (UdeS) ainsi que l'une de ses étudiantes participent au projet afin d'évaluer la proportion de BAPC optimale pouvant être intégrée au gravier en vue d'améliorer les propriétés mécaniques du mélange de granulats (section **3.2 Recherche et développement**).

Par ailleurs, le CERMIM collabore également avec deux partenaires industriels qui pourront assurer la continuité de la filière de valorisation. En effet, *Terrassement Maxime Deblois*, un entrepreneur travaillant dans la collecte et le transport des CRD, collabore au projet et sera responsable du conditionnement des BAPC. *P&B Entreprises*, une usine de béton bitumineux, œuvrant également dans la construction de routes non pavées, utilisera les BAPC lors de la construction des routes non pavées.

Finalement, le département d'Hygiène du milieu de la *Municipalité des Îles-de-la-Madeleine* est un partenaire du projet puisqu'il approvisionnera le conditionneur en BAPC, alors que les Services techniques et réseaux publics de la *Municipalité des Îles-de-la-Madeleine* utiliseront les BAPC broyés dans la construction et la recharge des routes non pavées.

2. RÉSUMÉ DES ÉTAPES DU PROJET

Le tableau 3 décrit les étapes du projet réalisées. Le diagramme de Gantt contenant les échéances prévues initialement ainsi que les échéances révisées est présenté à l'annexe 7.

Tableau 3. Activités réalisées et à venir dans le cadre du projet

Période	Activités réalisées	Section
Avril 2018	- Évaluation des exigences règlementaires en lien avec la valorisation des bardeaux d'asphalte	3,5
	- Recherche d'autres avenues de valorisation	3,1
	- Envoi d'échantillons à l'UdeS	3,2
	- Rédaction de l'entente de consortium	
	- Rencontre de début de projet	
Mai 2018	- Début des activités de recherche à l'UdeS	3,2
	- Identification et analyse des équipements de conditionnement	3,3
	- Identification et caractérisation d'un site pour réaliser un projet de démonstration et élaboration du devis pilote	3,4
	- Rencontre de suivi de projet	
Juin 2018	- Dépôt d'un devis-pilote au MELCC	4,5
	- Test de l'équipement de conditionnement ciblé	4,3
	- Rédaction et dépôt d'un addenda au projet	
Juillet 2018	- Validation du recyclat avec l'UdeS	4,3
	- Ajout de <i>Terrassement Maxime Deblois</i> au consortium (rencontre, signature de l'entente de consortium, de lettre d'appui et de lettre d'engagement)	
Août 2018	- Proposition d'achat du broyeur par le CERMIM	5,3
Septembre 2018	- Analyse du projet d'acquisition du Broyeur BM-309 par le CERMIM	Annexe 5
	- Planification du protocole de conditionnement	
Octobre 2018	- Évaluation et démonstration du taux de location aux projets de recherche	Annexe 5
	- Rédaction du rapport d'étape	
Novembre 2018	- Modification du calculateur budgétaire	4
	- Attente d'une réponse de <i>RECYC-QUÉBEC</i>	
	- Rédaction du rapport d'étape	
	- Rédaction des méthodologies de suivi des indicateurs	
	- Rencontre de suivi de projet	
Décembre 2018	- Commande de l'équipement de conditionnement	3,3
	- Révision du rapport d'étape	

Valorisation des bardeaux d'asphalte dans les routes non pavées : rapport final

Janvier 2019	- Suivi de la demande d'autorisation au MELCC	
Février 2019	- Réception de l'autorisation du MELCC - Élaboration d'une procédure de transfert des bardeaux d'asphalte du CGMR au site de conditionnement	Annexe 4 3,7
Mars 2019	- Dépôt du rapport de mi - projet - Réception et installation du broyeur - Installation de l'entrée électrique - Expédition d'échantillons d'asphalte recyclé à l'UdeS - Modification de l'abri de conditionnement	3,6 3,2 3,6
Avril 2019	- Conditionnement des bardeaux d'asphalte - Documentation des procédures	3,7 3,7
Mai 2019	- Conditionnement des bardeaux d'asphalte - Demande de modification au MELCC (changement de tracé de la route)	4,7 3,5
Juin 2019	- Suivi auprès du MELCC - Poursuite des travaux de recherche à l'UdeS	3,2
Juillet 2019	- Suivi auprès du MELCC - Poursuite des travaux de recherche à l'UdeS	3,2
Août 2019	- Suivi auprès du MELCC - Poursuite des travaux de recherche à l'UdeS	3,2
Septembre 2019	- Planification des travaux de construction de la route - Obtention de l'avis de non-assujettissement pour la réalisation du banc d'essai - Poursuite des travaux de recherche à l'UdeS	3,8 3,5 3,2
Octobre 2019	- Poursuite des travaux de recherche à l'UdeS - Rédaction du rapport final	3,5
Novembre 2019	- Poursuite des travaux de recherche à l'UdeS - Réalisation des deux mélanges de BAPC et de gravier - Évaluation de pistes de recommandations - Analyse économique - Fonctionnement de la filière	3,8 3,8.5 6 3,9
Décembre 2019	- Remplir les demandes de certificat d'autorisation pour les partenaires industriels - Finaliser les travaux de recherche à l'UdeS - Présentation de fin de projet aux partenaires	Annexe 6 Annexe 2

3. ÉTAPES DU PROJET

Cette section détaille chacune des étapes réalisées dans le cadre du projet.

3.1. Évaluation des différentes avenues de valorisation

Comme la valorisation des BAPC dans l'asphalte à sollicitation légère prévue initialement a été écartée en raison des exigences réglementaires (section **3.1 Évaluation des différentes avenues de valorisation**), la première étape du projet a été de trouver un autre débouché pour cette matière. Afin de déterminer une solution alternative pour poursuivre le projet, différentes avenues de valorisation ont été évaluées.

Bien qu'il existe de nombreuses avenues pour les BAPC, plusieurs méthodes restent marginales au Québec. Cette section présente la liste des méthodes de valorisation évaluées dans le cadre du projet et les raisons pour lesquelles elles ont été rejetées ou adoptées. Toutes ces méthodes concernent la construction de routes puisque l'un des membres du consortium est une entreprise qui œuvre dans la construction de routes; ce critère était important afin que le projet soit avantageux pour chacun des partenaires.

3.1.1. Mélange d'enrobés bitumineux à chaud

L'intégration de fines de BAPC dans un mélange d'enrobés bitumineux à chaud était initialement visée dans le cadre du présent projet. Cette utilisation est très intéressante puisqu'elle permet de donner une valeur ajoutée à cette matière résiduelle (Noël, 2006, et Malo, 2013). En effet, le bardeau d'asphalte substitue des matériaux très coûteux tels que le bitume ainsi que les agrégats qui sont importés en totalité de Matane.



Figure 2. Utilisation d'asphalte à sollicitation légère (Rectiligne, s.d.)

Cette voie de valorisation a dû être écartée pour plusieurs raisons. Premièrement, le *MELCC* exige des analyses de rejets atmosphériques lorsque le bardeau d'asphalte est chauffé dans un procédé ainsi que des modélisations atmosphériques réalisées par une firme d'experts (Bernardin, 2018). Ces études s'avèrent coûteuses et les installations à mettre en place nécessitent aussi d'importants investissements. Deuxièmement, le *Regroupement des récupérateurs et recycleurs de matériaux de construction, de rénovation et de démolition du Québec (3RMCDQ)* était en discussion avec le *MELCC* depuis de nombreuses années afin de revoir les exigences réglementaires liées à ce procédé en réalisant une étude générique, c'est-à-dire, en étudiant trois cas représentant différents types d'usine (Bernardin, 2018). Troisièmement, l'ajout de bardeau d'asphalte dans le procédé nécessite une modification d'autorisation ministérielle en vertu de l'article 22 (AM22) de la *Loi sur la qualité de l'environnement (LQE)*. Comme l'usine de *P&B Entreprises* a été conçue avant la création de la LQE, cette usine, comme la majorité des usines de béton bitumineux, possède des droits acquis. Une demande de modification de AM22 conduirait en la perte de ce droit acquis et ultimement en la perte du droit d'exploiter leur usine. Finalement, le partenaire industriel possédant une usine de fabrication de béton bitumineux est en litige avec le *MELCC* en raison des nombreuses plaintes liées aux odeurs. Le bureau régional du *MELCC* était donc fortement défavorable à un projet qui impliquerait l'ajout des matières dans l'usine de *P&B Entreprises*. Pour toutes ces raisons, toute méthode de valorisation nécessitant un chauffage direct ou indirect des BAPC a été écartée.

3.1.2. Rapiéçage des nids-de-poule

L'utilisation des BAPC pour le rapiéçage de nids-de-poule à froid a été explorée (figure 2). Une entreprise de Saint-Adolphe, *Permaroute*, manifestait son intérêt à collaborer avec le consortium sur le projet. Cette entreprise a développé un produit à haute teneur en BAPC afin de colmater les nids-de-poule à froid en utilisant un bitume moins visqueux que le bitume conventionnel. Ainsi, il ne nécessite aucun chauffage (Roy, 2018).



Figure 3. Rapiéçage des nids-de-poule avec mélange contenant des BAPC (Permaroute, s.d.)

Cette piste aurait pu constituer une méthode de valorisation complémentaire à l'utilisation dans les routes non pavées. Toutefois, étant donné que les nids-de-poule sont colmatés à l'interne par la *Municipalité des Îles-de-la-Madeleine*, que celle-ci vient d'acquérir une machinerie neuve pour effectuer cette tâche, et que le volume de matière valorisable par cette voie reste marginal, cette option a donc été écartée pour l'instant.

3.1.3. Routes non pavées

Dans la littérature, l'intégration de BAPC dans les routes de gravier permet de remplacer 30 % du gravier alors que l'utilisation dans les routes constituées d'un mélange de gravier et d'asphalte recyclé permettait de remplacer 10 % de l'asphalte recyclé (Surwilo, 2003). Ces taux de substitution sont intéressants comparativement à ceux des enrobés bitumineux évalués entre 3 et 5 % (Noël, 2006, et Malo, 2013). Bien que le matériau substitué représente un intérêt économique moindre que le bitume, cette avenue permet de valoriser de grandes quantités de BAPC. En outre, cet apport, dans les routes non pavées, améliore les propriétés mécaniques de la route en raison de la plasticité du matériau. De plus, cette utilisation ne nécessite aucun chauffage et est relativement simple. Pour toutes ces raisons, cette méthode de valorisation a été privilégiée dans le cadre du projet.

3.2. Recherche et développement

Des travaux de recherche ont été effectués par l'UdeS afin de faire la caractérisation géotechnique complète des mélanges contenant différentes proportions de BAPC et de les comparer avec les granulats naturels. Le but étant d'évaluer si le comportement du mélange avec des matériaux recyclés est supérieur ou équivalent au comportement d'un matériau granulaire sans matériaux recyclés. Ultiment, ces travaux permettent de déterminer la quantité de BAPC qui pourra se substituer au gravier pour créer un revêtement routier qui répond aux exigences du *MTMDET*. L'ensemble de la méthodologie et des résultats est présenté dans le rapport de l'UdeS disponible à l'annexe1.

La première étape fut de définir la granulométrie idéale des BAPC broyés pour les utiliser dans un revêtement routier. Afin d'éviter le phénomène de migration des particules fines ou encore de ségrégation, il est recommandé d'utiliser des granulats avec une granulométrie similaire au gravier de 0 - $\frac{3}{4}$ pouce. Pour valider cette hypothèse, des BAPC broyés avec le Broyeur BM-309 ont été expédiés au laboratoire de l'UdeS. Des analyses granulométriques ont donc été effectuées sur le gravier local et sur le BAPC broyé. Ces tests ont démontré qu'une grille de $\frac{3}{4}$ pouce disposée à la sortie du broyeur BM-309 permettait d'obtenir une granulométrie adéquate pour cet usage.

Afin de vérifier que les mélanges contenant différentes proportions massiques de BAPC respectent les caractéristiques intrinsèques des matériaux exigés par la norme BNQ 2560-114, des tests et des essais ont été réalisés suivant les protocoles LC 21-070, LC 21-101, LC 21-400 et LC 21-080. Des tests granulométriques ont été effectués sur du gravier des IdM et sur les BAPC broyés. (Nuth, 2020)

Des essais de Proctor modifiés ont ensuite été réalisés selon le protocole ASTM D1557 sur quatre mélanges contenant entre 5 % et 30 % de BAPC afin de comparer les résultats à un échantillon témoin composé uniquement de gravier. Les essais ont mis en évidence une perte de densité maximale respective de 7,9 %, 6,4 % et 12 % pour les mélanges de 5 %, 15 % et 30 % comparativement au granulats naturels. La perte de densité du mélange de 30 % est jugée trop instable pour que le mélange puisse être utilisé comme revêtement routier. De ce fait, il a été écarté pour la suite des essais. (Nuth, 2020)

Des essais de perméabilité à charge constante ou variable ont été réalisés sur trois mélanges (5 %, 10 % et 15 % BAPC). Les résultats montrent que les BAPC semblent retenir davantage l'eau que les granulats naturels. Toutefois, l'impact de la perte de perméabilité devrait être limité sur le terrain puisque la perméabilité demeure élevée. (Nuth, 2020)

Des tests de modules réversibles sont également en cours de réalisation. Les résultats seront fournis à RECYC-QUÉBEC dès qu'ils seront complétés

Bref, les tests visant à évaluer les propriétés mécaniques ont été effectués sur les mélanges de gravier et de copeaux de BAPC dans les laboratoires de l'UdeS. Ces tests ont permis de démontrer la faisabilité technique de la méthode de valorisation. Un taux de substitution maximale avoisinant 15 % a été estimé lors de ces travaux préliminaires pour conserver un taux de compaction avoisinant celui d'un mélange à 5 % de BAPC. (Nuth, 2020)



Figure 4. Mélange de sable silteux et de BAPC (30 %) (Nuth, 2019)

En tout, près de 400 litres de BAPC et de gravier des ÎdM ont été expédiés au laboratoire pour réaliser différents tests. Ceux-ci ont permis d'évaluer que 15 % du gravier pourraient être remplacés par du BAPC : ce taux permet de valoriser une quantité maximale de BAPC tout en conservant des caractéristiques géotechniques intéressantes. En effet, à cette concentration les propriétés mécaniques sont peu altérées et respectent la norme BNQ 2560-114. Pour évaluer les performances en conditions réelles, il est nécessaire de réaliser un banc d'essai et d'y faire des tests à la suite du projet.

Voici les principaux constats qui ont été tirés des travaux de recherche :

- Les mélanges contenant du BAPC nécessitent un taux d'humidité légèrement supérieur au gravier conventionnel pour assurer une densité maximale (12 % vs 10 %);
- Une perte de compaction a été observée dans le mélange à 5 % (-6,4 % de densité maximale) et 15 % (-7,9 % de densité maximale) de BAPC par rapport au gravier conventionnel;

- L'intégration de BAPC diminue la perméabilité du mélange de manière importante puisque le BAPC retient l'eau (perte de perméabilité de 12,5 % à 5 % de BAPC et de 25 % à 15 % de BAPC).

3.2.1. Recommandations et prédictions

Les recherches effectuées par l'UdeS montrent que la proportion de BAPC optimale dans le mélange de granulats est de 15 %. Le mélange de granulats contenant cette quantité de BAPC possède des propriétés mécaniques similaires au mélange en contenant 5 %, soit la proportion déjà acceptée par le *MTMDET*.

Voici la liste des recommandations du chercheur en lien avec la réalisation du banc d'essai :

- Les planches d'essai devraient avoir une longueur minimale de 50 m pour assurer la représentativité des données observées sur un tronçon;
- Le mélange de gravier et de BAPC devrait être mis sur l'ensemble de l'épaisseur de granulat dans le but de maximiser la quantité de BAPC valorisés et de faciliter l'interprétation des résultats. En effet, un affaissement sur l'ensemble de l'épaisseur sera plus facile à mesurer avec précision qu'un affaissement sur une petite section de l'épaisseur;
- La municipalité devrait mettre une fondation de la même profondeur que celle prévue dans une route de gravier conventionnelle. Le maintien des méthodes traditionnellement utilisées permettra d'évaluer si l'intégration des BAPC dans la route est cohérente avec les procédures habituelles. Cette recommandation avait pour but de ne pas surévaluer l'épaisseur de la fondation, ce qui augmenterait les coûts liés à la construction des routes et nuirait à la rentabilité de la filière.

3.3. Identification d'un équipement de conditionnement

Afin de déterminer l'équipement de conditionnement le plus adapté, les contraintes ont été énoncées et des critères ont été établis afin d'obtenir un broyat adéquat pour être intégré dans une route non pavée.

3.3.1. Critères du granulat

La qualité du granulat a une incidence très importante sur la durabilité de la route ainsi que sur son potentiel de valorisation. Des critères ont donc été établis afin de déterminer un équipement performant et adapté. D'une part, les copeaux de BAPC devaient contenir une quantité minimale de contaminants (papier, clou, bois, etc.). À titre d'exemple, dans les lignes directrices du MELCC, un taux de 1 % d'impuretés est toléré (Gouvernement du Québec, 2009). De plus, les copeaux doivent avoir un diamètre inférieur à ½ pouce afin de bien s'intégrer aux autres granulats d'une dimension variant entre 0 et ¾ pouce. De plus, les recherches en laboratoire tendent à démontrer que les copeaux trop grossiers se brisent dans le sol et ne permettent donc pas d'assurer la durabilité de la route.



Figure 5. Granulat de BAPC

3.3.2. Enjeux et particularités liés au choix de l'équipement

Les enjeux et particularités de la filière ont été identifiés afin de s'assurer que l'équipement choisi puisse pallier les problématiques rencontrées.

La première contrainte est la quantité de bitume sur les BAPC. Le second enjeu est la période de l'année où le conditionnement doit être réalisé. Le conditionnement a été effectué en avril et mai. Or, dans la littérature, l'importance de procéder au conditionnement durant l'hiver à des températures inférieures à -10 °C est fréquemment mentionnée. Les températures froides rendent le bitume du bardeau d'asphalte moins

visqueux et plus friable, ce qui facilite le broyage et diminue les risques de bris ou d'usure prématurée de la machinerie ainsi que les risques d'agglomération des granulats (Ali et al., 1995). Or, la température normale aux ÎdM durant la saison hivernale varie entre -2,3 et -8,2 °C, il n'est donc pas possible de se fier sur une saison stable sous les - 10 °C pour effectuer le conditionnement de BAPC sans difficulté (Gouvernement du Canada, 2018).

Dans la littérature, la possibilité d'ajouter de l'eau durant le broyage afin de réduire la température des BAPC est mentionnée (Chesner et autres, 1998). Cette solution a été envisagée, mais écartée rapidement en raison des exigences ministérielles liées à l'utilisation de l'eau potable ainsi qu'au rejet et au traitement des eaux usées.

Dans un autre ordre d'idée, bien qu'un gisement important de BAPC soit accumulé au CGMR, ce tonnage résulte d'une accumulation successive depuis de nombreuses années. La filière doit être rentable avec l'apport annuel de BAPC, soit une moyenne de 350 t par année basée sur les apports volontaires au CGMR entre 2015 et 2017. En effet, l'achat d'un broyeur ayant une grande capacité permettrait de traiter rapidement l'accumulation, mais ne pourrait pas être rentabilisé une fois l'amas traité. En outre, le CGMR est actuellement en infraction pour cette accumulation et la municipalité pourrait donc être contrainte d'exporter l'entièreté de l'amas à tout moment ce qui représente aussi un risque lié à l'acquisition d'un équipement de conditionnement.

3.3.3. Équipements évalués

En prenant en considération les critères et les contraintes, plusieurs équipements ont été évalués. Tous les équipements sont des broyeurs. Cette section décrit les équipements dont la location, l'achat ou le prêt a été envisagé en fonction du prix.

K-230 (Figure 6) : Il s'agit du broyeur que possède le CGMR pour broyer les bois de construction résiduels. C'est un broyeur à marteaux et à rotors. Ce broyeur a été conseillé par le représentant commercial de *Voghel*, un concessionnaire de machineries lourdes, pour le broyage des BAPC. La municipalité avait déjà broyé des BAPC à très petite échelle en période hivernale et les résultats n'avaient pas été concluants. En effet, les rotors étaient enduits de bitume et le procédé générait une importante quantité de poussières; le test a donc été arrêté. Le service d'Hygiène du milieu de la municipalité ne souhaitait donc pas utiliser leur broyeur pour conditionner l'ensemble des BAPC nécessaire à la réalisation du banc d'essai. Par ailleurs, la machinerie est déjà utilisée pour broyer les bois de construction résiduels.



Figure 6. Broyeur AK - 230

Morbark 3600 horizontal (Figure 7) : *Broyage Estrie Mobile* offre un service de location de ce type de broyeur qui est adapté pour le broyage de BAPC. La location de cet équipement pour une durée de 10 heures à 28 000 \$ aurait permis de broyer 450 t de BAPC selon le fabricant. Un tamis de 2 pouces de diamètre et un aimant étaient sur le marché. Toutefois, les coûts associés au transport de ce broyeur jusqu'aux ÎdM représentent plus de 80 % du coût de location et le tamis existant ne permettait pas d'obtenir la granulométrie souhaitée. Par ailleurs, nous n'avons pas l'assurance que ce broyeur est adapté aux BAPC recouverts de bitume des ÎdM et nous connaissons déjà l'enjeu de la température inadéquate au broyage efficace même en hiver. Cette option a été écartée puisqu'elle ne

permet ni de poursuivre la filière à la suite du projet ni d'assurer que les résultats conviennent.



Figure 7. Broyeur Morbark 3600

Broyeur Peterson Pacific. 2400B (Figure 8) : Ce broyeur est loué par le *Centre de valorisation Mario Charrette*. Il a une capacité de broyage d'environ 45 t/h pour les BAPC. Il est possible de mettre un tamis de 2 pouces de diamètre sur le broyeur. Ce choix a dû être écarté pour les mêmes raisons que le Morbark 3600 horizontal soit la difficulté de rentabiliser un équipement aussi coûteux. De plus, l'entreprise n'est pas en mesure de livrer le broyeur aux ÎdM en raison de la période de mobilisation trop importante et de l'espace disponible sur le traversier de CTMA. Par ailleurs, l'entreprise ne possédait pas de tamis de la bonne taille, soit de $\frac{3}{4}$ pouce de diamètre.



Figure 8. Broyeur Peterson Pacific 2400B

Broyeur BM-309 (Figure 9) : Il s'agit d'un broyeur conçu par *Pelletier Équipement* destiné à broyer des matières dangereuses comme des aérosols, des filtres à huile ou encore du bois. Il a une capacité moyenne de 1 t par heure et son prix de vente est de 75 000 \$. Il est muni d'un tamis de $\frac{3}{4}$ pouce de diamètre. Il est également possible d'adapter le broyeur en ajoutant des options permettant le contrôle des nuisances (aspirateur cyclone), le retrait des contaminants (aimant) et les risques de dispersion durant l'entreposage (raccord à un système de super-sacs). Le fabricant a été visité et des tests de broyage ont été effectués à deux reprises (en juin 2018 et en décembre 2018). Les premiers broyats ont été expédiés à l'*UdeS* pour vérifier que la granulométrie était adéquate et que ce granulat pourrait se substituer au gravier. Malgré la capacité relativement faible de l'équipement, il a été acquis par le CERMIM pour faire la démonstration que la méthode de valorisation fonctionne. Il s'agit également d'un équipement adéquat pour développer de nouvelles filières de valorisation de plusieurs autres MR.



Figure 9. Broyeur BM-309

Acquisition de l'équipement de conditionnement

Le broyeur BM-309 a été sélectionné pour effectuer le conditionnement des BAPC. Comme mentionné, cet équipement a une capacité relativement faible; il permet tout de même de faire la démonstration de la filière et permettrait aussi possiblement de broyer les apports annuels, bien qu'il ne s'agisse pas de l'équipement idéal pour valoriser les BAPC accumulés au CGMR.

Cet équipement a été acquis par le CERMIM et loué au projet. Le broyeur a été livré à la mi-mars; il était mis en opération à partir de mi-avril.

3.4. Identification d'un lieu pour le banc d'essai

Lors d'une rencontre avec l'équipe des Services techniques et réseaux publics de la *Municipalité des Îles-de-la-Madeleine*, le projet a été présenté à la directrice de ce service afin de définir le secteur pour la réalisation du banc d'essai. Cette rencontre a permis de cibler une section de la route d'accès au parc industriel comme projet de démonstration. Il s'agit d'une section de routes non pavées dans un secteur industriel lourd situé à Havre-aux-Maisons. Cet endroit est idéal, puisque :

- 1) La période de réalisation concorde avec l'échéance du projet;
- 2) Le banc d'essai serait à proximité du lieu de conditionnement ce qui limite le transport;
- 3) Il s'agit d'un zonage industriel loin des zones habitées, ce qui facilite la réponse aux exigences du MELCC.

3.5. Détermination des exigences légales

Les exigences légales liées à la réalisation du projet ont été identifiées. Pour ce faire, le bureau régional du *MELCC* de la région Gaspésie-Îles-de-la-Madeleine (GÎM) a été contacté. Comme pour tout usage de MR dans des travaux publics, l'intégration de BAPC dans les routes nécessite l'obtention d'une AM22. Pour la réalisation d'un banc d'essai, il est toutefois possible d'obtenir une autorisation du ministère pour une durée définie. Un délai de 75 jours est prévu avant d'avoir la réponse du *MELCC*.

Une demande d'autorisation a donc été déposée au *MELCC* en juin 2018 pour la réalisation du projet de démonstration. Cette demande décrit l'ensemble des équipements et procédures utilisés pour le conditionnement, l'entreposage, l'utilisation dans le banc d'essai ainsi que les mesures de mitigations mises en place. Elle détaille également les lieux où chacune des étapes est réalisée ainsi que le zonage municipal et les droits d'usage.

Pour le projet, l'ensemble des étapes du banc d'essai sera réalisé dans la zone industrielle lourde de Havre-aux-Maisons comme le montre la Figure 10. Cette particularité a facilité l'obtention de l'autorisation puisque cette zone est éloignée des résidences, de manière à réduire les nuisances occasionnées aux citoyens. De plus, l'achalandage important et la forte sollicitation de ce segment de route s'avèrent idéals pour la démonstration des propriétés mécaniques.

Le bureau régional du *MELCC* de la GÎM nous a orienté vers le document *Lignes directrices relatives à la gestion de béton, de brique et d'asphalte issus des travaux de construction et de démolition et des résidus du secteur de la pierre de taille* afin de structurer la demande et de déterminer les méthodes de mitigation à mettre en place. Ce document n'est toutefois pas parfaitement adapté aux BAPC. Les lignes directrices encadrant cette matière sont actuellement en rédaction.



Figure 10. Plan des aires de conditionnement, d'entreposage et d'utilisation des BAPC

Pour le projet de démonstration, le MELCC n'exige pas de respecter l'ensemble des critères décrits dans ce document. Ces directives ont toutefois été consultées et intégrées au mieux pour faciliter les chances d'obtention de l'avis de non-assujettissement et de se préparer en vue de la demande des demandes subséquentes. Ainsi, le conditionnement a été effectué sur une dalle de béton, sous un abri comme le prescrivent les lignes directrices. Ces infrastructures appartenant à un partenaire du projet ont permis de réduire les risques de dispersion des copeaux de BAPC par le vent ainsi que la contamination de l'eau de ruissèlement. Le devis-pilote déposé au ministère est présenté à l'annexe 2. Nous avons reçu, le 6 février 2019, un avis de non-assujettissement du MELCC nous autorisant à réaliser les travaux. Cet avis est disponible à l'annexe 3.

Au mois de juin, les Services techniques et réseaux publics de la municipalité ont modifié l'emplacement de la route d'accès. Ces changements ont donc dû être signalés au MELCC, ce qui a entraîné des retards avant l'obtention du nouvel avis de non-assujettissement qui a finalement été reçu en septembre. En effet, lors d'une demande

de modification, le ministère traite le dossier comme s'il s'agissait d'une nouvelle demande, cela occasionne donc des temps d'attente importants.

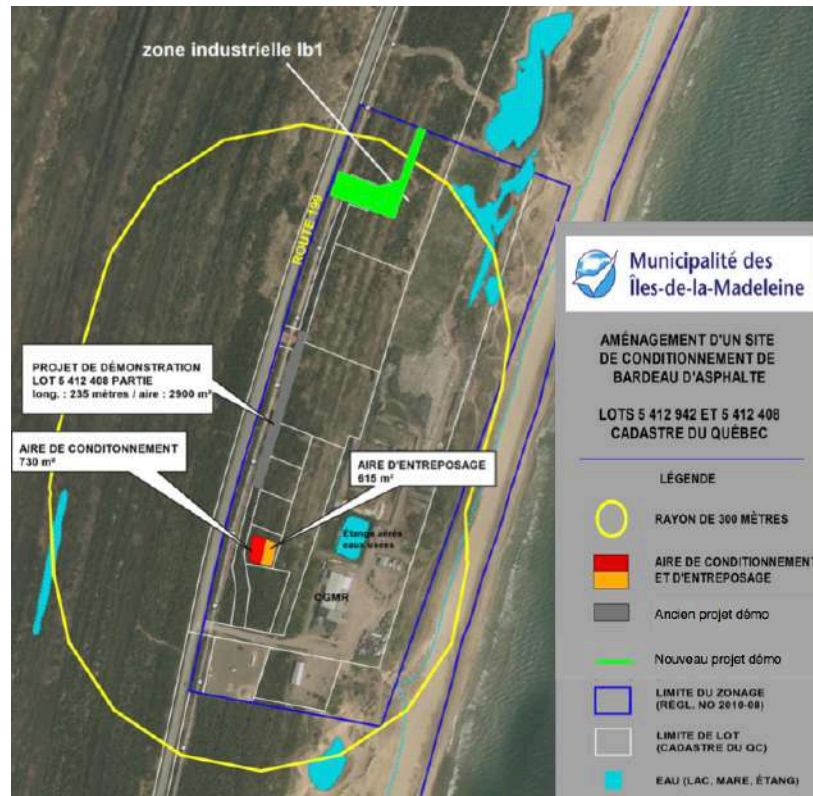


Figure 11. Plan du nouveau tracé

3.6. Aménagement du site de conditionnement

Le conditionneur loue un terrain au parc industriel pour réaliser ses activités. Comme il s'agit d'un nouveau secteur industriel, les terrains ne sont pas aménagés : la végétation devait être retirée; le terrain devrait être nivelé et remblayé. Des travaux d'aménagement ont donc été réalisés sur le terrain afin de le rendre accessible. L'entrepreneur y a également construit un abri ainsi qu'une dalle pour effectuer le conditionnement des BAPC. L'ensemble des infrastructures nécessaires pour recevoir le broyeur est donc prêt

tel que présenté à la Figure 12. Une entrée électrique de 575 volts a également été installée pour approvisionner le broyeur.



Figure 12. Site de conditionnement

3.7. Conditionnement des bardeaux d'asphalte

Le conditionnement des BAPC est divisé en trois sous-étapes : le tri, le broyage et l'évaluation du taux de contaminations.

3.7.1. Tri des bardeaux d'asphalte

La municipalité a effectué le transport des BAPC jusqu'au site de conditionnement à l'aide de conteneurs. Les BAPC au CGMR contiennent de nombreux contaminants en raison des erreurs de tri des citoyens et entrepreneurs. Un premier tri est effectué en transvidant les BAPC dans des conteneurs plus petits qui eux peuvent être entreposés dans la zone de conditionnement intérieur, ce qui permet le retrait des contaminants grossiers tels que les fascias et les grosses pièces de bois. Un second tri est ensuite effectué manuellement pour retirer les contaminants de plus petites tailles tels que les sacs et les planches de

petite taille. Cette étape était longue et ardue en raison du degré important de contamination. La Figure 13 illustre une partie des contaminants retrouvés dans les BAPC. Le taux de contamination des BAPC à la suite du premier tri était de 14 %; 10 t de résidus ont été retirées parmi les 70 t de BAPC transportées jusqu'au site de conditionnement.

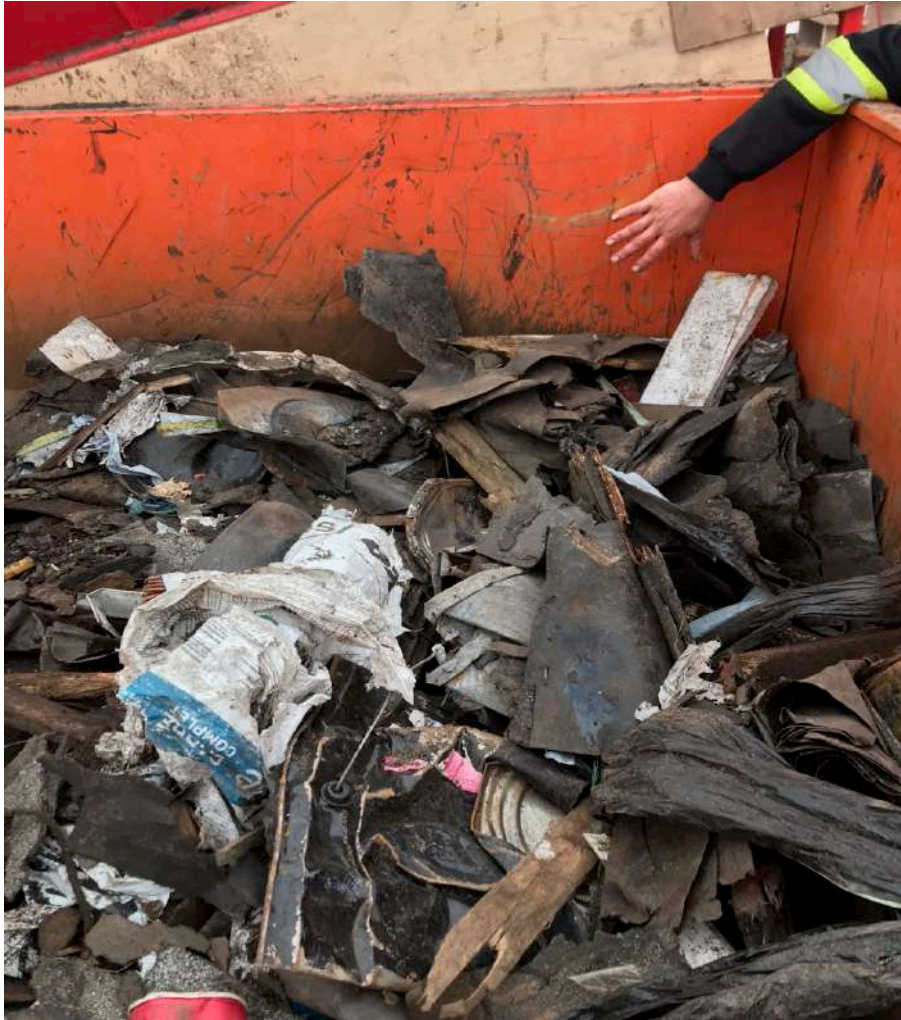


Figure 13. Contaminants retirés lors du deuxième tri

3.7.2. Broyage des bardeaux d'asphalte

Le broyage des BAPC était ensuite effectué dans l'abri installé sur la dalle de béton situé sur le terrain loué par le conditionneur. Les BAPC ont été acheminés au broyeur avec une petite pelle mécanique. Le broyat devait ensuite être acheminé dans des super-sacs à l'aide de l'aspirateur cyclone. Toutefois, ce mécanisme ne fonctionnait pas avec les BAPC

broyés en raison de leur densité trop élevée. Un convoyeur a donc été mis à la sortie du broyeur afin d'acheminer le broyat dans des super-sacs. Quatre aimants permanents ont été installés sur le convoyeur pour retirer les clous.

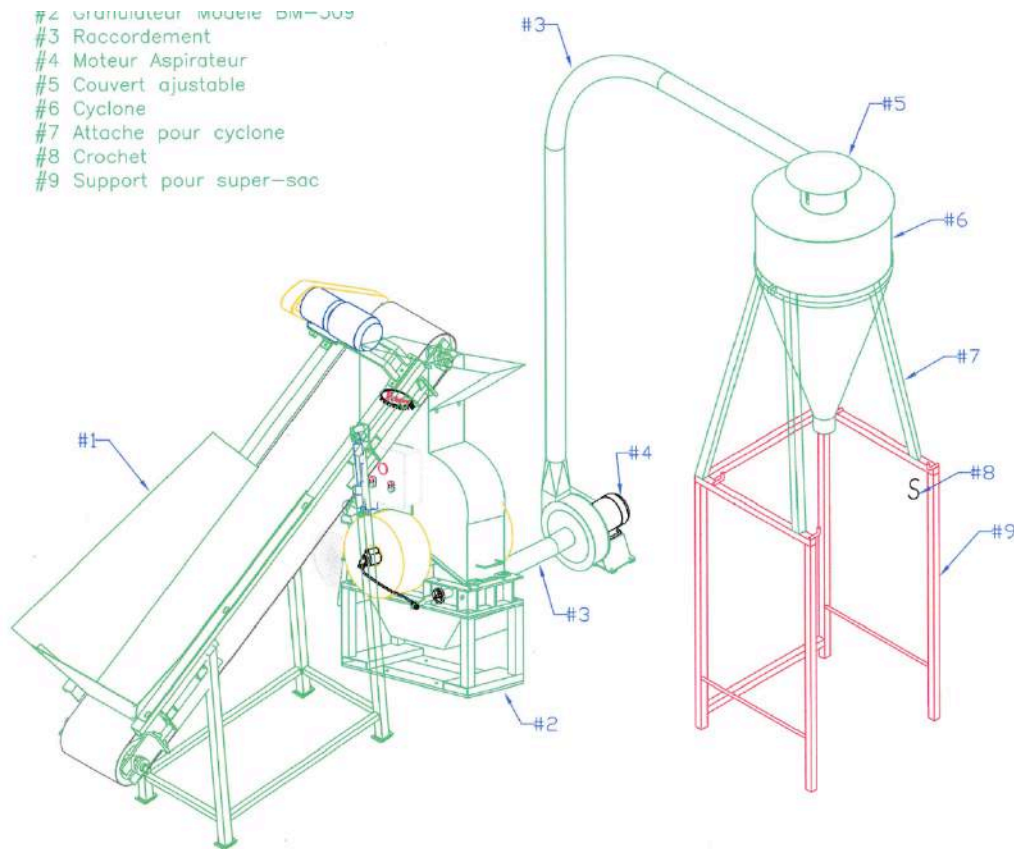


Figure 14. Schéma du système de broyage

En raison du fort taux de contamination et de la nature extrêmement abrasive des BAPC, le broyage a été laborieux et de nombreux bris ont été observés sur l'équipement; des roches envoyées par mégarde dans le broyeur et l'usure des pièces ont nécessité de nombreuses heures de réparation et d'ajustement (figures 15 et 16). La grille a dû être changée après 55 t, puisqu'une faille s'y est créée. Les couteaux s'arrondissaient extrêmement rapidement, tellement qu'il n'était pas justifié de les aiguiser. Le technicien a aussi dû ajuster les couteaux toutes les 6 heures de broyage pour conserver un espace adéquat entre les couteaux de manière à permettre le broyage (Figure 17).

Des ajustements ont été effectués sur l'équipement dans le but de :

- 1) Augmenter la durée de vie de l'équipement et de ses pièces;
- 2) Réduire les coûts d'entretien;
- 3) Améliorer la performance de l'équipement;
- 4) Augmenter la sécurité de l'équipement.

Pour ce faire, de nouveaux couteaux et une grille ont été machinés en acier ayant une dureté supérieure aux constituants actuels. Les couteaux ont été modifiés de manière à faciliter l'ajustement. Le broyage des BAPC a nécessité 170,5 heures en raison des bris fréquents.



Figure 15. Tamis perforés suite au broyage des BAPC

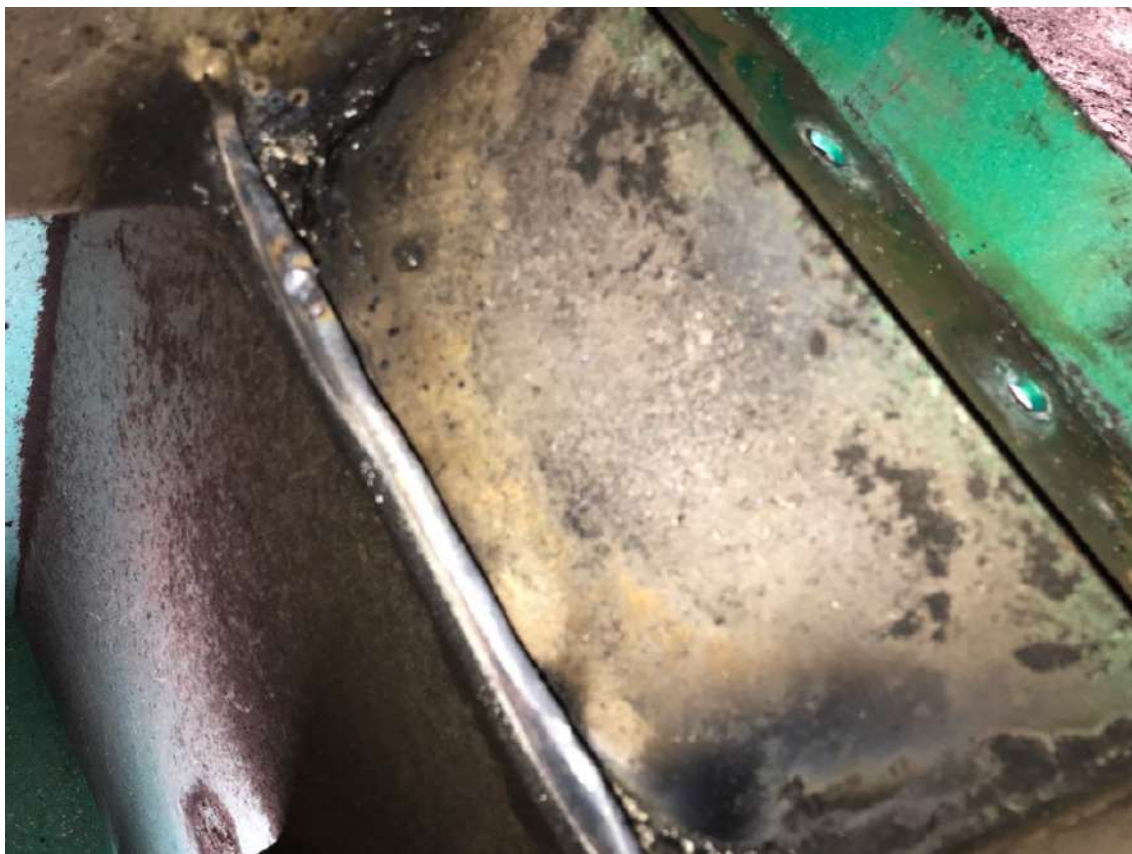


Figure 16. Trémie d'alimentation du broyeur tordue



Figure 17. Couteaux avant et après broyage des BAPC

Ainsi, le conditionnement des BAPC pour la réalisation du banc d'essai a permis de constater que le broyeur BM-309 n'est pas adapté au broyage de cette MR. C'est pourquoi plusieurs modifications seront apportées au broyeur dans le but de réduire les coûts d'entretien liés au broyage des BAPC. Par ailleurs, pour que le broyeur fonctionne adéquatement, il serait pertinent de réaliser un broyage primaire. Celui-ci permettrait de fragmenter les BAPC en morceaux de taille réduite, ce qui éviterait les bourrages dans la chute du broyeur. Le faible rendement du broyeur compromet également la rentabilisation du broyage (section **3.9 Analyse économique de la filière**).

3.7.3. Analyse du taux de contamination

Une fois les BAPC broyés, un tri manuel a été effectué afin d'évaluer la proportion massique des contaminants. Les *Lignes directrices relatives à la gestion de béton, de brique et d'asphalte issus des travaux de construction et de démolition et des résidus du secteur de la pierre de taille* tolèrent 1 % massique de contamination (Gouvernement du Québec, 2009). Pour évaluer ce paramètre, plusieurs échantillons ont été caractérisés à différents moments avec différents aimants.

Un système de trois aimants était disposé à la sortie du convoyeur. Le taux de contamination était alors de 1,47 %. À ces 3 aimants, 6 autres aimants ont été ajoutés et disposés sur le convoyeur. Cet ajout a permis de diminuer considérablement le niveau de contamination qui était alors de 0,33 %.

À la suite de l'analyse, le taux de contamination respecte la norme du *MELCC*. Toutefois, 70 % des contaminants étaient des clous entiers. En effet, les clous à toiture sont petits et se glissent facilement entre le tamis du broyeur de sorte qu'ils en ressortent intacts (Figure 18). Comme ces copeaux constitueront le revêtement de surface d'une route, il était nécessaire de trouver un moyen de retirer les clous. Ainsi, un autre système d'aimant beaucoup plus puissant a dû être utilisé afin de retirer les clous (voir section **4.8.4 Retrait des clous**).



Figure 18. Contaminants retirés des BAPC broyés

Contamination possible à l'amiante

Avant les années 1980, certains fabricants de bardeaux d'asphalte intégraient de l'amiante dans les composantes. L'amiante a une très grande résistance au feu

permettant ainsi de réduire l'inflammabilité des matériaux de construction qui en contiennent (Gouvernement du Québec, 2019). L'amiante était présent en faible proportion dans le matériau (moins de 1 %) (Zhou et autres, 2012). Depuis les années 1990, il est toutefois interdit d'utiliser des matières contenant de l'amiante (*Institut national de santé publique du Québec*, 2013). Les BAPC étant accumulés au CGMR depuis de nombreuses années, possiblement plus de 20 ans, il est fort probable qu'une certaine quantité soit contaminée par de l'amiante. Comme le broyage des BAPC occasionne de la poussière, il était légitime de se questionner sur la présence d'amiante dans les BAPC conditionnés. Les employés du CGMR ont soulevé cette inquiétude dès le début du projet, les analyses des échantillons en laboratoire ont ainsi permis de les rassurer et de favoriser l'acceptation du projet et le développement de la filière. Bien que le *MELCC* ne mentionne aucune restriction en lien avec la contamination potentielle à l'amiante de ces résidus dans les lignes directrices de valorisation ou dans l'avis de non-assujettissement, des analyses ont été effectuées afin d'évaluer si les BAPC valorisés n'étaient pas contaminés.

Certains laboratoires d'analyse comme *Environex* proposent une méthode d'échantillonnage des bardeaux d'asphalte. Toutefois, comme l'échantillonnage doit être représentatif du lot du CGMR qui est constitué de nombreuses couvertures, il n'était pas possible de se référer à ce genre de méthodologie. Ainsi, un échantillonnage des BAPC broyés a été effectué. La méthode utilisée consiste à prélever un échantillon dans la moitié des super-sacs de BAPC, à homogénéiser le mélange et à l'envoyer dans un laboratoire agréé.

Aucune trace d'amiante n'a été détectée (annexe 4). Ces résultats étaient prévisibles puisque les BAPC ne contiennent plus d'amiante depuis de nombreuses années, ainsi ce type de bardeaux d'asphalte se trouvent à la base de l'amas du CGMR. Or, le BAPC pour le banc d'essai a été prélevé sur la surface. Par contre, il est possible qu'une certaine proportion des BAPC soit contaminée par de l'amiante dans l'accumulation située au CGMR. La valorisation de ceux-ci serait complexifiée en raison du *Règlement sur la santé et la sécurité du travail* qui rendrait impossibles le broyage et la valorisation. En effet, les activités nécessitant la manipulation d'amiante doivent être effectuées dans des environnements contrôlés à pression négative, avec plusieurs mesures pour éviter la propagation de l'amiante dans l'environnement. Tous les déchets contaminés à une

concentration supérieure à 0,1 % doivent être transportés dans des contenants étanches (*Règlement sur la santé et la sécurité du travail, S-2.1, r. 13*). Ainsi, advenant qu'un lot soit contaminé à l'amiante, il ne serait pas possible de le valoriser de cette manière.

Afin d'évaluer si les craintes en lien avec la présence d'amiante dans les BAPC étaient fondées, plusieurs articles traitant du sujet ont été consultés. Selon une étude réalisée auprès de nombreux centres de valorisation de BAPC, la quantité de BAPC contaminés à l'amiante est extrêmement faible : moins de 1 % de 11 000 échantillons contenait de l'amiante. Ces études ont été réalisées en 2003 et en 2007 et ces études portent à croire que cela tendra à réduire avec le temps. (*National Asphalt Pavement Association, 2019*)

Malgré le risque jugé minime, il est important de se prévaloir d'un plan de gestion de l'amiante. Townsend et autres (2018) et *Construction Material Recycling Association (CMRA)* (2007) recommandent d'analyser les matériaux rentrant ponctuellement. Ainsi, pour les BAPC accumulés au CGMR, nous recommandons de réaliser des analyses à chaque 200 t de BAPC avant de les broyer. La quantité n'étant pas spécifiée par le CMRA, la municipalité peut donc définir la quantité entre chaque analyse. Quant aux nouveaux arrivages, comme l'intégration d'amiante dans les bardeaux d'asphalte est interdite depuis près de 30 ans et que ce matériau a une durée de vie variant entre 15 et 20 ans, les risques sont jugés négligeables pour les nouveaux arrivages de BAPC (*Association des maîtres-couvreurs du Québec, 2019*).

3.7.4. Entreposage des bardeaux d'asphalte broyés

Une fois broyés, les BAPC ont été entreposés dans des super-sacs jusqu'à la réalisation des travaux (Figure 19. Super-sacs contenant des BAPC broyés). Cette méthode permettait de limiter la dispersion de poussières dans l'environnement, tout en évitant d'avoir à construire une infrastructure pour accueillir le matériel. Les BAPC broyés ont ainsi été entreposés d'avril à novembre 2019.



Figure 19. Super-sacs contenant des BAPC broyés

3.8. Réalisation d'un banc d'essai

Les recherches effectuées en laboratoire sont cruciales pour émettre des recommandations basées sur des tests en milieu contrôlé. Toutefois, une planche d'essai est tout aussi importante afin de valider les résultats des recherches et les projections des comportements. Ainsi, un banc d'essai a été réalisé sur la route d'accès au parc industriel de Havre-aux-Maisons.

3.8.1. Organisation des travaux

Les travaux ont été réalisés avec l'étroite collaboration des Services techniques et réseaux publics de la *Municipalité des Îles-de-la-Madeleine*. Un comité de travail a donc été créé afin d'organiser et de planifier la réalisation des travaux, il était formé des membres suivants :

Services techniques et réseaux publics

- Direction;
- Planificatrice-coordonnatrice;
- Contremaître.

CERMIM

- Direction;
- Agente de recherche.

UdeS

- Chercheur responsable des travaux

Le comité s'est chargé d'identifier un emplacement pour la réalisation du banc d'essai. Il a également effectué la planification des travaux en définissant une date pour leurs réalisations et en arrimant les différents entrepreneurs. Le comité était aussi responsable de la supervision et de la coordination des entrepreneurs durant les travaux. Il a également validé la méthode de pose ainsi que le taux de compaction.

3.8.2. Travaux préparatoires

Les travaux préparatoires ont été effectués par les Services techniques et réseaux publics de la municipalité. Ces travaux comprennent le défrichage de la zone ainsi que le nivellement du terrain. Une couche de 400 mm de 0-4 pouce de granulat a été mise comme fondation de la route (Figure 20. Fondation du banc d'essai. L'épaisseur du remblai et de la couche de fondation a été communiquée au chercheur de l'UdeS afin qu'il prenne ces informations en considération pour proposer des scénarios de valorisation. Des tests de compaction ont été effectués par la firme *Englobe* sur la couche de fondation afin de permettre de faire des prévisions quant aux comportements de la route.



Figure 20. Fondation du banc d'essai

3.8.3. Planche d'essai

Différents scénarios de valorisation ont été proposés aux Services techniques et réseaux publics de la municipalité à la suite de la réalisation des recherches, dont la réalisation d'une petite parcelle contenant 25 % de BAPC. Des discussions avec les Services techniques et réseaux publics ont permis d'écarter ce scénario trop risqué.

Tel que présenté à la section **3.2 Recherche et développement**, les tests en laboratoire ont démontré que la proportion de BAPC optimale dans le mélange de gravier est de 15 % si l'on se base sur les deux critères initiaux, soit la valorisation d'une quantité maximale de BAPC et le maintien des caractéristiques géotechniques. En effet, cette proportion permettait de maximiser la quantité de BAPC qu'il est possible de valoriser dans le revêtement de la route tout en offrant des performances similaires au taux de 5 % permis par le *MTMDET*. Ainsi, dans le cadre du banc d'essai, trois planches d'essai ont été testées avec des proportions différentes de BAPC. Le Tableau 4. Informations sur les planches d'essai détaille les informations sur chacune des planches d'essai et la Figure 21. Vue du plan du banc d'essai illustre l'emplacement de chacune d'elle. Les plans

de coupes sont disponibles à l'annexe 5. La section A servira de témoin; la section B servira de référence alors que la section C permettra d'évaluer la performance du mélange de gravier et de BAPC.

Tableau 4. Informations sur les planches d'essai

Section	Proportion de BAPC	Proportion de gravier	Masse de granulat (t)
A	15 %	85 %	262
B	5 %	95 %	290
C	0 %	100 %	200

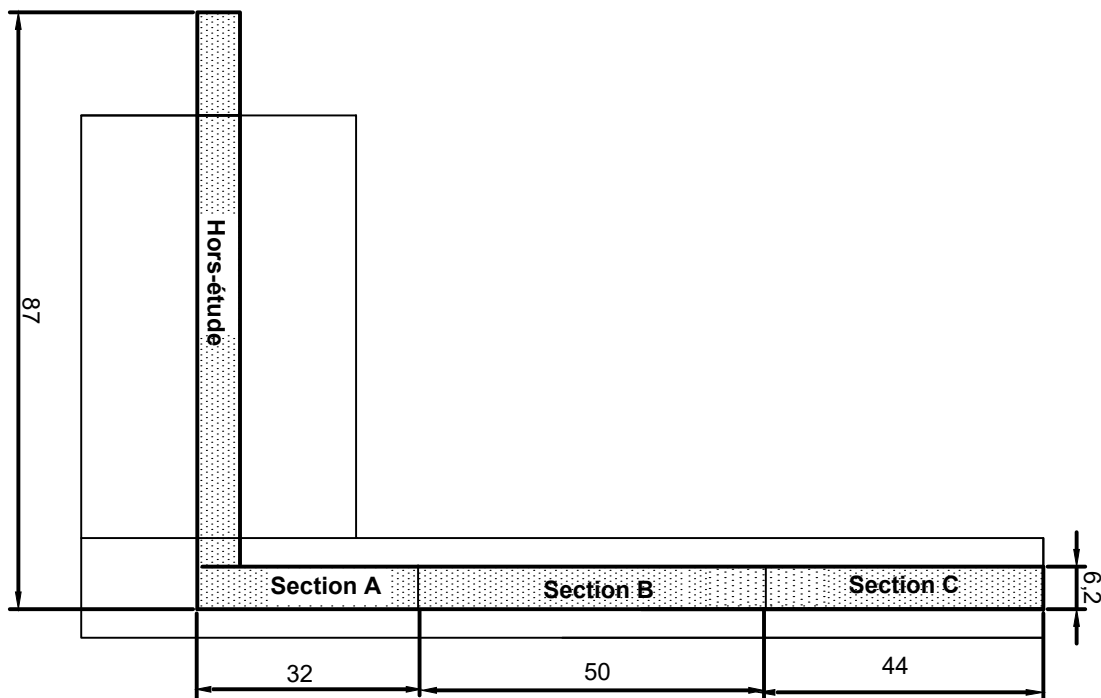


Figure 21. Vue du plan du banc d'essai

Comme recommandé par le chercheur de l'UdeS afin de faciliter l'observation des résultats, le mélange de gravier et de BAPC a été mis sur l'ensemble de l'épaisseur du revêtement de surface, soit 300 mm.

3.8.4. Transport des bardeaux d'asphalte

Les BAPC ont été transportés dans les super-sacs jusqu'au site où se trouvait la benne de mélange. En raison de la période d'entreposage des sacs et de l'exposition aux intempéries, les ganses ont été affaiblies; il n'était plus possible de lever les sacs par les ganses, ce qui a engendré des retards importants en raison des manipulations supplémentaires (Figure 22). Par ailleurs, une certaine quantité de copeaux de BAPC restait dans les sacs après que ceux-ci ont été vidés, ce qui générerait une perte de matières.



Figure 22. Transport des super-sacs

3.8.5. Retrait des clous

Pour le retrait des clous, trois systèmes ont été considérés : la poulie magnétique, le tambour magnétique et le séparateur à courroie perpendiculaire magnétique. Le CERMIM a fait l'acquisition d'un convoyeur à aimant permanent perpendiculaire ayant une force de 1 500 gauss pour effectuer cette étape. Un support a été construit et il a été installé sur le convoyeur de sortie de la benne de mélange (Figure 23). Cette étape a permis de retirer 175 kg de clous des BAPC broyés.



Figure 23. Convoyeur aimanté installé sur le convoyeur de sortie de la benne de mélange

3.8.6. Réalisation des mélanges de gravier et de bardeaux d'asphalte

Les mélanges de gravier et de BAPC ont été effectués dans la benne de mélange (Figure 24) conçue par *P&B Entreprises* afin d'obtenir la proportion exacte de BAPC et de gravier tout en assurant une bonne homogénéité dans le mélange. Des tas ont donc été formés avec les mélanges de 5 % et de 15 % de BAPC.



Figure 24. Benne de mélange utilisée pour réaliser le mélange de gravier et de BAPC

3.8.7. Compaction

Un entrepreneur a effectué la compaction des mélanges; le taux de compaction a été vérifié à la suite du passage des rouleaux compresseurs. Le matériel s'est avéré plus difficile à compacter que le gravier conventionnel en raison de la teneur en eau trop élevée des mélanges, le nombre de passages de rouleaux compresseurs a dû être augmenté passant de 6 à 8. Malgré cela, le taux de compaction visé (95 %) n'a pas été atteint en raison du taux d'humidité trop élevé dans la section A et C. En effet, plusieurs millimètres de pluie sont tombés dans les jours précédant les travaux.

Tableau 5. Résultats des tests de compaction

Planche d'essai	Compaction		Humidité	
	Idéale	Réelle	Idéale	Réelle
A	< 95 %	92,5 %	12 %	11,7 %
B	< 95 %	100 %	12 %	14,9 %
C	< 95 %	91 %	10 %	17,7 %



Figure 25. Coupure entre deux planches d'essai

Comme il n'est pas possible de faire des coupures nettes entre les sections, la transition entre les sections a été effectuée sur deux mètres (Figure 25). Il faudra considérer cet

élément lors des tests de durabilité effectués une année après la construction des travaux. Ainsi, les tests devront être effectués au milieu des sections pour éviter cette source de biais.

3.9. Analyse économique de la filière

L'analyse économique de la filière est divisée en 3 volets : la réception au CMGR, le conditionnement et le mélange au gravier pour l'utiliser comme revêtement de routes. Le but de cette analyse est de déterminer si le coût de réception au CGMR est suffisant pour couvrir le coût de l'ensemble de la filière.

3.9.1. Réception des bardeaux d'asphalte

La réception et l'accumulation des BAPC engendrent des coûts. Actuellement, le CGMR s'occupe de recevoir, de peser, de faire la facturation aux citoyens et de déplacer les BAPC dans l'amas. Par ailleurs, la municipalité possède une autorisation du MELCC pour entreposer cette matière avant de la gérer. Elle perçoit également les frais d'entrée au CGMR équivalents à 150 \$/t pour les entreprises et 20 \$ pour 150 pi³ pour les citoyens, ce qui représente environ 1,1 t, basée sur la masse volumique de 250 kg/m³ (CIWMB, 1991). Le prix de réception pour le particulier a été calculé avec l'équation suivante :

$$P_p = P_v \div (V_m \times MV_{BA})$$

P_p : Prix pour les particuliers à la tonne (\$/t)

P_v : Prix pour un voyage au CGMR

V_m : Volume maximal d'un voyage

MV_{BA} : Masse volumique du BAPC (t/m³)

Considérant que 35 % des BAPC sont apportés au CGMR par des entrepreneurs et 65 % par des citoyens, les revenus moyens pour 1 t de BAPC sont de 64,74 \$.

3.9.2. Activités de conditionnement

Le but du projet étant de mettre en place une filière de valorisation des BAPC rentable et avantageuse pour l'ensemble des partenaires, il est nécessaire d'évaluer le coût lié aux activités de conditionnement.

Les activités de conditionnement nécessitent l'aménagement d'un abri étanche muni d'une dalle de béton pour effectuer le broyage et l'entreposage. Le conditionneur devra également faire l'achat d'un équipement de conditionnement adapté au broyage des BAPC. À cela s'ajoutent les coûts liés à l'obtention de l'AM22. L'analyse économique consiste à évaluer le temps nécessaire pour rentabiliser les investissements initiaux en conditionnant 350 t de BAPC annuellement. Pour cette étape de la filière, quatre équipements ont été évalués. Bien que le broyage de seulement 350 t de BAPC a été considéré dans l'analyse économique, il est possible de broyer une partie des BAPC dans l'accumulation au CGMR s'il y a une demande pour le produit fini. Il est également possible de diversifier les activités réalisées avec le broyeur afin de créer plusieurs sources de revenus et de consolider la filière de valorisation.

Packer 750

Le broyeur Packer 750 est un équipement mobile au diesel. Il s'agit d'un broyeur conçu pour broyer des agrégats, du gypse ainsi que du bardeau d'asphalte. Comme démontré dans le Tableau 6. Analyse économique du broyage avec le broyeur Packer 750, les investissements initiaux pourraient être rentabilisés en quatre ans si le conditionnement des BAPC rapporte 100 \$/t. Il s'agit du broyeur qui permet d'assurer la rentabilité de la filière.

Tableau 6. Analyse économique du broyage avec le broyeur Packer 750

Packer 750	An 1	An 2	An 3	An 4	An 5
Dépenses	136 524 \$	6 487 \$	6 487 \$	6 487 \$	6 487 \$
Broyeur	53 000 \$	-	-	-	-
Abri + dalle	75 000 \$	-	-	-	-
Entretien	2 333 \$	2 333 \$	2 333 \$	2 333 \$	2 333 \$
Énergie	933 \$	933 \$	933 \$	933 \$	933 \$
Main-d'œuvre	887 \$	887 \$	887 \$	887 \$	887 \$
AM22	2 037 \$	-	-	-	-
Approvisionnement	2 333 \$	2 333 \$	2 333 \$	2 333 \$	2 333 \$
Revenus					
Traitement des BAPC - Scénario 1	35 000 \$	35 000 \$	35 000 \$	35 000 \$	35 000 \$
Scénario					
Différence -Scénario 1	(101 524) \$	28 513 \$	28 513 \$	28 513 \$	28 513 \$
Différence cumulée -Scénario 1	(101 524) \$	(73 010) \$	(44 497) \$	(15 984) \$	12 530 \$

Jeffrey

Le broyeur Jeffrey est un broyeur à marteaux conçu pour le broyage du bois. Cet équipement, une fois adapté avec des marteaux plus durables, peut être utilisé pour broyer des BAPC. C'est d'ailleurs cet équipement que le *Centre de valorisation Mario Charrette* utilise pour broyer entre 40 000 t et 50 000 t de BAPC annuellement. L'analyse économique démontre que les investissements initiaux pourraient être rentabilisés en quatre ans à un prix de 150 \$/t et en neuf ans à un prix de 100 \$/t (Tableau 7).

Tableau 7. Analyse économique du broyage avec le broyeur Jeffrey

Jeffrey	An 1	An 2	An 3	An 4	An 5	An 6	An 7	An 8	An 9	An 10
Dépenses	187 937 \$	15 900 \$	15 900 \$	15 900 \$	15 900 \$	15 900 \$	15 900 \$	15 900 \$	15 900 \$	15 900 \$
Broyeur + modifications	65 000 \$	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Abri et dalle	75 000 \$	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Convoyeur	30 000 \$	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Entretien	9 300 \$	9 300 \$	9 300 \$	9 300 \$	9 300 \$	9 300 \$	9 300 \$	9 300 \$	9 300 \$	9 300 \$
Énergie	300 \$	300 \$	300 \$	300 \$	300 \$	300 \$	300 \$	300 \$	300 \$	300 \$
Main-d'œuvre	1 300 \$	1 300 \$	1 300 \$	1 300 \$	1 300 \$	1 300 \$	1 300 \$	1 300 \$	1 300 \$	1 300 \$
AM22	2 037 \$	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Approvisionnement	5 000 \$	5 000 \$	5 000 \$	5 000 \$	5 000 \$	5 000 \$	5 000 \$	5 000 \$	5 000 \$	5 000 \$
Revenus										
Traitement des BAPC - Scénario 1	52 500 \$	52 500 \$	52 500 \$	52 500 \$	52 500 \$	52 500 \$	52 500 \$	52 500 \$	52 500 \$	52 500 \$
Traitement des BAPC - Scénario 2	35 000 \$	35 000 \$	35 000 \$	35 000 \$	35 000 \$	35 000 \$	35 000 \$	35 000 \$	35 000 \$	35 000 \$
Scénarios										
Différence - Scénario 1	(135 437) \$	36 600 \$	36 600 \$	36 600 \$	36 600 \$	36 600 \$	36 600 \$	36 600 \$	36 600 \$	36 600 \$
Différence cumulée - Scénario 1	(135 437) \$	(98 837) \$	(62 237) \$	(25 637) \$	10 963 \$	47 563 \$	84 163 \$	120 763 \$	157 363 \$	193 963 \$
Différence - Scénario 2	(152 937) \$	19 100 \$	19 100 \$	19 100 \$	19 100 \$	19 100 \$	19 100 \$	19 100 \$	19 100 \$	19 100 \$
Différence cumulée - Scénario 2	(152 937) \$	(133 837) \$	(114 737) \$	(95 637) \$	(76 537) \$	(57 437) \$	(38 337) \$	(19 237) \$	(137) \$	18 963 \$

AK-230

Le broyeur Ak-230 est l'équipement du CGMR utilisé pour le broyage du bois. Comme le test effectué avec ce broyeur l'a démontré, il faut ajouter un tamis à la suite du broyage pour obtenir la granulométrie désirée. Une estimation a été demandée à un vendeur de machinerie pour réaliser l'analyse. L'analyse économique montre que les investissements pourraient être rentabilisés en quatre ans à 150 \$/t de BAPC et en huit ans à 100 \$/t (Tableau 8).

Tableau 8. Analyse économique du broyage avec le broyeur AK-230

AK-230	An 1	An 2	An 3	An 4	An 5	An 6	An 7	An 8	An 9
Dépenses	212 187 \$	10 150 \$	10 150 \$	10 150 \$	10 150 \$	10 150 \$	10 150 \$	10 150 \$	10 150 \$
Tamis	125 000 \$	-	-	-	-	-	-	-	-
Abri et dalle	5 000 \$	-	-	-	-	-	-	-	-
Entretien	3 500 \$	3 500 \$	3 500 \$	3 500 \$	3 500 \$	3 500 \$	3 500 \$	3 500 \$	3 500 \$
Énergie	1 925 \$	1 925 \$	1 925 \$	1 925 \$	1 925 \$	1 925 \$	1 925 \$	1 925 \$	1 925 \$
Main-d'œuvre	1 225 \$	1 225 \$	1 225 \$	1 225 \$	1 225 \$	1 225 \$	1 225 \$	1 225 \$	1 225 \$
AM22	2 037 \$	-	-	-	-	-	-	-	-
Approvisionnement	3 500 \$	3 500 \$	3 500 \$	3 500 \$	3 500 \$	3 500 \$	3 500 \$	3 500 \$	3 500 \$
Revenus									
Traitement des BAPC Scénario 1	52 500 \$	52 500 \$	52 500 \$	52 500 \$	52 500 \$	52 500 \$	52 500 \$	52 500 \$	52 500 \$
Traitement des BAPC Scénario 2	35 000 \$	35 000 \$	35 000 \$	35 000 \$	35 000 \$	35 000 \$	35 000 \$	35 000 \$	35 000 \$
Scénarios									
Différence - Scénario 1	(159 687) \$	42 350 \$	42 350 \$	42 350 \$	42 350 \$	42 350 \$	42 350 \$	42 350 \$	42 350 \$
Différence cumulée- Scénario 1	(159 687) \$	(117 337) \$	(74 987) \$	(32 637) \$	9 713 \$	52 063 \$	94 413 \$	136 763 \$	179 113 \$
Différence - Scénario 2	(177 187) \$	17 850 \$	17 850 \$	17 850 \$	17 850 \$	17 850 \$	17 850 \$	17 850 \$	17 850 \$
Différence cumulée - Scénario 2	(177 187) \$	(152 337) \$	(127 487) \$	(102 637) \$	(77 787) \$	(52 937) \$	(28 087) \$	(3 237) \$	21 613 \$

BM-309

Le dernier équipement évalué est le broyeur BM-309, soit l'équipement utilisé pour faire le projet. Comme démontré dans la section **3.7 Conditionnement des bardeaux d'asphalte**, pour être fonctionnel, cet équipement nécessite un broyage primaire des BAPC. Un second broyeur a donc été ajouté aux investissements initiaux. L'analyse économique présentée au Tableau 9 montre que pour rentabiliser ces équipements en quatre ans, cela nécessiterait un revenu de 225 \$/t de BAPC.

Tableau 9. Analyse économique du broyage avec le broyeur BM-309

BM-309	An 1	An 2	An 3	An 4	An 5
Dépenses	192 037 \$	45 000 \$	45 000 \$	45 000 \$	45 000 \$
Convoyeur	20 000 \$	-	-	-	-
Abri et dalle	75 000 \$	-	-	-	-
Entretien	4 650 \$	4 650 \$	4 650 \$	4 650 \$	4 650 \$
Énergie	2 100 \$	2 100 \$	2 100 \$	2 100 \$	2 100 \$
Main-d'œuvre	13 650 \$	13 650 \$	13 650 \$	13 650 \$	13 650 \$
AM22	2 037 \$	-	-	-	-
Broyage primaire	50 000 \$	-	-	-	-
Entretien - broyeur primaire	5 000 \$	5 000 \$	5 000 \$	5 000 \$	5 000 \$
Énergie - broyeur primaire	2 100 \$	2 100 \$	2 100 \$	2 100 \$	2 100 \$
Approvisionnement	17 500 \$	17 500 \$	17 500 \$	17 500 \$	17 500 \$
Revenus					
Traitement des BAPC - Scénario 1	78 750 \$	78 750 \$	78 750 \$	78 750 \$	78 750 \$
Scénario					
Différence - Scénario 1	(113 287) \$	33 750 \$	33 750 \$	33 750 \$	33 750 \$
Différence cumulée - Scénario 1	(113 287) \$	(79 537) \$	(45 787) \$	(12 037) \$	21 713 \$

3.9.3. Activité de valorisation

Cette méthode de valorisation engendre également des coûts pour celui qui achète le mélange de gravier et de BAPC, soit les coûts liés au transport des BAPC conditionnés, à l'intégration des BAPC dans le gravier et à l'obtention de l'AM22 auprès du MELCC. Le Tableau10 détaille les dépenses engendrées par la valorisation des BAPC dans une route. Ainsi, la valorisation d'une tonne de BAPC dans un mélange à 15 % de BAPC coûte 33 \$/t de BAPC et 15,37 \$/t de produit fini, soit un mélange de gravier et de 15 % de BAPC.

Tableau10. Analyse économique liée à la valorisation des BAPC dans une route

Activités	Coût de valorisation des bardeaux d'asphalte (\$/t BAPC)		Coût de production du produit fini (\$/t produit fini)	
	Mélange à 5 % de BAPC	Mélange à 15 % de BAPC	Mélange à 5 % de BAPC	Mélange à 15 % de BAPC
Transport	5 \$	5 \$	0,25 \$	0,75 \$
Certificat d'autorisation	6 \$	6 \$	0,29 \$	0,87 \$
Location de benne de mélange	77 \$	22 \$	3,85 \$	3,33 \$
Gravier	-	-	11,64 \$	10,41 \$
Total (\$/t de BAPC)	88 \$	33 \$	16,02 \$	15,37 \$
Différence avec le gravier			3,77 \$	3,12 \$

3.9.4. Rentabilité de la filière

En considérant que le broyage des BAPC pourrait être effectué pour 100 \$/t et que l'intégration au gravier pourrait être effectuée pour 33 \$/t (mélange à 15 % de BAPC), il est possible de conclure que les coûts de réception des BAPC au CGMR ne permettent pas de couvrir les dépenses liées à la filière. Ainsi, pour être rentables, les coûts de réception devraient être augmentés à 125 \$/t pour les citoyens et rester au même taux pour les entrepreneurs. Cette modification entraînerait une augmentation des revenus associés à la réception des BAPC à une moyenne de 133 \$/t et permettrait d'assurer la

rentabilité du conditionnement et de la valorisation des BAPC. De cette façon, les Services techniques et réseaux publics de la Municipalité des Îles-de-la-Madeleine n'auraient pas à assumer une augmentation du coût des granulats; la filière financerait la différence. Le coût de 133 \$/t des BAPC est moins dispendieux que l'exportation des BAPC jusqu'à l'ÎPE, ce qui permet de rendre la filière concurrentielle à l'exportation. Toutefois, advenant que le mélange à 15 % de BAPC ne donne pas de résultats satisfaisants et que le mélange optimal soit celui contenant 5 % de BAPC, alors la filière ne serait plus concurrentielle à l'exportation avec un coût de traitement de 188 \$/t.

3.10. Évaluation d'autres équipements de broyage

Comme le broyeur acheté dans le cadre du projet n'a pas donné de résultats satisfaisants et ne permettait pas d'assurer la poursuite de la filière, le broyeur du CGMR, le modèle Doppstadt Ak-230, a été testé pour broyer les BAPC.

Il a été testé pour évaluer s'il était possible de contrôler la poussière des BAPC. Ainsi, un gicleur a été fabriqué et installé sur le convoyeur de sortie de manière à humecter le matériel et ainsi éviter l'émission de poussières à la sortie du convoyeur (Figure 26). Lors de ce test, 750 kg de BAPC ont été broyés et comme la grille du broyeur n'avait pas la bonne taille, la granulométrie n'était pas adéquate. Les copeaux ont été tamisés afin de valoriser les particules dont la taille est inférieure à ½ pouce, ce qui a permis de récupérer 440 kg du produit.



Figure 26. Gicleur installé sur le broyeur pour contrôler les poussières

Ce test ne s'est pas avéré concluant, car le broyage a tout de même généré une quantité importante de poussières. Selon un vendeur de machinerie, il serait plus efficace de brancher un boyau d'arrosage dans la chambre de broyage pour réduire les poussières, cela permettrait également de réduire l'usure des couteaux.

Ainsi, pour que ce broyeur puisse être utilisé dans la filière, il faudrait installer un nouveau système de contrôle de poussières et ajouter un tamis à la sortie du broyeur afin de broyer de nouveau les copeaux trop grossiers pour être intégrés à un revêtement de route. L'usure de l'équipement et le plan d'entretien devraient aussi être considérés par la municipalité si cet équipement était utilisé pour les BAPC.

3.11. Mise en place de la filière

Cette section détaille les exigences règlementaires ainsi que le fonctionnement de la filière.

3.11.1. Exigences règlementaires

Les exigences du MELCC sont divisées en deux étapes. La première est l'entreposage et le conditionnement et la seconde, la valorisation.

Entreposage et conditionnement

Le MELCC exige que les BAPC non broyés et broyés soient entreposés dans un abri muni d'un plancher étanche (Bellavance, 2020). Les eaux superficielles ne doivent pas pénétrer dans les zones d'entreposage et de conditionnement. Il faut également définir des méthodes de mitigations afin de réduire les impacts environnementaux liés au conditionnement des BAPC quant à l'émission de poussières.

Ces aires doivent respecter les distances séparatrices des cours d'eau :

- Plus de 100 m des puits d'eau potable;
- Plus de 60 m de la ligne des hautes eaux d'un cours d'eau à débit régulier ou intermittent;
- Plus de 60 m d'un lac;
- Plus de 60 m des milieux humides (Bellavance, 2017).

La capacité maximale d'entreposage des installations doit également être définie dans les demandes d'AM22. Afin de déterminer la taille des infrastructures de conditionnement et d'entreposage nécessaires, les apports de 2019 au CGMR ont été ventilés par mois (Tableau 11). Si l'on considère que la quantité maximale de BAPC qui serait accumulée durant un mois serait de 100 t, il faudrait donc prévoir une dalle de béton de 15 x 15 m pour entreposer les BAPC avant d'être conditionnés.

Tableau 11. Répartition des apports en BAPC par mois

Mois	Apport (t)	Répartition
Janvier	8,31	3 %
Février	0	0 %
Mars	0	0 %
Avril	9,2	3 %
Mai	25,7	8 %
Juin	44,1	13 %
Juillet	39,1	12 %
Aout	18,6	6 %
Septembre	102,8	31 %
Octobre	47,5	14 %
Novembre	25,1	8 %
Décembre	9,3	3 %
Total	329,9	-

Utilisation

Le mélange de gravier et de BAPC ne nécessite pas d'AM22. Toutefois, l'utilisation de ce granulats pour construire une route en nécessite une. Ainsi, comme la municipalité réalise la construction de routes à l'interne, elle aurait besoin d'obtenir une autorisation pour cette activité.

La Norme 4202 permet d'utiliser des granulats contenant 5 % de BAPC pour la construction de revêtement routier. Dans ce cas-ci, son utilisation ne nécessite pas d'autorisations ministérielles tant que le granulats est conditionné par une entreprise détenant toutes les AM22 requises.

Demandes d'AM22

Comme des AM22 sont nécessaires pour légitimer les activités de conditionnement, d'entreposage et de valorisation, le projet inclut la rédaction des demandes d'autorisation. Ainsi, deux demandes ont été formulées : une pour le conditionneur et une autre, pour l'utilisateur, soit la Municipalité des Îles-de-la-Madeleine. Ces demandes ont été débutées selon des méthodes de fonctionnement prévues qui ont été déterminées lors des

discussions impliquant l'ensemble des partenaires. Vu les coûts d'analyse exigés par le MELCC, ces formulaires n'ont pas été déposés. Les demandes seront déposées au ministère à la suite des analyses de durabilité de la route dans un an, et ce si l'ensemble des partenaires décident d'aller de l'avant et de mettre en place la filière. En effet, il faut s'assurer que la planche d'essai possède une bonne performance dans le temps afin de vérifier que le taux de substitution ciblé à 15 % soit bel et bien le meilleur. Par ailleurs, selon la durabilité de la route, il est possible que des ajustements soient apportés à la méthode, ce qui aurait un impact sur le contenu des demandes d'AM22.

3.11.2. Élaboration du fonctionnement de la filière

Une rencontre avec l'ensemble des partenaires du projet a permis de déterminer le fonctionnement pour l'ensemble des étapes de la filière. Avant que la filière ne soit effective, il faut attendre que l'UdeS vérifie la performance des matériaux granulaires dans le temps. Cette validation sera réalisée un an après la construction du banc d'essai (section **3.13 Étapes après-projet**).

Les BAPC continueront d'être acheminés par les citoyens et entrepreneurs au CGMR, ils seront ensuite pesés et disposés dans un conteneur de l'écocentre (Figure 27). Une fois pleins, ils seront transportés jusqu'au site du conditionnement au parc industriel. Les BAPC y seront accumulés, broyés et entreposés dans un abri jusqu'à ce qu'ils soient utilisés dans une route non pavée. Les BAPC seront ensuite transportés, par camion dix roues, jusqu'à la carrière de *P&B Entreprises* où ils seront intégrés au gravier et entreposés jusqu'à leur utilisation par les Services techniques et réseaux publics municipaux.



Figure 27. Conteneur (AGB, 2018)

Dans ce cas de figure, le département d'Hygiène du milieu perçoit les frais d'entrée au CGMR et redistribue ces revenus entre les partenaires de la filière pour assurer la rentabilité de la valorisation des BAPC.

3.12. Évaluation d'autres avenues de valorisation

Une discussion avec les Services techniques et réseaux publics municipaux a permis de déterminer une autre piste de valorisation des BAPC, soit l'intégration aux accotements de routes. Cette avenue ne nécessiterait pas d'autres tests en laboratoire; il faudrait simplement réaliser un test terrain. Ce département municipal pave en moyenne 4 km de routes par année, ce qui représente 8 km d'accotement. Selon leurs données, près de 2 000 t de gravier de 0 -3/4 pouce sont utilisées à cette fin annuellement. Considérant un taux de 15 % de BAPC, cette avenue permettrait de valoriser 300 t des 350 t de BAPC annuellement. Comme détaillé dans la section **3.11.1 Exigences réglementaires**, il faut toutefois considérer qu'il y a des distances séparatrices à respecter avec les cours d'eau et le milieu humide.

3.13. Étapes après-projet

Deux types de suivis devront être effectués sur le banc d'essai à la suite de sa construction. D'une part, des tests devront être effectués un an après la construction pour assurer que la route conserve des propriétés géotechniques adéquates. Les tests qui seront réalisés sont les suivants :

- 1) Inspection visuelle de l'état des sections (orniérage, fissures, tassement et endommagement);
- 2) Carottage d'échantillons pour faire un suivi en laboratoire du comportement du matériel dans le temps;
- 3) Contrôle de compaction aux mêmes points qu'en novembre 2019.

Selon les constats qui seront observés à l'automne 2020, d'autres tests complémentaires pourront être effectués pour expliquer les observations. Ces tests seront faits avec la collaboration de l'UdeS, une entente a été prise pour qu'ils soient réalisés à la suite du projet.

D'autre part, le MELCC a récemment exigé que différentes analyses soient effectuées sur le terrain afin d'assurer l'innocuité environnementale du BAPC. Les paramètres à analyser dans les eaux de ruissellement et souterraines sont les métaux (arsenic, bore, cadmium, calcium, chrome, cuivre, fer, manganèse, nickel, plomb, sélénium, vanadium, zinc), les hydrocarbures aromatiques polycycliques, les nonylphénols et leurs dérivées ainsi que les phtalates. Plusieurs alternatives de financement seront évaluées afin de réaliser ces analyses dans le cadre d'une seconde phase du projet Bardeaux.

4. MÉTHODOLOGIE POUR LA QUANTIFICATION DES OBJECTIFS MESURABLES

Afin de quantifier les objectifs mesurables du projet de manière rigoureuse, une méthodologie a été élaborée pour évaluer la quantité de BAPC valorisés, les émissions de gaz à effet de serre (GES) évitées, les économies pour la municipalité, les économies pour *P&B Entreprises* ainsi que le nombre d'emplois créés.

4.1. Taux de substitution et propriétés mécaniques

La méthodologie employée par l'UdeS est détaillée dans le rapport disponible à l'annexe 1.

4.2. Quantité de bardeaux d'asphalte valorisés

La quantité de BAPC valorisés sera évaluée en pesant les MR sortant du CGMR avec la balance située au CGMR; les résultats seront compilés par l'employé responsable de la balance. Les rejets associés au conditionnement des BAPC, soit les contaminants (bois, papier, clou, plastique, etc.), seront pesés lorsqu'ils seront réacheminés au CGMR. La masse des contaminants sera déduite de la masse des BAPC sortant du CGMR afin d'avoir la masse nette des BAPC conditionnés et valorisés dans le projet de route. Ces données permettront également d'évaluer le pourcentage de rejets. Les mélanges finaux seront pesés avant d'être transportés jusqu'au site; cela permettra de valider une deuxième fois le poids des BAPC valorisés. Ces données seront utilisées pour évaluer la quantité de gravier extrait évitée.

4.3. Émissions de GES évitées

La méthodologie de quantification des émissions de GES est basée sur celle énoncée dans le rapport *Quantification des émissions évitées par le projet de matériau* rédigé en 2018. Ce rapport décrit l'approche méthodologique utilisée pour quantifier les émissions de GES qui ont été évitées par le réemploi de matériaux de construction aux ÎdM. Ce rapport quantifie les émissions de GES liées à la gestion en fin de vie du bardeau d'asphalte, soit le transport des matières résiduelles (MR) jusqu'au lieu d'enfouissement technique de Saint-Rosaire ainsi que les émissions fugitives liées à l'enfouissement. Advenant l'exportation des BAPC, ceux-ci seraient exportés et enfouis à l'ÎPE conformément à une nouvelle entente municipale. Ainsi, la quantification liée à l'exportation des MR considère qu'elles parcourent 130 km en bateau et 80 km en camion. Bien qu'actuellement les BAPC ne soient pas envoyés à l'enfouissement, il s'agit du scénario le plus plausible; cette hypothèse a donc été utilisée pour le calcul des émissions. Les émissions liées à l'extraction du gravier seront également considérées dans l'analyse, soit 10 kg éq CO₂ par tonne de gravier (*Athena Sustainable Materials Institute*, s.d.). **Ainsi, la valorisation locale d'une tonne de BAPC permettrait d'éviter l'émission de**

232 kg éq CO₂ dans l'atmosphère. Cette valeur sera donc multipliée par le tonnage de BAPC utilisé pour la réalisation du projet de démonstration. (Beaudoin-Gagnon et Thibodeau, 2017)

4.4. Économie pour la municipalité

Le montant économisé par la municipalité par le réemploi des BAPC localement sera basé sur le coût d'exportation des BAPC ciblé à 150 \$/t par le directeur de l'Hygiène du milieu de la municipalité. À ce montant, seront déduits les revenus liés à la réception des BAPC au CGMR évalués à 64,74 \$/t (section **3.9.1 Réception des bardeaux d'asphalte**). Ainsi, les économies municipales potentielles sont évaluées à 85,26 \$/t multiplié par un gisement annuel de 350 t.

4.5. Gains économiques pour les partenaires industriels

Dans le cadre du projet, les partenaires industriels n'ont eu aucun bénéfice économique résultant de la substitution des BAPC dans la route du parc industriel. La méthodologie utilisée pour quantifier les gains économiques potentiels advenant la valorisation du gisement annuel de BAPC est détaillée dans cette section.

4.5.1. Conditionneur

Les gains économiques pour le conditionneur sont basés sur les résultats de l'analyse économique. Ainsi, les redevances liées au conditionnement des BAPC considèrent les coûts fixes, soit l'achat des équipements et des infrastructures, les frais d'obtention de l'AM22 ainsi que les coûts variables, soit la main-d'œuvre, l'énergie, l'entretien et le transport de la matière première. Le montant des redevances nécessaires pour assurer la poursuite de la filière sera multiplié par le gisement annuel pour évaluer les revenus potentiels pour le conditionnement.

4.5.2. Valorisateur

Pour évaluer les revenus associés à la filière pour le valorisateur, c'est-à-dire l'entreprise qui intégrera les BAPC conditionnés au gravier, il faut considérer le coût de vente de gravier, la location de la benne de mélange, le coût des AM22 nécessaires et le taux de BAPC contenu dans le mélange. Le calcul se base sur un taux de substitution au gravier

de 15 %. L'évaluation du coût lié à la benne de mélange a été calculée avec la formule suivante :

$$C_{BM} = \frac{C_h}{R \times T_{BAPC}}$$

C_{BM} : Coût de la benne de mélange (\$/t)

C_h : Taux horaire

R : Rendement de la benne de mélange (t/h)

T_{BAPC} : Taux en BAPC (%)

Les revenus pour le valorisateur sont basés sur le coût d'une tonne de produit fini (15 % de BAPC) multiplié par la quantité de produits finis qu'il serait possible de produire avec le gisement annuel de BAPC.

5. RETOMBÉES DU PROJET

Cette section présente les retombées du projet ainsi que les retombées potentielles de la filière à la suite du projet.

5.1. Définition de la filière et du potentiel de développement

Le projet a permis de :

- 1) Définir le fonctionnement d'une filière de valorisation des BAPC dans une route basée sur les façons de faire des partenaires du projet;
- 2) Démontrer en laboratoire selon des protocoles normalisés que la méthode de valorisation répond aux exigences du *MTMDET*;
- 3) Évaluer les exigences légales nécessaires à la mise en place de la filière;
- 4) Débuter les demandes d'AM22 des partenaires.

Bref, tous les éléments sont en place pour assurer la poursuite de la filière à la suite de projet.

De plus, l'intégration de 350 t de BAPC au gravier de 0 -³/₄ pouce pour produire un granulat contenant 15 % de BAPC permettrait de générer 2 333 t de granulats qui pourraient être utilisées pour créer des routes ou entretenir des routes existantes. À titre d'exemple, ce tonnage permettrait de produire annuellement une route d'une longueur de 487 m, d'une

largeur de 7 m et d'une épaisseur de 300 mm ou encore 4,6 km d'accotement (sur les 2 côtés).

5.2. Développement d'une avenue de valorisation

Comme il n'y a actuellement aucun débouché aux ÎdM pour les BAPC, le fait de trouver un débouché local pour cette matière constitue en soi un résultat au projet. Cette **méthode de valorisation est reproductible dans l'ensemble des régions du Québec** : elle constitue une solution qui pourrait être répliquée puisque le projet a permis de soulever et surmonter les embûches, d'identifier les enjeux réglementaires et de proposer un protocole permettant de réduire les impacts sur l'environnement. Bien que le coût élevé de la gestion de cette MR en contexte insulaire facilite la rentabilité de la filière, il serait possible de la combiner avec d'autres méthodes de valorisation afin d'en faciliter la rentabilisation.

5.3. Matières résiduelles détournées de l'enfouissement et GES évité

Dans le cadre du projet, 70 t de MR ont été sorties du CGMR pour être conditionnées et 10 t de rebuts ont été réacheminées au CGMR; 60 t de BAPC ont donc été valorisées. Cela représente **13 920 kg éq CO₂ évité**, si l'on considère que ces matériaux auraient été éventuellement exportés jusqu'à l'ÎPE pour y être enfouis. Ces GES incluent les émissions évitées par la substitution du gravier vierge dans la route.

Considérant le gisement annuel de BAPC qui est géré par le CGMR, la mise en place d'une filière représente une valorisation potentielle de 350 t de BAPC qui pourraient potentiellement être valorisées localement et **81 200 kg éq CO₂ évités par année**.

5.4. Retombées économiques

Ce projet a également eu de nombreuses retombées économiques sur la communauté et les partenaires.

Économies pour la municipalité

Ce projet a permis d'éviter la gestion de 60 t de BAPC, ce qui représente un coût évité à la communauté de 5 115 \$. La valorisation des apports annuels estimée à 350 t permettrait de générer des économies de 29 841 \$ par année pour la municipalité.

Gains pour les entreprises partenaires

Dans le cadre du projet, aucune entreprise n'a retiré un bénéfice financier du projet. Par contre, la mise en place d'une filière aurait des retombées économiques bénéfiques pour l'ensemble des partenaires. Les gains et économies annuels potentiels à la suite du projet des partenaires sont décrits au Tableau 12°: ils sont basés sur un tonnage annuel de 350 t.

Tableau 12. Gains et économies potentiels pour les partenaires

Organisme	Montant (\$)	Explication
Municipalité – Hygiène du milieu	29 841 \$	Économie pour la gestion des MR
Municipalité – Services techniques et réseaux publics	0 \$	Construction de routes moindres
<i>Terrassement Maxime Deblois</i>	35 000 \$	Conditionnement des BAPC
<i>P&B Entreprises</i>	35 800 \$	Redevance pour l'utilisation des BAPC par les Services techniques et réseaux publics municipaux
Total	100 641 \$	

Autres bénéfices

Outre les bénéfices environnementaux et économiques, le projet permettra aux entreprises partenaires de bénéficier d'une image positive en aidant la communauté à développer des initiatives de valorisation. Il permettra également à la municipalité de réduire sa dépendance aux contrats externes pour la GMR des BAPC.

Création d'emplois

Par ailleurs, la valorisation de BAPC permettra de consolider un emploi pour le conditionnement et de diversifier les activités économiques d'une entreprise locale.

6. RECOMMANDATIONS POUR LA MISE EN PLACE D'UNE FILIÈRE

Plusieurs éléments doivent être pris en compte lors de la mise en place d'une filière de valorisation des BAPC. Cette section décrit les recommandations et les facteurs de réussite à considérer.

6.1. Aspects réglementaires

Les contraintes réglementaires accentuent considérablement les coûts de conditionnement des BAPC. Il faut donc prendre en considération les coûts des infrastructures pour le conditionnement (bâtiment et dalle de béton), la zone d'entreposage étanche, les coûts des certificats de localisation. La construction d'un abri étanche pour l'entreposage des BAPC, bien que plus coûteuse, permet de réduire les frais liés à la manipulation des super-sacs en plus d'être plus durable.

6.2. Dimensionnement de l'équipement

Les équipements de broyage permettant le conditionnement des BAPC sont de gros équipements conçus pour être extrêmement robustes et résistants à l'abrasion de cette MR. Pour rentabiliser ces équipements, il faut un gros volume de MR (bois, BAPC ou autres CRD) ou encore un équipement polyvalent. Un équipement de taille réduite a été utilisé dans le cadre du projet : comme mentionné, cet équipement n'était pas adapté à cette MR pour une filière continue de grande ampleur. Ainsi, plusieurs options existent, soit la location de machinerie des compagnies à l'extérieur des IdM, l'achat d'un équipement polyvalent permettant le broyage du bois ou d'autres matières.

6.3. Entreposage des bardeaux d'asphalte broyés

L'utilisation de super-sacs pour entreposer les BAPC s'est avérée problématique à plusieurs égards :

- 1) Elle augmente les manipulations ainsi que les coûts de valorisation de manière substantielle;
- 2) Elle occasionne des pertes en raison de la fragilité de sacs;
- 3) Elle engendre des déchets qui doivent être enfouis; les sacs ne pouvant pas être réemployés puisqu'ils sont déchirés et souillés après usage;

- 4) Lorsque les sacs sont vidés, ils se fragmentent en section, ce qui occasionne des bris à la benne de mélange et en réduit le rendement.

Ainsi pour assurer une filière rentable et performante, il est nécessaire de prévoir un abri muni d'une dalle de béton pour l'entreposage des BAPC broyés. Ce mode d'entreposage limiterait par la même occasion les risques d'agglomération des copeaux.

6.4. Rentabilité

Cette avenue de valorisation pourrait être utilisée dans toutes les régions du Québec. Toutefois, dans d'autres contextes, il y a fort à parier que cette méthode ne serait pas rentable en raison du coût de GMR de cette matière. Si les coûts de transport et d'enfouissement sont faibles, il sera difficile de concurrencer le prix du gravier. Au coût de conditionnement s'ajoutent les coûts de manipulations supplémentaires nécessaires pour mélanger les BAPC au gravier.

Dans le cas présent, les coûts d'entrée au CGMR devront être augmentés pour permettre de financer l'ensemble de la filière.

6.5. Qualité du tri

Comme mentionné à la section **3.7 Conditionnement des bardeaux d'asphalte**, la contamination des BAPC par les corps étrangers peut s'avérer problématique, en plus d'accroître les coûts de conditionnement et les frais de transport. De plus, ces corps étrangers peuvent endommager l'équipement de broyage. Par ailleurs, une contamination de plus de 1 % n'est pas tolérée par le *MELCC* et modifie le comportement des matières dans les temps puisque les matières comme le bois se dégraderont plus rapidement que les granulats.

Afin de réduire l'impact de ce problème sur la filière, il est recommandé de transférer les BAPC directement au site de conditionnement de manière à éviter de les contaminer avec les anciens BAPC qui ont un taux de contamination beaucoup plus élevé. Par ailleurs, cela limite le risque de contamination avec les autres MR présentes au CGMR.

En outre, il est indispensable de mettre en place des consignes strictes sur le tri des BAPC acceptés; les résidus de démolition à la machinerie ne pourront pas être valorisés dans une telle filière.

6.6. Risque de contamination à l'amiante

Les bardeaux d'asphalte ne contenant plus d'amiante depuis près de 40 ans, le risque que de nouveaux apports au CGMR soient contaminés est extrêmement faible (section **3.7.4 Contamination potentielle à l'amiante**). Toutefois, si les BAPC accumulés au CGMR étaient valorisés, il est recommandé de procéder aux analyses d'amiante chaque 100 ou 200 t de BAPC non broyés de manière à réduire les risques liés au broyage d'une matière contaminée à l'amiante.

6.6.1. Coût d'entrée au CGMR

Pour que le coût du mélange de gravier et de BAPC soit le même que celui du gravier de 0 -³/₄ pouce traditionnel, les coûts de réception devraient être augmentés à 125 \$/t pour les particuliers et 150 \$/t pour les entrepreneurs tels que détaillés dans la section **3.9 Analyse économique de la filière de valorisation**.

6.6.2. Création d'un comité

Il est recommandé de créer un comité afin d'assurer la poursuite de la filière à la suite du projet, dès que les vérifications seront effectuées par l'*UdeS* afin d'assurer que la route respecte les normes BNQ applicables aux revêtements routiers.

7. CONCLUSION

Les travaux de recherche menés à l'UdeS ont montré que 15 % du gravier pouvaient être remplacés par du BAPC dans un revêtement routier en respectant la norme BNQ 2560-114 et que les particules de ½ pouce étaient la taille optimale pour ce type d'usage. Ces recommandations ont donc été considérées pour le choix de l'équipement ainsi que pour la réalisation du banc d'essai.

Les recherches d'équipements ainsi que les tests effectués sur deux broyeurs ont permis de déterminer et d'acquérir le broyeur BM-309, un broyeur de format « laboratoire » permettant de conditionner les matières nécessaires pour la construction d'une section de route. Une analyse économique réalisée sur quatre équipements montre que le broyeur Packer 750 permettrait de réaliser le conditionnement au coût le plus bas, soit 100 \$/t. Un convoyeur magnétique a également été acquis afin de retirer les clous après le broyage.

L'étape de conditionnement a permis de définir une procédure de transport et de broyage, de vérifier que le taux de contamination respecte les exigences du MELCC et de broyer les BAPC nécessaires pour la réalisation du banc d'essai, soit 60 t. Une analyse du taux d'amiante effectuée en laboratoire montre que les BAPC broyés ne contiennent pas d'amiante et des recherches complémentaires confirment que le risque est minime. Les BAPC ont été intégrés au gravier avec une benne de mélange : cette étape a permis de retirer les clous et de faire deux mélanges à différents teneurs de BAPC (5 et 15 %). Trois planches d'essai ont ainsi été réalisées sur la route du parc industriel de Havre-aux-Maisons. Des tests seront réalisés un an après la construction pour suivre l'évolution des granulats dans le temps.

Le projet a eu des retombées environnementales, soit la valorisation de 60 t de BAPC, l'évitement de près de 14 t éq CO₂, en plus du développement d'une avenue de valorisation pour un résidu de CRD problématique aux ÎdM. Advenant la valorisation du gisement annuel de BAPC, la filière permettrait de valoriser annuellement 350 t de BAPC, d'éviter l'émission de 81 t éq CO₂, en plus de générer des retombées de plus de 100 000 \$ pour les partenaires du projet.

De plus, les nombreuses embûches rencontrées dans les différentes étapes du projet ont permis d'élaborer une liste de recommandations permettant d'optimiser la filière et ultimement de réduire les coûts de valorisation.

Finalement, l'ensemble des objectifs du projet ont été atteints. En effet, un équipement de conditionnement permettant de broyer les BAPC au coût le plus faible a été identifié. La réalisation du banc d'essai a permis de tester et de bonifier les procédures de conditionnement et d'entreposage, en plus de mettre en pratique les résultats des travaux de l'*UdeS*. Les demandes d'AM22 sont entamées et pourront être déposées lorsque les suivis sur le banc d'essai auront été réalisés sur la route. Bref, tous les éléments nécessaires pour mettre en place une filière de valorisation des BAPC dans des routes non pavées ont été réalisés.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Ali, N., Chan, J. S. S., Potyondy, A. J., Bushman, R. and Bergan, A. T. (1995). *Mechanistic evaluation of asphalt concrete mixtures containing reclaimed roofing materials*. Transportation Research Record. [En ligne] [<http://onlinepubs.trb.org/Onlinepubs/trr/1995/1515/1515-004.pdf>] (Consulté le 9 mai 2018)
- Association des maîtres couvreurs du Québec (2019). *Manuel d'entretien, Édition 2019*. [En ligne] [https://www.amcq.qc.ca/wp-content/uploads/2019/08/190521-AMCQ-Manuel-dentretien_HRspread.pdf] (Consulté le 5 octobre 2019)
- Athena Sustainable Materials Institute (ASMI) (s.d.). *Modélisation effectuée sur le logiciel Impact Estimator for Buildings (version 5.2.0119). Report of Life Cycle Stage. Detailed LCA Result*. (Modélisations effectuées le 23 août 2017.)
- Beaudoin Gagnon M.-H. et Thibodeau M. (2017). *Quantification des émissions des GES évitées par le projet de matériaux de construction*. Centre de recherche sur les milieux insulaires et maritimes, Îles-de-la-Madeleine (Québec). xiii, 33 p. + annexes.
- Beaudoin-Gagnon M.-H., Thibodeau M., Massé M.-O., Petitpas, P., Poirier, M., Rabenasolo H., Coll. Leblanc, M., Poirier, Y., Richard J., Boudreau, D. (2018). *Projet d'écogestion des chantiers de construction aux Îles-de-la-Madeleine : Rapport final*. Centre de recherche sur les milieux insulaires et maritimes, Îles-de-la-Madeleine (Québec). xiii, 77 p. + annexes.
- Bellavance, L. (2017). Courriel de Lorraine Bellavance, ing., analyste à la Direction régionale de l'analyse et de l'expertise du Bas-Saint-Laurent et de la Gaspésie-Îles-de-la-Madeleine du ministère de l'Environnement et de la Lutte aux changements climatiques. Courriel du 1^{er} novembre 2017.
- Bellavance, L. (2020). Courriel de Lorraine Bellavance, ing., analyste à la Direction régionale de l'analyse et de l'expertise du Bas-Saint-Laurent et de la Gaspésie-Îles-de-la-Madeleine du ministère de l'Environnement et de la Lutte aux changements climatiques. Courriel du 8 janvier 2020.

- Bernardin, G. (2018). Discussion téléphonique avec Gilles Bernardin, directeur du Regroupement des recycleurs et récupérateurs des matériaux de construction et de démolition du Québec. Discussion du 4 avril 2018.
- California Integrated Waste Management Board (CIWMB) (2011). *Weight conversion sources and table. Appendix 1*. [En ligne]
[<https://www.contracosta.ca.gov/depart/cd/recycle/c-n-d/volume-to-weight-conversion.pdf>] (Consulté le 28 octobre 2019)
- Chesner, W. H., Collins, R. J., Mackay, M. H. (1998). *User guideline for waste and by product materials in pavement construction report prepared for the office of engineering research and development federal highway administration publication no. FHWA-RD-97-148 april 1998*. [En ligne]
[<https://www.fhwa.dot.gov/publications/research/infrastructure/structures/97148/rss1.cfm>] (Consulté le 9 mai 2018)
- Construction Material Recycling Association (CMRA) (2007). *Recycling tear-off asphalt shingles: best practices guide*. October 11, 2007. [En ligne]
[http://www.shinglerecycling.org/sites/www.shinglerecycling.org/files/shingle_PDF/S_hingleRecycling-BPG-DFK-3-22-2010.pdf] (Consulté le 1er décembre 2019)
- Gouvernement du Canada (2018). *Données des stations pour le calcul des normales climatiques au Canada de 1981 à 2010*. Îles-de-la-Madeleine, Québec. [En ligne]
[http://climate.weather.gc.ca/climate_normals/results_1981_2010_f.html?searchType=stnProv&lstProvince=QC&txtCentralLatMin=0&txtCentralLatSec=0&txtCentralLongMin=0&txtCentralLongSec=0&stnID=5748&dispBack=0] (Consulté le 5 novembre 2018)
- Gouvernement du Québec (2009). *Lignes directrices relatives à la gestion de béton, de brique et d'asphalte issus des travaux de construction et de démolition et des résidus du secteur de la pierre de taille*. Ministère du Développement durable, de l'Environnement et des Parcs. [En ligne]
[<http://www.mddep.gouv.qc.ca/matieres/valorisation/lignesdirectrices/beton-brique-asphalte.pdf>] (Consulté le 9 mai 2018)
- Gouvernement du Québec (2019). *Prévenir les effets de l'amiante sur la santé*. Gouvernement du Québec. [En ligne] [<https://www.quebec.ca/sante/conseils-et->

prevention/sante-et-environnement/prevenir-les-effets-amiante-sur-la-sante/#c3633]
(Consulté le 2 juillet 2019)

Institut national de santé publique du Québec (INSPQ) (2013). *Amiante. Maladies respiratoires reliées au travail*. Centre d'expertise et de référence en santé publique. [En ligne] [<https://www.inspq.qc.ca/amiante>] (Consulté le 2 juillet 2019)

Malo, J.-M. (2013). *Incorporation de particules de bardeaux d'asphalte de postconsommation dans les enrobés bitumineux*. Mémoire de maîtrise. École de technologie supérieure. [En ligne] [http://espace.etsmtl.ca/1137/1/MALO_Jean-Michel.pdf]. (Consulté le 15 avril 2018)

Municipalité des Îles-de-la-Madeleine (2013). *Horizon 2025. Bâtir ensemble l'avenir – un projet de territoire pour les Îles-de-la-Madeleine*. [En ligne] [https://www.muniles.ca/wp-content/uploads/Document_FINAL_PROJET_DE_TERRITOIRE.pdf] (Consulté le 2 octobre 2019)

Municipalité des Îles-de-la-Madeleine (2016). *Plan de gestion des matières résiduelles du territoire des Îles-de-la-Madeleine*. Direction de l'hygiène du milieu. Dernière version révisée le 5 juillet 2016. [En ligne] [<https://www.muniles.ca/wp-content/uploads/PGMR.pdf>] (Consultée le 5 mai 2018)

National Asphalt Pavement Association (NAPA) (2019). *Guidelines for the use of reclaimed asphalt shingles in asphalt pavement*, Second Edition. Information Series 136. [En ligne] [http://www.asphalt pavement.org/PDFs/EngineeringPubs/IS136_Guidelines_for_Use_of_RAS_2e-web.pdf]

Noël, F. (2006). *Incorporation de particules de bardeaux d'asphalte de postconsommation dans les enrobés bitumineux*. [En ligne] [<http://collections.banq.qc.ca/ark:/52327/bs1992020>] (Consulté le 16 avril 2018).

Nuth, M. (2020). *Valorisation des bardeaux d'asphalte post-consommation dans les matériaux granulaires de fondation et de revêtement de route*. Rapport final. Université de Sherbrooke. 52 p.

- Permaroute (s.d.). *Permaroute. Colmatage de nids-de-poule*. [En ligne] [<http://permaroute.ca/services/>] (Consulté le 20 janvier 2020)
- Rectiligne (s.d.). *Ligne de stationnement*. [En ligne] [<https://rectiligne.ca/>] (Consulté le 20 janvier 2020)
- RECYC-QUÉBEC (2018). *Résidus de construction, de rénovation et de démolition (CRD), Fiche informative*, 12 pages. [En ligne] [<https://www.recyq-quebec.gouv.qc.ca/sites/default/fîles/documents/Fiche-info-crd.pdf>] (Consulté le 19 septembre 2018)
- Roy, A. (2018). Discussion téléphonique avec André Roy, le président de Permaroute, 13 avril 2018.
- Surwilo, J. (2003). *Performance of recycled asphalt shingles on road applications*. Vermont Agency of Natural Resources. [En ligne] [http://www.shinglerecycling.org/sites/www.shinglerecycling.org/fîles/shingle_PDF/surwilo.pdf] (Consulté le 9 mai 2018)
- Townsend, T., Laux, S., Su, J. and Anshassi, M. (2018). *Guidance for construction & demolition debris recyclers on the environmental impacts of asphalt products*. University of Florida, The Department of Environmental Engineering Sciences, 20 pages.
- Zhou, F., Button, J.W. and Epps, J. (2011). *Best Practice for using RAS in HMA*. Texas Department of Transportation, Technical Report: September 2010 - August 2011. [En ligne]. [<https://static.tti.tamu.edu/tti.tamu.edu/documents/0-6614-1.pdf>] (Consulté le 28 octobre 2019)

ANNEXES

Annexe 1 – Rapport de l’UdeS

À : CERMIM

Att. : Marie-Hélène Beaudoin Gagnon

37, chemin Central, C.P. 2280

Havre-aux-Maisons, Îles-de-la-Madeleine (Québec) G4T 5P4

VALORISATION DES BARDEAUX D'ASPHALTE POST- CONSOMMATION DANS LES MATÉRIAUX GRANULAIRES DE FONDATION ET DE REVÊTEMENT DE ROUTE

Date d'émission : 12/02/2020

Mathieu Nuth, Ph.D., ing. 5030831



UNIVERSITÉ DE
SHERBROOKE

TABLE DES MATIÈRES

1	INTRODUCTION	3
1.1	Mandat.....	3
1.2	Organisation du rapport.....	3
2	RAPPEL DE LA PROBLÉMATIQUE ET OBJECTIFS	4
2.1	Problématique	4
2.2	Objectifs.....	4
3	REVUE DE LITTÉRATURE	5
3.1	Introduction.....	5
3.2	Composition des bardeaux d'asphalte post-consommation (BAPC).....	5
3.3	Transformation des BAPC.....	7
3.4	Critères d'utilisation des BAPC.....	9
3.5	Rappel des normes pour la caractérisation des matériaux granulaires.....	11
4	MÉTHODOLOGIE DE RECHERCHE	13
4.1	Résumé	13
4.2	Essais préliminaires.....	13
4.3	Caractérisation des mélanges de gravier avec BAPC.....	16
4.4	Planche d'essais in-situ	21
5	RESULTATS ET ANALYSE	25
5.1	Essais préliminaires.....	25
5.2	Essais de laboratoire sur matériaux granulaires	29
5.3	Essais in situ.....	36
6	CONCLUSIONS ET RECOMMANDATIONS.....	40
7	BIBLIOGRAPHIE	42

1 INTRODUCTION

1.1 Mandat

Le présent rapport est le livrable final de la subvention d'engagement partenarial entre l'Université de Sherbrooke, groupe de géotechnique, et P&B Entreprises, intitulée « valorisation de bardeaux d'asphalte post-consommation (BAPC) dans le recouvrement et la structure de chaussées. » La participation active du Centre de recherche sur les milieux insulaires et maritimes (CERMIM) a été indispensable à la réussite du projet.

1.2 Organisation du rapport

En plus d'une introduction et d'une conclusion présentant les recommandations, le rapport est structuré en 4 parties, présentant la problématique sommaire (section 2), la revue de littérature (section 3), la méthodologie d'essais (section 4), les résultats d'essais et leur analyse (section 5)

2 RAPPEL DE LA PROBLÉMATIQUE ET OBJECTIFS

2.1 Problématique

Au Québec, la gestion des matières résiduelles (GMR) est un enjeu majeur en raison des coûts importants qui y sont associés (Municipalité des Îles-de-la-Madeleine 2016). L'éloignement géographique de certaines régions comme les Îles de la Madeleine (IDL) contribue à accentuer cet enjeu puisque les coûts de GMR sont décuplés en raison de l'exportation des matières résiduelles sur le continent. On estime à plusieurs milliers de tonnes la masse de l'amas de bardeaux d'asphalte post-consommation (BAPC) actuellement disponible aux IDL. Cette masse est en constante évolution en raison des apports annuels importants estimés à plus de 350 tonnes (Beaudoin-Gagnon et al. 2018). Les délais d'exportation des BAPC sont dus à la masse importante de cette matière qui rend le transport extrêmement coûteux en plus de contraindre l'exportation des autres matières résiduelles qui ne peuvent être accumulés sans risquer de contaminer le sol. Cette situation est favorable au développement de solutions innovantes de valorisation de matières résiduelles dans les éco-matériaux pour la construction.

L'enjeu économique et environnemental est de 1) valoriser des matières résiduelles récurrentes (BAPC), 2) trouver des débouchés au granulats recyclés élaborés (fondation ou revêtement de route) et 3) offrir des matériaux à valeur ajoutée novateurs et uniques à coût avantageux.

Au Québec, la norme 4202 du Tome VII du ministère des transports (MTMD) (MTMD 2017) permet l'utilisation des matériaux recyclés, notamment les granulats bitumineux recyclés (GBR) dans la composition des enrobés bitumineux et des structures de chaussée (Langlois 1982). Les pourcentages autorisés, variant de 10 à 20% de GBR et jusqu'à 5% de BAPC, sont dictés par le principe de précaution que les matériaux avec GBR doivent être au moins aussi performants que ceux sans matériaux recyclés (Jambou 2015), vis-à-vis notamment de la fissuration, du désenrobage ou de la capacité portante (Boutin 2016). Les matériaux granulaires recyclés (MR) doivent cependant continuer de faire l'objet d'études afin d'optimiser les proportions de matières résiduelles (Franklin Associate 1998, Hassan et al. 2016, Jambou 2015, Soleimanbeigi et al. 2014), en particulier dans le contexte de projets de recherche futurs dans lesquels la valorisation de quantités importantes de BAPC est cruciale.

2.2 Objectifs

Le projet de recherche vise à développer de nouveaux matériaux granulaires à haute valeur ajoutée pour la construction de routes en 1) valorisant les BAPC et 2) en respectant le cahier des charges en termes de propriétés fonctionnelles des granulats développés.

3 REVUE DE LITTÉRATURE

3.1 Introduction

Le présent chapitre dresse un bref état de l'art concernant la nature des bardeaux d'asphalte post-consommation, leur transformation et leur valorisation en tant que matériaux recyclés. Les méthodes de caractérisation des matériaux granulaires pour les chaussées, puisqu'elles sont standardisées et très largement utilisées, ne font pas partie de la revue de littérature, mais sont listées dans le paragraphe 3.5.

3.2 Composition des bardeaux d'asphalte post-consommation (BAPC)

Tel que mentionné en introduction, avec une accumulation annuelle de BAPC d'environ 350 tonnes, les Îles-de-la-Madeleine accumulent plusieurs milliers de tonnes de BAPC qui ne sont pas exportées sur le continent. Le tableau 3.1 ci-dessous présente la composition des matériaux de toitures. On note que dans le cas résidentiel comme commercial, les bardeaux d'asphalte représentent 89% ou plus des matériaux.

Tableau 3.1. Composition des matériaux de toitures, Selon Ali et al. (1995)

Composition (% par poids)	Résidentielles	Commerciales
Bardeaux d'asphalte	96	89
Finition de métal	0,14	2,5
Clous	0,5	3,4
Bande de plastique	0,06	0,35
Sous couche de feutre	3,3	4,75
Total	100	100

Selon Malo (2013) il est possible de classer en catégories A, B et C les bardeaux trouvés sur un site d'enfouissement selon la quantité de matières « non désirables » correspondant aux matériaux différents du bardeau. La classe A désigne les matières avec très peu de contaminants. À partir de 2010 de plus en plus d'entrepreneurs ont commencé à livrer cette classe ce qui a permis d'augmenter considérablement la qualité des BAPC.

Après leur mise en place, les bardeaux subissent des modifications à cause des conditions externes comme le climat ce qui a une influence sur la composition des BAPC.

Malgré l'exposition du bardeau aux conditions climatiques, son pourcentage de granulats et de fibres n'a pas une diminution considérable (Malo, 2013).

Les bardeaux d'asphalte post-consommation sont composés d'un pourcentage de bitume (un mélange d'hydrocarbures de couleur noire) de 30 – 35 %, de granulats (50 – 60 %) et de fibres inorganiques ou organiques (1 – 12%) comme des scories d'acier, de caoutchouc et des clous. Plusieurs de ces matériaux se retrouvent dans d'autres produits du bitume, comme l'enrobé compacté (Figure 3.1).



Figure 3.1. Composition enrobé compacté (MTQ, 2016)

Premièrement, le bitume, étant très dur et oxydé, agit comme un liant pour tous les autres composants du bardeau et il ajoute une propriété imperméable. Il existe deux types de bitume : le bitume de surface qui est un imperméabilisant et contribue à l'adhérence entre les autres composants et le bitume de saturation qui est un traitement des fibres de renforcement.

Ali et al (1995) ont réalisé une expérience de caractérisation du bitume mettant en évidence le fait que la viscosité cinématique du bitume est plus grande dans les bardeaux que dans les enrobés. Le Tableau 3.2 présente les résultats des divers essais effectués sur le bitume des BAPC où on constate des hautes valeurs de viscosité.

Tableau 3.2. Résultats des essais sur le bitume de BAPC (Ali et al. 1995)

Essai effectué	Résultat	Norme
Essais de pénétration à 25°C	17.0 dmm	ASTM D 5
Viscosité cinématique à 135°C	54,000 cSt	ASTM D 2170
Densité	1.000	ASTM D-3124

Dans la composition des granulats des bardeaux de postconsommation, les particules de céramique, qui sont de roches recouvertes d'oxyde de métal, représentent le composant le plus important. On liste aussi les particules de superposition de tête qui proviennent de scories de charbon concassé, les clous, et le sable de surface arrière. (Noël, 2006)

Une étude de Newcomb et al (1993) a séparé les différents types de granulats rencontrés dans le bardeau et sont présentés dans le Tableau 3.3 selon leur proportion.

Tableau 3.3 Composantes granulaires dans les BAPC (Newcomb et al. 1993)

Composant	Quantité en proportion de la masse totale du bardeau	Dimmension des granulats
Granulat de céramiques	10-20%	Passant 1,70 mm Retenu 425 µm
Granulat de superposition de têtes	15-25%	Passant 1,70 mm Retenu 425 µm
Sable de surface arrière	5-10%	Passant le 425 µm Retenu 106 µm
Stabilisateur	70%-90%	Passant 150 µm retenu 75 µm

Par ailleurs, la présence des fibres dans le bardeau assure la durabilité de l'enrobé. Selon Noël (2006), il existe trois types de fibres : les fibres synthétiques, les fibres de cellulose, et les fibres d'amiante. Les fibres de cellulose montrent la plus grande absorption ce qui a une influence sur la teneur en eau optimale dans l'enrobé.

3.3 Transformation des BAPC

Le processus de recyclage commence par la récupération des bardeaux pour obtenir par la suite le matériau idéal et prêt à utiliser dans les mélanges. La transformation des BAPC comprend trois étapes: le tri des matériaux défavorables, le broyage et l'obtention de la granulométrie des poudres.

Tri des matériaux défavorables

Afin de préparer un mélange de BAPC adéquat pour les essais, il est nécessaire de trier les matériaux non désirables comme le bois (élément le plus problématique car il ne se dissout pas dans les mélanges d'asphalte comme les éléments métalliques), les clous, les bordures métalliques qui peuvent contaminer les BAPC.

Selon Noël (2006), d'autres méthodes existent pour enlever les résidus comme les métaux. Ces derniers peuvent être retirés grâce à l'action d'un champ magnétique. Ainsi, un convoyeur avec inducteur de champ magnétique qui varie selon la nature des matériaux (courant de Foucault). Par exemple, l'inducteur peut repousser l'aluminium. La séparation des résidus organiques se fait par flottation.

Broyage

Aussi appelé processus de déchetage des bardeaux, le broyage est une étape importante pour bien assurer les dimensions des particules à utiliser pour qu'elles correspondent aux besoins des mélanges. Selon les exigences du traitement des bardeaux, il est recommandé de ne pas dépasser une dimension de 13 mm pour assurer un traitement complet des déchets de bardeaux et maintenir l'uniformité dans l'incorporation des éléments déchetés dans le mélange. Si la taille dépasse les 13 mm, les particules ne vont pas se disperser facilement et ils se comporteront comme des granulats.

Les machines de broyage sont de différents types : broyeur à lames rotatif, comme celui utilisé dans le projet qui est fourni par le Carrefour d'innovations en technologies écologiques (CITÉ) de l'Université de Sherbrooke, broyeur à marteaux à haute vitesse ou un broyeur à sec avec un broyeur à boulettes d'acier.

Un facteur à remarquer pendant le déchetage est la température qui accroît durant la procédure ce qui entraîne une agglomération des particules. Afin de conserver la température basse et continuer la bonne maniabilité des éléments, il est recommandé d'arroser pendant le déchetage.

Une recommandation de l'étude d'Ali et al. (1995) indique de broyer à une température à -10 °C pour éviter l'agglomération durant le broyage.

Le risque de stockage de particules de bardeaux suite au broyage aussi génère des problèmes d'agglomération qu'après ils causeront des irrégularités dans les mélanges de bardeaux. Pour cette raison, il est possible de recommencer le processus de déchetage afin de bien pulvériser les particules encore grosses, en plus de les tamiser.

Granulométrie

La courbe granulométrique des BAPC broyés peut être obtenue par les procédures standard normalisées (ASTM D6913/D6913M – 17 et norme BNQ 2560-114). Lorsque le produit du broyage est très fin, il peut être nécessaire d'effectuer une sédimentométrie. Pour une caractérisation fine et une description physique et qualitative des poudres, la microscopie électronique à balayage (MEB) permet travailler sur différents échantillons humides, huileux ou non conducteurs. Le MEB permet, par l'imagerie en électrons, de dévoiler les détails de surface en utilisant une tension d'accélération et des pressions variables.

Par ailleurs, un granulométrie laser (comme le Mastersizer 2000 de l'Université de Sherbrooke) peut être approprié pour mesurer la distribution granulométrique d'une poudre avec des particules de 20 nm à 2 mm de diamètre dispersées dans un milieu liquide. Il faut que la poudre soit exemptée d'agrégats. La méthode présente plusieurs avantages qui sont la rapidité et facilité de la mesure, la flexibilité du montage, la très grande résolution et la grande étendue de la gamme de mesure.

3.4 Critères d'utilisation des BAPC

La première règle de base pour l'utilisation des matériaux recyclés dans les enrobés ou matériaux granulaires est que le comportement d'un mélange avec matériaux recyclés doit être supérieur ou équivalent au comportement d'un enrobé ou matériau granulaire sans matériaux recyclés. La présente section dresse un bref résumé de l'utilisation de matériaux recyclés de nature bitumineuse.

Utilisation des Granulats bitumineux recyclés

Les granulats bitumineux recyclés, récupérés ou concassés sont des matériaux qui proviennent du concassage de l'asphalte de la route qui sont disponibles pour une réutilisation dans de nouveaux mélanges. Selon l'article 13.3.2.2.2 « Enrobés à chaud formulés selon la méthode du Laboratoire des chaussées » du Cahier des Charges et Devis Généraux (CCDG) et à la norme 4202 du Tome VII du ministère des transports (MTMDET), les pourcentages de granulats bitumineux recyclés (GBR) dans le mélange est limité à 20 % (usage général) et à 10% (couches de roulement des autoroutes).

Les études en laboratoire et le bon comportement des enrobés avec GBR dans projets réels sur autoroutes démontrent une performance adéquate du mélange. On note, par exemple, dans la figure 3.2, que la différence visuelle est minime entre une section d'autoroute avec et sans GBR intégrés.



Figure 3.2. Autoroute sans GBR et avec GBR

Entre 2008 et 2015 la proportion d'enrobé contenant du GBR est passée de 15.3% à 71.3% (Figure 3.3). Les données démontrent que le recyclage des matériaux bitumineux devient un processus incontournable dans la construction.

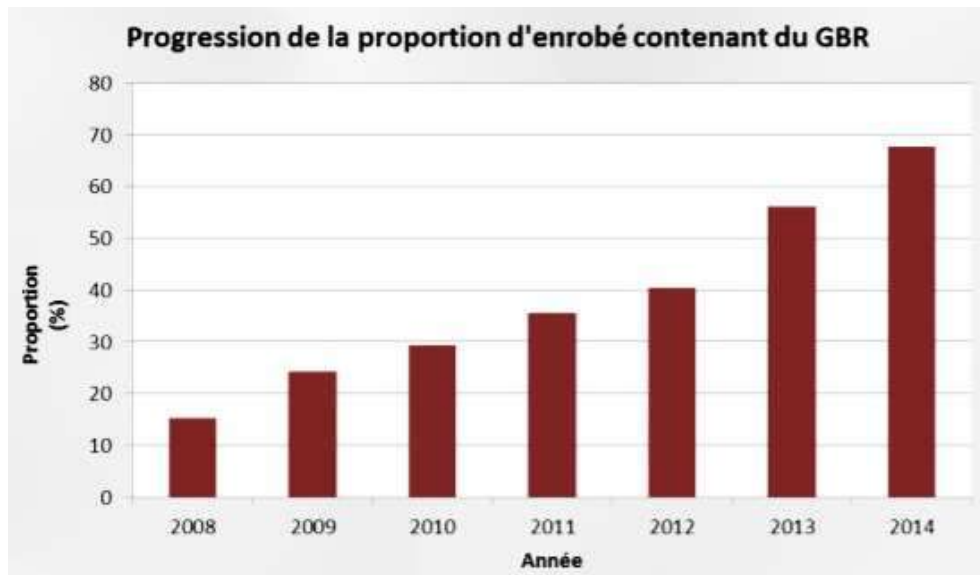


Figure 3.3. Progression de la proportion d'enrobé contenant GBR (MTQ, 2016)

Utilisation des BAPC

Selon les critères pour la conception des enrobés avec BAPC, le Ministère des Transports du Québec (MTQ) avec la norme 4202 fait une distinction entre des enrobés de surface et des enrobés de base ce qui est montré dans le Tableau 3.4.

Tableau 3.4. Critères des enrobés avec BAPC

Critères	Enrobés de surface	Enrobés de base
Pourcentage autorisé dans l'enrobé	≤ 3.0 %	≤ 5.0 %
Dimension du bardeau	≤ 10 mm	≤ 10 mm
Ajustement de la teneur en bitume par rapport à	≤ 0.15 %	≤ 0.25 %
Conditions de circulation	DJMA < 10 000 Non autorisé sur les autoroutes	Aucune restriction

* DJMA = Débit Journalier Moyen Annuel

Cependant, il n'existe pas d'information sur le comportement de mélanges avec plus de 5 % de particules de BAPC.

Depuis 2016, le Ministère des Transports, de la Mobilité durable et de l'Électrification des transports (MTMDET) a autorisé l'incorporation des bardeaux dans le revêtement de chaussée en enrobé. Cependant, il existe toujours la préoccupation de l'amiante qui est un contaminant très nocif pour la santé des travailleurs impliqués au processus de recyclage. En outre, certains fabricants de bardeaux d'asphalte ont substitué le carton bitumineux par des feuilles de fibre de verre ce qui a compliqué le recyclage et la valorisation postérieure à long terme.

3.5 Rappel des normes pour la caractérisation des matériaux granulaires

Selon le guide de contrôle de la qualité des sols et des granulats émis par le Ministère des transports du Québec, les matériaux granulaires utilisés notamment pour les sous-fondations, fondations couches de roulement et accotement des chaussées doivent obéir à des normes strictes en termes de qualité, de mise en place et de durabilité.

La norme NQ 2560-114 – Granulats définit ces matériaux granulaires, en désigne les classes et précise les caractéristiques intrinsèques et de fabrication.

Le tableau 3.5 ci-dessous résume les caractéristiques attendues des granulats ainsi que les essais prescrits le cas échéant pour déterminer ces caractéristiques.

Tableau 3.5. Exigences du MTQ sur les granulats

Caractéristique	Essai prescrit
Caractéristiques intrinsèques : résistance à l'usure, résistance aux chocs, sensibilité aux agents atmosphériques, pétrographie	Essai Micro-Deval (LC 21-070 et LC 21-101), Essai Los Angeles (LC21-400) et de friabilité (LC 21-080)
Granulométrie	Courbe granulométrique
Compactage	Essai Proctor modifié ASTM D1557
Perméabilité	Essai de Perméabilité à charge constante ou variable
Forme et texture des granulats	Contenu de granulats cubiques, fracturés, rugueux
Propreté des granulats	CSA-A23.2-5A

À titre de comparatif, plusieurs études sur les matériaux recyclés sont listées dans le tableau 3.6. Toutefois, certains essais sont propres aux enrobés bitumineux et donc non pertinents pour le présent projet. La démarche méthodologique est présentée dans la section 4, qui suit.

Tableau 3.6. Comparaison entre études sur matériaux recyclés

Essais / Auteurs	Ali et al. (1995)	Nöel (2006)	Malo (2013)	Projet
Granulométrie	X	X		X
Essai de Marshall	X	X		
Module Réversible	X	X		X
Densité Maximale			X	X
Résistance à l'orniérage		X	X	
Essai de retrait thermique		X	X	
Perméabilité				X

4 MÉTHODOLOGIE DE RECHERCHE

4.1 Résumé

La méthodologie a compris trois tâches principales qui sont résumées ci-dessous.

Tâche # 1 Broyage mécanique des BAPC: Les BAPC ont été broyés en particules de granulométrie variée afin d'être ajoutés aux matériaux granulaires. Pour ce faire, une étape manuelle de séparation grossière a été effectuée afin d'éliminer les clous, bordures métalliques et morceaux de bois pouvant contaminer les BAPC. Les BAPC ont été ensuite broyés mécaniquement en utilisant le broyeur du CERMIM incluant un tri des éléments métalliques en utilisant un aimant. L'ensemble des tâches de broyage ont été réalisées par le CERMIM et l'entrepreneur. Ainsi, le broyage ne fait pas l'objet d'une description détaillée dans le présent rapport.

Tâche #2 Élaboration et caractérisation de mélanges granulaires avec: L'objectif de cette tâche centrale était de formuler différents mélanges de matériaux granulaires recyclés (MR) comparables par exemple au MG-20 avec des proportions variables de BAPC, en d'en faire la caractérisation géotechnique complète afin de pouvoir comparer les performances des MR aux granulats sans matériaux recyclés. Dans une première étape, la revue de la littérature a établi l'état de la pratique et de la recherche en termes de pourcentage de GBR en général et de BAPC en particulier (voir section 3). De plus, des essais préliminaires ont été menés. Sur cette base, des mélanges ont été effectués au laboratoire de géotechnique de l'UdeS par brassage et tamisage et la caractérisation des propriétés des granulats a été menée. Les essais prévus dans cette tâche ont été les suivants : granulométrie, densité, Proctor modifié, conductivité hydraulique et module réversible. Le département de génie civil de l'UdeS est équipé pour l'ensemble de ces essais, notamment avec un appareil triaxial à grand diamètre (150 mm).

Tâche #3 Compactage in situ: Pour les mélanges de MR ayant obtenu les meilleures propriétés en laboratoire, des essais de mise en place par compactage ont été réalisés sur site, dans une planche d'essai, afin d'évaluer 1) la maniabilité des matériaux et 2) le degré de compaction pouvant être obtenu. Les essais de contrôle in-situ standard sur remblai granulaire ont également été menés.

4.2 Essais préliminaires

Broyage/ caractérisation sommaire des BAPC

Dans l'étude préliminaire, après une phase manuelle de séparation grossière afin d'éliminer les clous, bordures métalliques et morceaux de bois pouvant contaminer les BAPC, ces derniers ont été broyés mécaniquement dans le broyeur à lame rotatif du Carrefour d'innovation en technologies écologiques (CITÉ, Granby, QC), ce qui a généré une poudre relativement fine. Les dimensions des broyats indiqués dans le tableau 2.1 ci-dessous sont basées sur une observation des poudres obtenues, mais aucune courbe granulométrique n'a été réalisée sur les BAPC broyés à ce stade.

Tableau 4.1 Répartition des tailles de grain

Taille maximale des granulats	1 mm
Taille minimale des granulats	0.05 mm

Mélanges BAPC/Sols

Afin de ne pas générer d'incompatibilité de taille et de problèmes, notamment, de migration de particules fines ou de ségrégation, il a été décidé d'identifier un matériau naturel compatible avec les BAPC broyés en termes de taille et répartition des grains pour les mélanges.

Le sable silteux de Saint-Nicéphore a été identifié comme approprié pour effectuer des mélanges avec les BAPC, comme le montre la courbe granulométrique (Figure 4.1)

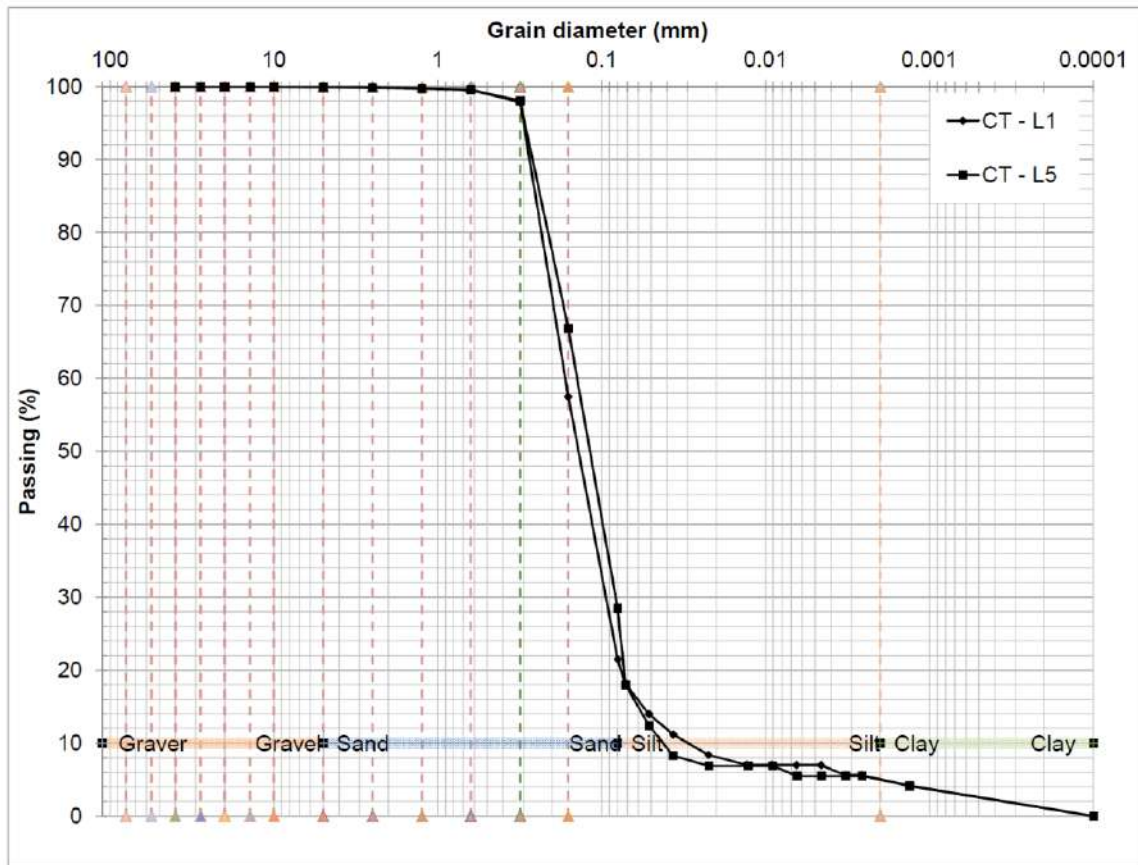


Figure 4.1 Courbe granulométrique du sable silteux de Saint-Nicéphore

Des mélanges ont été réalisés entre le sable silteux et les BAPC avec différents pourcentages massiques. Dans ce rapport, on présente les études sur les mélanges à 0% (matériau naturel seul), 15% et 30% de BAPC. La figure 4.2 montre l'apparence du

mélange à 30%. On remarque que les BAPC sont intégrés au sol naturel, qui peut former des agrégats au compactage humide.



Figure 4.2 Mélange de sable silteux et 30% de BAPC

Essais de laboratoire

Pour cette phase d'exploration, des essais de compactage de type Proctor modifié (ASTM D1557) ont été menés sur les trois mélanges avec différents pourcentages de BAPC. Les résultats d'essais sont présentés dans la section 5.1.

Les résultats ont été suffisamment concluants pour implémenter le reste de la méthodologie de travail, sur les matériaux granulaires réels de type MG-20.

4.3 Caractérisation des mélanges de gravier avec BAPC

Broyage des BAPC

Comme dans l'étude préliminaire, une grande importance est accordée à la compatibilité de taille entre les bardeaux broyés et les matériaux naturels/concassés à mélanger.

Le matériau granulaire utilisé dans cette partie correspond à un gravier propre mais non lavé (0-3/4) provenant de la carrière de P&B entreprises aux Îles-de-la-Madeleine (QC). La granulométrie est résumée dans le tableau 4.2.

Tableau 4.2 Répartition des tailles de grain

Taille maximale des granulats	19 mm (3/4 ")
Taille minimale des granulats	0.05 mm

Les BAPC ont été broyés par le CERMIM sous forme de flocons de taille compatible à celle des granulats, voir figure 4.3., et livrés au laboratoire de géotechnique de Sherbrooke en chaudières scellées de 5 gallons. Même si la taille maximum théorique est de 19mm, on note au laboratoire que les flocons de grande taille sont fragiles et ont tendance à se briser en morceaux de plus petite taille. De plus, la revue de littérature (voir section 3.3) indique que des particules de plus de 13mm peuvent éventuellement poser problème lors des mélanges. Une attention particulière a donc été portée en laboratoire et sur les sites de mélange pour s'assurer de minimiser l'agglomération excessive des flocons de BAPC. En laboratoire, les mélanges ne présentent pas d'agglomérats de BAPC. Toutefois, sur le site du chemin expérimental, on note que les bardeaux ont tendance à former des agrégats.



Figure 4.3. BAPC broyé en flocons 0-3/4".

Mélanges des BAPC avec le gravier

En plus du matériau naturel, trois pourcentages massiques de bardeaux ont été intégrés au matériau granulaire. Le mélange est effectué par brassage à la main sur les matériaux à teneur en eau naturelle. Le tableau 4.3 résume les différents pourcentages faisant l'objet d'essais, également illustrés par des photos des mélanges en figure 4.4. Les figures 4.4 c et d illustrent le même matériau à des teneurs en eau différentes.

Tableau 4.3 Répartition des tailles de grain

Dénomination	Mélange
0%	Matériau naturel
5%	Matériau naturel + 5% de BAPC
15%	Matériau naturel + 15% de BAPC
30%	Matériau naturel + 30% de BAPC

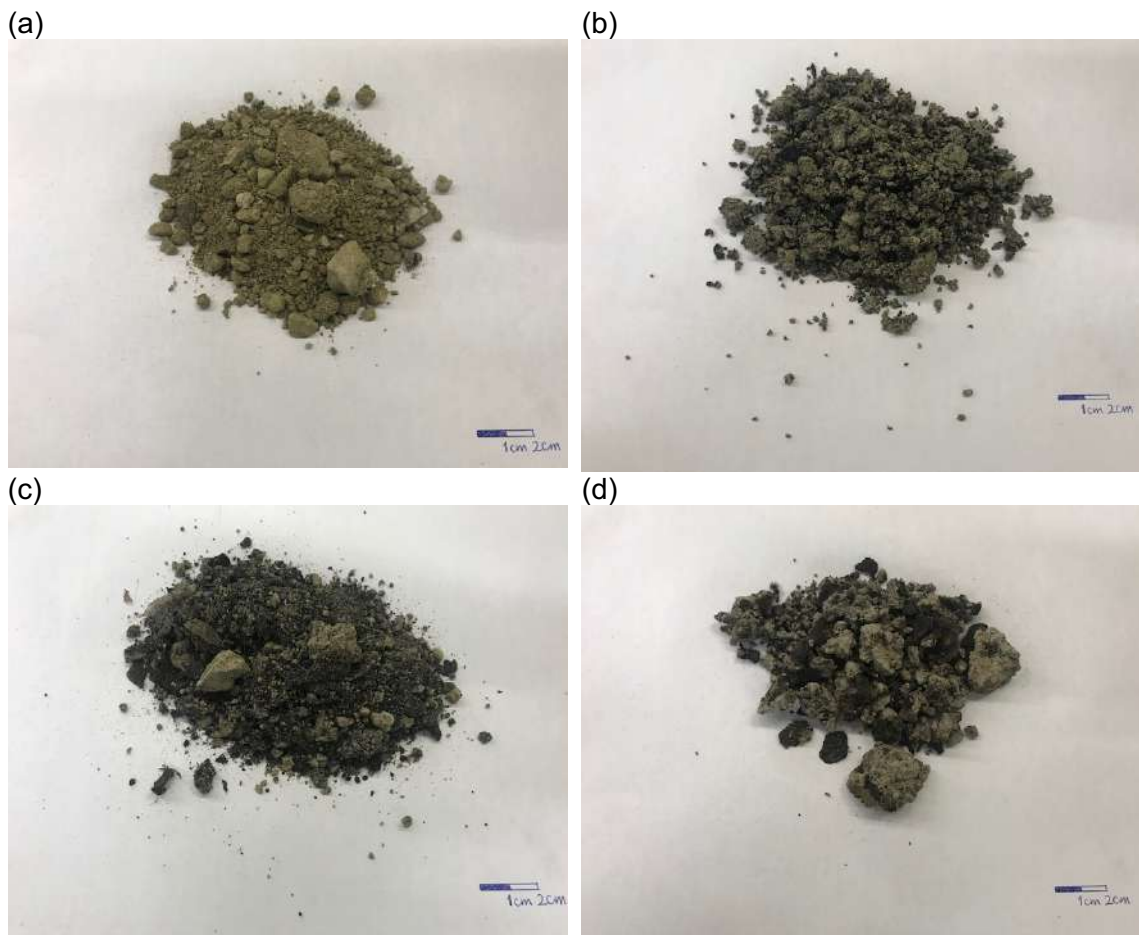


Figure 4.4. Mélanges BAPC avec 0-3/4" (a) Matériau naturel – teneur en eau $w = 10\%$ (b) 15% BAPC – teneur en eau $w = 11\%$ (c) 30% BAPC – teneur en eau $w = 11.5\%$ (d) 30% BAPC – teneur en eau $w = 0\%$

Les pourcentages ont été déterminés à partir des résultats de l'étude préliminaire, les normes du MTQ et le fait d'avoir un écart significatif entre les pourcentages.

Courbe granulométrique

La distribution des particules par taille a été obtenue pour les matériaux selon le standard ASTM D6913/D6913M – 17 et conformément à la norme BNQ 2560-114 dans un tamiseur automatique (figure 4.5). Cette procédure étant normalisée et décrite en détail dans le standard, et dans un souci de concision, elle n'est pas décrite dans le présent rapport. Il en sera de même pour toutes les autres procédures normalisées.



Figure 4.5. Tamiseur automatique

Essai Proctor modifié

La détermination de la densité sèche maximum en fonction de la teneur en eau s'appuie sur la norme CAN/BNQ 2501-255-M86 (Figure 4.6).



Figure 4.6. Moules et marteaux pour l'essai Proctor modifié

Essai de perméabilité

La conductivité hydraulique des échantillons est déterminée selon la norme ASTM D5084 (Figure 4.7)



Figure 4.7. Panneau de contrôle et cellule pour les essais de perméabilité à charge constante

Module réversible

Le module réversible des mélanges sols-BAPC est déterminé dans une cellule triaxiale à grand diamètre selon la méthode LC-22-400 (Figure 4.8). Le contrôle dynamique des contraintes et déformations, ainsi que les pressions interstitielles, sont assurés de façon électronique et automatique (interface GDS Lab).



Figure 4.8. Cellule triaxiale grand diamètre GDS-ELDYN

4.4 Planche d'essais in-situ

La méthodologie de recherche a prévu la mise en place d'une cellule d'essai sur le terrain, afin de tester la mise en place par compactage et la durabilité des mélanges granulaires. Un terrain de la municipalité a été identifié aux Îles-de-la-Madeleine (Havre aux Maisons) (Figure 4.9).

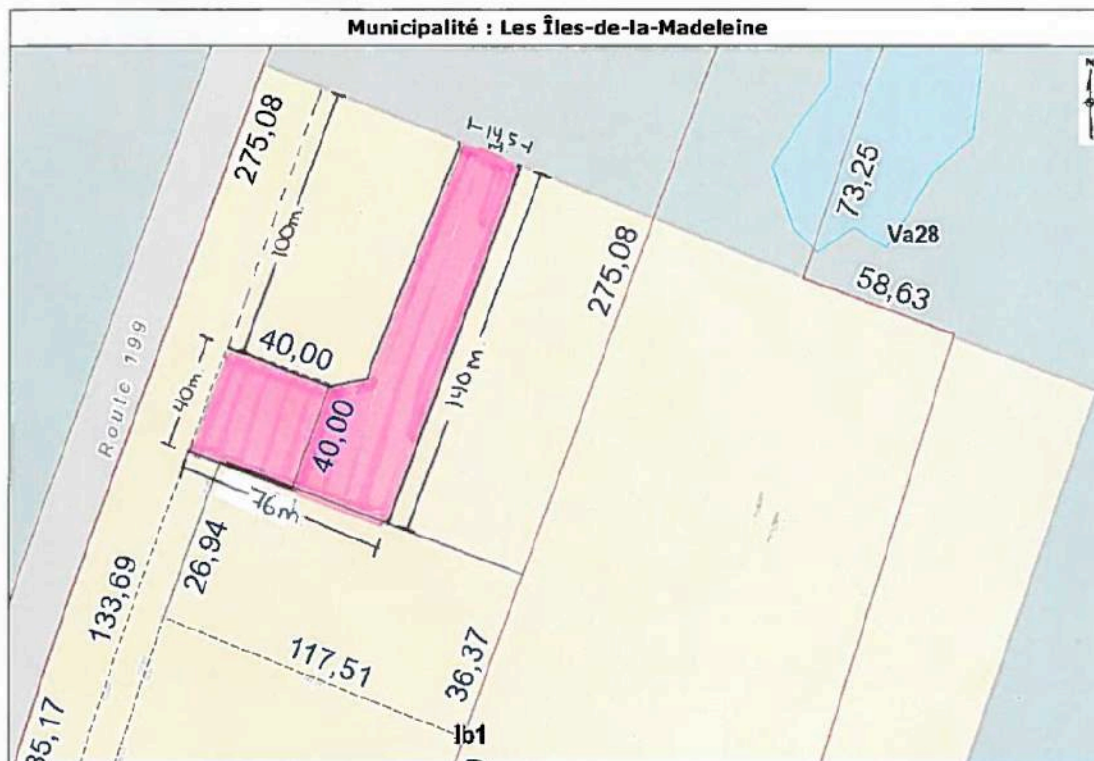


Figure 4.9. Plan du terrain et zone réservée pour le chemin (source : municipalité des Îles-de-la-Madeleine)

L'annexe A présente les plans (voir également figure 4.10) et coupes-types du chemin (voir également figure 4.11).

La route pilote comprend trois différentes sections (tableau 4.4) avec des pourcentages représentatifs de bardeaux, issus des analyses de laboratoire.

Tableau 4.4. Répartition des pourcentages de BPAC en fonction de la section étudiée

Section	Longueur (m)	% de BPAC	Tonnage BPAC (estimé)	Tonnage total MG + BPAC
A	32	0	0	180
B	50	5	13.9	281
C	44	15	36.6	256

VUE EN PLAN

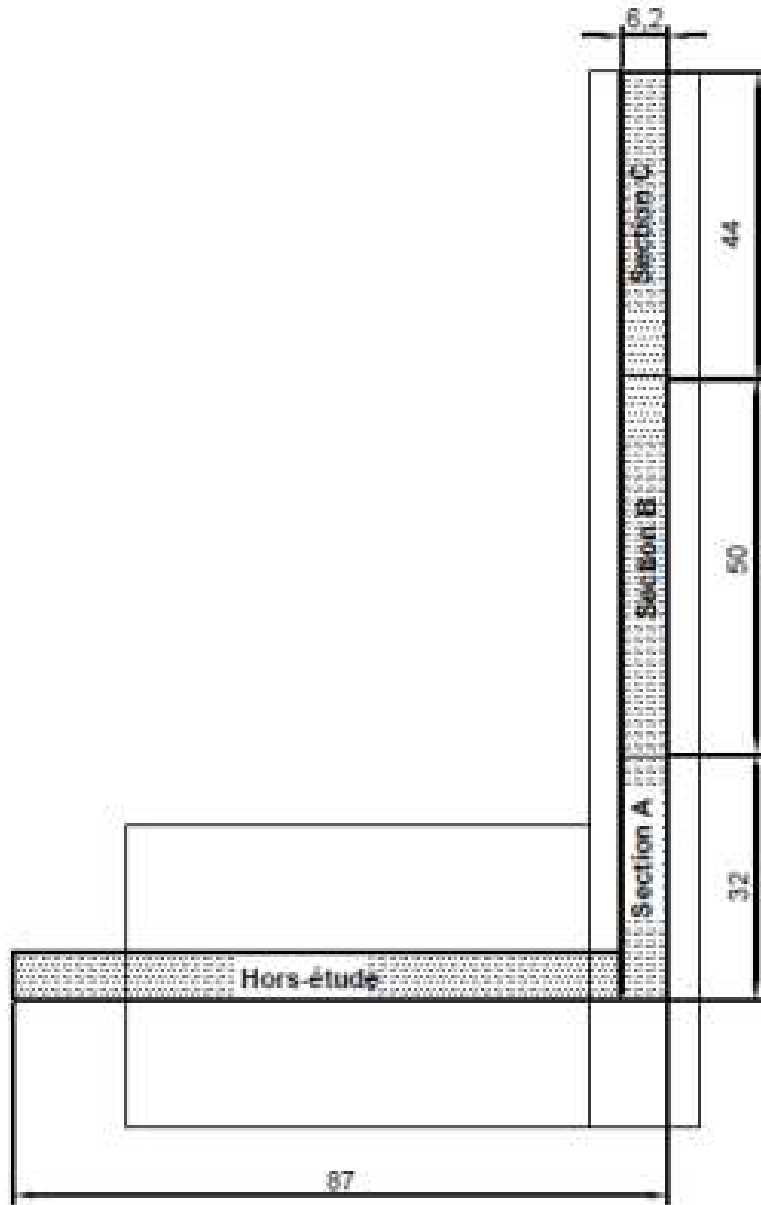


Figure 4.10. Vue en plan du chemin

COUPE TYPE DANS LA SECTION A

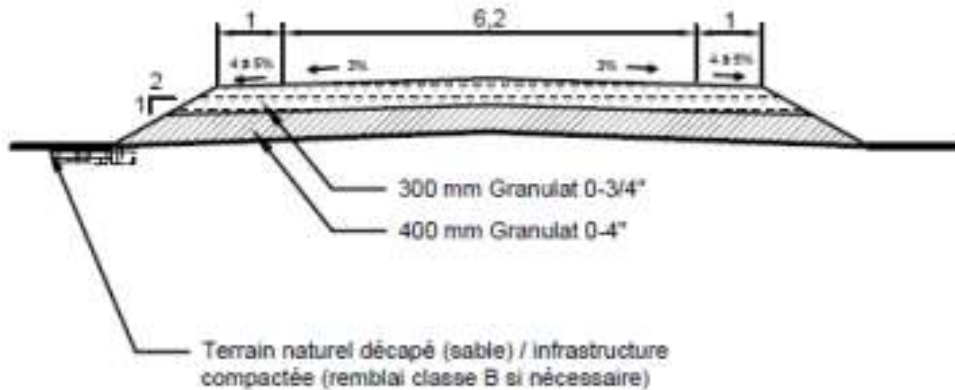


Figure 4.11. Exemple de coupe-type

La mise en place des mélanges de matériaux granulaires est effectuée sur une épaisseur de 300 mm, au-dessus d'une fondation de 400 mm. Entre les différentes sections, une zone de transition de 2 mètres de longueur a été aménagée avec des pentes progressives de 0.15.

Pour le compactage des différentes couches de matériau granulaire et de BPAC, on vise 98 % de l'optimum Proctor. Toutefois, étant donnée la nature expérimentale du projet, on considérera qu'un niveau de 95% de compaction est acceptable.

5 RESULTATS ET ANALYSE

5.1 Essais préliminaires

On présente ci-après les résultats d'essais pour le mélange sable-silt St-Nicéphore avec différents pourcentages de BAPC broyés.

Échantillon 0% BAPC



Université de Sherbrooke
Laboratoire de Géotechnique
Essai Proctor

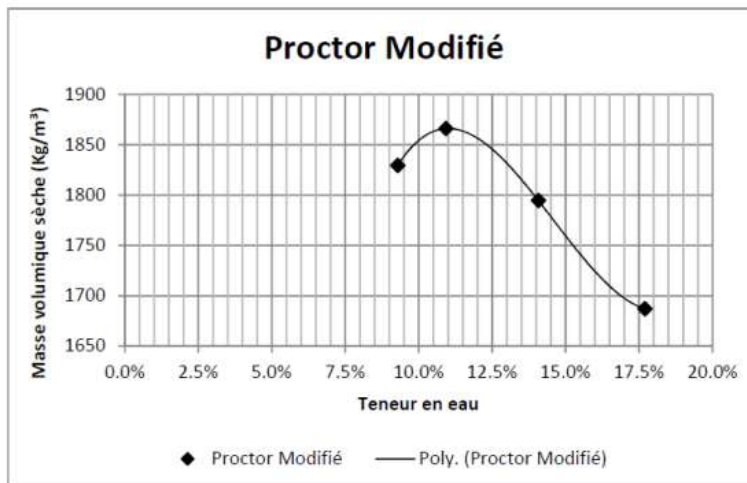
Projet : Valorisation bardeau
Échantillon : Sable silteux
Trou no :
Profondeur :
Analysé par : V. Dumoulin
Date : 2018-09-28

Description du sol : Sable-silt St- Nicéphore

Autres remarques : _____

Essai #	1	2	3	4	5	6	7
M moule + sol compacte	6166.5	6232.8	6211.4	6153.7			
M moule (B)	4287.1	4287.1	4287.1	4287.1			
M sol compacte (humide)	1879.4	1945.7	1924.3	1866.6	0	0	0
Masse volumique humide (Kg/m ³)	1999	2070	2047	1986	0	0	0
Masse volumique sèche (Kg/m ³)	1830	1866	1795	1687	0	0	0

Teneur en eau visée (%)	1.50%	3.00%	4.50%	6.00%			
No. De la tare	5	1247	1178	8			
Masse tare + sol humide	280.5	253.11	282.75	529.45			
Masse tare + sol sec	258.16	229.91	250.04	452.35			
Masse de l'eau	22.34	23.2	32.71	77.1	0	0	0
Masse de la tare	17.58	17.56	17.6	16.69			
Masse du sol sec	240.58	212.35	232.44	435.66	0	0	0
Teneur en eau réelle(%)	9.29%	10.93%	14.07%	17.70%			



Mode de compactage
Volume (cm³) 939.98
Dame 4,54 kg
Chute 457 mm
Nombre de couches 5
No. Coups/couche 25

Projet : Valorisation bardeau

Description du sol : Sable St- Nicéphore + 15% bardeau

Échantillon : Sable + Bardeau

Trou no :

Profondeur :

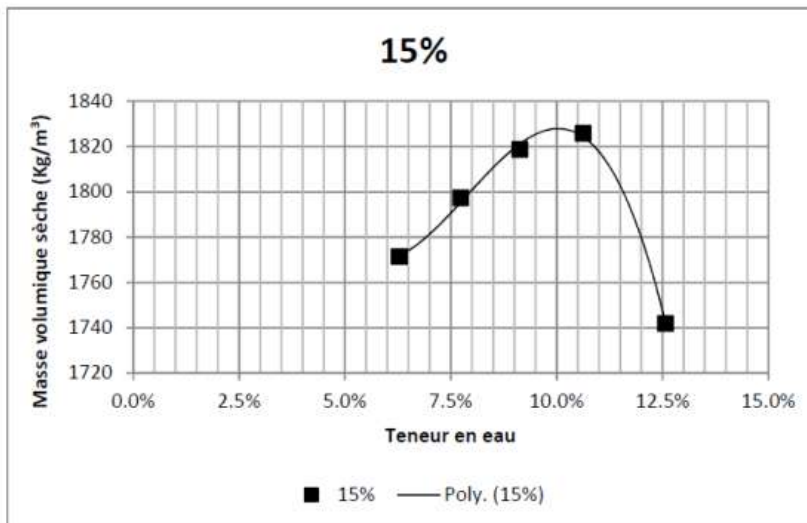
Analysé par : V. Dumoulin

Autres remarques : 5882g de mélange → 5000g de silt
et 882g de bardeau.

Date : 2018-07-25

Essai #	1	2	3	4	5	6	7
M moule + sol compacte	6190.4	6240.6	6286	6318.8	6263.6		
M moule (A)	4423.5	4423.5	4423.5	4423.5	4423.5		
M sol compacte (humide)	1766.9	1817.1	1862.5	1895.3	1840.1	0	0
Masse volumique humide (Kg/m ³)	1883	1936	1985	2020	1961	0	0
Masse volumique sèche (Kg/m ³)	1771	1797	1819	1826	1742	0	0

Teneur en eau visée (%)	Nat.	1.50%	3.00%	4.50%	6.00%		
No. De la tare	1217	29	7	1291	1275		
Masse tare + sol humide	191.65	184.41	169.92	185.38	493.97		
Masse tare + sol sec	181.35	172.42	157.16	169.26	440.75		
Masse de l'eau	10.3	11.99	12.76	16.12	53.22	0	0
Masse de la tare	17.58	17.45	17.46	17.55	17.45		
Masse du sol sec	163.77	154.97	139.7	151.71	423.3	0	0
Teneur en eau réelle(%)	6.29%	7.74%	9.13%	10.63%	12.57%		



Mode de compactage
 Volume (cm³) 938.42
 Dame 4,54 kg
 Chute 457 mm
 Nombre de couches 5
 No. Coups/couche 25

Projet : Valorisation bardeau

Description du sol : Sable St- Nicéphore + 30% bardeau

Échantillon : Sable + Bardeau

Trou no :

Profondeur :

Analysé par : V. Dumoulin

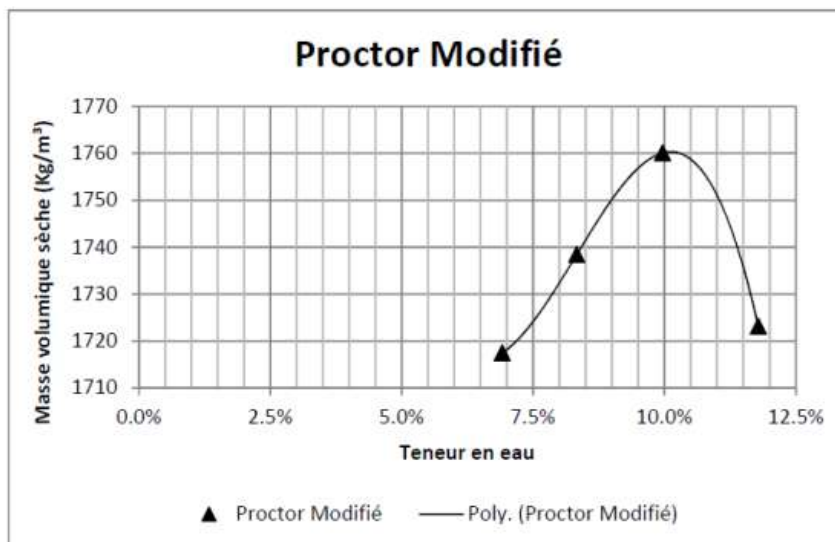
Autres remarques : 5000g de mélange → 3500g de silt

Date : 2018-07-27

et 1500g de bardeau.

Essai #	1	2	3	4	5	6	7
M moule + sol compacte	6146.3	6190.4	6239.3	6230.7			
M moule (A)	4423.1	4423.1	4423.1	4423.1			
M sol compacte (humide)	1723.2	1767.3	1816.2	1807.6			
Masse volumique humide (Kg/m ³)	1836	1883	1935	1926			
Masse volumique sèche (Kg/m ³)	1718	1738	1760	1723			

Teneur en eau visée (%)	1.50%	3.00%	4.50%	6.00%			
No. De la tare	1242	11	22	13			
Masse tare + sol humide	159.17	187.24	284.24	454.96			
Masse tare + sol sec	150	174.1	260.1	408.7			
Masse de l'eau	9.17	13.14	24.14	46.26			
Masse de la tare	17.37	16.37	17.75	16.16			
Masse du sol sec	132.63	157.73	242.35	392.54			
Teneur en eau réelle(%)	6.91%	8.33%	9.96%	11.78%			



Mode de compactage
 Volume (cm³) 938.42
 Dame 4,54 kg
 Chute 457 mm
 Nombre de couches 5
 No. Coups/couche 25

Courbe comparative

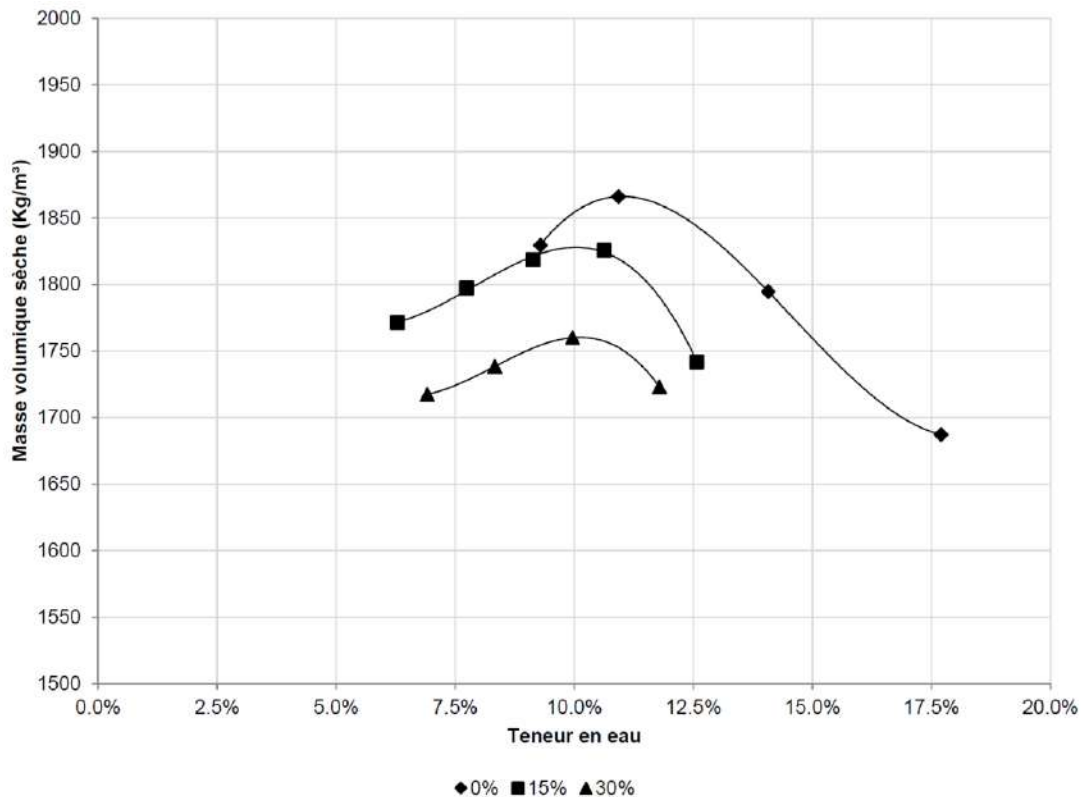


Figure 5.1 Comparaison des courbes de compactage à différents pourcentages massiques de BAPC.

Les mélanges testés vont très au-delà de l'usage en termes de pourcentage de BAPC intégrés au sol puisque qu'une limite de 5% est normale.

Toutefois, on constate qu'à 15 % de BAPC, dans un mélange avec un matériau compatible de type sable silteux, la densité maximale passe de 1866 kg/m³ à 1826 kg/m³, soit une perte de densité de seulement 2.1% (La perte de densité maximale par rapport au matériau naturel est de 5.7% dans le cas du mélange avec 30% de BPAC).

Ces résultats préliminaires indiquent qu'une étude paramétrique peut être menée pour déterminer le pourcentage optimum de BAPC permettant de rester dans un critère acceptable de densité. Les essais préliminaires ont permis de déterminer que des tailles de granulats plus grossiers pouvaient être mises à l'essai, avec des BAPC broyés ou déchetés moins finement afin de viser la caractérisation de matériaux de structure de chaussée.

5.2 Essais de laboratoire sur matériaux granulaires

La section qui suit présente les résultats de la caractérisation des matériaux granulaires mélangés avec les BAPC de la section 4.3.

5.2.1 Courbe granulométrique

La caractérisation du gravier de la carrière de P&B entreprises a permis de le classifier selon l'USCS comme un gravier mal gradué avec silt et sable (GP-GM), tableau 5.1 et figure 5.2

Tableau 5.1 Paramètres du gravier

D ₁₀	0.09
D ₃₀	1.28
D ₆₀	4.57
Cu	50.64
Cc	3.97

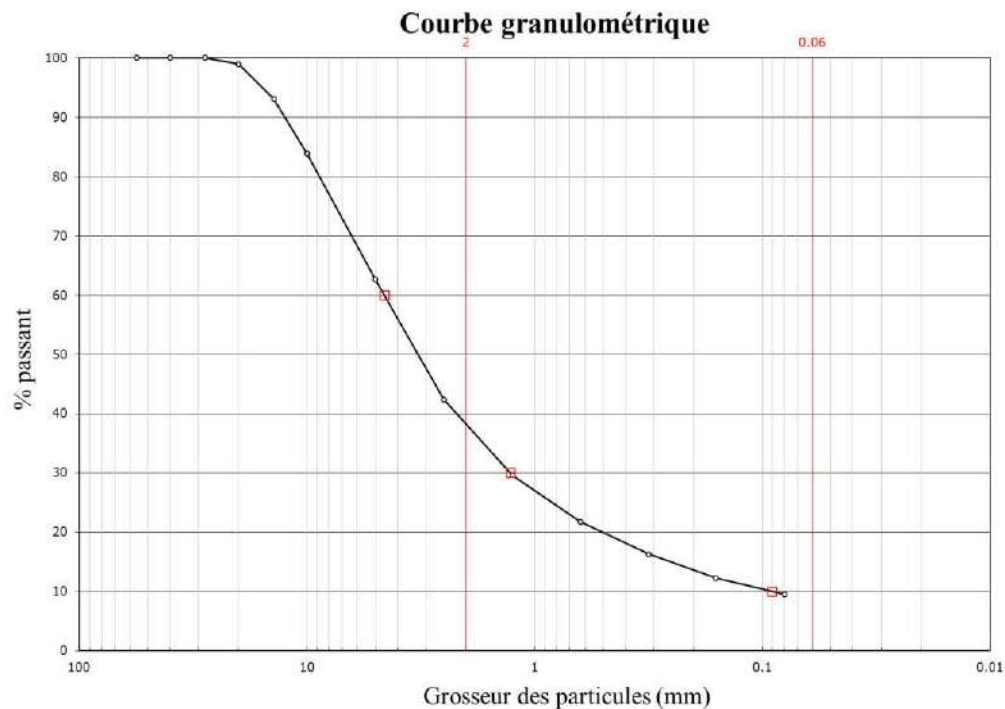


Figure 5.2 Courbe granulométrique du gravier 0-3/4

Les tableaux 5.2 et 5.3 démontrent que le matériau se classifie aussi comme un MG-20.

Tableau 5.2. Fuseau granulaire du MG-20

Tamis (mm)	Passant (%)
31,5	100
20	90 - 100
14	68 - 93
5	35 - 60
1,25	19 - 38
0,315	9 - 17
0,080	2 - 7

Tableau 5.3. Matériau granulaire

Tamis (mm)	% Passant
28	100.00
20	98.95
14	93.08
5	62.62
1.25	29.57
0.315	16.30
0.080	9.53

5.2.2 Essai Proctor modifié

L'ensemble des fiches d'essais de cette section sont présentés en Annexes B à G. Parmi les essais réalisés, plusieurs ont été reproduits. Le tableau 5.4 résume les essais pertinents de matériau granulaire (M.G.) mélangé avec différents pourcentages de bardeaux BAPC. Des essais avec un mélange de matériau granulaire et d'asphalte recyclé (A.R.) ont également été menés à titre de référence.

Tableau 5.4. Masse volumique sèche maximale et teneur en eau à l'optimum pour différents mélanges.

Mélange	ρ_d max (kg/m ³)	w opt (%)
M.G + 0% BAPC	2062	11.05
M.G + 5% BAPC	1901	12.60
M.G + 10% BAPC	1946	10.90
M.G + 15% BAPC	1929	10.90
M.G + 30% BAPC	1815	12.70
60% M.G +40% A.R.	1988	10.60

La figure 5.3 présente la compilation des essais de compaction dans un même graphique. En comparaison avec la densité maximum obtenue pour le matériau naturel (2062 kg/m³) une perte respective de 7.9%, 6.4% et 12% de la masse volumique maximum pour les mélanges à 5% de BAPC, 15% de BAPC et 30% de BAPC.

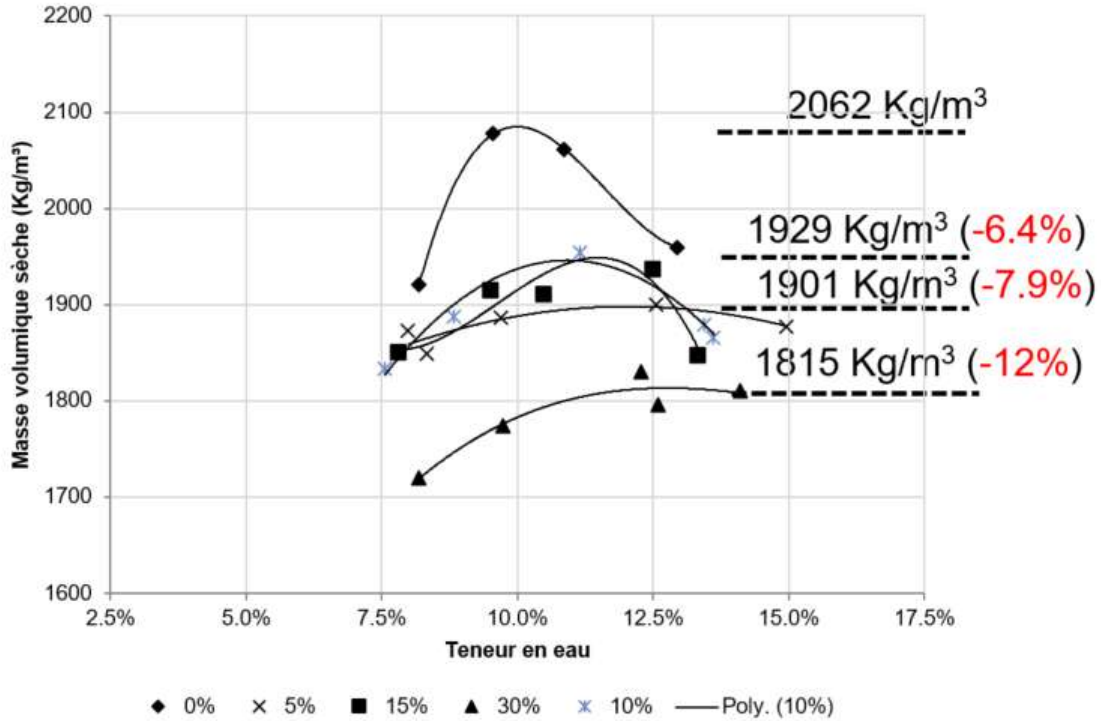


Figure 5.3 Courbes de compaction des mélanges de matériau granulaire et BAPC (pourcentage massique de BAPC indiqué en %)

La diminution de densité maximum en fonction du pourcentage de BAPC est représentée sur la figure 5.4. On constate qu'une modélisation linéaire de la perte de densité n'est pas adaptée à la tendance observée. L'observation principale est que l'ajout de BAPC fait invariablement baisser la densité maximum, de l'ordre de 6%. Toutefois, il semble que l'effet de la teneur en bardeau ait un palier en dessous de 15%. Avec une perte de 12% de densité, le mélange à 30% de bardeau représente un risque trop important d'instabilité sur le terrain.

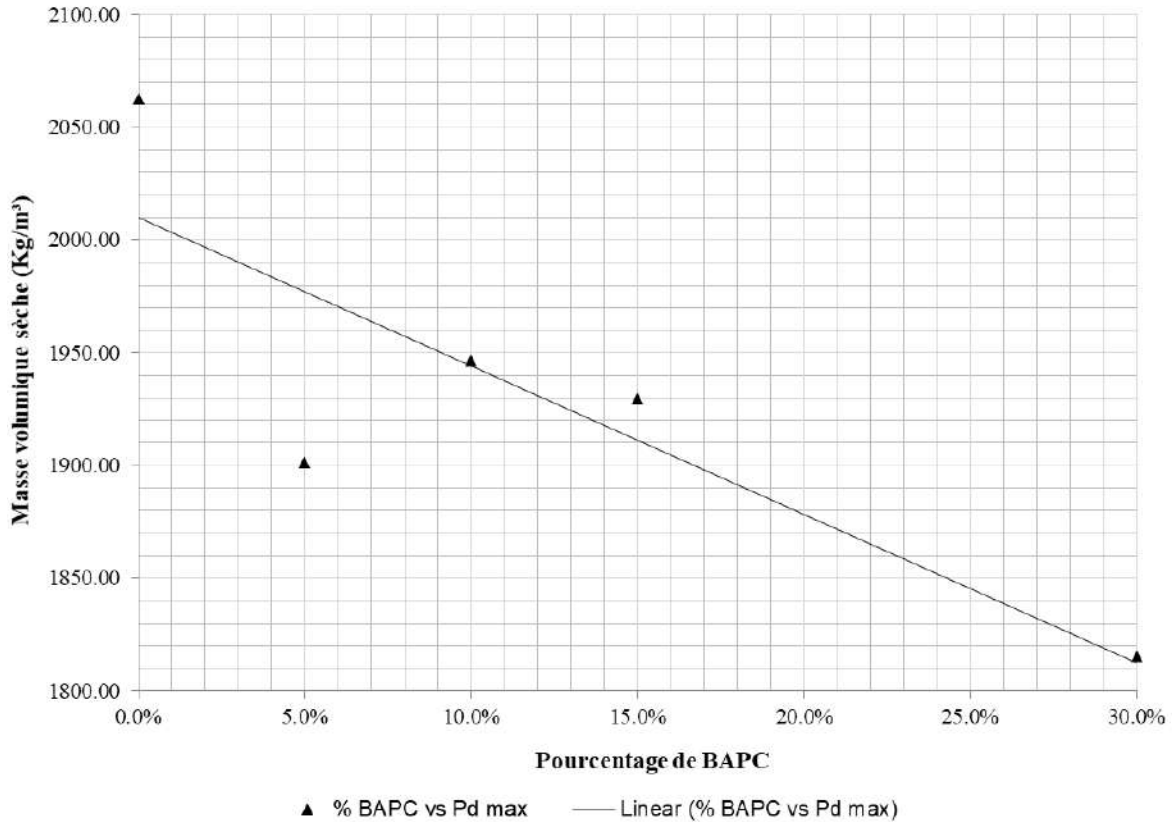


Figure 5.4 Évolution de la masse volumique sèche maximum en fonction du pourcentage de BAPC

La figure 5.4 montre la comparaison entre les essais de compaction du matériau granulaire seul et du mélange avec asphalte recyclé (dans une proportion 60% M.G. – 40% A.R.). L'ajout d'asphalte recyclé n'induit pas de perte notable de densité (3.6%).

L'ensemble des masses volumiques sèches à l'optimum ont été utilisées pour la vérification du compactage sur le chantier. Il a été estimé pertinent, in situ, de mettre en place des mélanges à 0% de BPAC (référence), 5 % de BAPC et 15 % de BAPC (le mélange à 10 % donnant des résultats trop proches des autres mélanges).

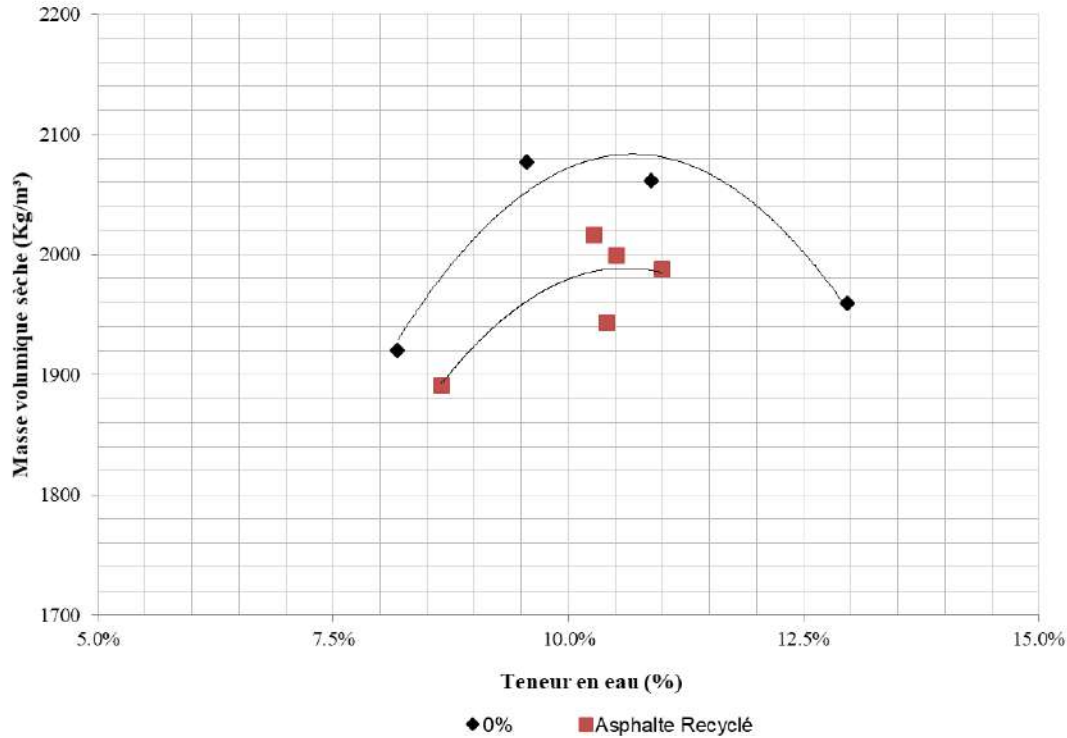


Figure 5.5 Comparaison des courbes de compaction avec et sans asphalte recyclé.

5.2.3 Essais de perméabilité

Les essais de perméabilité à charge constante ont été menés sur les mélanges de 0 % de BAPC à 15% de BAPC, les mélanges à 30% de BAPC n'étant plus jugés comme pertinents à la lumière des essais Proctor (5.2.2). Les valeurs de perméabilités sont de l'ordre de $3 \text{ à } 4 \times 10^{-5} \text{ m/s}$, tel que démontré dans le tableau 5.5. et l'annexe H.

Tableau 5.5. Résultat des essais de perméabilité

% BAPC	T. en eau (%) Début	M. Vol. Humid (Début)	M. Vol. Sèche (Début)	M. Vol. Humid (FIN)	M. Vol. Sèche (FIN)	Perméabilité m/s	T. en eau (%) FIN
0.00%	7.76	1944.50	1805.00	2088.70	1786.70	4.00E-05	16.90
5.00%	10.40	2064.30	1869.80	2206.30	1844.80	3.70E-05	16.20
10.00%	4.70	2098.00	2003.80	2241.00	1815.50	3.40E-05	23.43
15.00%	11.30	1987.40	1785.70	2080.00	1772.00	3.00E-05	17.38

On note une perte de perméabilité quasi-linéaire en fonction du pourcentage de BAPC, tel qu'illustré à la figure 5.6., à raison de 7.5% de perte par 5% de BAPC supplémentaire. Toutefois, l'ordre de grandeur de perméabilité étant maintenu et la perméabilité étant élevée, l'impact des BAPC sur le drainage et les écoulements souterrains devraient être limités. On note, toutefois, que les matériaux avec BAPC semblent présenter davantage d'absorption et de rétention d'eau.

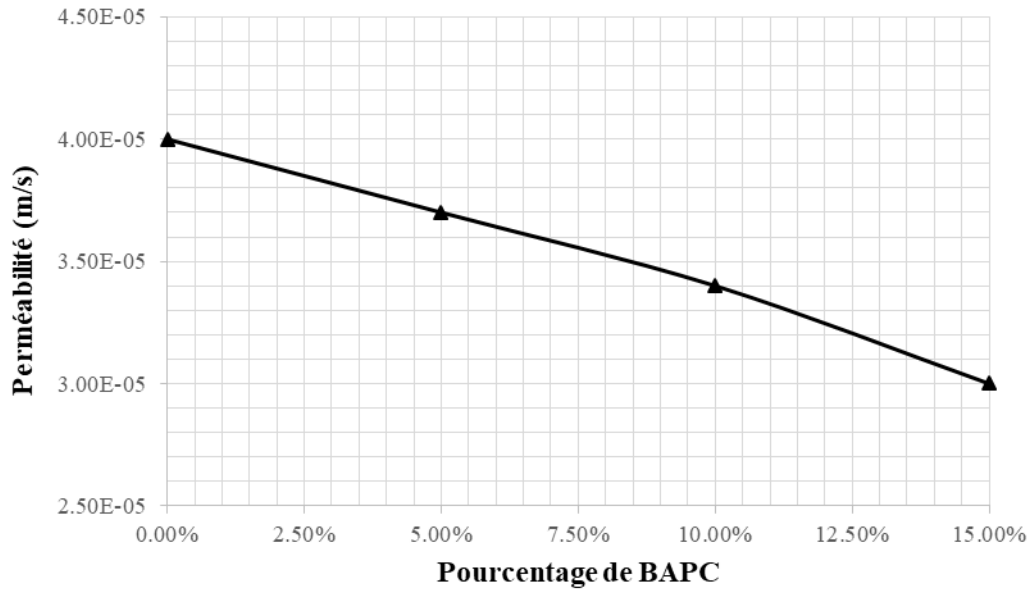


Figure 5.6 Évolution de la perméabilité en fonction du pourcentage de BAPC

5.2.4 Essais triaxiaux

Les essais triaxiaux pour la mesure du module réversible ont été effectués sur le matériau granulaire à titre de référence. Les caractéristiques de l'échantillon sont ainsi les mêmes que présentées dans les sections précédentes. L'échantillon cylindrique a une hauteur de 176 mm pour un diamètre initial de 102 mm.

Les états de contraintes utilisés pour la caractérisation du module réversible sont listés dans le tableau 5.6.

Tableau 5.6 États de contraintes pour le module réversible (source : LC-22-400)

σ_3 (kPa)	σ_d (kPa)	σ_{do} (kPa)	σ_{dr} (kPa)	θ (kPa)
20	20	2	18	80
	40	4	36	100
	60	6	54	120
35	35	3	32	140
	70	7	63	175
	105	11	94	210
70	70	7	63	280
	140	14	126	350
	210	21	189	420
105	70	7	63	385
	105	11	94	420
	210	21	189	525
140	105	11	94	525
	140	14	126	560
	280	28	252	700

On obtient ainsi la courbe d'évolution du module réversible E_r en fonction de la contrainte totale θ (Figure 5.7) et de la contrainte de cisaillement octaédrique τ_{oct} . On peut modéliser le comportement non linéaire de E_r en fonction de la contrainte totale par l'équation suivante :

$$E_r = a + b\theta + c\tau_{oct}$$

Les paramètres typiquement obtenus sont présentés dans le tableau 5.7.

Tableau 5.7 Paramètres de régression

a	b	c	R ²
124	1.20	0	0.992

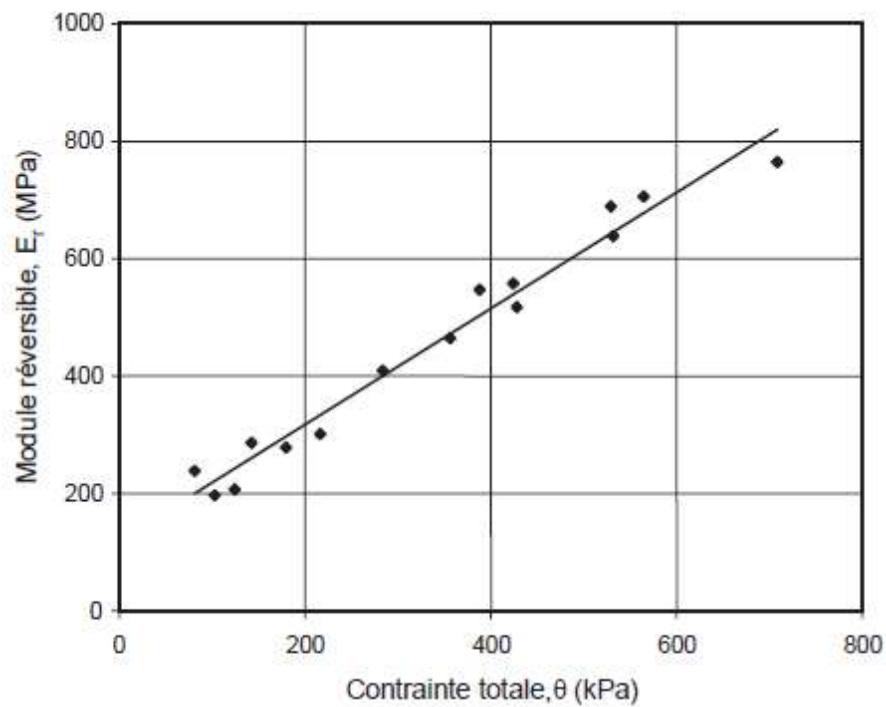


Figure 5.7. Module réversible du matériau granulaire en fonction de la contrainte totale

Les essais de caractérisation du module réversible pour les mélanges avec pourcentage variable de bardeau sont en cours. À l'heure où ce rapport est émis, les résultats ne sont pas disponibles mais ces derniers seront communiqués ultérieurement dans un rapport annexe.

5.3 Essais in situ

La construction de la route expérimentale aux Îles-de-la-Madeleine a été effectuée en Novembre 2019 sous la supervision des chercheurs.

La figure 5.8 présente la fondation de la route telle que préparée avant la mise en place des mélanges pour la réalisation du banc d'essai.



Figure 5.8 Fondation granulaire de la route expérimentale

Les trois sections A, B et C ont été déposées et compactées selon la séquence prévue dans la section 4.4. On note que la météo était froide (proche de 0°C) et humide et que des pluies importantes s'étaient abattues sur les Îles de la Madeleine deux jours avant le chantier de la couche de roulement. Ainsi, les piles de matériaux ont présenté une teneur en eau plus importante que prévu, ce qui peut affecter la mise en place et le compactage, puisque la teneur en eau à l'optimum est potentiellement dépassée. Le tableau 5.6 résume les données de teneur en eau des mélanges.

Tableau 5.6. Teneur en eau des mélanges

% BAPC dans le M.G.	Section	Teneur en eau estimée
---------------------	---------	-----------------------

0	A	11.7 %
5	B	14.9%
15	C	17.7%

Dans l'ensemble, les mélange de matériaux granulaires et BAPC préparés à la carrière sont relativement homogène. Le taux de déchets semble très faible, mais si certains clous et morceaux de plastique sont visibles (Figure 5.9).



Figure 5.9. Mélange in-situ à 15% de BAPC, présence minime de déchets

Comme au laboratoire, le mélange présente une couleur plus noire dans le cas du 15% de BAPC, alors qu'à 5% l'apport de BAPC est visuellement peu perceptible. Les particules de BAPC broyées semblent plus fines que celles qui ont été obtenues au laboratoire. On peut attribuer ceci au bris des plus grandes particules de BAPC lors du mélange. Des agglomérats de bardeaux sont parfois visibles, pouvant atteindre jusqu'à plus de 10 cm en taille (figure 5.10). Toutefois, ces agglomérats humides ne sont pas un bloc solide et s'effritent au moindre contact. Le transport, mise en place par bulldozer et compactage devraient suffire à désintégrer ces blocs. On peut soulever toutefois que ces blocs, même défaits, pourraient créer une concentration de BAPC et donc avoir un impact sur l'homogénéité du mélange.

Les opérateurs de machinerie ne relèvent pas de différence notable de maniabilité entre les MG naturels et les MG avec pourcentage de bardeau, que ce soit pour le transport, l'épandage et le compactage (Figure 5.11). Toutefois, à cause de l'humidité importante des matériaux, le compactage au rouleau statique et dynamique peut causer une génération excessive de pression interstitielle pouvant mener à la liquéfaction de la couche. Le nombre de passes de compacteur a donc été réduit à 5 statiques, sauf à des endroits ciblés où le compactage par deux passes statiques supplémentaire a été testé ou le compactage dynamique a été testé (voir tableau 5.7).

La densité in-situ a été testée à plusieurs chainages et profondeurs à l'aide du nucléodensimètre. Les résultats sont présentés dans le tableau 5.7



Figure 5.10. Agglomérat de bardeau broyé



Figure 5.11. Mise en place du matériau granulaire avec 15% de BAPC

Tableau 5.7. Résultats des essais de densité sur la route expérimentale.

Zone	Chainage (m)	Distance du bord (m) Nord ou Sud	Profondeur (mm)	Densité sèche (kg/m ³)	% de l'optimum Proctor modifié	Teneur en eau w(%)	Vides (%)	Commentaires
C	0+020	2,80N	150	1738	89.3	18.3	3.8	
C	0+020	2,80N	200	1624	83.5	18.6	0.66	
C	0+010	2,80S	200	1736	89.3	17.9	4.7	
C	0+020	2,80N	200	1727	88.8	17.8	5.3	Après 2 passes supplémentaires - statique
C	0+020	2,80N	200	1748	88.3	17.8	3.7	Après 2 passes supplémentaires - dynamique
C	0+040	2,80M	200	1770	91	15.8	6.4	
B	0+060	2,50S	200	1901	100.2	15.1	0.8	
B	0+080	2,50S	200	1841	97	13.9	6.2	
B	0+090	2,50N	150	1864	98.2	14.2	4.4	
B	0+090	2,50N	200	1809	95.3	16.5	3.2	
A	0+100	2,00S	200	1925	92.5	12	5.7	
A	0+110	2,00N	200	1803	86.5	11.1	13.2	
A	0+100	2,50S	200	1895	91.1	12.1	6.9	Après 2 passes supplémentaires -statique

Tel que mentionné plus haut, la teneur en eau est, dans toutes les sections, trop élevée pour atteindre l'optimum Proctor de densité. On note toutefois des résultats acceptables de compactage dans la section A (matériau naturel) et dans la section C (15% de bardeaux). On note que des passes supplémentaires de rouleau, que ce soit en mode statique ou en mode dynamique, ne permettent pas d'améliorer significativement la densité dans ces deux sections. Ceci est attribuable principalement à la teneur en eau élevée des matériaux. La section B, en revanche (5% de bardeaux) est celle qui s'est la mieux comportée au compactage, atteignant en plusieurs points le critère de densité de 98% du Proctor.

6 CONCLUSIONS ET RECOMMANDATIONS

Le présent rapport porte sur une étude de valorisation des bardeaux d'asphalte post-consommation dans les matériaux granulaires de routes. Cette étude s'inscrit dans le contexte insulaire des Îles-de-la-Madeleine, où la gestion des matières résiduelles représente un enjeu de taille.

L'objectif de l'étude est de vérifier la faisabilité de nouveaux mélanges de matériaux granulaires et de BAPC en vue de leur utilisation pour le génie civil. Ainsi, les réserves de BAPC des îles pourraient être valorisées et non enfouies ou exportées.

Une revue de littérature a été menée afin de dresser l'état de la pratique en termes de matériaux bitumineux recyclés en général et de bardeaux d'asphalte en particulier. La règle de base employée par le ministère des transports repose sur la démonstration qu'un matériau incorporant des matières recyclées doit se comporter aussi bien que le matériau sans matières recyclées. La pratique est courante dans les enrobés bitumineux, mais pour les matériaux granulaires sans traitement à chaud, la démonstration reste à faire.

Une étude préliminaire a été menée sur un mélange de broyats de BAPC et de silt de St-Nicéphore, l'objectif étant d'étudier la compatibilité de taille des particules et l'influence du pourcentage de BAPC sur le comportement du sol. Il a été constaté que l'apport de BAPC baisse la densité maximum qui peut être obtenue mais que les effets sont surtout notables au-delà de 15% de BAPC.

L'étude a été généralisée à un matériau granulaire de construction provenant des carrières de P&B entreprises afin de caractériser en laboratoire le comportement d'un mélange avec BAPC. Jusqu'à 5 pourcentages ont été testés, soit 0%, 5%, 10%, 15% et 30%. Les essais effectués sont l'essai Proctor, l'essai de densité, l'essai de perméabilité, l'essai triaxial. Le critère de densité (optimum Proctor) est le plus critique pour la mise en place sur le terrain, ainsi, il a permis de constater qu'il n'y a moins de 10% de perte de densité max tant que le pourcentage de BAPC reste en-dessous de 15%. Au-delà (ex. : 30% de BAPC) les pertes sont plus significatives. Les essais de perméabilité ne semblent pas indiquer de risque associé à l'ajout de BAPC d'un point de vue hydraulique. On note toutefois une tendance plus claire à retenir /absorber davantage d'eau en présence de BAPC. Les essais de module réversible sont à approfondir pour obtenir les courbes comparatives.

Le déploiement sur le terrain de l'étude, sous forme d'une route expérimentale comportant trois sections avec des couches de surfaces avec 0%, 5% et 15% de BPAC a été l'étape finale de l'étude. On note que le mélange des matériaux à plus grande échelle est possible, et que la mise en place et le compactage n'ont pas été différents, que ce soit avec ou sans bardeaux. Par contre, l'obtention d'une densité élevée a été plus difficile dans le cas présent à cause de l'humidité.

Au niveau du laboratoire, il est recommandé de compléter les essais de module réversible afin d'obtenir une prédiction fine du comportement dynamique des matériaux granulaires en fonction de la teneur en BAPC. Cette étape est en cours au laboratoire de géotechnique de l'Université de Sherbrooke et fera l'objet d'un rapport-annexe au présent rapport. Il est de plus possible d'étudier davantage de pourcentages pour déterminer si

un optimum de teneur en BAPC est possible. Il semble que cet optimum soit situé entre 5 et 15%.

Au niveau des travaux de terrain, il est important de limiter la circulation sur le chantier dans les phases de dégel. Le matériau pouvant être amené à sécher, il est possible que la densité change au cours des prochaines saisons, ce qui pourrait justifier de nouveaux tests au nucleodensimètre au cours de l'automne prochain. Une inspection visuelle de l'orniérage/tassement et des ruptures serait souhaitable. Enfin, une circulation égale sur les trois sections serait à recommander afin d'obtenir des données comparables.

7 BIBLIOGRAPHIE

Ali, N., Chan, J., Potyondry, A., Bushman, R., Bergan, A.T. (1995). Mechanistic evaluation of asphalt concrete mixtures containing reclaimed roofing materials. Transportation Research Record, n 1515, p. 28-36

ASTM D5084 (2016) Standard Test Methods for Measurement of Hydraulic Conductivity of Saturated Porous Materials Using a Flexible Wall Permeameter. Standard.

ASTM D6913/D6913M (2017) Standard Test Methods for Particle-Size Distribution (Gradation) of Soils Using Sieve Analysis. Standard.

Beaudoin-Gagnon M-H., Thibodeau M., Massé M-O., Petitpas, P., Poirier, M. Rabenasolo H., Coll. Leblanc, M., Poirier, Y., Richard J., Boudreau, D. (2018). Projet d'écogestion des chantiers de construction aux Iles-de-la- Madeleine : Rapport final. Centre de recherche sur les milieux insulaires et maritimes, Îles-de-la-Madeleine (Québec). xiii, 77 p. + annexes.

BNQ 2560-114. (2014) Travaux de Génie Civil – Granulats, Bureau de Normalisation du Québec.

Boutin L. (2016). « Enrobés en développement pour la norme 4202 et autres nouveautés ». Colloque AQTr, Trois-Rivières, Canada.

CAN/BNQ 2501-255-M86 (1986) Sols - Détermination de la relation teneur en eau masse volumique - Essai Proctor modifié, Bureau de Normalisation du Québec.

Franklin Associates (1998). Characterization of building related construction and demolition debris in the United States. US Environmental Protection Agency.

Hassan, M.M., Lodge, A., Mohammad, L.N., King, W. (2016) "Characterization of Recycled Asphalt Shingles". Proceedings of the 2016 Construction Research Congress, San Juan, Puerto Rico.

Jambou, M. (2015). Valorisation des déchets inertes du BTP, suivant le principe d'écologie industrielle et territoriale. Maitrise Université de Sherbrooke – Université Technologique de Troyes.

Langlois, R. (1982). Recyclage des revêtements bitumineux. Gouvernement du Québec Ministère des Transports.

LC-22-400 (2007) Détermination du module réversible des matériaux granulaires. Ministère des transports du Québec.

Malo, J.M (2013). Incorporation de particules de bardeaux d'asphalte de postconsommation dans les enrobés bitumineux. École de Technologie supérieure Université du Québec.

Ministère des Transports, de la Mobilité durable et de l'Électrification des transports (2017). Tome VII – Matériaux. Gouvernement du Québec MTMDET.

Municipalité des Iles-de-la-Madeleine (2016). Plan de gestion des matières résiduelles du territoire des Iles-de-la-Madeleine 2017-2021. Direction de l'hygiène du milieu. [En ligne]. [https://muniles.ca/wp-content/uploads/HMS_2016_07_06_PGMR.pdf].

Municipalité des Iles-de-la-Madeleine (2018). La Matériauthèque des Îles-de-la-Madeleine fait des envieux. [En ligne] [<https://www.ilesdelamadeleine.com/2018/11/la-materiautheque-des-iles-de-la-madeleine-fait-des-envieux/>]

Newcomb, D.E, Stroup-Gardiner, M., Weikle, B., Drescher, A. (1993). Influence of Roofing Shingles on Asphalt Concrete Mixture Properties. University of Minnesota.

Noël, F. (2006). Incorporation de particules de bardeaux d'asphalte de postconsommation dans les enrobés bitumineux. Recyc Québec

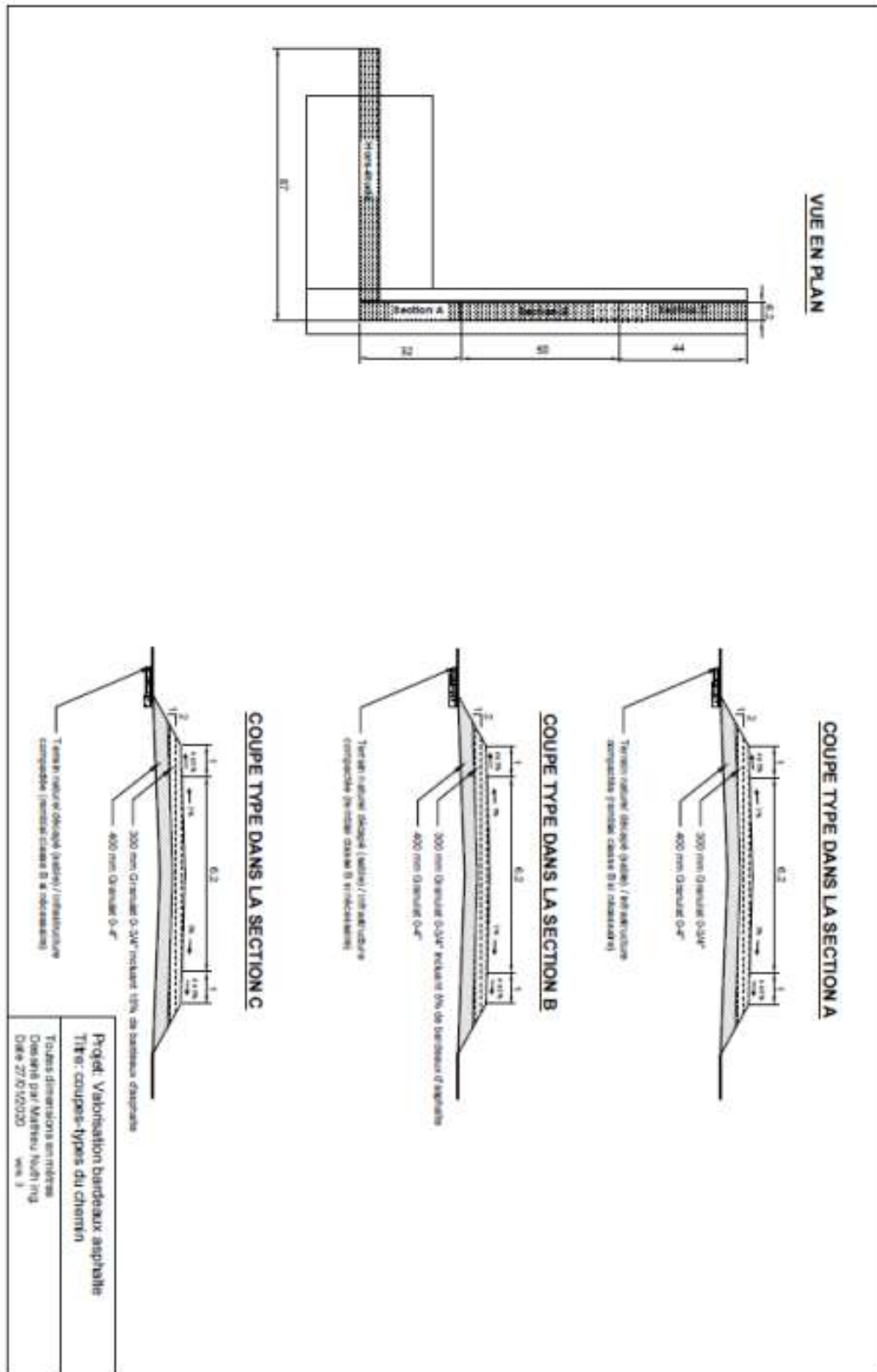
Nuth M., Laloui L. (2007), "Unified stress framework for modelling unsaturated subsoil behaviour". Int. Journal of Road Materials and Pavement Design, 8(4).

P.&B. Entreprises. Béton Provincial (2019). [En ligne] [<https://www.betonprovincial.com/en/concrete-plants/isles-de-la-madeleine-p-b-entreprises>]

Soleimanbeigi, A. Edil, T.B., Benson, C.H. (2014). "Creep response of recycled asphalt shingles". Canadian Geotechnical Journal. 51(7).

Vulliet, L., Laloui, L., & Zhao, J. (2016). Mécanique des sols et des roches (TGC volume 18): Avec écoulements souterrains et transferts de chaleur. PPUR Presses polytechniques.

ANNEXE A – PLANS ET SECTIONS-TYPES DE LA ROUTE EXPÉRIMENTALE



ANNEXE B – PROCTOR MODIFIÉ DU MATÉRIAU GRANULAIRE



Université de Sherbrooke
Laboratoire de Géotechnique
Essai Proctor

Projet : Mathieu - BAPC

Description du sol : mat. Granulaire sans Bardeau

Échantillon :

Trou no :

Profondeur :

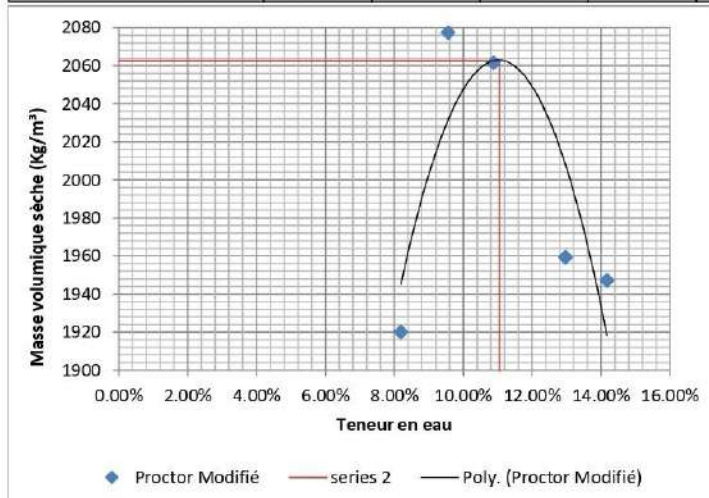
Analysé par : I. Chacaltana

Autres remarques :

Date : 06/03/2019

Essai #	1	2	3	4	5	6	7
M moule + sol compacte	10915.7	11336	11357	11203.8	11224.6		
M moule (B)	6518.6	6518.6	6518.6	6518.6	6518.6		
M sol compacte (humide)	4397.1	4817.4	4838.4	4685.2	4706	0	0
Masse volumique humide (Kg/m³)	2077	2276	2286	2213	2223		
Masse volumique sèche (Kg/m³)	1920	2077	2061	1959	1947	0	0

Teneur en eau visée (%)	nat	1.50%	3.00%	4.50%	6.00%		
No. De la tare	1262	1056	9	16	1249		
Masse tare + sol humide	264.5	261.3	264.6	269.9	259		
Masse tare + sol sec	245.9	240	240.3	241	229.1		
Masse de l'eau	18.6	21.3	24.3	28.9	29.9	0	0
Masse de la tare	18.7	17.1	16.9	18.1	18.1		
Masse du sol sec	227.2	222.9	223.4	222.9	211	0	0
Teneur en eau réelle (%)	8.19%	9.56%	10.88%	12.97%	14.17%		



Mode de compactage
 Volume (cm³) 2116.81
 Dame _____
 Chute _____
 Nombre de couches 5
 No. Coups/couche 56

0 11.05%
 2062.5 11.05%
 2062.5 0.00%

pd max (kg/m3)	2062.5
w opt (%)	11.05

ANNEXE C – PROCTOR MODIFIÉ DU MATÉRIAU GRANULAIRE ET 5% DE BAPC

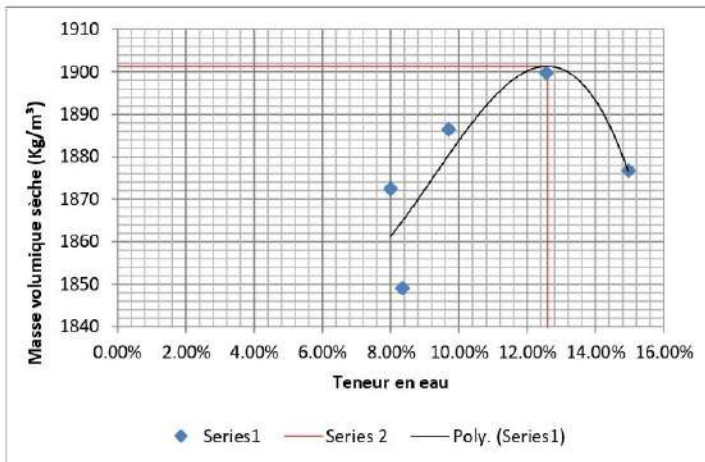


Université de Sherbrooke
Laboratoire de Géotechnique
Essai Proctor

Projet : _____ Description du sol : mat. Granulaire + 5% bardeau
 Échantillon : _____
 Trou no : _____
 Profondeur : _____
 Analysé par : _____ Autres remarques : _____
 Date : _____

Essai #	1	2	3	4	5	6	7
M moule + sol compacte	10799.2	10759.3	10899.1	11045	11086		
M moule (B)	6518.6	6518.6	6518.6	6518.6	6518.6		
M sol compacte (humide)	4280.6	4240.7	4380.5	4526.4	4567.4		
Masse volumique humide (Kg/m ³)	2022	2003	2069	2138	2158		
Masse volumique sèche (Kg/m ³)	1872	1849	1886	1900	1877		

Teneur en eau visée (%)	8.00%	9.54%	10.50%	12.80%	14.00%		
No. De la tare	1265	20	6	25	24		
Masse tare + sol humide	246.9	251.3	293.2	311.7	313.1		
Masse tare + sol sec	230	233.3	268.8	279	274.7		
Masse de l'eau	16.9	18	24.4	32.7	38.4		
Masse de la tare	18.7	17.6	17.2	18.6	18.2		
Masse du sol sec	211.3	215.7	251.6	260.4	256.5		
Teneur en eau réelle(%)	8.00%	8.34%	9.70%	12.56%	14.97%		



Mode de compactage
 Volume (cm³) 2116.81
 Dame _____
 Chute _____
 Nombre de couches _____
 No. Coups/couche _____

0 12.60%
 1901.3 12.60%
 1901.3 0.00%

pd max (kg/m ³)	1901.3
w opt (%)	12.6

ANNEXE D – PROCTOR MODIFIÉ DU MATÉRIAU GRANULAIRE ET 10% DE BAPC

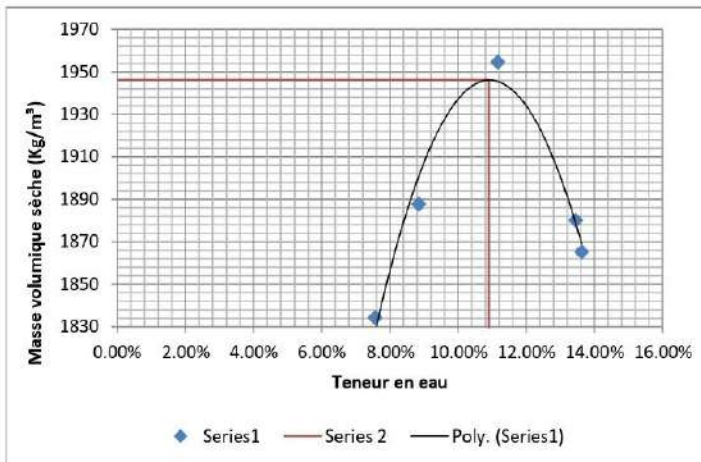


Université de Sherbrooke
Laboratoire de Géotechnique
Essai Proctor

Projet : _____ Description du sol : mat. Granulaire + 10% bardeau
 Échantillon : _____
 Trou no : _____
 Profondeur : _____
 Analysé par : I. Chacaltana _____
 Date : _____ Autres remarques : _____

Essai #	1	2	3	4	5	6	7
M moule + sol compacte	10695	10867.9	11117.9	11033.9	11005.1		
M moule (B)	6518.6	6518.6	6518.6	6518.6	6518.6		
M sol compacte (humide)	4176.4	4349.3	4599.3	4515.3	4486.5		
Masse volumique humide (Kg/m³)	1973	2055	2173	2133	2119		
Masse volumique sèche (Kg/m³)	1834	1888	1955	1880	1865		

Teneur en eau visée (%)	8.00%	9.54%	10.50%	12.80%	14.00%		
No. De la tare	20	1265	24	6	25		
Masse tare + sol humide	377.1	257.5	293	344.1	288.3		
Masse tare + sol sec	351.9	238	265.3	305.5	255.9		
Masse de l'eau	25.2	19.5	27.7	38.6	32.4		
Masse de la tare	18.7	17.6	17.2	18.6	18.2		
Masse du sol sec	333.2	220.4	248.1	286.9	237.7		
Teneur en eau réelle (%)	7.56%	8.85%	11.16%	13.45%	13.63%		



Mode de compactage
 Volume (cm³) 2116.81
 Dame _____
 Chute _____
 Nombre de couches _____
 No. Coups/couche _____

0	10.90%
1946.2	10.90%
1946.2	0.00%

pd max (kg/m3)	1946.2
w opt (%)	10.9

ANNEXE E – PROCTOR MODIFIÉ DU MATÉRIAU GRANULAIRE ET 15% DE BAPC

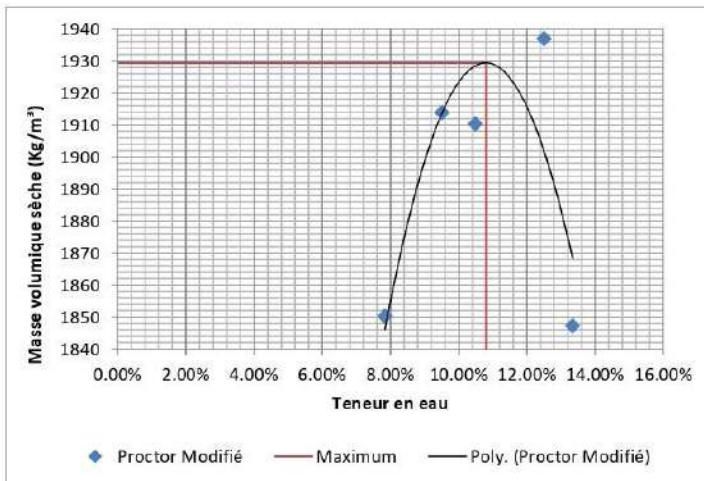


Université de Sherbrooke
Laboratoire de Géotechnique
Essai Proctor

Projet : _____
Description du sol : Mat granulaire + 15% bardeau
Échantillon : _____
Trou no : _____
Profondeur : _____
Analysé par : _____
Autres remarques : _____
Date : _____

Essai #	1	2	3	4	5	6	7
M moule + sol compacte	10742.1	10955.4	10986.6	11131.6	10950.5		
M moule (B)	6518.6	6518.6	6518.6	6518.6	6518.6		
M sol compacte (humide)	4223.5	4436.8	4468	4613	4431.9	0	0
Masse volumique humide (Kg/m ³)	1995	2096	2111	2179	2094	0	0
Masse volumique sèche (Kg/m ³)	1850	1914	1910	1937	1847	0	0

Teneur en eau visée (%)	8.19%	9.56%	10.88%	12.97%	14.17%		
No. De la tare	1292	5	24	25	10		
Masse tare + sol humide	249.6	273	281.9	240.9	239.4		
Masse tare + sol sec	232.9	250.8	256.9	216.2	213.2		
Masse de l'eau	16.7	22.2	25	24.7	26.2	0	0
Masse de la tare	19.8	17.5	18.6	18.7	16.8		
Masse du sol sec	213.1	233.3	238.3	197.5	196.4	0	0
Teneur en eau réelle(%)	7.84%	9.52%	10.49%	12.51%	13.34%		



Mode de compactage
 Volume (cm³) 2116.81
 Dame _____
 Chute _____
 Nombre de couches _____
 No. Coups/couche _____

0	10.80%
1929.3	10.80%
1929.3	0.00%

pd max (kg/m ³)	1929.3
w opt (%)	10.8

ANNEXE F – PROCTOR MODIFIÉ DU MATÉRIAU GRANULAIRE ET 30% DE BAPC

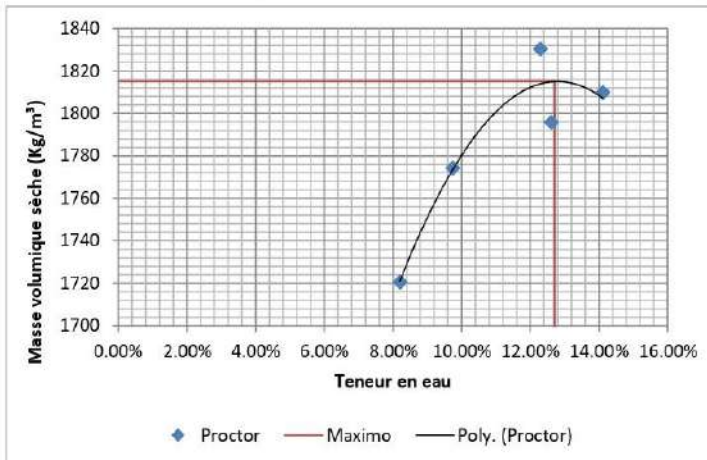


Université de Sherbrooke
Laboratoire de Géotechnique
Essai Proctor

Projet : _____ Description du sol : mat. Granulaire + 30% bardeau
 Échantillon : _____
 Trou no : _____
 Profondeur : _____
 Analysé par : _____ Autres remarques : _____
 Date : _____

Essai #	1	2	3	4	5	6	7
M moule + sol compacte	10459.3			10799.3	10890.6	10640.2	10869.4
M moule (B)	6518.6			6518.6	6518.6	6518.6	6518.6
M sol compacte (humide)	3940.7			4280.7	4372	4121.6	4350.8
Masse volumique humide (Kg/m ³)	1862			2022	2065	1947	2055
Masse volumique sèche (Kg/m ³)	1720			1796	1810	1774	1830

Teneur en eau visée (%)	8.00%			12.80%	14.00%	> 9.54%	>11%
No. De la tare	1056			9	1262	16	4
Masse tare + sol humide	217.5			240.9	247.9	206	214.1
Masse tare + sol sec	202.3			215.8	219.5	189.3	192.6
Masse de l'eau	15.2			25.1	28.4	16.7	21.5
Masse de la tare	17			16.8	18.4	17.9	17.7
Masse du sol sec	185.3			199	201.1	171.4	174.9
Teneur en eau réelle(%)	8.20%			12.61%	14.12%	9.74%	12.29%



Mode de compactage
 Volume (cm³) 2116.81
 Dame _____
 Chute _____
 Nombre de couches _____
 No. Coups/couche _____

0	12.70%
1815	12.70%
1815	0.00%

pd max (kg/m ³)	1815
w opt (%)	12.7

ANNEXE G – PROCTOR MODIFIÉ DU MATÉRIAU GRANULAIRE ET ASPHALTE RECYCLÉ

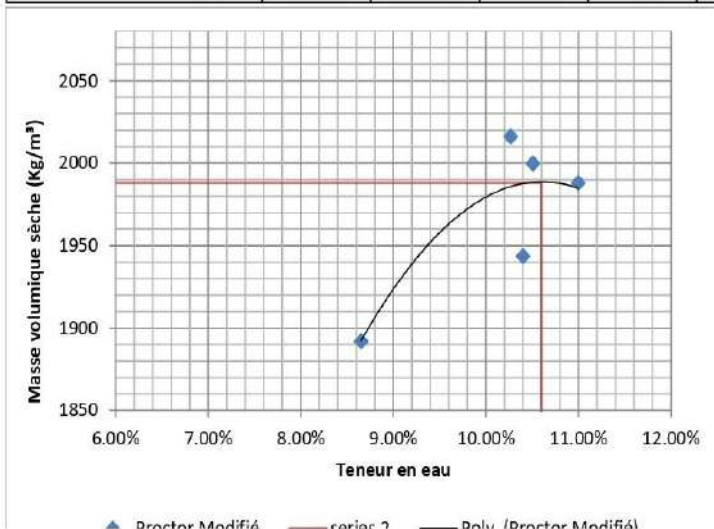


Université de Sherbrooke
 Laboratoire de Géotechnique
 Essai Proctor

Projet : Mathieu - BAPC
 Échantillon : _____
 Trou no : _____
 Profondeur : _____
 Analysé par : I. Chacaltana
 Date : _____
 Description du sol : 60% mat gran. + 40% AR
 Autres remarques : _____

Essai #	1	2	3	4	5	6	7
M moule + sol compacte	10870.1	11224.5	11196.5	11060.6	11189.4		
M moule (B)	6518.6	6518.6	6518.6	6518.6	6518.6		
M sol compacte (humide)	4351.5	4705.9	4677.9	4542	4670.8	0	0
Masse volumique humide (Kg/m³)	2056	2223	2210	2146	2207		
Masse volumique sèche (Kg/m³)	1892	2016	2000	1944	1988	0	0

Teneur en eau visée (%)	nat	1.50%	3.00%	4.50%	6.00%		
No. De la tare	1404	45AA	1249	16	33		
Masse tare + sol humide	298.3	273.7	320.9	296.1	310.2		
Masse tare + sol sec	276	249.9	292.1	269.9	281.2		
Masse de l'eau	22.3	23.8	28.8	26.2	29	0	0
Masse de la tare	18.3	18.1	18	18	17.5		
Masse du sol sec	257.7	231.8	274.1	251.9	263.7	0	0
Teneur en eau réelle(%)	8.65%	10.27%	10.51%	10.40%	11.00%		



Mode de compactage
 Volume (cm³) 2116.81
 Dame _____
 Chute _____
 Nombre de couches 5
 No. Coups/couche 56

0	10.60%
1988	10.60%
1988	0.00%

ANNEXE H – LOG DE L'ESSAI DE PERMÉABILITÉ

UNIVERSITÉ DE SHERBROOKE
LABORATOIRE DE GÉOTECHNIQUE
ESSAI DE PERMÉABILITÉ – CHARGE CONSTANTE

Projet: Bardeau | Site: _____
 Description du sol: Granulométrie + 15% d'argile | Trou No.: _____
 Analysé par: _____ | Profondeur: _____
 Vérifier par: _____ | Échantillon No.: _____

PERMÉAMÈTRE No.: _____ Hauteur: <u>11,615</u> cm Diamètre: <u>40,048</u> cm Aire A: <u>79,255</u> cm ² Volume V: <u>219,55</u> cm ³	PRESSION Hauteur d'eau = h ₀ 1 psi = 70.34 cm (20°C) 1 kPa = 10.202 cm (20°C) h ₀ = <u>23,23</u> cm i=2	MODE DE COMPACTAGE DAME: <u>5</u> lb kg CHUTE: _____ po. <u>0,304</u> m Nb. DE COUCHES = <u>3</u> COUPS/COUCHE = <u>25</u> m = <u>3x 658,40g</u> $K_1 = \frac{QL}{h_0 A} \quad \begin{matrix} k_1 = 0,0030 \\ k_2 = 0,0030 \\ k_3 = 0,0030 \\ k_4 = 0,0030 \end{matrix}$ $K_{20^\circ C} = K_1 \cdot \frac{\eta}{\eta_{20^\circ C}}$
---	---	--

ÉCHANTILLON	DÉBUT		FIN	
	Moule		Moule	
TARE No.	<u>5</u>	<u>1</u>	<u>5</u>	
MASSE HUMIDE + TARE	<u>197,30</u>	<u>1035,6</u>	<u>2473,8</u>	
MASSE SEC + TARE	<u>177,06</u>		<u>2170,4</u>	
MASSE DE L'EAU			<u>283,38</u>	
MASSE DE LA TARE	<u>17,59</u>	<u>8527,0</u>	<u>560,25</u>	
MASSE DU SOL SEC				
TENEUR EN EAU (ω%)	<u>11,30</u>		<u>11,38</u>	
M. VOL. HUMIDE (γ _h) <u>2148</u>	XXXXX	<u>1,9874 g/cm³</u>	XXXXX	<u>2,0808 g/cm³</u>
M. VOL. SÈCHE (γ _s) <u>1930</u>	XXXXX	<u>1,7857 g/cm³</u>	XXXXX	<u>1,772 g/cm³</u>
DEGRÉ SATURATION (S%)				

k₁ = 0,0030 cm/sec

Pression (kPa)	Lect. du deflect. (0,1mm)	Hauteur del'échan. L (cm)	Durée d'écoulement t (sec)	Volume d'eau Q (cm ³)	Température T (°C)	Perméabilité	η/η _{20°C}	Perméabilité
						À T °C K ₁ (cm/sec)		À 20 °C K _{20°C} (cm/sec)
∅	5,000	11,15						
charge dense	10 kPa	5,16						
	50 kPa	5,18						
	100 kPa	5,20	<u>9,90</u>	<u>5</u>	<u>19,5</u>			
			<u>9,86</u>	<u>5</u>				
			<u>9,46</u>	<u>5</u>				