



**Subvention accordée par la Région wallonne
à un Centre de Recherche Agréé
Dans le cadre d'une Recherche collective**

APERROUT

**Amélioration des performances
des recyclés en domaine routier
par optimisation des unités de traitement**

Rapport scientifique final

Période du 01/09/2013 au 29/02/2016

Numéro de convention

1217817

Table des matières

Introduction	5
Tâche 1: Etat des lieux et caractérisation des matériaux	8
1.1 Veille bibliographique et technologique	8
1.1.1 Composition des déchets entrants dans les unités de traitement et leur évolution dans le temps	8
1.1.2 Dispositifs de traitement des déchets	8
1.1.3 Introduction à la durabilité des granulats	8
1.1.4 Principaux essais de durabilité des granulats liés aux sollicitations mécaniques	11
1.1.5 Principaux essais de durabilité des granulats liés aux sollicitations climatiques	27
1.2 Etude de centres de traitement agréés	30
1.2.1 Visite de centres de traitement	30
1.2.2 Caractéristiques des centres d'origine des échantillons recyclés testés	32
1.3 Prélèvement des échantillons	34
1.3.1 Prélèvement des matériaux bruts	34
1.3.2 Prélèvement des matériaux recyclés	35
1.4 Caractérisation en laboratoire des échantillons de déchets bruts	36
1.4.1 Séparation granulométrique des échantillons	36
1.4.2 Analyse de la fraction 0/4 des déchets bruts	38
1.4.3 Composition granulométrique des fractions grossières de déchets bruts	45
1.5 Caractérisation en laboratoire des échantillons de matériaux recyclés traités	53
1.5.1 Composition granulométrique des échantillons	53
1.5.2 Courbe granulométrique des échantillons	56
1.5.3 Essais Micro-Deval en présence d'eau (M_{DE})	59
1.5.4 Essais Los Angeles (LA)	60
1.5.5 Critère $M_{DE}+LA$	60
1.5.6 Essais liés aux cycles gel-dégel	62
Tâche 2: Mise au point d'un test spécifique aux granulats recyclés	65
2.1 Modification des essais de durabilité	65
2.1.1 Etude des paramètres influençant les résultats des essais de durabilité	65
2.1.2 Corrélation entre les résultats des essais	71
2.2 Essais triaxial cyclique	75
2.2.1 Matériel et méthodes	75
2.2.2 Résultats	76
2.3 Essais de friabilité, dégradabilité et fragmentabilité selon la norme française	79
2.3.1 Essai de friabilité (NF P 18-576)	79
2.3.2 Essai de fragmentabilité (NF P 94-066)	80
2.3.3 Essai de dégradabilité (NF P 94-067)	82

2.3.4	Conclusion	84
Tâche 3: Etude des paramètres néfastes85		
3.1	Caractérisation en laboratoire des fines issues des différents échantillons recyclés mixtes.....	85
3.1.1	Caractérisation physique	85
3.1.2	Caractérisation « minéralogique » et chimique	86
3.1.3	Caractérisation de forme	88
3.2	Influence des fines et de la teneur en eau sur les déformations permanentes du matériau	95
Tâche 4: Protocole de traitement98		
4.1	Description globale du protocole de traitement	98
4.2	Broyage sélectif	100
4.2.1	Réduction granulométrique à l'aide d'un concasseur à mâchoires	100
4.2.2	Réduction granulométrique à l'aide d'un concasseur à percussion	102
Tâche 5: Analyse en laboratoire du comportement des nouveaux granulats obtenus 108		
Tâche 6: Etude des nouveaux déchets issus de la démolition et adaptation du protocole de traitement 111		
6.1	Influence du béton cellulaire sur les résultats aux essais de durabilité	111
6.2	Concassage de béton cellulaire	113
6.2.1	Matériel et méthode	113
6.2.2	Analyse granulométrique	113
6.3	Séparation gravimétrique sur un mélange béton/brique/béton cellulaire.....	114
6.3.1	Matériel et méthode	114
6.3.2	Résultats	116
Tâche 7: Validation à grande échelle..... 122		
7.1	Première planche d'essais : résistance au gel-dégel.....	122
7.1.1	Mise en place et démontage partiel de la planche	122
7.1.2	Evolution des températures	126
7.1.3	Levers topographiques	127
7.1.4	Suivi des propriétés in situ	129
7.1.5	Caractéristiques des échantillons prélevés sur le site	136
7.1.6	Conclusions de la première planche d'essai	143
7.2	Deuxième planche d'essais : concassage/compactage.....	144
7.2.1	Mise en œuvre	144
7.2.2	Essais in situ	146
7.2.3	Essais de laboratoire	151
7.2.4	Conclusions de la deuxième planche d'essais	154

7.3 Troisième planche d'essais : gélivité/gonflement	154
7.3.1 Mise en œuvre	154
7.3.2 Evolution des températures	157
7.3.3 Levers topographiques	159
7.3.4 Autres essais in situ	160
7.3.5 Essais de laboratoire	162
7.3.6 Conclusions de la troisième planche d'essai	164
Conclusions	165
Perspectives	173
Références	174
Annexe I: Formulaire transmis aux centres de traitement	177
Annexe II: Annexe A.2 de la prescription technique PTV 406	179
Annexe III: Indication et classification des granulats recyclés (Tableau 1 de la prescription technique PTV 406).....	180
Annexe IV: Description des équipements pour la caractérisation de forme des particules	181
Annexe V : Évolution des températures dans la planche d'essais gélivité.....	183

REMARQUE PRELIMINAIRE

Dans le présent rapport, il convient de distinguer les termes suivants :

- Les **finés** (f) concernent les particules dont le diamètre est inférieur à 63 µm. La teneur de ces particules est représenté par la lettre f dans les normes et le cahier des charges QUALIROUTES.
- La **fraction 0/4** concernent les particules dont le diamètre est inférieur à 4 mm. Cela correspond à une fraction sableuse.
- Les **éléments fins** concernent les particules de petite taille et dont le diamètre maximal n'est pas précisé. Ce dernier peut varier entre 2 µm et 10 mm.

Introduction

L'objectif du projet Aperroul était de pouvoir fournir des granulats de recyclés mixtes plus performants pour des applications en domaine routier et pouvant offrir toutes les garanties de qualité et de sécurité aux prescripteurs de projet et aux différents entrepreneurs de voiries.

Pour remplir cet objectif, les travaux des différents partenaires, le CTP, l'ULg et le CRR, ont été répartis en neuf tâches distinctes.

Tâche 1 : Etat des lieux et caractérisation des matériaux

Dans un premier temps, une étude bibliographique a été menée afin de rassembler l'information disponible sur les dispositifs de traitement et sur les essais de caractérisation qui peuvent être utilisés pour caractériser les matériaux recyclés.

Ensuite, des déchets bruts et des échantillons recyclés ont été prélevés afin de faire l'objet d'une caractérisation en laboratoire. Pour des raisons de confidentialité, l'origine des échantillons bruts ne nous a pas été communiquée et celle des échantillons traités ne l'a été qu'à titre confidentiel.

La fraction 0/4 a fait l'objet d'une caractérisation spécifique, vu l'influence souvent néfaste de ces éléments dans le comportement du matériau. Cette caractérisation a comporté une grande variété de tests comme l'analyse granulométrique, la mesure de densité, la détermination de la teneur et demande en eau, la perte au feu, l'analyse minéralogique, ainsi que l'analyse quantitative chimique.

Les fractions granulaires grossières ont fait l'objet d'une classification, afin d'identifier leurs différents constituants rassemblés en catégories faisant référence à la norme NBN EN 933-11. Les échantillons recyclés ont fait en outre l'objet d'une caractérisation via des analyses granulométriques et par les principaux essais de durabilité que sont les essais Los Angeles (LA), Micro-Deval en présence d'eau (M_{DE}) et les essais de sensibilité aux cycles gel-dégel (F).

Tâche 2 : Mise au point d'un essai spécifique aux granulats recyclés

Actuellement, les granulats recyclés sont caractérisés par des essais classiques, mis au point pour des granulats naturels tels que l'essai Micro-Deval en présence d'eau (M_{DE}), l'essai Los Angeles (LA) et les essais de sensibilité aux cycles gel-dégel (W_A et F). Cependant, vu leur composition et leur traitement préalable qui diffèrent de ceux des granulats naturels, ces essais ne sont peut-être pas totalement représentatifs du comportement réel des granulats recyclés. Le projet avait donc pour objectif de développer un ou plusieurs essais de laboratoire spécifique(s) aux matériaux recyclés à partir, soit des essais actuels, soit d'essais récemment développés, comme notamment l'essai triaxial cyclique.

Des variantes des essais classiques de durabilité (LA, M_{DE} et F) ont été effectuées afin d'estimer l'influence de certains paramètres tels que la classe granulaire, l'influence de l'eau ou la nature des matériaux. D'éventuelles corrélations entre les résultats de ces différents essais ont également été recherchées.

Deux échantillons traités ont été soumis à des essais recommandés par la norme française pour les matériaux de remblai (*essais de friabilité, de fragmentabilité et de dégradabilité*). Ces critères, repris

dans les cahiers des charges français, en ce qui concerne les remblais et non pour des applications en sous-fondation, sont moins stricts que les essais classiques.

Des essais triaxiaux cycliques ont également été réalisés, en utilisant des niveaux de contraintes adaptés pour être représentatifs des sollicitations en sous-fondation. Un essai a été mis en œuvre afin d'évaluer via cette procédure l'impact de cycles de gel-dégel sur les déformations permanentes. Une comparaison avec les déformations mesurées sur des granulats naturels a également été effectuée.

Tâche 3 : Etude des paramètres "néfastes"

Sur base des informations obtenues des deux tâches précédentes, il s'avère que la teneur en éléments fins joue un rôle non négligeable dans le comportement des matériaux recyclés utilisés en sous-fondation routière. Pour cette raison, les travaux de cette tâche se sont concentrés sur ce paramètre en particulier.

Une analyse plus détaillée de la composition et de différentes caractéristiques de la fraction 0/4 des matériaux bruts et recyclés a été réalisée à l'ULg. Une caractérisation détaillée de la forme des particules par imagerie statique a notamment été menée.

L'influence de la teneur en fines (f) des matériaux, ainsi que de leur teneur en eau, a été également étudiée à l'aide d'essais triaxiaux cycliques.

Tâche 4 : Protocole de traitement

L'objectif de cette tâche était de déterminer si un protocole de traitement spécifique des recyclés pouvait être envisagée pour trier les différents composants ainsi qu'éliminer ou améliorer certains paramètres néfastes.

Un schéma de protocole de traitement a été élaboré par le CTP, après concertation avec différents intervenants du secteur. La méthode de broyage a été investiguée de façon à limiter la production de fines (f) mais également afin de s'intéresser à la possibilité d'avoir recours à un broyage sélectif qui faciliterait la séparation ultérieure des granulats par simple coupure granulométrique. Deux types de concasseurs ont été envisagés : le concasseur à mâchoires et le concasseur à percussion. Pour ce second équipement, la puissance motrice a été modifiée afin de voir l'évolution sur la production de fines.

Les essais ont été réalisés principalement sur des échantillons de béton et de briques ainsi que sur un mélange des deux.

Tâche 5 : Analyse en laboratoire du comportement des nouveaux granulats obtenus

Des recyclés mixtes issus de deux variantes du protocole expérimental développés dans la Tâche 4 ont été prélevés: l'un où deux fractions sont concassées avant criblage et recombinaison et l'autre où seule une fraction est concassée. Les performances de ces granulats aux essais classiques de durabilité ($LA - M_{DE} - F$) ont ainsi pu être comparées avec les performances des granulats recyclés prélevés dans les centres.

Tâche 6 : Etude des nouveaux déchets de démolition et adaptation du protocole de traitement

Les bétons cellulaires sont des matériaux rencontrés de plus en plus fréquemment dans les centrales de traitement, où ils se retrouvent souvent mélangés aux déchets inertes. Pour cette raison, nous avons

choisi d'étudier l'impact de la présence de ce matériau sur les performances des recyclés et les adaptations possibles du protocole de traitement.

La séparation des granulats de béton cellulaire d'un mélange béton/brique a été envisagée, au moyen de techniques gravimétriques, et plus particulièrement avec une table densimétrique.

Tâche 7 : Validation à grande échelle

Afin de contrôler *in situ* le comportement des recyclés mixtes, trois planches d'essais ont été réalisées dans le cadre du projet. Ne disposant pas de suffisamment de matériaux issus du protocole expérimental, celles-ci ont été réalisées sur base de recyclés issus de centrales de traitement.

La première planche d'essais a été réalisée afin de pouvoir étudier le comportement *in situ* de granulats recyclés 0/32 vis-à-vis des conditions météorologiques hivernales et de déterminer s'il existe des similitudes entre les résultats observés sur le terrain et les résultats obtenus par l'essai de sensibilité au gel-dégel. Cette planche a été équipée de sondes de température disposées en surface et à différentes profondeurs de la couche testée ainsi que de repères topographiques. Les propriétés mécaniques de la couche ont été contrôlées régulièrement, sous des conditions climatiques variables, afin de contrôler leur évolution dans le temps et en fonction des conditions climatiques. Suite à la première période hivernale, la planche a été partiellement démontée. Des échantillons de matériaux ont été prélevés à différentes étapes de la réalisation ainsi que lors du démontage et ont fait l'objet d'une caractérisation en laboratoire.

La seconde planche d'essais a été mise en place afin d'estimer l'influence du type de concasseur (à mâchoires ou à percussion) et du type de compacteur (à rouleaux ou à pneus) sur les propriétés des recyclés mis en œuvre. Les performances des différents matériaux ont été mesurées *in situ* et des prélèvements ont été effectués afin de comparer leurs performances aux essais de durabilité.

Suite au gonflement et raidissement observés lors de la première planche d'essais, une troisième planche a été mise en œuvre afin de comparer le comportement à long terme et sous l'effet du gel d'un matériau recyclé à celui d'un matériau naturel. Ces paramètres ont été contrôlés régulièrement au cours d'une période hivernale.

Tâche 1: Etat des lieux et caractérisation des matériaux

1.1 Veille bibliographique et technologique

1.1.1 Composition des déchets entrants dans les unités de traitement et leur évolution dans le temps

Il n'existe à ce jour que peu d'études et d'articles précis concernant la composition des déchets entrants dans une unité de traitement car cette composition fluctue, en fonction du type de matériaux acceptés par le centre, mais aussi des chantiers situés à proximité de l'unité de traitement et de la géologie locale.

1.1.2 Dispositifs de traitement des déchets

Il n'existe pas de dispositif unique de traitement des déchets. Chaque société et unité de traitement dispose de son propre dispositif, qui évolue au cours du temps en fonction des produits entrants et de l'objectif de qualité souhaité et de la nature des matériaux traités.

1.1.3 Introduction à la durabilité des granulats

En domaine routier, il importe de garantir la durabilité des granulats au sein de la structure routière afin de limiter à terme le risque d'apparition de dégradations au sein de ces structures, en particulier en surface.

La durabilité d'un granulat utilisé en domaine routier peut se définir comme *la capacité du matériau à conserver dans le temps, ses caractéristiques initiales et notamment son fuseau granulométrique face aux différentes sollicitations auxquelles il sera soumis lors de ses diverses étapes depuis son traitement jusqu'à la destruction de la voirie.*

Cette définition fait intervenir 3 notions-clés qu'il convient de préciser, à savoir la conservation du fuseau granulométrique, le cycle de vie des granulats recyclés ainsi que les sollicitations présentes au sein du matériau.

- **La conservation du fuseau granulométrique** : pour rappel, un mélange granulaire non lié est en réalité un assemblage de grains de taille et de nature variées qui se touchent les uns aux autres en différents points de surface et qui sont séparés par des espaces intergranulaires remplis, soit d'eau libre ou capillaires (\pm attachée), soit d'air. Chaque phase se caractérise par des propriétés distinctes qui influencent le comportement général du matériau.

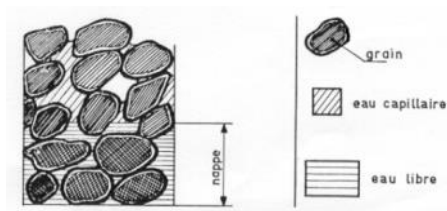


Figure 1 : Matériau granulaire en présence d'eau.

En présence de sollicitations au sein du matériau, une partie des contraintes se concentre dans la phase liquide (*sous forme de pression interstitielle*), tandis que l'autre partie se concentre dans la phase solide et en particulier, dans certaines zones telles que les points de contact entre les grains, les zones de faiblesses de la roche (*fissures, pores, etc.*), voire à l'interface eau–solide.

Si ces sollicitations croissent, ces contraintes peuvent provoquer des ruptures au sein des grains ainsi que leur polissage, ce qui se traduit par leur décomposition et la formation d'éléments fins. Cela engendre dès lors une modification dans la structure granulaire du matériau qui se traduit souvent par la perte de caractéristiques géotechniques, non seulement de la couche concernée mais également de la structure entière.

La conservation du fuseau granulométrique est donc un facteur important dans la durabilité d'un granulat. C'est la raison pour laquelle la majorité des essais de durabilité fournissent des résultats sous forme de production d'éléments fins produits lors de ces essais.

La présence d'éléments fins au sein d'un matériau granulaire peut avoir plusieurs effets positifs ou négatifs selon la teneur sur les trois paramètres suivants :

- La compacité, la force portante du matériau ainsi que la résistance aux différents types de déformations : les éléments fins, pour autant qu'ils ne soient pas en trop grand nombre, ont tendance lors de l'opération de compactage à remplir les espaces intergranulaires; ce qui permet d'améliorer la masse volumique du matériau et donc sa compacité et sa portance. Par contre, à partir d'une certaine teneur (*située entre 20 - 25 % selon la porosité initiale du matériau grossier*), l'ajout d'éléments fins engendre un phénomène inverse, à savoir une diminution de la densité. Les éléments fins n'occupent plus uniquement les interstices mais ils écartent les gros éléments et la porosité initiale du matériau devient de plus en plus importante (Figure 2). Il convient de noter que les cahiers des charges autorisent une teneur en fines (f) pouvant aller jusqu'à 9 % pour des couches portantes telles que la fondation.

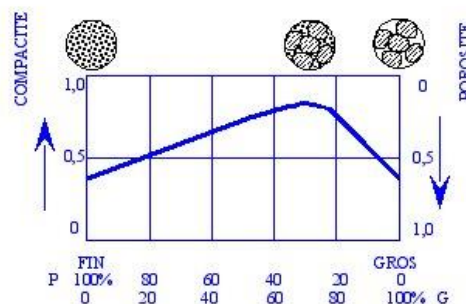


Figure 2 : Influence de la répartition granulométrique sur la compacité du mélange.

- La perméabilité : les éléments fins présents dans les interstices réduisent la perméabilité du matériau par remplissage des pores. Cependant, tant que leur pourcentage en masse reste modéré, l'eau continue à circuler dans les interstices sans trop de problème. Par contre, à partir d'une certaine teneur (*liée à la granulométrie du matériau*), les éléments fins favorisent l'accumulation de l'eau dans le matériau plutôt que la circulation de cette dernière.

Ainsi, déjà en 1931, CASAGRANDE concluait que le critère concernant la teneur en éléments de diamètre inférieur à 20 μm devait être inférieur à 2 %. Actuellement, sur base des différentes expériences réalisées depuis lors et pour des raisons pratiques (*le tamisage mécanique s'arrête à 63 μm*), la majorité des cahiers de charges limitent la teneur en fines ($\varnothing < 63$ ou 80 μm) à une valeur inférieure ou égale à 7 % pour des couches à rôle drainant, comme par exemple la sous-fondation.

- **La sensibilité au gel** : en cas de gel, l'eau stationnaire gèle plus facilement qu'une eau en mouvement. Le passage de l'état liquide à l'état solide provoque un accroissement du volume sous forme de gonflement. Ce gonflement se caractérise, soit par un soulèvement de la structure supérieure, soit par une augmentation des contraintes sur les différents matériaux; ce qui facilite dans ce cas la rupture et la production d'éléments fins et ne fait qu'accélérer les phénomènes de dégradation mécanique du matériau. Une structure non drainante et donc riche en éléments fins accélère la propagation des fronts de gel et de dégel.
- **Le cycle de vie des granulats recyclés en domaine routier** : le granulat est confronté à différentes manipulations depuis la sortie de l'unité de traitement jusqu'à la mise en service de la voirie où il est également soumis à des contraintes (Figure 3).



Figure 3 : Cycle des principales manipulations que subissent les granulats depuis l'unité de traitement jusqu'à la fin de l'exploitation de la voirie.

- **Les sollicitations appliquées aux granulats du domaine routier** : tout granulat présent dans une structure routière (*revêtement, fondation et sous-fondation*) est soumis à un grand nombre de sollicitations de nature, d'intensité et de répétabilité variable dans le temps. Cette répétabilité est responsable de la fatigue du matériau. En effet, tous les véhicules n'ont pas le même poids, la même vitesse et ne passeront pas à des intervalles réguliers.

Vu la grande diversité de contraintes présentes, il est impossible de réaliser un seul essai en laboratoire capable de prendre en considération toutes ces sollicitations et qui témoigne ainsi des véritables performances du matériau. En réalité, seuls quelques essais – les plus représentatifs des sollicitations les plus importantes – sont réalisés en vue de pouvoir comparer leurs résultats avec des critères figurant dans les cahiers des charges. Ces essais sont décrits dans le chapitre suivant.

Parmi les sollicitations les plus fréquentes, il convient de distinguer deux grandes familles :

- **Les sollicitations mécaniques** concernent les sollicitations qui provoquent des chocs ou des frottements mécaniques entre les grains comme la fragmentation par impact, l'usure par attrition, le cisaillement, la compression ou encore le broyage. Les premières sollicitations les plus importantes sont la fragmentation par impact (*essai Los Angeles*) et l'usure par attrition

(essai *Micro-Deval en présence d'eau*). L'essai triaxial cyclique à charges répétées tient compte de l'usure du matériau par fatigue suite à la répétabilité des actions mécaniques.

- Les sollicitations climatiques sont liées à l'action de l'eau et/ou de la chaleur qui provoquent des cycles d'alternance dans le milieu, comme par exemple les alternances gel-dégel, également appelées gélivité, chaud-froid, sec-humide, etc. La première sollicitation est souvent la principale cause responsable des dégradations observées en surface de voiries en cours ou à la sortie de l'hiver dans nos contrées. Dans les pays chauds, c'est la variation de température qui prédomine.

1.1.4 Principaux essais de durabilité des granulats liés aux sollicitations mécaniques

Depuis longtemps, le secteur routier a effectué des recherches pour trouver un seul ou un nombre limité d'essais de laboratoire qui puissent représenter au mieux la durabilité des granulats en condition in situ.

Plusieurs essais ont ainsi vu le jour dans le temps, tels que notamment :

- **L'essai Deval**, réalisé sur des granulats grossiers (25/50) tels les ballasts, a été mis au point en 1878. Il représente l'attrition par usure en l'absence d'eau.
- **L'essai Los Angeles (LA)**, mis au point en 1925, représente les sollicitations liées à la fragmentation par impact. A l'époque, c'était un essai représentatif des sollicitations mécaniques présentes durant les opérations de concassage. Il a été utilisé pour prédire, dans le cas d'un nouveau gisement, la quantité d'éléments fins qui seraient produites par les installations de concassage. De ce fait, il a été vite choisi comme un essai de référence par les différents organismes, notamment américains (*pays d'invention*) tels l'AASHTO et l'ASTM. Par la suite, il a été translaté au secteur routier. Il demeure toujours, à ce jour, un essai de référence.
- **L'essai Micro-Deval en présence d'eau (M_{DE})** a été mis au point dans les années 1960 en France pour des granulats plus fins que ceux concernés par l'essai Deval, avant de connaître un succès uniquement dans certains pays européens francophones (*Belgique*). Il représente le processus d'usure par attrition en présence d'eau. Cet essai a été exporté en 1995 au Canada et aux Etats-Unis où il a subi quelques modifications par rapport à la version européenne après avoir fait l'objet d'un grand nombre d'études (voir les articles dans les Références de ce document).

REMARQUE : La somme des résultats de ces deux essais est parfois limitée afin d'éviter que les granulats ne présentent des performances à la limite de l'acceptabilité dans les deux sollicitations simultanément.

- **L'essai triaxial cyclique** permet de simuler les sollicitations exercées par le trafic routier sur les matériaux granulaires utilisés dans la structure routière (*sous-fondation et fondation*) et d'établir les déformations réversibles et permanentes (*orniérages*), les modules résilients de déformation, le coefficient de Poisson ainsi que la loi de fatigue. Ces résultats peuvent être utilisés pour un calcul de dimensionnement et afin de prédire le comportement à long terme du matériau.

1.1.4.1 L'essai Los Angeles (LA)

Cet essai de résistance aux impacts consiste à déterminer selon la méthode normalisée en Europe la quantité d'éléments fins ($\varnothing < 1,6$ mm) produits à partir de 5 000 g de granulats [10/14] ayant été soumis à 500 tours à une vitesse de 33 t/min dans un cylindre horizontal muni d'une saillie en présence de 11 boulets d'acier ($\varnothing 45 - 49$ mm).

La valeur du coefficient Los Angeles équivaut à :
$$LA = \frac{M_{ini}(5000) - m}{50}$$

m: : masse du refus à 1,6 mm
 M_{ini} : masse initiale du matériau

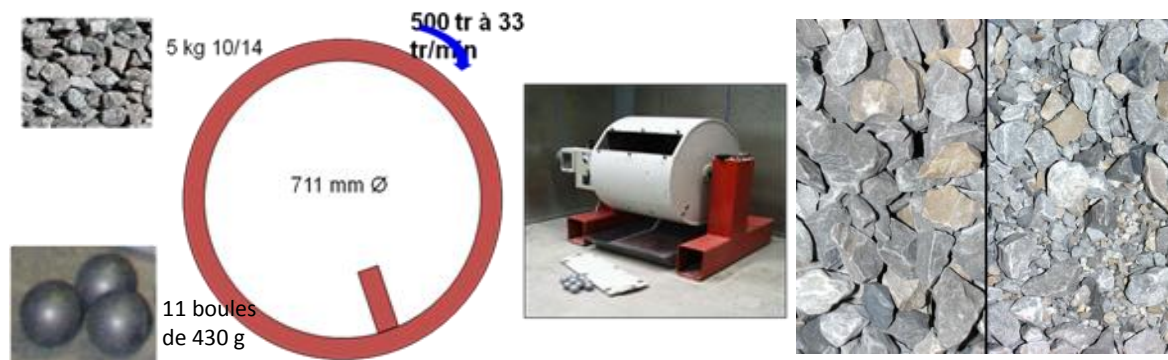


Figure 4 : Principe de l'essai Los Angeles et comparaison d'un échantillon de granulat avant et après l'essai.

Tableau I : Principales caractéristiques de l'essai Los Angeles selon la norme européenne (EN 1907-2).

Dimension du cylindre		Inclinaison du cylindre	0°
Diamètre interne (\varnothing)	508 ± 5 mm		
Longueur interne (L)	711 ± 5 mm		
Nombre de tours	500 tours	Vitesse du cylindre	31 – 33 tr/min
Classe granulaire utilisée	[10 – 14] Critères complémentaires % passant tamis de 12,5 mm : 60 – 70 % % passant tamis de 11,2 mm : 30 – 40 %	Poids de l'échantillon	5 000 ± 5 g

La norme EN 1097-2 décrit également les variantes suivantes pour l'essai Los Angeles :

- **La détermination de la résistance à la fragmentation des ballasts de chemin de fer (Annexe A - normative)** : l'essai est réalisé sur 10 000 g de fraction granulaire [31,5/50] en présence de 12 boulets d'acier et consiste à réaliser 1 000 tours. Le coefficient Los Angeles ainsi obtenu équivaut à LA_{RB} .
- **La possibilité d'utiliser des classes granulaires différentes (Annexe B – informative)** : le tableau ci-dessous extrait de la norme reprend différentes classes granulaires qui peuvent être éventuellement utilisées ainsi que les caractéristiques spécifiques à ces granulométries.

Tableau II : Principales caractéristiques des classes granulaires accessoires de l'essai Los Angeles selon la norme européenne.

Classe granulaire	Tamis intermédiaire (mm)	Passant au tamis intermédiaire (%)	Nombre de boulets	Masse totale des boulets (g)
4 – 6,3	5	30 – 40	7	2 930 – 3 100
4 – 8	6,3	60 – 70	8	3 410 – 3 540
6,3 – 10	8	30 – 40	9	3 840 – 3 980
8 – 11,2	10	60 – 70	10	4 250 – 4 420
11,2 - 16	14	60 - 70	12	5 120 – 5 300

- **La possibilité d'utiliser une classe granulaire [16/32] pour les granulats recyclés** (Annexe G – informative) : le Tableau III, extrait de la norme, reprend les caractéristiques spécifiques à cette classe granulaire.

Tableau III : Principales caractéristiques de la classe granulaire [16/32] disponibles pour les granulats recyclés selon la norme européenne.

Classe granulaire	Tamis intermédiaire (mm)	Passant au tamis intermédiaire (%)	Nombre de boulets	Masse totale des boulets (g)
16 - 32	22,4	45 - 55	14	5 810 – 6 010

L'essai Los Angeles est réalisé dans de nombreux pays dans le monde. Le Tableau IV présente une comparaison entre les différentes méthodologies réalisées dans la majorité des pays européens et nord-américains.

Tableau IV : Tableau comparatif entre les différentes normes concernant l'essai Los Angeles.

Principaux utilisateurs	Europe	Suisse	Pays anglo-saxons			Canada					
	EN 1097-2	SN 670 835b	ASTM ou AASHTO (T-96)			LC 21-400					
Standard			B	C	D	1	2	3	4	5	6
Classe granulaire	10/14	11/16	9,5/19	4,75/9,5	2,36/4,75	4/6,3	6,3/10	10/14	10/25	16/31,5	25/50
Poids de l'échantillon	5 000 g										
Nombre de boulets	11	10	11	8	6	7	9	11	11	12	12
Poids total des boulets (g)	4 475	4 170	4 584	3 330	2 500	3 080	3 960	4 840	4 840	5 280	5 280
Diamètre du passant	1,6 mm		1,7 mm								

Remarque : les cases en grisés correspondent aux essais les plus proches de l'essai classiquement réalisé en Belgique.

Le projet de recherche ALT-MAT (1996-2001) a comparé la méthode généralement utilisée en Europe (norme EN 1097-2) et la méthode (ASTM-C). Les résultats sont généralement similaires pour tous les types de matériaux testés.

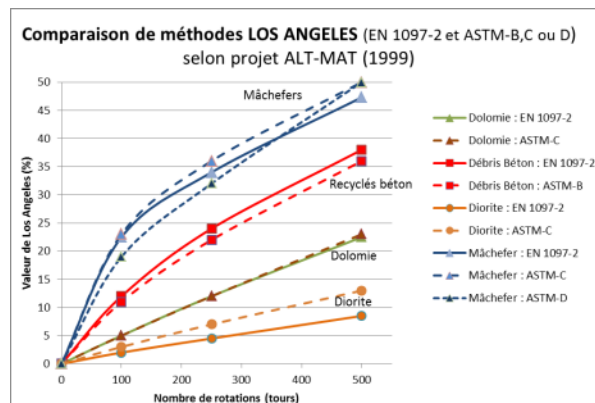


Figure 5 : Influence du nombre de rotations sur la valeur de coefficient Los Angeles (selon le projet ALT-MAT).

En ce qui concerne l'interprétation des résultats, plus faible est la valeur, meilleure est la résistance du matériau aux impacts.

Les différents tableaux repris ci-dessous reprennent une estimation sommaire du comportement à la fragmentation des matériaux sur base des valeurs de LA (Tableau V) et les valeurs généralement obtenues pour les principales lithologies (Tableau VI).

Tableau V : Estimation de la résistance à la fragmentation des granulats sur base de la valeur de LA.

Valeurs	Estimation
< 20	Très bonne
20 – 30	Bonne
30 – 40	Moyenne
> 40	Médiocre

Tableau VI : Principales valeurs de Los Angeles (LA) en fonction de la lithologie.

Famille	Type	Valeurs de LA (Europe)	Estimation du comportement
Granulats naturels	Grès ($pr > 2,5 t/m^3$)	12 – 25, voire 80	Très bon à bon
	Calcaire ($2,3 < pr < 2,7 t/m^3$)	15 – 65, voire 100	Variable selon nature et densité
	Dolomie	20 - 25	Bon
	Porphyre belge	4 – 15	Très bon
	Granite	15 - 25	Très bon à bon
	Basalte	11 - 17	Très bon
Granulats recyclés	Recyclés de béton	24 – 38	Bon à moyen
	Recyclés de maçonnerie	38 – 44	Moyen à médiocre
	Recyclés d'enrobés bitumineux	20	Très bon à bon
Granulats artificiels	Laitier de haut-fourneau	16 – 22	Très bon à bon
	Scorie	4 – 25	Très bon à bon
	Mâchefer d'incinérateur (MIOM)	36 – 54	Moyen à médiocre

Les principaux commentaires et remarques concernant l'essai Los Angeles sont les suivants :

- **La majorité des études concernant l'essai Los Angeles ont été réalisées sur des granulats naturels. Les granulats secondaires semblent réagir de manière différente** : la Figure 5 montre que la forme des droites reliant les trois points de mesure varie selon l'origine naturelle du matériau. Les granulats naturels présentent une forme relativement linéaire entre les trois points, alors que la forme est plus arrondie en ce qui concerne les granulats secondaires. Cela signifie un comportement différent entre les deux familles de granulats. Les granulats secondaires semblent connaître une plus forte fragmentation dans les premiers tours.
- **L'essai Los Angeles n'est pas représentatif du comportement réel des granulats** selon un grand nombre d'auteurs : c'est un essai uniquement d'impact ne faisant pas intervenir d'abrasion. En effet, les roches à grains grossiers ont tendance à se briser plus facilement sous les impacts que les granulats à grains fins, qui ont tendance à absorber une partie de l'impact et ainsi à produire moins de fines. Or, sur le terrain, c'est l'inverse qui se produit. Ce test ne permet donc pas de prédire complètement les performances *in situ* du matériau.
- **L'essai est uniquement représentatif du comportement du matériau lors de sa mise en œuvre** (Rogers et al., 2003 ; Meininger, 2004).
- **La valeur de Los Angeles semble dépendre de la densité du matériau pour une même lithologie.** Ainsi, un calcaire dense (ρ_r de l'ordre de 2,6 à 2,7 t/m³) se caractérise par une valeur de Los Angeles comprise entre 18 et 40 tandis qu'un calcaire de faible densité ($\rho_r < 2,3$ t/m³) peut avoir une valeur de Los Angeles comprise entre 30 et 100. Il en est de même pour le grès qui montre une valeur de LA comprise entre 12 et 25 pour une densité supérieure à 2,5 t/m³ et une valeur comprise entre 25 et 80 pour une densité comprise entre 2,2 et 2,5 t/m³ (Tableau VII).

Tableau VII : Quelques valeurs typiques des caractéristiques les plus courantes (roches saines).

Roche	ρ_r (t/m ³)	n (%)	R_c (MPa)	L_A	M_{DE}
Granites	2.6 à 2.7	< 1	170 à 260	15 à 25	6 à 13
Microgranites	2.6	< 1	200 à 350	10 à 18	5 à 10
Basaltes	2.8 à 3.0	0 à 2	200 à 400	11 à 17	5 à 10
Calcaires	2.6 à 2.7	0 à 5	80 à 260	18 à 40	14 à 40
	2.3 à 2.6	5 à 15	35 à 150	25 à 65	25 à 60
	1.8 à 2.3	15 à 35	8 à 80	30 à 100	4 à 100
Grès	2.5 à 2.6	0 à 5	40 à 250	12 à 25	3 à 30
	2.2 à 2.5	5 à 20	20 à 200	25 à 80	20 à 100
Cornéennes	2.6 à 2.7	< 1	160 à 200	10 à 16	5 à 15
Gneiss	2.6 à 2.7	< 2	140 à 250	12 à 28	5 à 14
Amphibolites	2.8 à 3.0	< 1	160 à 250	8 à 20	5 à 22

- **Cet essai ne tient pas compte de la teneur en eau** : en réalité, les granulats sont rarement secs dans la nature et la présence d'une certaine humidité peut altérer leurs propriétés mécaniques. Certains auteurs comme Larson et al. (1971) ont étudié l'influence de l'eau sur le comportement des granulats soumis à l'essai Los Angeles en réalisant 250 cycles secs suivis de 250 cycles humides. Des résultats plus réalistes furent trouvés.
- **L'essai Los Angeles peut être également réalisé sur un matériau avant et après plusieurs cycles gel/dégel.** La différence de valeur fournit une valeur de sensibilité au gel du granulat. L'action

répétée du gel (*et du dégel*) sur les granulats saturés d'eau peut provoquer une dégradation de ceux-ci par fragmentation ou microfissuration. Cela est particulièrement vrai pour les roches poreuses.

● **Différentes relations ont été étudiées entre l'essai Los Angeles et d'autres paramètres généralement utilisés pour caractériser les granulats :**

- Le coefficient d'absorption d'eau : Esa et al. (1993) n'ont pu établir de corrélation précise entre ces deux paramètres mais ont conclu que les granulats caractérisés par une valeur élevée de Los Angeles ont une tendance à avoir des valeurs importantes de coefficient d'absorption. Ces valeurs dépendent également du type de granulat.
- Le coefficient d'aplatissement : le calcaire viséen et le calcaire tournaisien sont facilement distinguables sur base de ces deux paramètres (calcaire tournaisien de nature plus siliceuse : $Flx = 20$ et $LA 19-20$, calcaire viséen de nature plus dolomitique : $Flx = 5-10$ et $LA = 25-30$).

L'essai Los Angeles fut un des premiers essais permettant de comprendre le comportement des granulats en domaine routier. C'est la raison pour laquelle cet essai a connu, à l'époque, un certain succès et a été notamment choisi comme critère pour la qualification des granulats. Il est un des essais de qualification les plus couramment utilisés.

Cependant, la majorité des critères de référence ont été établis sur base de valeurs-tests obtenues en laboratoire sur des granulats naturels généralement utilisés en domaine routier, sans tenir compte de la réalité du terrain.

1.1.4.2 L'essai Micro-Deval en présence d'eau (M_{DE})

Cet essai de résistance à l'usure des granulats par attrition (*frottement intergranulaire et frottement avec les boulets*) consiste à déterminer, selon la méthode normalisée en Europe, la quantité d'éléments fins ($\varnothing < 1,6$ mm) produits en soumettant 500 g de granulats [10/14] en présence de 5 000 g de boulets ($\varnothing 10$ mm) d'acier et de 2,5 l d'eau à environ 12 000 rotations durant 2 h à une vitesse de 100 t/min dans un cylindre horizontal.

La valeur du coefficient Micro-Deval en présence d'eau équivaut à :

$$M_{DE} = \frac{M_{ini}(500) - m}{5} \quad m: \text{masse du refus à } 1,6 \text{ mm}$$

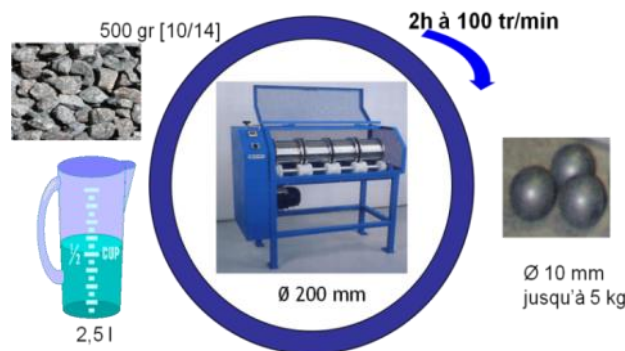


Figure 6 : Principe de l'essai Micro-Deval.

Tableau VIII : Principales caractéristiques de l'essai Micro-Deval en présence d'eau selon la norme européenne

Dimension du cylindre Diamètre (\varnothing) Longueur (L)	200 \pm 1 mm 154 \pm 1 mm	Inclinaison du cylindre	0°
Nombre de tours	12 000 \pm 10 tours	Vitesse du cylindre	100 \pm 5 tr/min
Classe granulaire utilisée	[10 – 14] Critères complémentaires % passant au tamis de 12,5 mm : 60 – 70 % % passant au tamis de 11,2 mm : 30 – 40 %	Poids de l'échantillon	500 \pm 2 g

Outre l'essai classique, la norme EN 1097-1 décrit également les variantes suivantes :

- **La détermination de la résistance à l'attrition des ballasts de chemin de fer (Annexe A - normative)** : l'essai est réalisé sur 10 000 g de fraction granulaire [31,5/50] en l'absence de boulets d'acier et en présence de 2 litres d'eau et consiste à réaliser 14 000 tours. Le coefficient Micro-Deval en présence d'eau ainsi obtenu équivaut à $M_{DE,RB}$.
- **La possibilité de réaliser l'essai en l'absence d'eau (Annexe B - informative)** : l'essai est exécuté de façon similaire à la méthode classique à l'exception de l'eau. Le coefficient ainsi fourni est dénommé M_{DS} .
- **La possibilité d'utiliser des classes granulaires différentes (Annexe C - informative)** : le Tableau IX, extrait de la norme, reprend les différentes classes granulaires qui peuvent être éventuellement utilisées ainsi que les caractéristiques spécifiques à ces granulométries.
- Il n'existe pas de classe granulaire spécifique [16/32] pour les recyclés, au contraire de l'essai Los Angeles.

Tableau IX : Principales caractéristiques des classes granulaires accessoires de l'essai Micro-Deval en présence d'eau selon la norme européenne.

Classe granulaire	Tamis intermédiaire (mm)	Passant au tamis intermédiaire (%)	Nombre de boulets	Masse totale des boulets (g)
4 – 6,3	5	30 – 40	7	2 000 \pm 5
4 – 8	6,3	60 – 70	8	2 800 \pm 5
6,3 – 10	8	30 – 40	9	4 000 \pm 5
8 – 11,2	10	60 – 70	10	4 400 \pm 5
11,2 - 16	14	60 - 70	12	5 400 \pm 5

L'essai Micro-Deval en présence d'eau a été adapté par le Ministère des Transport de la province d'Ontario (*Canada*) dans les années 1990 avant de connaître un réel succès sur le continent nord-américain. Le Tableau X présente une comparaison entre les différentes méthodologies.

Tableau X : Tableau comparatif entre les différentes normes concernant l'essai Micro-Deval en présence d'eau.

Standard	EN 1097-1	ASTM D 6928 - 03	AASHTO T 327-051	Test Method LS-619 : <i>Fine Aggregate (Ministry of Transportation, Ontario)</i>
Principaux utilisateurs	Europe	USA	USA, Canada (<i>granulats grossiers</i>)	Canada (<i>granulats fins < 4,75 mm</i>)
Classe granulaire	10/14 <i>Variantes : [4/6,3], [4/8], [6,3/10], [8/11,2], [11,2/16], [31,5/50]</i>		9,5/19 – 4,75/12,5 – 4,75/9,5	0,075/4,75
Caractéristique du cylindre		Ø 200 mm x L 154 mm		
Poids de l'échantillon	500 g		1 500 g	500 g
Poids total des billes	5 000 g (Ø 10 mm)	5 000 g (Ø 9,5 mm)	5 000 g (Ø 9,5 mm)	1 250 g (Ø 9,5 mm)
Quantité d'eau	2 500 ml	2 000 ml	2 000 ml	750 ml
Temps d'immersion de l'échantillon avant réalisation de l'essai		1 h	1 h	24 ± 4 h
Nombre de tours	12 000 tours	12 000 tours	9 500 – 12 000 tours	1 500 tours
Vitesse de rotation		100 tours/min		
Diamètre du passant	1,6 mm	1,18 mm	1,18 mm	0,075 mm

En ce qui concerne l'interprétation des résultats, plus faible est la valeur, meilleure est la résistance du matériau à l'attrition.

Les tableaux repris ci-dessous reprennent une estimation sommaire de la résistance à l'attrition des matériaux sur base des valeurs de M_{DE} (Tableau XI) ainsi que les valeurs généralement obtenues pour les principales lithologies (Tableau XII).

Tableau XI : Classification des granulats sur base de la valeur du Micro-Deval en présence d'eau (M_{DE}).

Valeurs	Estimation du comportement à la résistance
< 15	Très bon
15 – 25	Bon
25 – 50	Moyen
> 50	Médiocre

Tableau XII : Principales valeurs de Micro-Deval en présence d'eau (M_{DE}) en fonction de la lithologie.

Famille	Type	Valeurs de M_{DE}	Estimation du comportement
Granulats naturels	Grès ($\rho_r > 2,5 \text{ t/m}^3$)	3 – 30	Très bon à moyen
	Calcaire ($2,3 < \rho_r < 2,7 \text{ t/m}^3$)	10 – 60	Variable selon nature et densité
	Dolomie	5,6	Très bon
	Porphyre	3 – 10	Très bon
	Granite	6 – 13	Très bon
	Basalte	5 – 10	Très bon
Granulats recyclés	Recyclés de béton	14 – 36	Bon à médiocre
	Recyclés de maçonnerie	37 – 52	Médiocre
	Recyclés d'enrobés bitumineux	30	Moyen
Granulats artificiels	Laitier de haut-fourneau	8 – 11	Très bon à bon
	Scorie	3 – 10	Très bon
	Mâchefer d'incinérateur (MIOM)	15 – 53	Bon à médiocre

Les principaux commentaires concernant l'essai Micro-Deval en présence d'eau sont :

- **La majorité des études concernant l'essai Micro-Deval en présence d'eau ont été réalisées sur des granulats naturels. Les granulats secondaires réagissent de manière différente à cet essai par rapport aux granulats naturels** : la Figure 7 montre que la forme des droites reliant les trois points de mesure varie selon l'origine naturelle du matériau. Les granulats naturels présentent une forme relativement linéaire entre les trois points de mesure (correspondant à trois nombres de rotations différents) alors que la forme est plus arrondie en ce qui concerne certains granulats secondaires comme les recyclés et les mâchefers d'incinérateur. Cela signifie la présence de comportements différents entre les granulats.

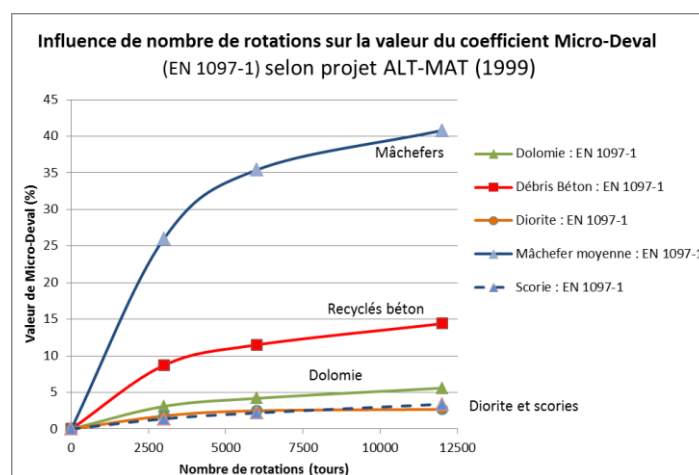


Figure 7 : Influence du nombre de rotations sur la valeur de coefficient Micro-Deval en présence d'eau (selon le projet ALT-MAT).

- **L'essai Micro-Deval en présence d'eau est un des essais de durabilité les plus représentatifs du comportement in situ des granulats** mais il doit être associé à d'autres essais (examens visuel et pétrographique, Los Angeles, Magnesium Sulfate Soundness Test). Cet essai est particulièrement bien adapté pour les granulats fins. En raison de son développement récent en Amérique du

Nord (Canada, USA), de nombreuses études réalisées sur des granulats naturels dans le cadre de la recherche de critères de sélection concluent que cet essai constitue majoritairement un bon indicateur de durabilité, de dureté et de résistance à l'abrasion, mais qu'il doit être accompagné d'autres essais de durabilité (Senior et Rogers, 1991 ; Kandhal et Parker, 1998 ; Wu et al., 1998, Lang et al., 2006). Cependant, certaines études, telles que celle de Hunt (2001) et celle de Cooley et James (2003), ne montrent pas de relation évidente entre l'essai Micro-Deval en présence d'eau et les performances *in situ*.

- **L'essai est réalisé en présence d'eau**, ce qui explique notamment la bonne représentativité de l'essai vis-à-vis des performances *in situ* des matériaux. En effet, les matériaux de moins bonne qualité ont tendance à s'hydrater et à perdre de leur résistance en présence d'eau. Or, dans la nature, les granulats sont rarement secs.
- **Plusieurs facteurs jouent ou ne jouent pas un rôle déterminant dans la mesure de la valeur Micro-Deval en présence d'eau**. Parmi ces facteurs, il convient de citer :
 - La forme des particules joue un rôle important dans la valeur de l'essai Micro-Deval en présence d'eau : les valeurs mesurées sont généralement plus élevées sur des granulats concassés que sur des éléments arrondis (Ekse et Morris – 1959).
 - La taille des particules et la texture du matériau semblent influencer les résultats du test. Une autre étude a démontré l'inverse (Lang et al. - 2006).
 - La densité : la valeur du Micro-Deval en présence d'eau semble dépendre de la densité du matériau pour une même lithologie. Ainsi, un calcaire dense (ρ_r de l'ordre de 2,6 à 2,7 t/m³) se caractérise par une valeur de M_{DE} comprise entre 14 et 40 tandis qu'un calcaire de faible densité ($\rho_r < 2,3$ t/m³) peut avoir une valeur M_{DE} comprise entre 40 et 100. Il en est de même pour le grès qui montre une valeur de M_{DE} comprise entre 3 et 30 lorsque leur densité est supérieure à 2,5 t/m³ et une valeur comprise entre 20 et 100 pour une densité comprise entre 2,2 et 2,5 t/m³ (Tableau XII).
 - L'état d'altération du matériau : l'essai Micro-Deval en présence d'eau permet de différencier plusieurs états de qualité et d'altération au sein d'une même lithologie pour ce qui concerne les granulats naturels.
 - L'humidification préalable des granulats et la période d'humidification : le rôle de ce paramètre est assez complexe. Si une étude montre qu'une humidification préalable des échantillons durant plus d'une heure n'exerce aucune influence au contraire de périodes inférieures à une heure (Latham et Rogers, 1998), d'autres études faites par les mêmes auteurs démontrent que l'humidification préalable n'a aucun effet sur l'essai (Latham et al., 1998) et qu'une très bonne similitude de résultats existe entre des échantillons humidifiés préalablement et des échantillons mis en contact avec l'eau juste avant l'essai (corrélation de Woodside et Woodward – Figure 8).

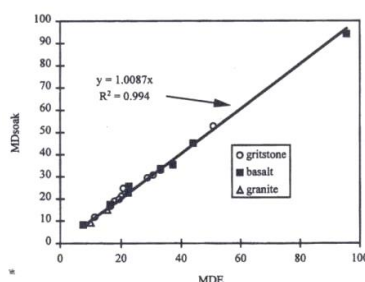


Figure 8 : Corrélation de Woodside et Woodward.

- **Cet essai offre une excellente répétabilité et reproductibilité des valeurs.**
- **L'essai Micro-Deval permet de déterminer également la production d'éléments fins par frottement des granulats au contact d'outils métalliques.**
- **Il existe une corrélation entre l'essai Micro-Deval et le "Magnesium Sulfate Soundness Test" :** de nombreuses études (Senior et Rogers, 1991 ; Richard et Scarlett, 1997 ; Wu et al, 1999 ; Jayawickrama et al., 2001) réalisées en vue de remplacer ce dernier essai compliqué ont montré la présence d'une bonne corrélation ($R \approx 0,85$) sur tout type de granulats à l'exception d'une seule étude (Cooley et James, 2003).

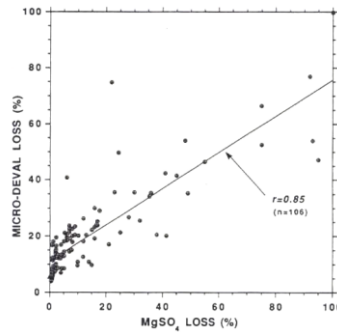


Figure 9 : Corrélation entre l'essai Micro-Deval et le "Magnesium Sulfate Soundness" selon Senior et Rogers (1991).

- **Il n'existe pas de corrélation évidente entre l'essai Micro-Deval en présence d'eau et l'essai Los Angeles.** L'essai micro-Deval en présence d'eau tend à polir les particules alors que l'essai Los Angeles tend à les fracturer, soit deux comportements différents.

Sur le continent Nord-Américain, de nombreuses études ont été réalisées afin d'obtenir des critères Micro-Deval en présence d'eau pour les granulats selon les types d'application dans le domaine routier (*revêtements en asphalte et en béton, fondation et sous-fondation*). Elles ont principalement comparé les résultats des essais Micro-Deval en présence d'eau avec les performances *in situ* des matériaux et les classifications sommaires qui en découlaient (Tableau XIII). Cependant, seulement trois provinces canadiennes (*Ontario, Nouvelle Ecosse et Québec*) et quelques états américains (7 à 10) utilisent réellement cet essai comme critère.

Tableau XIII : Classifications américaines des granulats sur base de leur performance *in situ* et de leurs applications.

Performance du granulat	Classification de Rogers et Senior (1991)	Classification de Wu et al. (1998)
Type d'application	Granulats pour béton	Granulats pour asphalte
Bon ("good")	Pas de dégradation observée durant toute la durée de la route	Pas de dégradation observée durant toute la durée de la route
Moyen ("fair")	Dégradations observées après plus de 2 ans Durée de vie de la route supérieure à 10 ans	Dégradations observées lors de la construction ou après Durée de vie de la route supérieure à 8 ans
Mauvais ("poor")	Dégradations importantes après 1 an (<i>hiver</i>) Durée de vie de la route inférieure à 10 ans	Dégradations observées lors de la construction ou après Durée de vie de la route inférieure à 8 ans

Saeed et al. (2001) ont préconisé des valeurs distinctes de Micro-Deval en présence d'eau pour évaluer la durabilité des granulats dans des couches non liées de structure selon les conditions climatiques et le trafic.

1.1.4.3 L'essai triaxial cyclique

L'essai triaxial cyclique est un essai de laboratoire permettant de simuler les sollicitations du trafic routier sur les empierrements non liés utilisés en fondations ou sous-fondations routières.

Cet essai permet de déterminer les modules résilients, utiles pour un calcul de dimensionnement de la structure routière et les déformations permanentes, à l'origine de l'orniérage. Les déformations permanentes caractérisent le comportement à long terme du matériau. Au cours de cet essai, l'éprouvette est soumise à une contrainte axiale cyclique (σ_1) et à une pression de confinement (σ_3). La contrainte déviatorique σ_d est la différence entre σ_1 et σ_3 . La pression de confinement reste soit constante (essais CCP - 'constant confining pressure'- NBN EN 13286-7, méthode B) ou varie de manière cyclique en phase avec σ_1 (essais VCP - 'variable confining pressure'- NBN EN 13286-7, méthode A), ce qui est plus représentatif de la situation réelle lors du passage d'une roue. Les essais à pression de confinement variable sont beaucoup plus complexes dans leur mise en œuvre que les essais à pression de confinement constante. Les essais VCP requièrent l'utilisation d'un fluide incompressible, en l'occurrence de l'eau désaérée. Le schéma suivant montre le principe de chargement de l'éprouvette pour l'essai VCP.

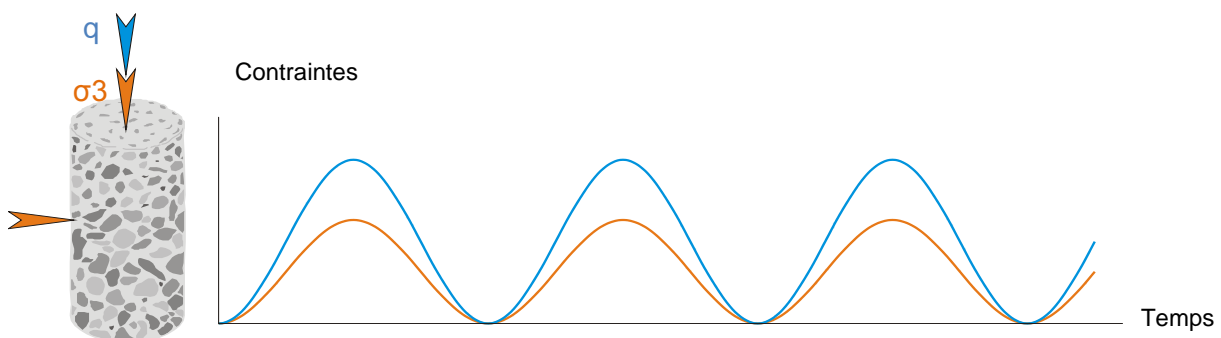


Figure 10 : Principe de l'essai VCP.

Les déformations réversibles relatives (10^{-3} - 10^{-4}) sont mesurées par des capteurs placés sur l'éprouvette : les LDTs (Local Deformation Transducers). Ceux-ci ont été développés au Japon et sont constitués de quatre jauges de déformation formant un pont de Wheatstone et collées sur une lame flexible en phosphore bronze (Goto et al., 1991; Hoque et al., 1997) avec un faible coefficient de dilatation thermique. Ce sont les capteurs utilisés jusqu'à présent au CRR.

Les déformations permanentes (10^{-2} voire plus) peuvent être mesurées par un capteur local (si elles ne sont pas trop élevées) ou par un capteur de déplacement externe type lvdt (linear variable differential transformer).

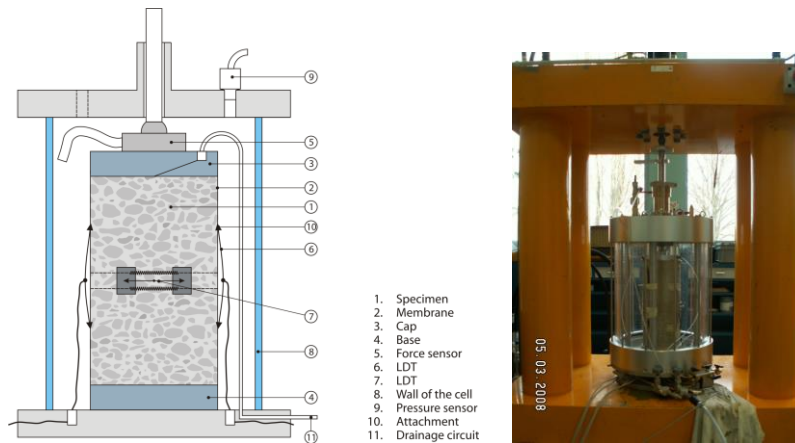


Figure 11 : Schéma de principe de l'équipement (gauche) et équipement CRR (droite).

Des travaux (Corté, 1994 ; Paute, 1994 ; Balay, 1998 ; Correia, 1999 ; Correia, 2004) illustrent l'utilisation de cet essai pour déterminer le module résilient et les déformations permanentes de matériaux granulaires naturels non liés, en analysant l'influence de paramètres tels que la teneur en eau, la densité sèche ou la méthode de compactage.

(a) Déformations réversibles

Pour chaque type d'essai (VCP ou CCP), la norme NBN EN 13286-7 propose deux niveaux de contraintes définis par : « le niveau de contraintes élevé est représentatif des contraintes généralement obtenues au sommet de la couche de base, sous une couche de roulement bitumineuse mince (moins de 80 mm). Le niveau de contraintes faibles correspond aux niveaux de contraintes obtenus sous une structure bitumineuse plus épaisse, ou dans une couche de fondation en matériau non traité (sous une première couche granulaire). »

Pour l'étude des déformations réversibles, l'éprouvette, compactée à l'énergie Proctor modifiée, est soumise à 20 000 cycles pour la phase de conditionnement (NBN EN 13286-7). Cette phase de conditionnement permet de stabiliser les déformations permanentes (Remarque : on peut déjà utiliser les mesures de cette phase de conditionnement pour évaluer les déformations permanentes sur 20 000 cycles).

Pour les essais à **pression de confinement variable**, le niveau de contraintes élevé (**HSL**) est défini selon NBN EN 13286-7 par une contrainte déviatorique cyclique et une contrainte radiale cyclique dont les maxima sont respectivement de **600 kPa** et de **110 kPa**. Le niveau de contraintes faible (**LSL**) est défini selon NBN EN 13286-7 par une contrainte déviatorique cyclique et une contrainte radiale cyclique dont les maxima sont respectivement de **300 kPa** et de **110 kPa**.

Pour les essais à **pression de confinement constante**, le niveau de contraintes élevé (**HSL**) est défini selon NBN EN 13286-7 par une contrainte déviatorique cyclique dont le maximum est de **340 kPa** et une pression de confinement constante de **70 kPa**. Le niveau de contraintes faible (**LSL**) est défini selon la NBN EN 13286-7 par une contrainte déviatorique cyclique dont le maximum est de **200 kPa** et une pression de confinement constante de **70 kPa**.

Ensuite, différents chemins de contraintes successifs sont appliqués à l'éprouvette (29 pour les essais CCP et 19 pour les essais VCP). 100 cycles par niveau de contraintes sont appliqués.

Pour l'essai CCP à niveau de contraintes élevé, les pressions de confinement varient de 20 kPa à 150 kPa. Pour chacune d'elles, l'éprouvette est sollicitée à des valeurs croissantes de contraintes déviatoriques (valeur max. 475 kPa).

Pour l'essai VCP, les pressions de confinement ont des maxima allant de 15 kPa à 277 kPa. Les contraintes déviatoriques ont des maxima allant jusque 600 kPa. Les rapports contrainte déviatorique/contrainte moyenne varient entre 0 et 2,5. Remarque : les modélisations réalisées au CRR ont montré des rapports entre 1,5 et 2 pour une structure de route belge (cfr. Conventions CC CCN/PN/NBN-807 et NBN-857).

L'étude des déformations réversibles permet de calculer un module résilient pour chaque état de contraintes. Il est défini par (essai CCP):

$$E_r = \Delta q / \Delta \varepsilon_1^r$$

où ε_1^r est la déformation axiale réversible et q est la contrainte déviatorique ($\sigma_1 - \sigma_3$).

Pour l'essai VCP, la formule est :

$$E_r = \frac{\sigma_1^{r^2} + \sigma_1^r \cdot \sigma_3^r - 2\sigma_3^{r^2}}{\sigma_1^r \varepsilon_1 + \sigma_3^r \varepsilon_1 - 2\sigma_3^r \varepsilon_3} \quad \text{avec} \quad \begin{cases} \sigma_1^r = \sigma_{1\max} - \sigma_{1\min} \\ \sigma_3^r = \sigma_{3\max} - \sigma_{3\min} \end{cases}$$

La Figure 12 montre les modules résilients obtenus avec des essais VCP sur différents matériaux (calcaire 0/20, granulat de débris de béton 0/32 et 2 granulats de débris mixtes 0/32). (cfr. Conventions CC CCN/PN/NBN-807 et NBN-857). En général, les modules sont représentés en fonction de la contrainte verticale. Dans la gamme de contraintes étudiées, les modules augmentent avec le niveau de contraintes.

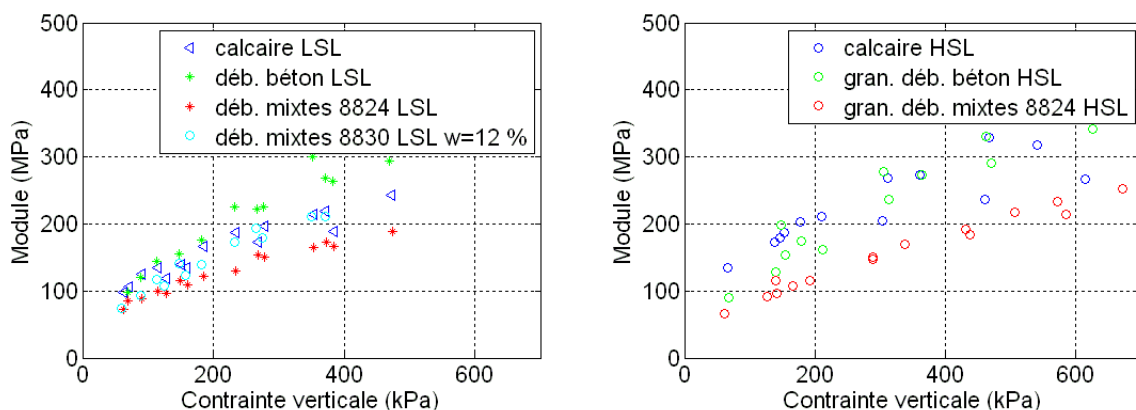


Figure 12 : Modules relatifs aux différents matériaux testés (OPM et WOPM).

Les essais réalisés ont montré une plus grande sensibilité à l'eau des matériaux recyclés.

(b) Déformations permanentes

Pour les mesures des déformations permanentes, la norme en vigueur (NBN EN 13286-7) donne des niveaux de contraintes indicatifs dans l'annexe C informative pour les essais à pression de confinement constante. Aucune indication n'est mentionnée pour les essais à pression de confinement variable.

Dans le cadre des conventions CC CCN/PN/NBN-807 et NBN-857, différentes procédures ont été testées.

- Procédure 1 : application de 100 000 cycles à un niveau de contraintes.
- Procédure 2 : application de 2 500 cycles à un niveau de contraintes (relativement élevé : $\sigma_3 = 10$ à 110 kPa et σ_d max 300 kPa) suivis de 100 000 cycles à un autre niveau de contraintes (plus faible : $\sigma_3 = 10$ à 35 kPa et σ_d max 75 kPa)
- Procédure 3 : combinaison de l'étude des déformations réversibles avec l'étude des déformations permanente (objectif: réduire le nombre d'éprouvettes)

La Figure 13 montre les résultats obtenus sur un granulat de débris mixtes. 100 000 cycles ont été appliqués avec le même niveau de contrainte.

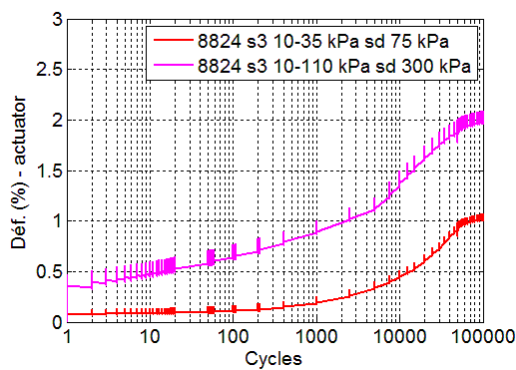


Figure 13 : Déformations permanentes d'un granulat de débris mixtes - Procédure 1.

Les résultats de la procédure 2 appliquée à un calcaire et deux granulats de débris mixtes sont représentés à la Figure 14.

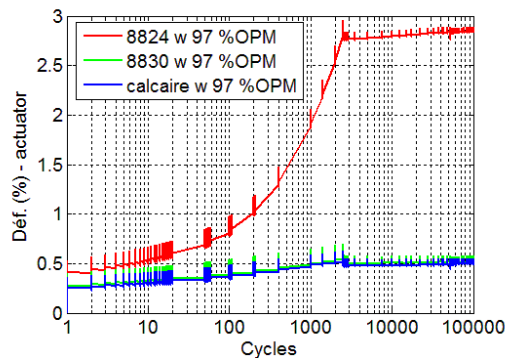


Figure 14 : Déformations permanentes de granulats de débris mixtes et d'un calcaire - Procédure 2.

Cette procédure a été appliquée dans le cadre du projet, après adaptation des valeurs des contraintes déviatorique et radiale.

La teneur en eau du matériau a une grande influence sur les déformations permanentes et l'effet semble plus marqué pour les granulats de débris mixtes.

(c) Variante de l'essai triaxial cyclique : 'Confined compression test'

L'université de Nottingham et le Cooper Research Technology ont développé un équipement pour déterminer les modules de matériaux granulaires non liés (ou faiblement liés). Le principe est décrit par Brown (2013) et Thom (2012).

Le matériau granulaire est sollicité par une contrainte verticale cyclique via un disque de chargement. Les éprouvettes ont un diamètre de 150 cm et une hauteur de 150 cm. Les parois du moule sont en caoutchouc avec bandes d'acier, simulant une contrainte horizontale représentative d'une contrainte horizontale en couches de fondation ou sous-fondation (simulation de la contrainte horizontale résiduelle). Une correction doit être appliquée sur les contraintes pour tenir compte de la friction avec le moule. Les déformations sont mesurées par des lvd't's externes. Selon les auteurs, le test est rapide et les contraintes horizontales représentatives des conditions *in situ*.

Pour réaliser l'essai et mesurer les modules, quatre niveaux de contraintes successifs sont appliqués, 1 000 cycles par niveau de contraintes. La valeur maximale de la contrainte verticale cyclique varie de +/- 30 kPa à +/- 250 kPa. Des pressions de confinement allant de 10 à 50 kPa sont simulées. L'équipement pourrait aussi être utilisé pour les déformations permanentes.

Si on compare le dispositif et les procédures de l'essai Puma à ceux de l'essai triaxial cyclique, on constate que le fait de mesurer les déformations réversibles par des capteurs externes dans l'essai PUMA est moins précis qu'une mesure sur l'éprouvette. En ce qui concerne les contraintes appliquées, les contraintes de l'essai triaxial cyclique peuvent être adaptées pour mieux correspondre aux contraintes *in situ*. De plus, en appliquant les mêmes procédures que celles de la norme EN 13286-7, l'essai Puma n'est pas plus rapide.



Figure 15 : The Precision Unbound Material Analyzer (PUMA).

1.1.5 Principaux essais de durabilité des granulats liés aux sollicitations climatiques

La transformation de l'eau en glace à la pression atmosphérique s'accompagne d'une expansion de volume de 9 % et d'une expansion linéaire de 3 %; ce qui peut être considérable. Si ce phénomène se produit dans un volume non déformable, les contraintes, principalement hydrostatiques, exercées sur les parois peuvent atteindre 220 MPa à -22°C. Ces contraintes sont trop importantes pour être absorbées par la très faible résistance en traction de la majorité des squelettes minéraux.

Cependant, dans le cas des roches, ces contraintes n'existent quasiment pas pour diverses raisons :

- **La transformation de l'eau en glace est progressive** (mélange d'eau s'enrichissant en glace) et permet ainsi une distribution progressive des contraintes.
- **La température du mélange reste bloquée à 0°C** durant toute la durée de la transformation, ce qui facilite l'extrusion de la glace et l'expulsion de l'eau.
- **La température de gel dépend principalement de l'ouverture des discontinuités.** Plus cette ouverture est fine, plus la température de gel est basse. Ainsi, pour des ouvertures de l'ordre de 0,007 µm, la température est de l'ordre de -35°C ; le risque de gel est donc faible dans nos contrées. La roche est dite non gélive. Pour des ouvertures de 0,1 µm, la température est de - 6°C et pour des discontinuités d'ouverture supérieure à 3 µm, la température équivaut à 0°C.
- **Il reste toujours une certaine quantité d'air, étant donné que les pores n'ont pas tous la même dimension d'ouverture** qui est capable d'absorber partiellement l'expansion de la glace. Le processus de dégradation de la roche due au gel n'est maximum qu'à saturation complète de l'échantillon; ce qui est rarement le cas.
- **Des surfusions peuvent entraîner des retards de gel.**
- **Le squelette solide des roches est déformable.**

Le gel peut dégrader une structure routière selon 3 processus distincts qui peuvent néanmoins se superposer :

- La **gélifraction** est un processus de fragmentation des éléments par gonflement de volume et/ou augmentation de pression sur ces éléments suite à la transformation de l'eau présente dans les espaces interstitiels en glace. Ces phénomènes génèrent des éléments fins et modifient la structure du matériau. Celui-ci perd alors toute consistance. Ce processus concerne principalement les matériaux granulaires, en particulier les matériaux poreux et les sols traités.

Ce processus concerne donc uniquement les caractéristiques des granulats. Son impact est principalement déterminé par les essais de résistance ou de sensibilité au gel-dégel.

- La **cryosuction** est un processus lié à la succion de l'eau située à une certaine profondeur dans le sol (de quelques centimètres à une dizaine de mètres selon la nature des terrains meubles) et à sa transformation en lentilles de glace à faible profondeur sous le front de gel. Ce processus se traduit principalement par un gonflement relativement important (jusque 30 cm dans certains cas) de la structure routière avec apparition de fissures longitudinales dans le revêtement en

période de gel et une diminution partielle de la portance avec apparition d'ornières et de fissures de fatigue en période de dégel.

Ce processus concerne principalement les matériaux fins cohérents sensibles à l'eau constituant le fond de coffre. Il affecte peu les granulats propres. Son impact est principalement déterminé par l'essai de susceptibilité aux cycles gel–dégel.

- **L'effet "bras de levier" en bordure de voirie** se développe principalement en bordure latérale de voirie ou au niveau de joints faibles et concerne principalement les couches de la structure routière. Pour que ce phénomène se produise, deux conditions doivent être réunies : la présence d'une zone verticale d'infiltration d'eau (*fissures, joints de bordure non étanches*) et la présence d'une interface non imperméable horizontale en contact avec cette zone d'infiltration. En effet, l'eau s'infiltré dans la structure et se retrouve bloquée au niveau du sommet de la couche imperméable. Le phénomène s'accélère si l'interface horizontale à cette profondeur est de mauvaise qualité (*mauvaise cohésion*). L'eau a tendance à s'y accumuler.
- **En période de gel**, l'eau piégée se solidifie en lentille de glace avec comme conséquences directes, l'apparition d'un soulèvement (*de quelques centimètres*) des couches sus-jacentes et la progression de l'ouverture de l'interface vers le centre de la voirie. L'ensemble reste néanmoins dur.
- **Lors du dégel**, un front de dégel se développe à partir de la surface et progresse depuis l'extrémité latérale vers le centre de la route. Le soulèvement de la voirie ne diminue pas suite à la présence d'une certaine rigidité dans le revêtement mais également au rôle de bras de levier que joue la lentille résiduelle de glace qui constitue un élément dur. L'extrémité latérale du revêtement est donc dans le vide. Lors du passage d'engins lourds, le revêtement se rompt à ces endroits et des fissures en forme de lune apparaissent en surface et se chevauchent. Dans certains cas, des morceaux de revêtement peuvent se détacher et partir.

Ce processus affecte particulièrement les structures routières et non les matériaux tels quels.

Ainsi, en ce qui concerne les granulats, c'est principalement le processus de gélifraction qui intervient dans leur durabilité.

Les normes actuelles concernant une application des granulats en domaine routier (*notamment la NBN EN 13242*) prévoient de réaliser au maximum deux étapes afin de déterminer si le matériau est sensible ou pas aux cycles gel–dégel :

- L'étape 1 consiste à réaliser un essai de sélection de la sensibilité du matériau à l'action du gel–dégel. Cet essai correspond généralement à la mesure du coefficient d'absorption d'eau (W_A). Selon la valeur obtenue ($W_A > 2\%$), la deuxième étape doit être réalisée ou pas.
- L'étape 2 consiste à réaliser l'essai de sensibilité ou de résistance aux cycles gel–dégel. Cet essai consiste à déterminer la dégradation du matériau soumis à un certain nombre de cycles de gel–dégel.

Il convient de noter qu'il existe une grande multitude d'essais de sensibilité aux cycles gel–dégel; chaque pays ayant en général développé sa propre méthode.

1.1.5.1 La détermination du coefficient d'absorption d'eau (WA_{24})

L'essai de mesure du coefficient d'absorption d'eau ($WA_{24x} = \Delta_{\text{masse}} / M_{\text{sèche}}$) permet de déterminer la quantité d'eau qui peut être absorbée par les grains au sein des microfissures et microcavités après immersion d'un échantillon dans l'eau (EN 1097-6). La valeur dépend principalement de la porosité des éléments (*nature des éléments*) et de la classe granulométrique. En effet, la valeur augmente pour une diminution de la taille. Cela s'explique par le fait qu'au concassage, les fissures se produisent surtout dans la matrice.

Cet essai fournit une idée de la résistance au gel-dégel des granulats ; c'est pourquoi il est utilisé comme essai de sélection avant l'essai de résistance au gel-dégel (EN 13242) : si la valeur du coefficient d'absorption d'eau WA_{24} est inférieure ou égale à 2%, le granulat peut être considéré comme résistant au gel-dégel.

Les granulats recyclés présentent généralement des valeurs plus élevées que les granulats naturels qui peuvent presque toujours être considérés comme non sensibles aux cycles gel-dégel ($WA_{24} < 2\%$).

1.1.5.2 L'essai de sensibilité aux cycles gel-dégel (F – norme EN 1367-1)

L'essai consiste à réaliser à pression atmosphérique, 10 cycles de gel-dégel sur 3 échantillons pesés de granulats lavés et saturés à l'eau. Chaque cycle comprend une phase de refroidissement à $-17,5^\circ\text{C}$ sous eau et une phase de réchauffement dans un bain d'eau à $+20^\circ\text{C}$.

Plusieurs classes granulométriques peuvent être testées : 4-8, 8-16, 16-32 et 32-63.

Après réalisation des cycles, les 3 échantillons font l'objet d'une inspection visuelle afin de déterminer l'apparition ou pas de changement de fissures, d'une mesure de la perte de masse ainsi que d'éventuelles modifications de résistance.

En ce qui concerne la détermination de la perte de masse, les échantillons font l'objet d'un tamisage au tamis de $d/2$, (*soit 2, 4, 8 ou 16 cm*). Le refus est par la suite mesuré et la valeur (M_2) est introduite dans la formule suivante.

$$F (\%) = \frac{M_1 - M_2}{M_1} \times 100 \quad M_1 : \text{Masse sèche de l'échantillon initial}$$

Les principales valeurs-critères de F adoptées dans les différentes normes européennes et autres documents techniques équivalent à 1, 2 et 4.

L'annexe B (*informative*) de la norme prévoit également la détermination de la perte de résistance liée à la réalisation des cycles gel-dégel. Dans ce cas, l'échantillon initial est séparé en 2 parties distinctes : une partie est soumise aux essais de résistance qui sont soit l'essai Los Angeles (LA), soit la valeur d'impact anglais (SZ). L'autre partie est soumise aux 10 cycles gel-dégel avant de pouvoir réaliser un des deux essais de résistance ci-dessus. La différence entre les deux valeurs (*initiale et finale*) fournit un coefficient ΔS_{LA} ou ΔS_{SZ} .

En ce qui concerne les valeurs critères de ΔS_{LA} , elles ne sont plus utilisées en Belgique. Des valeurs de référence existent dans d'anciennes prescriptions techniques ($\Delta S_{LA} < 30\%$).

1.1.5.3 L'essai de résistance au sulfate de sodium ou de magnésium (AASHTO T 104-99)

L'essai de résistance au sulfate de sodium ou de magnésium (*Sodium or Magnesium sulfate soundness test*) est un vieil essai anglo-saxon qui permet de stimuler la sensibilité des matériaux aux cycles gel-dégel, à partir du gonflement de cristaux de sel. Toutefois, sa méthodologie implique également la réalisation de cycles de séchage – humidification et des cycles chaud – froid.

De plus, ce test nécessite un contrôle parfait de tous les paramètres afin de maintenir la variabilité des résultats à un niveau acceptable.

Il a par ailleurs été établi que les effets destructifs de cet essai sont reliés aux efforts thermiques (*gradients internes et variation volumique*), aux mouvements de la couche de fluide absorbé et aux cycles de mouillage-séchage alternatifs combinés à l'expansion cristalline du sel lors de son hydratation.

Comme dans le processus de cryoclastie des granulats, la durabilité au sulfate est directement reliée à la microstructure et à la minéralogie des granulats. Cependant, l'inexistence d'une relation entre l'essai au sulfate et la performance réelle des granulats exposés à des conditions naturelles, de même que le peu de précision de cet essai normalisé, démontrent à tout utilisateur que cet essai ne doit être employé que comme un indice global de comportement qui, combiné avec une analyse pétrographique détaillée, peut permettre, grâce à son étroite relation avec les propriétés d'attrition et d'absorption, de déceler les faiblesses potentielles des granulats. En aucun cas, il ne doit servir de critère exclusif de sélection.

1.2 Etude de centres de traitement agréés

1.2.1 Visite de centres de traitement

Dans le cadre du projet Aperrou, plusieurs centres de recyclage ont été visités. Ces visites nous ont permis de nous rendre compte de la variabilité des dispositifs de traitement présents actuellement sur le marché. En effet, les centres de traitement pour les recyclés mixtes peuvent varier de l'unité mobile "rudimentaire", comportant uniquement un à deux cribleurs et un concasseur, à une installation "complète" disposant des technologies dernier cri.

Pour des raisons de confidentialité, nous ne détaillerons pas ici le traitement d'une centrale en particulier. Néanmoins, nous pouvons décrire différentes étapes de traitement susceptibles d'influencer les propriétés du matériau final.

- **La provenance des déchets** : les déchets proviennent principalement de parcs à containers et d'entrepreneurs de construction/démolition. L'un des centres visités reçoit en outre les déchets d'une carrière de calcaire, qui constituent un matériau de bonne qualité susceptible d'améliorer les propriétés du recyclé.
- **La réception des déchets sur le site** : les déchets arrivant sur les sites durant les heures ouvrables passent en général sur un pont-balance où un examen visuel du contenu de la benne est réalisé par la personne en charge de l'administratif. Les bennes comportant un certain pourcentage d'éléments indésirables (panneaux gyproc, béton expansé,...) sont refusées. Après pesage, le camion est généralement orienté vers le tas de dépôt adéquat : filière béton, filière mixte ou d'autres logettes spécifiques à certains matériaux (*bois, plastique, plâtre, amiante, divers*).

Sur certains sites, les déchets arrivant en dehors des heures ouvrables sont déversés sur un tas proche de l'entrée, sans contrôle.

- **Pré-traitement des recyclés de béton** : les déchets contenant une forte proportion de béton sont stockés sur un tas particulier. Certains déchets grossiers (éléments métriques, poteaux d'éclairage, etc.) doivent au préalable subir une opération de prébroyage afin de mettre de côté les armatures métalliques.
- **Pré-criblage des recyclés mixtes** : dans certains cas, le matériau mixte subit une première séparation granulométrique avant d'être soumis à un concassage
 - La fraction grossière (par exemple supérieure à 250 mm) est écartée car elle affecte le bon fonctionnement de l'installation de traitement à proprement parler. De plus, étant donné que les éléments grossiers sont principalement constitués d'éléments en béton, ces éléments peuvent être envoyés vers le tas de déchets de béton.
 - La fraction fine (inférieure à 10-15 mm) peut être écartée avant traitement. Ces fines de pré-criblage contiennent en effet beaucoup de matériaux terreux et donc de matières organiques et argileuses. Après stabilisation à la chaux ou au ciment, ce matériau peut être utilisé pour les remblais.
- **Concassage** : en fonction de l'installation, le matériau va subir une ou plusieurs opérations de concassage. Deux types de concasseurs sont fréquemment utilisés :
 - Le concasseur à percussion, qui permet d'obtenir un meilleur indice de forme que le concasseur à mâchoires et qui présente un bon rendement.
 - Le concasseur à mâchoires, qui présente l'avantage de produire moins d'éléments fins que le concasseur à percussion. Dans le cas de centres de traitement utilisant plusieurs types de concasseurs, le concasseur à mâchoire est utilisé uniquement comme concasseur primaire.
- **Criblage** : en fonction de l'installation, le matériau subit un ou plusieurs criblages au cours du traitement. Certaines installations criblent le matériau à son diamètre maximal uniquement (par exemple pour produire un 0/32), alors que d'autres produisent une gamme de différentes fractions, qu'elles recombinent ensuite pour obtenir le fuseau désiré.
- **Extraction des métaux** : les métaux ferreux sont extraits dans tous les centres visités, grâce à un, deux ou trois overbands magnétiques qui permettent l'élimination des métaux ferreux.

Les métaux non ferreux peuvent quant à eux être extraits via un séparateur à courant de Foucault. Un tel appareil étant très onéreux, relativement peu d'installations en sont équipées. Une partie des métaux non ferreux peut néanmoins être extraite et isolée manuellement lorsqu'un dispositif de tri manuel fait partie de l'installation.

- **Soufflerie / Bassin de flottation** : Dans les centres plus complets, certaines fractions peuvent être traitées via une soufflerie (pour éliminer les plastiques et autres éléments légers) et/ou un bassin de flottation, pour éliminer par exemple le béton cellulaire.
- **Tri manuel** : Dans la plupart des centres, un tri manuel est prévu sur les éléments moyens (60/250) afin d'éliminer les éléments impurs grossiers. Les métaux ferreux et non ferreux sont ainsi retirés, ainsi que les autres impuretés (plastiques, bois, cartons,...), dont le pourcentage total dans le matériau final ne peut dépasser 1% (fraction X).

1.2.2 Caractéristiques des centres d'origine des échantillons recyclés testés

Un formulaire a été transmis aux six centres nous ayant fourni des échantillons, afin de pouvoir corréler les propriétés des matériaux aux traitements qui lui ont été appliqués. Les questions posées sont détaillées à l'Annexe I du présent rapport, tandis que les réponses reçues sont synthétisées dans le Tableau XIV.

Tableau XIV : Questionnaire relatif aux centres de traitement pour les recyclés mixtes.

Centre	I	II	III	IV	V	VI
Tonnage annuel	120 000	80 000	100 000	60 000	300 000-400 000	26 000
% de recyclés mixtes	60%	65%	60%	83%	50%	100%
Type d'installation	Fixe	Fixe	Fixe	Mobile	Mobile (pour 0/32) Fixe	Fixe
Personnel	6	5	7	9 mais avec d'autres activités + sous-traitants	5	Sous-traitant
Origine des déchets	Tout venant, Entrepreneurs de démolition, chantiers de voirie et de bâtiment	Tout venant, Entrepreneurs de démolition, chantiers de voirie et de bâtiment	Tout venant, Entrepreneurs de démolition, chantiers de voirie et de bâtiment	Entrepreneurs de démolition et de voirie	Entrepreneurs de démolition; 90% de leurs propres chantiers	Tout venant Entrepreneurs de démolition
Tri sélectif?	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui	Non
Tamis de pré-scalpage	15 mm	8 mm	8 mm	-	non pour 0/32 10 mm pour le reste	oui, 0/40
Type de concasseur?	Percussion	Percussion	Percussion	Mâchoires	Percussion pour 0/32 Mâchoires puis percussion pour le reste	Percussion
Tri manuel fraction X	Oui	Oui	Oui	Non	Oui	Oui
Récupération ferreux	Avant et après concassage	Après concassage et après criblage	3 overbands, avant et après concassage	A la sortie du concasseur	En plusieurs points du processus (autres que 0/32)	Oui, au niveau du concassage
Récupération non-ferreux	Non	Non	Non	Non	Oui (autres que 0/32)	Non
Soufflerie?	Oui	Oui	Non	Non	Oui	Non
Criblage des éléments fins?	Non	Non	Non	Non	6.3 mm (autres que 0/32)	Non
Fractions produites	0/15 - 0/31,5 - 31,5/63 - 0/63	0/8 - 0/31,5 - 31,5/63 - 0/63	0/8 - 0/20 - 0/31,5 - 0/63 - 20/31,5 - 31,5/63	0/20 - 20/40 - 0/30 - 0/80 - 40/120 - béton 0/30	0/32 par concassage mobile 0/6.3, 4/20, 20/40, 20/56 ==> 0/20, 0/40, 0/56	0/31.5 - 31.5/63 - 0/63 - 0/80 - 0/120
Difficiles à écouler?	0/15	0/8	0/8 de precriblage et 0/31,5 Mixtes	0/20	Sable pré-scalpage (plutôt matériau lié), sable concassage	0/31.5
Applications principales	Routes, bâtiment	Routes, bâtiment	Routes, bâtiments, Via la centrale de stabilisation (0/8 précriblage, 0/31,5 béton et enrobés hydrocarbonés)	Routes + Bâtiment	Routes, bâtiment, aéroport, centrale à béton, pistes de chantier	Sous-fondation bâtiment, Accès forestier - aire de circulation / manoeuvre

Quelques particularités des différents centres peuvent être mises en évidence :

- Les échantillons issus du centre IV sont les seuls à avoir été traités par un concasseur à mâchoires. Le centre V en utilise néanmoins un, en combinaison avec un concasseur à percussion, pour la plupart des produits traités.

- Les centres IV et V sont les seuls centres à ne pas être approvisionnés en tout-venant.
- La plupart des centrales fixes sont équipées d'un crible de pré-scalpage, avec un tamis variant de 8 à 15 mm.
- Les échantillons des centres I, II et V sont passés sur une soufflerie.
- Aucun échantillon n'a bénéficié d'un criblage d'éléments fins de concassage (les échantillons du centre V n'ayant pas été traités dans leur installation fixe).
- Les fractions fines, et en particulier celles de précriblage, sont les plus difficiles à valoriser commercialement.
- Tous les centres à l'exception du IV (qui ne reçoit pas de tout-venant) procèdent à un tri manuel de la fraction X.

1.3 Prélèvement des échantillons

1.3.1 Prélèvement des matériaux bruts

Les partenaires n'ont pas pu choisir les différents sites de prélèvement comme cela était prévu initialement dans le projet, suite à une certaine réticence de la part de FEREDCO.

Cependant, il s'est avéré que FEREDCO était intéressée de connaître les variations de composition des déchets bruts entrants dans les centres de recyclage selon les différentes régions "géologiques" de Wallonie. Elle soupçonne notamment que les centres de recyclage présents en Brabant wallon, dont le sous-sol est principalement composé de sables bruxelliens, reçoivent des déchets bruts contenant plus de fractions sableuses que le reste de la Wallonie.

C'est la raison pour laquelle FEREDCO a accumulé, sur son site de Fleurus, quatre tas de déchets bruts provenant de différents centres de recyclage. Les origines exactes de ces déchets ne nous ont pas été communiquées par souci de discrétion.

Le prélèvement des quatre échantillons de déchets bruts sur le site de Fleurus a eu lieu le 10 décembre 2013. Les déchets bruts étaient accumulés sous forme de tas d'une dizaine de mètres cubes (Photo 1).



Photo 1 : Vue des quatre tas de déchets bruts et de l'unité mobile de prétraitement.

L'indexation des différents lots ainsi que leur description visuelle sont reprises dans le Tableau XV.

Tableau XV – Indexation des échantillons de déchets bruts.

Référence FEREDCO	Référence CTP	Description
Lot 1	M 5284 A	Couleur générale brun-beige, teneur relativement importante en éléments fins
Lot 2	M 5284 B	Couleur générale brun foncé, présence de nombreux éléments grossiers comme des blocs de briques et de béton
Lot 3	M 5284 C	Couleur générale brune, présence de nombreux blocs grossiers de béton
Lot 4	M 5284 D	Couleur générale beige-gris, présence de nombreux éléments souvent grossiers de béton et de briques

Une opération de prétraitement a été nécessaire avant de procéder au prélèvement des échantillons. Cette opération a consisté à éliminer la fraction supérieure à 100 mm au moyen d'un crible à peigne monté sur une unité mobile de traitement (voir Photo 2). Cette opération de précriblage est également réalisée dans les centres de traitement classiques.

Les échantillons ont été prélevés à différents moments lors de l'opération de criblage dans des bigbags placés directement à la sortie de la bande convoyeuse (voir Photo 2).



Photo 2 : Mode de prélèvement des déchets bruts par bigbag.

Trois bigbags ont ainsi été prélevés pour chaque lot. Les bigbags ont par la suite été numérotés et stockés dans un hall couvert avant leur transport vers le CTP, où ils ont été réceptionnés le 8 janvier 2014.

1.3.2 Prélèvement des matériaux recyclés

Des échantillons de matériaux recyclés traités ont été majoritairement prélevés via un dispositif permettant de mettre le bigbag à la sortie de la bande convoyeur. Cette opération a été réalisée

directement par le personnel des différents centres de traitement concernés. Un échantillon (Centre VI) a été prélevé dans le tas par l'équipe du CRR.

Au total, neuf échantillons issus de six centres différents (cinq en Wallonie et un en Flandre) ont été prélevés:

- Six échantillons de recyclés mixtes, dont cinq de granulométrie 0/32 et un de granulométrie 0/40.
- L'un de ces échantillons de recyclés mixtes a été prélevé en double, à plusieurs mois d'intervalle.
- Dans deux centres, un recyclé de béton a été récolté en plus du recyclé mixte, afin d'observer la différence de comportement entre ces différents matériaux.

Certains de ces échantillons ont été envoyés à l'ULg et au CTP pour la caractérisation des fractions 0/4 et des fractions grossières. La liste de ces échantillons et leur référencement est présentée dans le Tableau XVI.

Tableau XVI : Indexation des échantillons traités réceptionnés.

Référence CRR	Référence CTP	Remarque
CRR 10748	M 5837 A	Echantillon Centre I 16/01/14
CRR 10844	M 5837 B	Echantillon Centre I 12/03/14
CRR 11267	M 5837 C	Echantillon Centre II 20/08/14
CRR 11334	M 5837 D	Echantillon Centre III 10/09/14
CRR 11850	M 6495 B	Echantillon Centre IV
CRR 11851	M 6495 A	Echantillon Centre IV béton
CRR 11852	/	Echantillon Centre V
CRR 11853	/	Echantillon Centre V béton
CRR 12045	M 6368 G	Echantillon Centre VI

1.4 Caractérisation en laboratoire des échantillons de déchets bruts

1.4.1 Séparation granulométrique des échantillons

Afin de faciliter le tri manuel sur les différents échantillons bruts, une séparation granulométrique a d'abord été opérée sur chacun d'eux. L'échantillon a été alimenté sur une bande transporteuse munie d'une poulie magnétique à son extrémité qui sépare les éléments métalliques ferreux du flux de matière (Photo 3). Ensuite, un double passage a été réalisé sur un crible vibrant double étage (Photo 4) afin d'obtenir quatre fractions granulométriques dans le but de procéder à la caractérisation visuelle :

- la fraction (+40 mm) ;
- la fraction (-40 +16 mm) ;
- la fraction (-16 +4 mm) ;
- la fraction (-4 mm) appelé fraction 0/4.

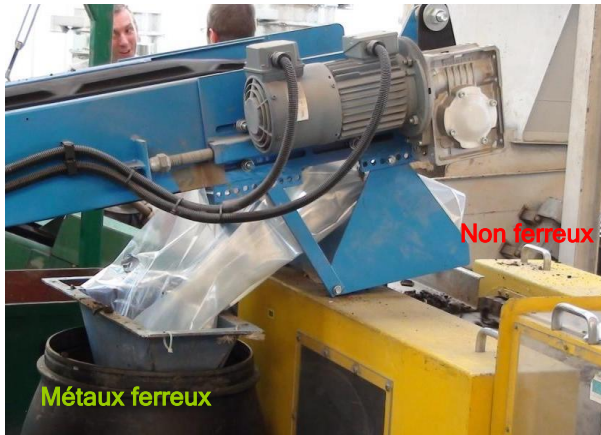


Photo 3 : Poulie magnétique.



Photo 4 : Crible double étage.

Pour chaque échantillon, chacune des fractions a été pesée. Les résultats sont repris dans le Tableau XVII et représentés graphiquement à la Figure 16. Les répartitions massiques ont été calculées sans considérer la fraction métallique. Le pourcentage de perte a été considéré comme négligeable.

Tableau XVII : Masses et répartitions massiques des fractions granulométriques.

Fractions	M 5284 A		M 5284 B		M 5284 C		M 5284 D	
	Masse (kg)	Répartition massique (%)	Masse (kg)	Répartition massique (%)	Masse (kg)	Répartition massique (%)	Masse (kg)	Répartition massique (%)
Ferreux	2,1	-	2,2	-	2,4	-	0,8	-
(+40 mm)	430	44,9	624	49,4	377	28,1	510	48,2
(-40 +16 mm)	174	18,2	270	21,4	320	23,9	171	16,1
(-16 +4 mm)	71	7,4	92	7,3	194	14,5	75	7,1
(-4 mm)	282	29,5	277	21,9	450	33,5	303	28,6

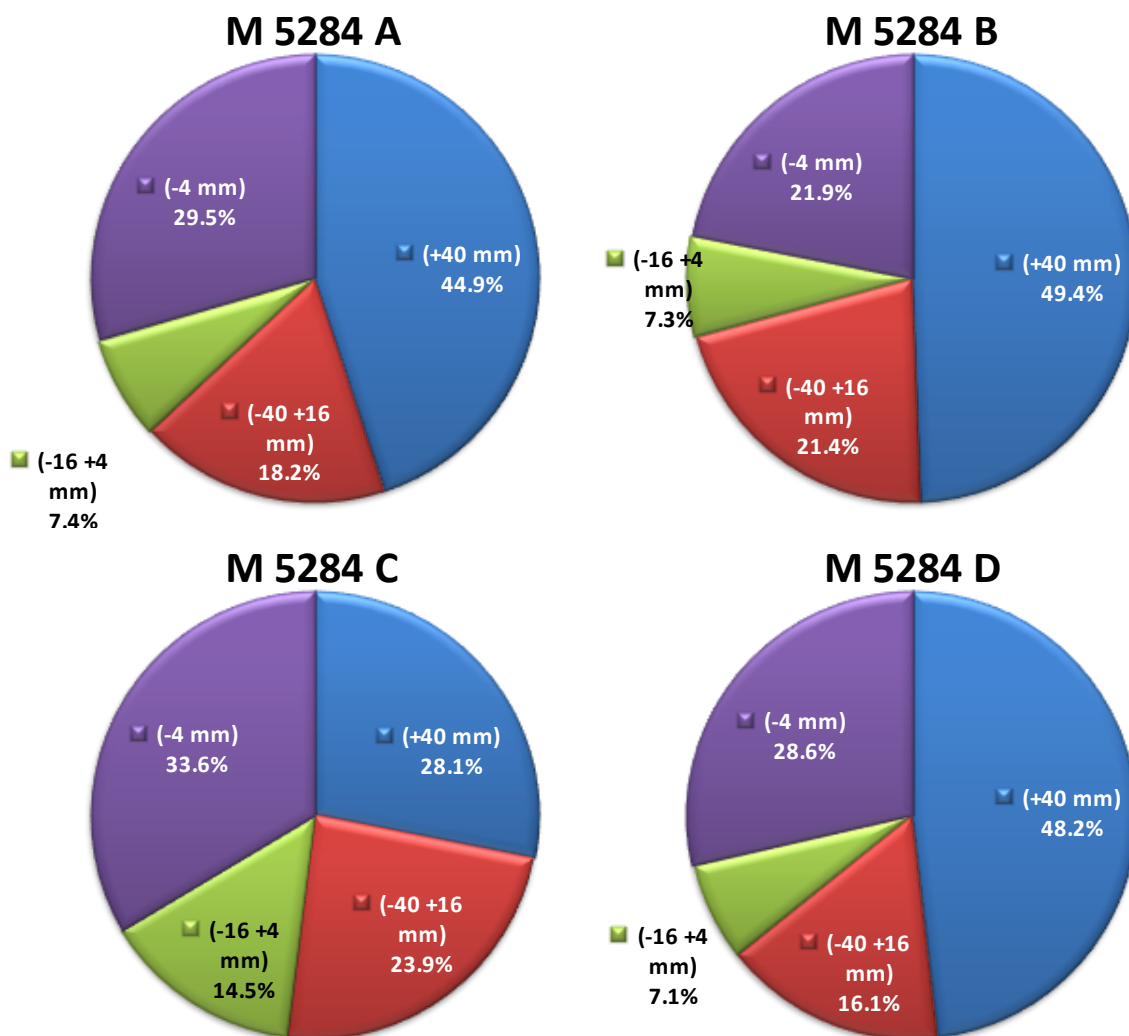


Figure 16 : Distribution granulométrique des échantillons de déchets bruts.

A l'examen de ces analyses granulométriques, les échantillons M 5284 A, B et D présentent une granulométrie similaire, tandis que l'échantillon M 5284 C se distingue par une proportion beaucoup moins importante de (+40 mm), dont la compensation se répercute dans les fractions inférieures et essentiellement dans la fraction (-16 +4 mm).

A la suite de cette coupure granulométrique, les fractions (-16 +4 mm), (-40 +16 mm) et (+40 mm) ont subi un tri manuel au CTP, tandis qu'un échantillon représentatif de la fraction 0/4 a été fourni à l'ULg-GeMMe pour caractérisation.

1.4.2 Analyse de la fraction 0/4 des déchets bruts

Les quatre échantillons, issus des matériaux M5284A à D et sont référencés M5284Af à Df. Il s'agit de la fraction inférieure à 4 mm, provenant de la séparation granulométrique réalisée par le CTP.

Les caractéristiques physiques observées sont la densité, la teneur en eau, la demande en eau ainsi que la granulométrie. Afin d'avoir une idée de la « composition minéralogique » de ces poudres, la diffraction des rayons X (DRX) a été utilisée. Enfin, la recherche d'hydrocarbures, la fluorescence X (XRF) et l'analyse chimique (par voie humide et sèche) clôturent la caractérisation chimique de ces fines de déchets bruts.

1.4.2.1 Aspect visuel des matériaux

Macroscopiquement, les échantillons M5284Bf à Df sont de couleur brun foncé, alors que M5284Af est brun clair (Figure 17). Il est important de souligner que, au vu de la présence d'eau condensée sur les parois du sachet, toutes ces poudres semblent avoir un pouvoir d'absorption important.

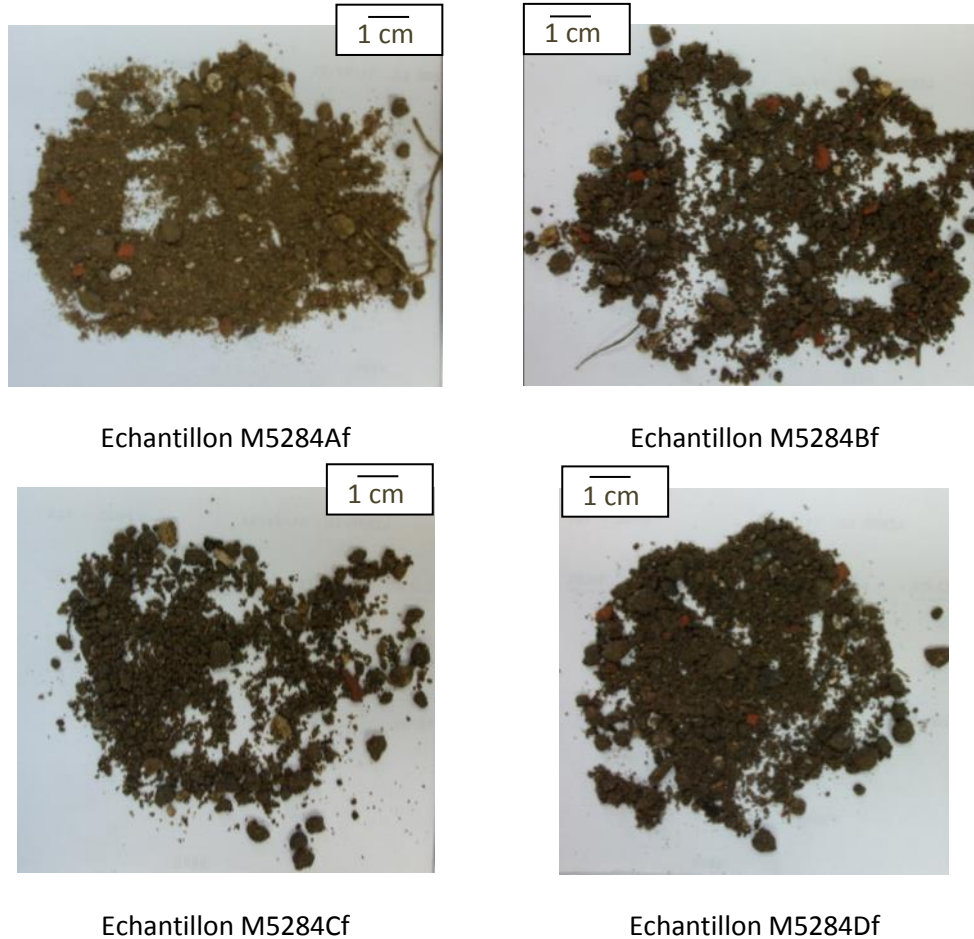


Figure 17 - Photos macroscopiques des fractions 0/4 de déchets bruts (M5284Af à Df).

1.4.2.2 Caractérisation physique

Teneur en eau et densité

Ces quatre échantillons (M5284Af à Df) semblent avoir une teneur en eau relativement importante. De plus, nous avons remarqué une condensation assez rapide d'eau sur les parois intérieures des sachets de conservation des poudres, même après séchage de ces dernières.

Afin de calculer les teneurs en eau, l'échantillon, dont on connaît la masse initiale, est placé dans une étuve à 105°C pour y être séché. Ce séchage se poursuit jusqu'à l'obtention d'une masse constante. Les échantillons de départ proviennent des sachets qui ont séjourné au moins 1 mois dans le laboratoire, dont la température et l'hygrométrie sont constantes (22°C, 65%), afin de se rapprocher autant que possible des conditions réelles. Les teneurs en eau des poudres varient de 11,91 % à 14,66 % (tableau XXI). C'est l'échantillon M5284Bf qui a le taux d'humidité le plus élevé, suivi par M5284Df, M5284Cf et enfin M5284Af.

Tableau XVIII - Densité et teneur en eau des échantillons M5284Af à Df.

	M5284Af	M5284Bf	M5284Cf	M5284Df
Densité (g/l)	1017,60	1042,40	1020,65	918,68
Teneur en eau (%)	11,91	14,66	12,86	14,13

La densité déterminée dans le cadre de ce projet, également appelée « bulk density », est estimée en remplissant une éprouvette graduée d'un volume déterminé de poudre. La masse (g) de ce volume connu (l) de matière nous permet de calculer sa densité (g/l). Il est important de noter que cette mesure dépend non seulement de la densité intrinsèque de l'échantillon, mais également de la manière dont les grains s'agencent dans le tube. La densité maximale mesurée est de 1042,40 gr/l (M5284Bf) et la plus faible est de 918,68 gr/l (M5284Df) (Tableau XVIII). Il est difficile de tirer des conclusions de ces valeurs sans effectuer d'autres types de mesures. En effet, comme il a été précisé précédemment, deux paramètres interviennent dans cette densité, rendant l'interprétation malaisée.

Demande en eau

La demande en eau a été mesurée comme suit : après l'opération de séchage qui a servi à déterminer la teneur en eau, les échantillons ont été placés dans une boîte fermée contenant un récipient rempli d'eau (Figure 18). La prise de masse des échantillons a été mesurée régulièrement (Tableau IX).



Figure 18 - Dispositif permettant la mesure de la demande en eau.

La Figure 19 indique une augmentation plus importante de la masse, au cours du temps, pour l'échantillon M5284Df que pour l'échantillon M5284Cf.

Tableau XIX : Variation de masse en fonction du temps pour l'échantillon M5284Df.

Temps (h)	Essai 1 (%)	Essai 2 (%)	Moyenne (%)
0	0	0	0
1	0,25	0,24	0,24
2	0,38	0,35	0,36
3	0,47	0,46	0,46
4	0,62	0,58	0,60
7	0,75	0,73	0,74
24	1,52	1,44	1,48
48	2,89	2,83	2,86
120	3,08	3,01	3,04
168	3,19	3,13	3,16
192	3,32	3,26	3,29
336	3,85	3,90	3,88

D'une manière générale, c'est au cours de la première semaine que l'augmentation de masse des poudres est la plus conséquente. La semaine suivante, ce paramètre croît encore, mais de manière moins importante. Ensuite, la masse des différents échantillons continue à progresser mais beaucoup plus lentement.

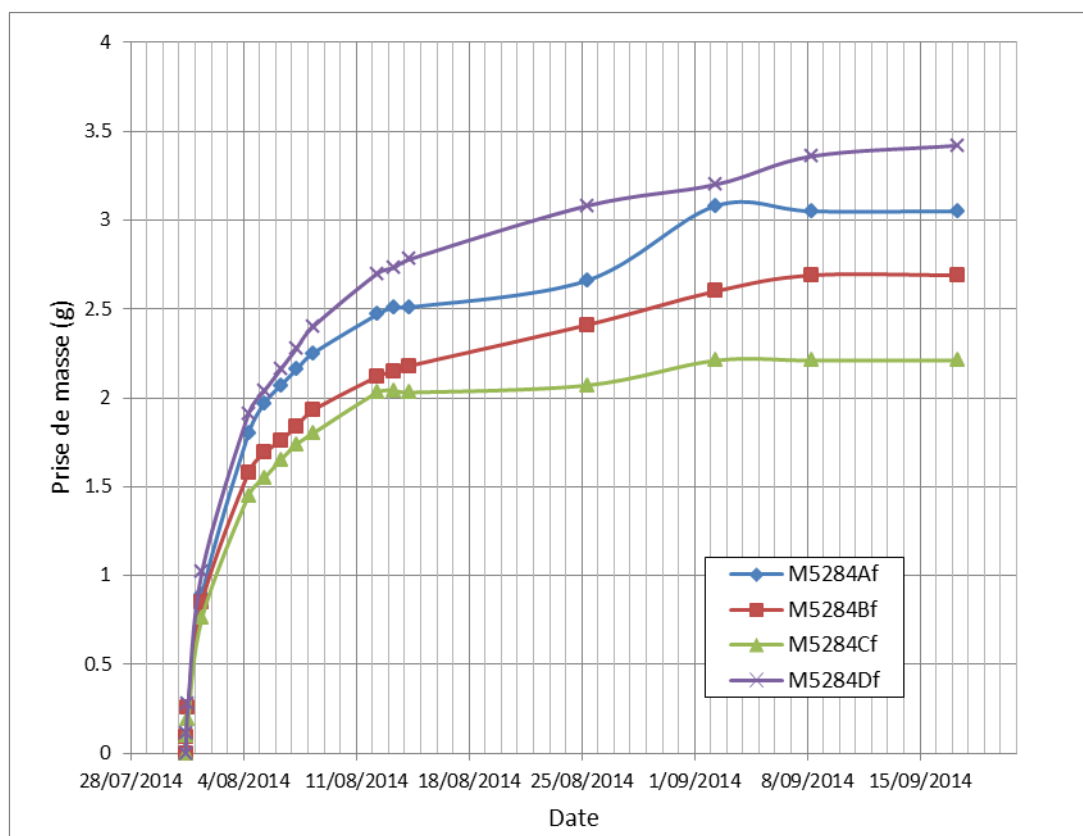


Figure 19 – Demande en eau relative aux échantillons M5284Af à Df.

Il est étonnant de constater que les résultats obtenus ne sont pas corrélables avec la teneur en eau calculée précédemment. En effet, l'échantillon M5284Bf, qui a la valeur la plus élevée en taux d'humidité, présente une prise de masse plus faible que deux autres échantillons. Plus étonnant encore,

M5284Af, qui a une prise de masse relativement importante, offre la teneur en eau la plus faible. Le fait de ne pas trouver un comportement de type « hystérésis » montre l'influence importante que le milieu extérieur joue.

Granulométrie

Afin de ne pas perdre les éventuels éléments solubles, c'est la technique de granulométrie par voie sèche sur les fractions 0/4 (M5284Af à Df) qui a été utilisée, avec les tamis de mailles 4 ; 2 ; 1 ; 0,5 ; 0,25 ; 0,125 et 0,063 mm. Ces tamis, correctement superposés, contenant l'échantillon, ont été placés sur une table vibrante pendant 15 min (60 et 80 vibrations/sec). Ensuite, la séparation granulométrique a été terminée au pinceau, afin d'avoir un résultat s'approchant le plus possible de la réalité.

La Figure 20 indique le pourcentage de refus cumulés, alors que la Figure 21 montre la répartition des différentes fractions obtenues au sein de chaque échantillon.

La Figure 20 nous apprend que les échantillons M5284Bf et Cf ont des courbes granulométriques similaires. Ce sont également ces deux échantillons qui contiennent les éléments les plus grossiers, puisque leurs pourcentages de refus cumulés sont systématiquement plus élevés que ceux des deux autres courbes. On remarque également que c'est l'échantillon M5284Df qui est constitué des fractions les plus fines.

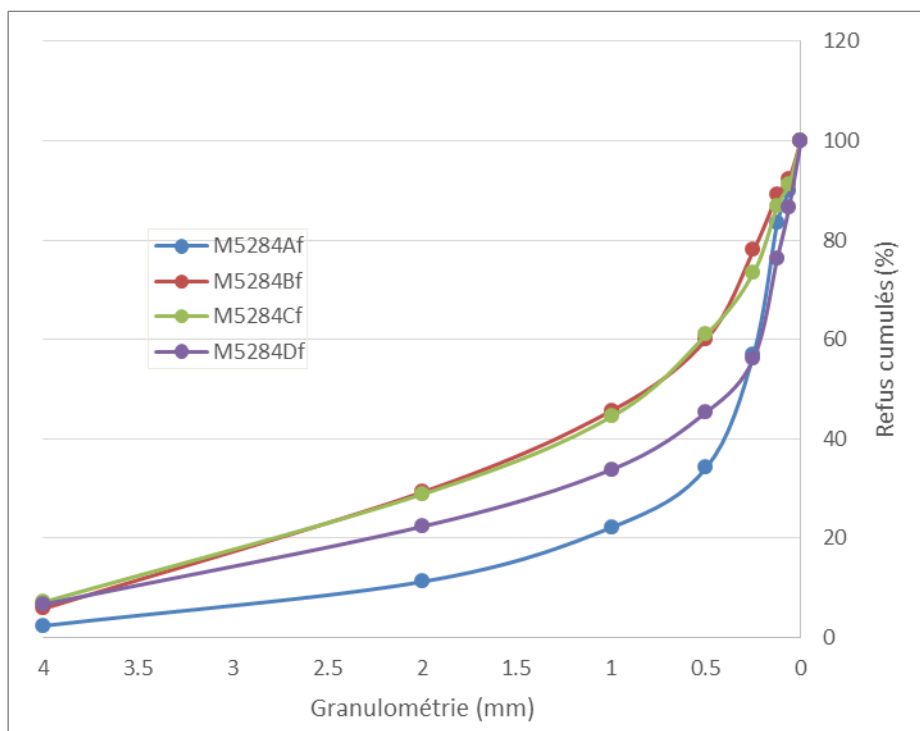


Figure 20 – Granulométrie des fractions fines des échantillons M5284Af à Df, en pourcent de refus cumulés.

En ce qui concerne la distribution des fractions granulométriques dans les différents échantillons (Figure 21), ce sont M5284Af et Df qui contiennent le plus de particules fines (< 250 µm). Cependant, c'est dans l'échantillon M5284Df que l'on observe la plus grande concentration en particules de diamètres les plus faibles (0 à 125 µm). M5284A est, quant à lui, essentiellement formé de fragments dont la granulométrie est comprise entre 125 et 500 µm. C'est également dans cet échantillon que l'on recense le moins d'éléments grossiers (> 2 mm). D'un point de vue granulométrique, M5284Bf et Cf sont très similaires et

sont composés de particules plus grossières, essentiellement comprises entre 500 µm et 4 mm. La différence entre la granulométrie de ces deux échantillons se marque au niveau de la fraction 250-500 µm, enrichie dans la fraction fine de M5284B.

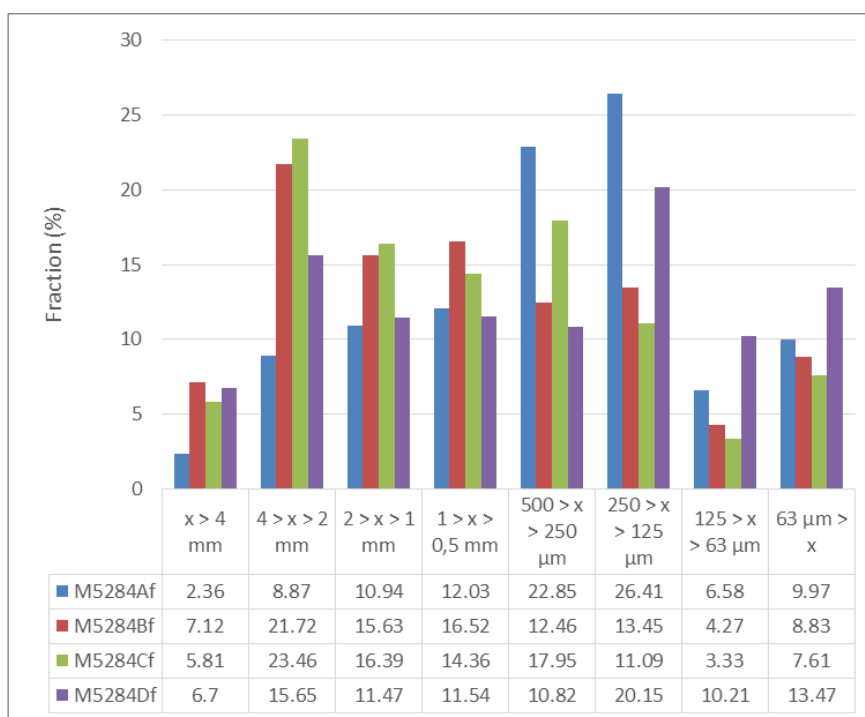


Figure 21 - Pourcentage des fractions obtenues lors de la séparation granulométrique dans les différents échantillons (M5284Af à Df).

1.4.2.2 Caractérisation « minéralogique » et chimique

Minéralogie

La granulométrie trop fine de ces échantillons ne nous permettant pas une reconnaissance visuelle des différents constituants, la « caractérisation minéralogique » a été tentée au moyen de la diffraction des rayons X (DRX). Pour ce faire, les échantillons ont subi un broyage, avant d'être soumis aux rayons X. La position, ainsi que l'intensité relative des pics du diffractogramme des poudres, ont permis de déterminer la nature des constituants (Tableau XX). L'analyse semi-quantitative, présentée à titre indicatif, a été déterminée selon le protocole décrit dans Cook *et al.* (1975).

Les diffractogrammes de poudre ne montrent pas de différences significatives entre les 4 échantillons. Ils sont, en effet, essentiellement composés de quartz et, en de plus faibles proportions, de calcite, de plagioclases et de feldspaths potassiques. Cependant, on observe la présence des minéraux appartenant au groupe des argiles dans les échantillons M5284Bf à Df alors que M5284Af ne semble pas en contenir. Il faut cependant faire attention à cette dernière affirmation, l'absence des pics relatifs aux argiles dans ce dernier pouvant être due à l'absence de ces composés ou à leur présence en des teneurs trop faibles pour être détectées.

Tableau XX - Analyses semi-quantitative obtenue par diffraction des rayons X (M5284Af à Df).

	Calcite	Quartz	Plagioclases	Feldspaths potassiques	Argiles
M5284Af	12 %	68 %	7 %	13 %	ND
M5284Bf	11 %	75 %	4 %	10 %	D
M5284Cf	14 %	71 %	7 %	8 %	D
M5284Df	16 %	72 %	5 %	7 %	D
(ND = non détecté, D = détecté)					

Analyse chimique élémentaire

L'analyse chimique élémentaire par XRF (spectrométrie de fluorescence X), le dosage des chlorures et des sulfates (par voie humide), ainsi que les pertes au feu, ont été réalisés.

Les essais de perte au feu permettent de montrer qu'il y a peu de différences entre les échantillons. Il en est de même pour les teneurs en chlorures et sulfates qui restent faibles et ne semblent pas constituer un risque vis-à-vis de leur utilisation dans les mélanges à base cimentaire. D'autre part, le risque de contact avec des éléments en acier est limité au niveau des fondations/sous-fondations dans lesquelles ces matériaux recyclés sont utilisés.

Tableau XXI : Perte au feu, teneur en sulfates et en chlorures des échantillons de type M5284.

Essai	500°C	1000°C	SO ₃ ²⁻	Cl ⁻
M5284A	5,18	8,96	1,568	0,024
M5284B	4,5	12,30	1,786	0,024
M5284C	3,46	13,53	0,618	0,016
M5284D	6,78	14,92	1,450	0,044

La spectrométrie de fluorescence X permet une évaluation de la proportion des différents composés présents dans les échantillons (Tableau XXII).

Tableau XXII : Spectrométrie de fluorescence X sur les échantillons de type M5284.

	M 5284 Af	M 5284 Bf	M 5284 Cf	M 5284 Df
SiO ₂	70,00	60,59	59,87	60,20
TiO ₂	0,32	0,35	0,29	0,35
Al ₂ O ₃	4,47	6,44	5,19	6,58
Fe ₂ O ₃	2,31	3,10	3,69	2,93
MnO	0,05	0,12	0,26	0,06
MgO	0,74	0,85	1,25	0,74
CaO	9,71	12,38	13,95	10,08
Na ₂ O	0,17	0,13	0,14	0,16
K ₂ O	1,05	1,16	0,97	1,42
P ₂ O ₅	0,12	0,15	0,15	0,23
LOI	9,30	12,13	13,32	14,73
SOMME	98,25	97,39	99,09	97,47

Les analyses révèlent une quantité élevée de SiO₂, qui peut provenir des sables et du ciment, ainsi qu'une teneur limitée en chaux, ce qui semble indiquer une faible teneur en ciment. La faible teneur en Al₂O₃ quant à elle semble indiquer une faible teneur en déchets de maçonnerie.

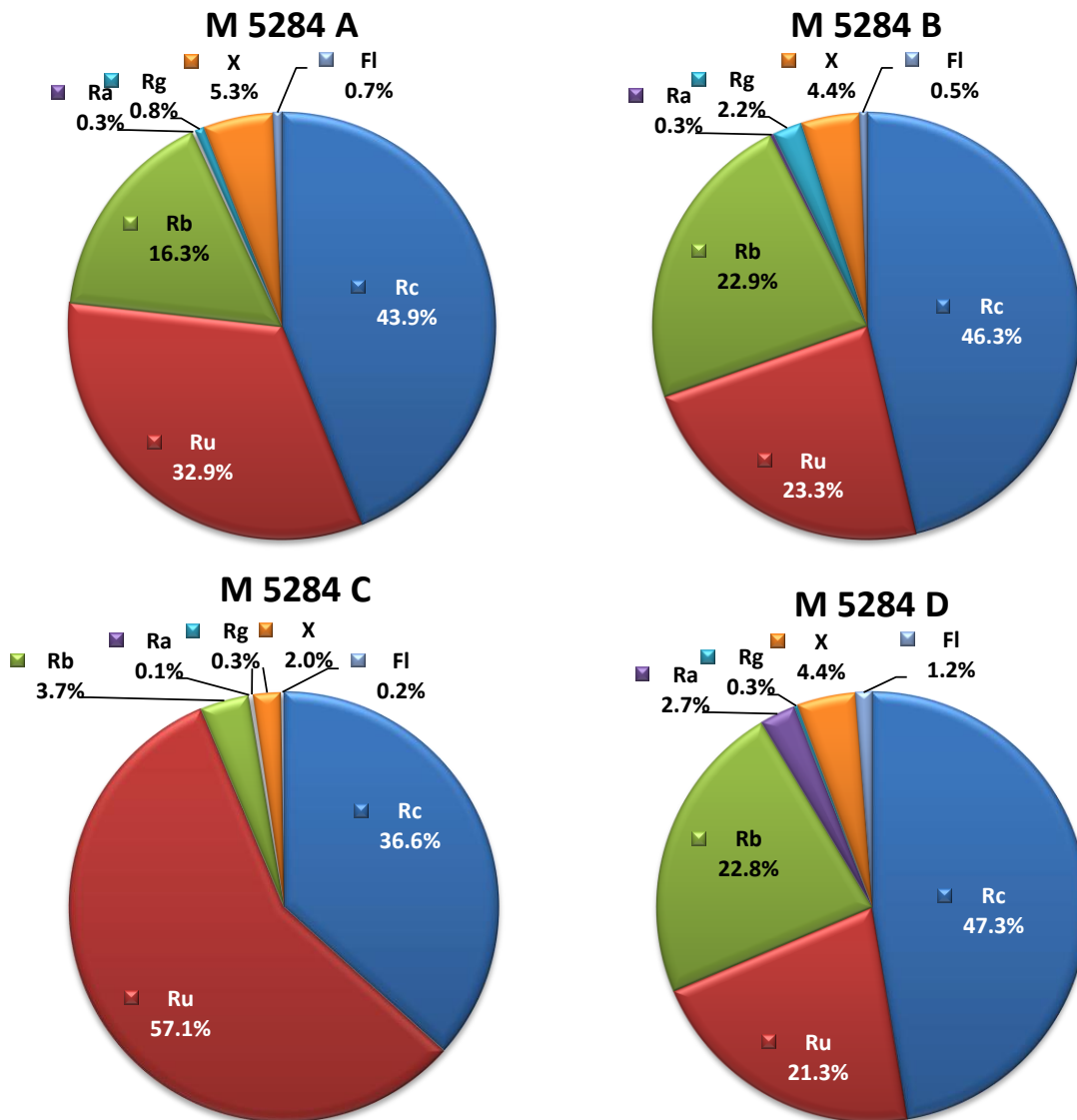
1.4.3 Composition granulométrique des fractions grossières de déchets bruts

La caractérisation des constituants des différentes fractions granulométriques a été réalisée sur base de l'annexe A.2 de la norme NBN EN 933-11 (également reprise dans la PTV 406) (Voir Annexe II).

Les fractions granulométriques (-16 +4 mm) ont été échantillonnées jusqu'à obtenir un échantillon représentatif d'une masse comprise entre 2 et 3 kg sur lequel la caractérisation visuelle a été réalisée sur base des sept catégories reprises dans la norme. Les résultats sont repris dans le Tableau XXIII et présentés graphiquement aux Figures 22.

Tableau XXIII : Répartition massique des fractions (-16 +4 mm).

	M 5284 A	M 5284 B	M 5284 C	M 5284 D
Catégories	Répartition massique (%)			
Rc	43.9	46.3	36.6	47.3
Ru	32.9	23.3	57.1	21.3
Rb	16.3	22.9	3.7	22.8
Ra	0.3	0.3	0.1	2.7
Rg	0.8	2.2	0.3	0.3
X	5.3	4.4	2.0	4.4
Fl	0.7	0.5	0.2	1.2



Figures 22 : Distribution des fractions (-16 +4 mm).

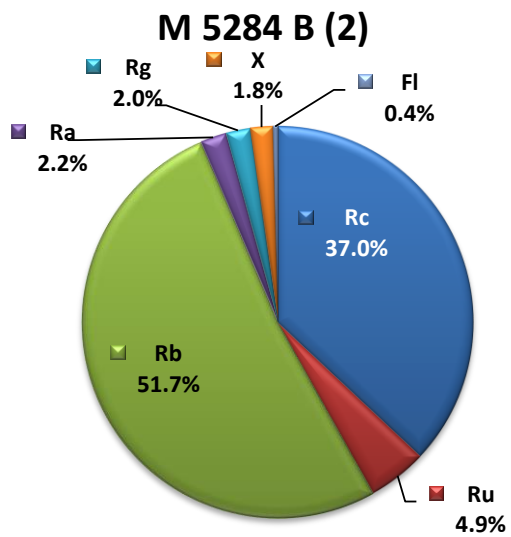
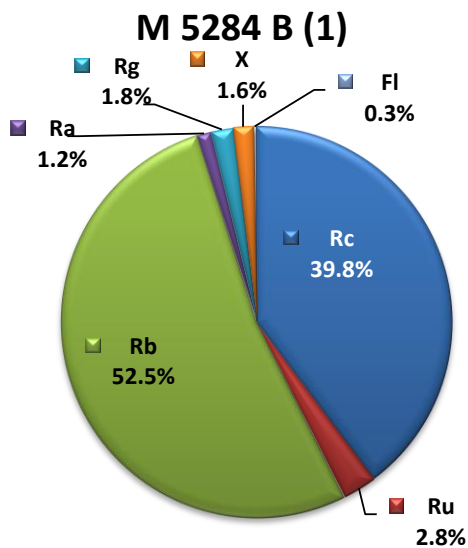
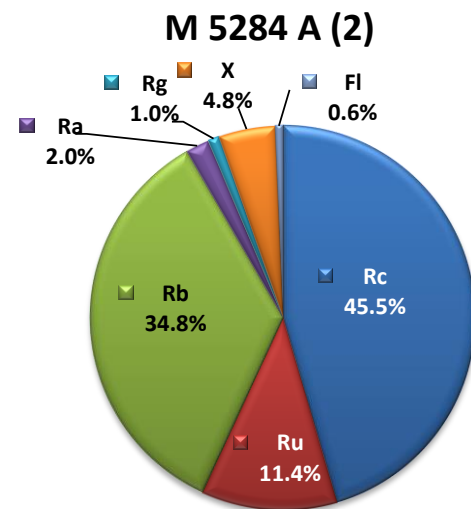
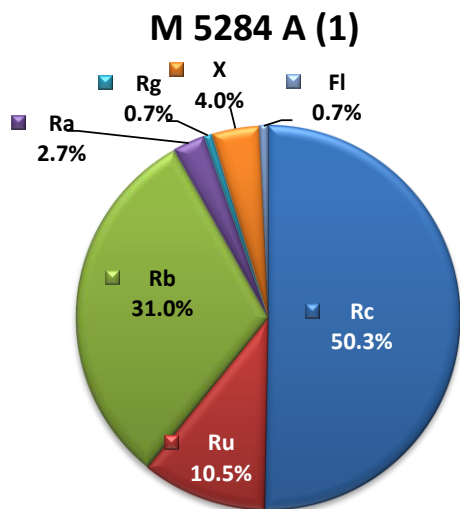
Les catégories majoritairement constitutives des fractions (-16 +4 mm) sont les catégories Rc (béton, mortier), Ru (pierre naturelle) et Rb (brique, tuile, céramique).

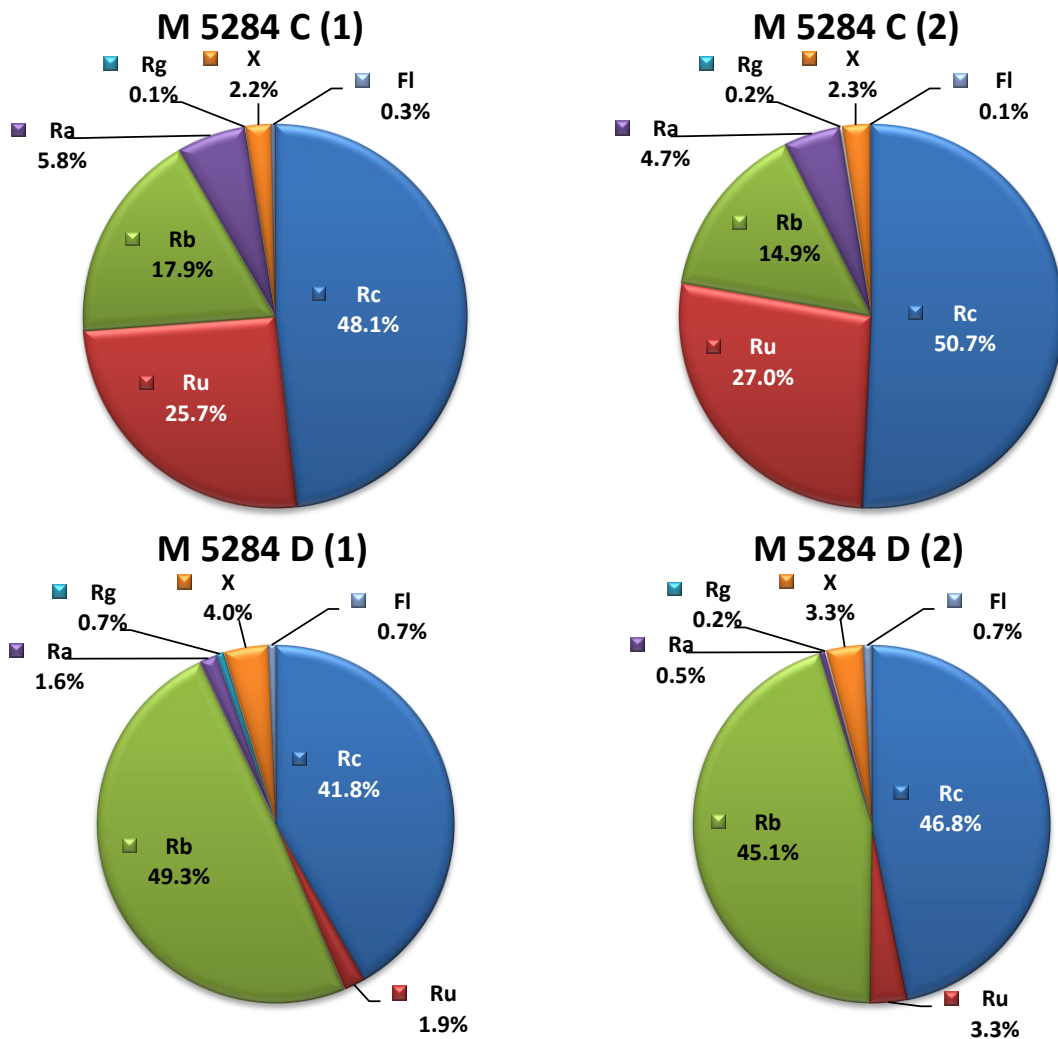
En termes de comparaison entre les différents échantillons, le lot M 5284 C se distingue encore essentiellement des trois autres échantillons. En effet, sa teneur en pierres naturelles est significativement plus importante que pour les autres lots (57 % contre 20... 30 %), et se traduit en contrepartie par une teneur plus faible en matériaux en terre cuite (4 % contre 16... 23 %).

Les fractions granulométriques (-40 +16 mm), comme pour la fraction (-16 +4 mm), ont été échantillonnées jusqu'à l'obtention de deux échantillons représentatifs d'une masse comprise entre 7 et 8 kg sur lesquels la caractérisation visuelle a été réalisée toujours sur base des sept catégories reprises dans la norme NBN EN 933-11. Celle-ci a été opérée deux fois, de façon à vérifier la reproductibilité de cette caractérisation pour un même échantillon. Les résultats sont repris dans le Tableau XXIV et présentés graphiquement aux Figures 23.

Tableau XXIV : Répartition massique des fractions (-40 +16 mm).

Catégories	M 5284 A		M 5284 B		M 5284 C		M 5284 D	
	Répartition massique (%)							
Rc	50.3	45.5	39.8	37.0	48.1	50.8	41.8	46.9
Ru	10.5	11.4	2.8	4.9	25.7	27.0	1.9	3.3
Rb	31.0	34.8	52.5	51.7	17.8	14.9	49.3	45.1
Ra	2.8	1.9	1.2	2.2	5.8	4.7	1.6	0.5
Rg	0.7	1.0	1.8	2.0	0.1	0.2	0.7	0.2
X	4.0	4.8	1.6	1.8	2.2	2.3	4.0	3.3
Fl	0.7	0.6	0.3	0.4	0.3	0.1	0.7	0.7





Figures 23 : Distribution des fractions (-40 +16 mm).

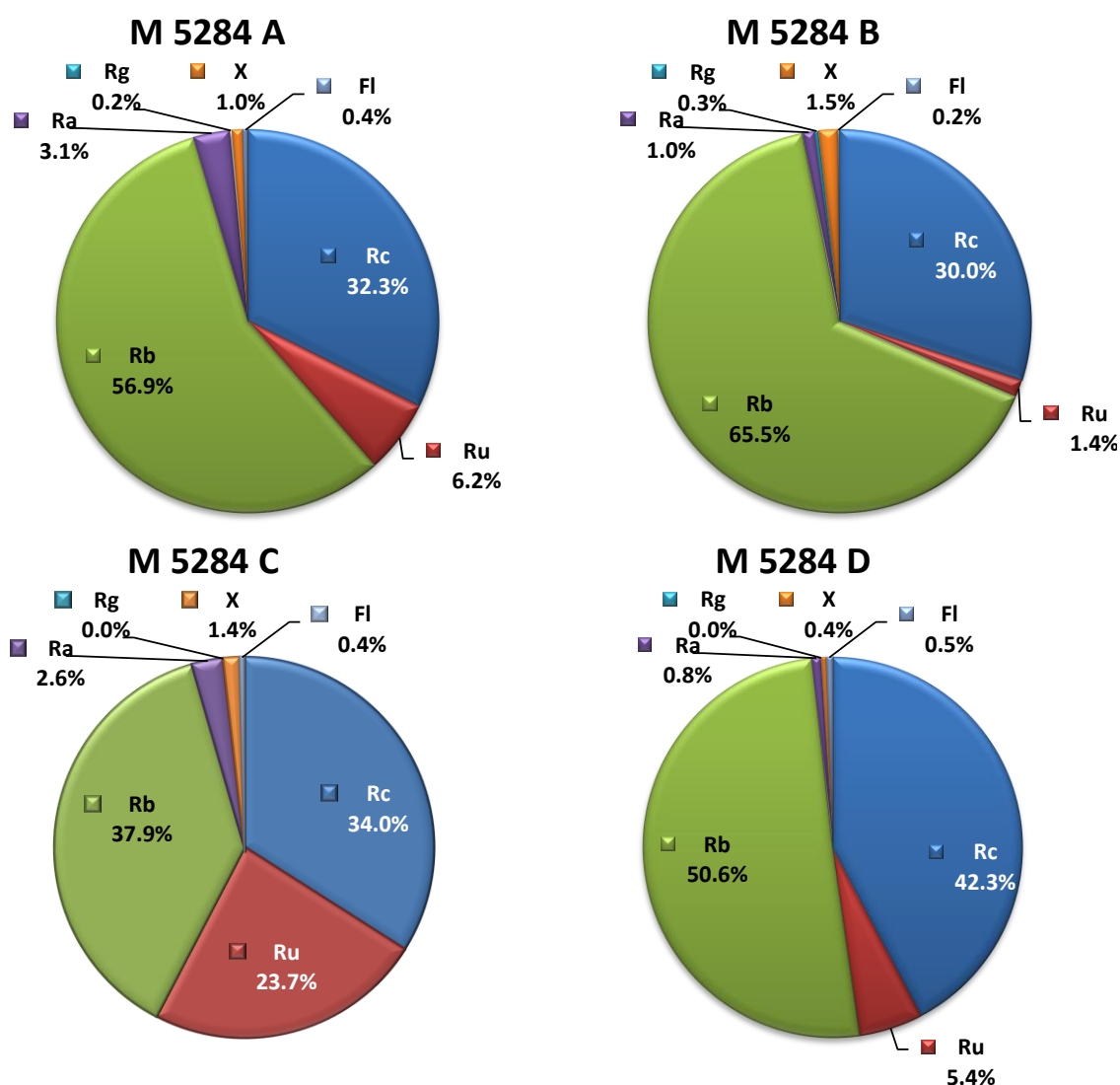
Après caractérisation des fractions (-40 +16 mm), les catégories majoritaires sont identiques à celles identifiées pour les fractions (-16 +4 mm), à savoir la catégorie Rc (béton, mortier), la Rb (brique, tuile, céramique) et, dans une moindre mesure, la Ru (pierre naturelle). A nouveau, l'échantillon M 5284 C se caractérise des autres par une teneur nettement inférieure en éléments de terre cuite, contrebalancée par une teneur plus élevée en pierres naturelles.

En ce qui concerne la reproductibilité des résultats, à l'erreur expérimentale près (de l'ordre de 5 % maximum), la répartition massique de chaque catégorie reste semblable pour deux échantillons différents en provenance d'un même lot de départ.

Considérant la taille importante des éléments constitutifs de la fraction granulométrique (+40 mm), aucun échantillonnage n'a été réalisé, et le tri manuel a été effectué sur l'entièreté de cette fraction pour les quatre échantillons. Les résultats sont repris dans le Tableau XXV et présentés graphiquement aux Figures 24.

Tableau XXV : Répartition massique des fractions (+40 mm).

	M 5284 A	M 5284 B	M 5284 C	M 5284 D
Catégories	Répartition massique (%)			
Rc	32.3	30.0	34.0	42.3
Ru	6.2	1.5	23.7	5.4
Rb	56.9	65.5	37.9	50.6
Ra	3.1	1.0	2.6	0.8
Rg	0.1	0.3	0.0	0.0
X	1.0	1.5	1.4	0.4
Fl	0.4	0.2	0.4	0.5



Figures 24 : Distribution des fractions (+40 mm).

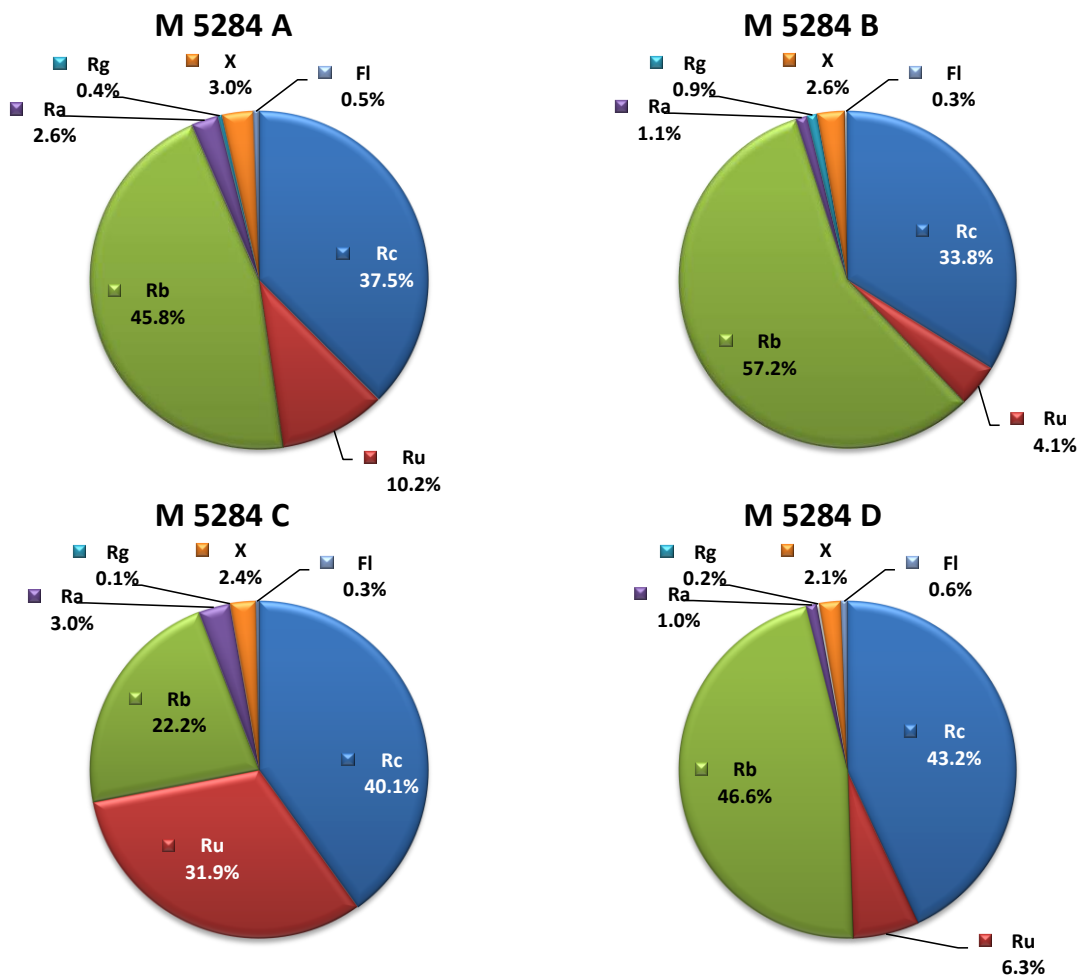
Les catégories majoritaires restent les catégories Rc (béton, mortier) et Rb (brique, tuile, céramique), et, dans une moindre mesure, la catégorie Ru (pierre naturelle). L'échantillon M 5284 C présente toujours une proportion en pierres naturelles et en éléments en terre cuite respectivement plus élevée et plus faible que pour les autres échantillons. Cette tendance confirmée à chaque fraction granulométrique de ce lot à une teneur plus faible en éléments en terre cuite et à une teneur plus élevée en pierres

naturelles laisse supposer qu'il se comporterait mieux aux essais de validation (essais Los Angeles et Micro Deval).

Sur base de la caractérisation visuelle des différentes fractions granulométriques, et de la répartition massique de celles-ci au sein de chaque échantillon, la répartition massique de chaque catégorie a pu être recalculée au sein de l'échantillon dans sa globalité (hormis la fraction (-4 mm) qui n'a pas été caractérisée visuellement cas de dimension trop faible). Cette répartition globale est présentée au Tableau XXVI et illustrée graphiquement aux Figures 25.

Tableau XXVI : Répartition massique générale.

Catégories	M 5284 A	M 5284 B	M 5284 C	M 5284 D
	Répartition massique (%)			
Rc	37.6	33.8	40.1	43.3
Ru	10.2	4.1	31.9	6.3
Rb	45.7	57.1	22.2	46.5
Ra	2.6	1.1	3.0	1.0
Rg	0.4	1.0	0.1	0.2
X	3.0	2.6	2.4	2.1
Fl	0.5	0.3	0.3	0.6



Figures 25 : Distribution générale des échantillons.

Ces résultats peuvent être mis en comparaison avec le Tableau 1 de la norme NBN EN 933-11 qui référence les teneurs minimales ou maximales de chaque catégorie selon l'application visée pour les granulats recyclés (Annexe III). De par leur composition, les quatre échantillons se rapprochent de la classification 'Gravillon mixte', bien que certains critères ne soient pas respectés :

- la somme des catégories Rc, Ru et Rg (Rcug) doit représenter au minimum 50 % en masse de l'échantillon. Seul l'échantillon M 5284 C répond à ce critère. Les autres échantillons sont soit légèrement en deçà de cette limite (M 5284 A et D avec respectivement 48.1 et 49.9 %), soit nettement en dessous (M 5284 B avec 38.8 %) ;
- la répartition massique des éléments de maçonnerie (Rb) ne doit pas excéder les 50 %. Seul l'échantillon M 5284 B ne répond pas à ce critère (57.8 %) ;
- la répartition massique des éléments 'autres' (X) doit se situer sous les 1 %. Ce critère n'est respecté par aucun des échantillons, avec au mieux 2.1 % de ces éléments identifiés dans l'échantillon (M 5284 D) et jusqu'à 3.0 % (M 5284 A).

Dans la perspective de la mise en place d'un schéma de traitement à mettre en œuvre pour une optimisation de la qualité des granulats, il sera donc nécessaire de tenir compte de ces critères, et plus particulièrement de ceux qui ne sont pas respectés en entrée.

Suite à ces différents tris effectués sur les fractions granulométriques, les résultats obtenus ont été rassemblés de façon à déterminer l'évolution de chaque catégorie en fonction de la granulométrie (Figure 26 à Figure 29).

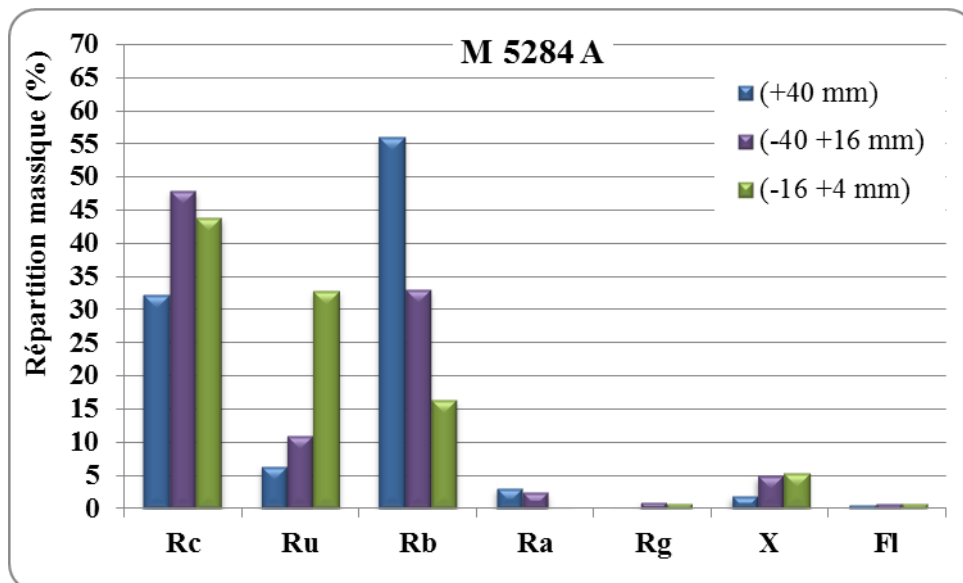


Figure 26 : Distribution en fonction de la granulométrie pour l'échantillon M 5284 A.

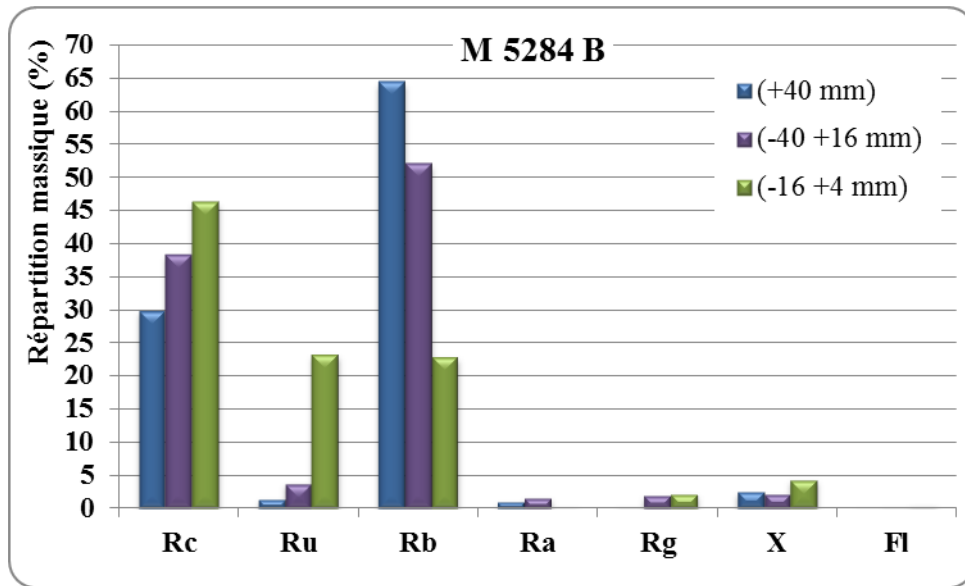


Figure 27 : Distribution en fonction de la granulométrie pour l'échantillon M 5284 B.

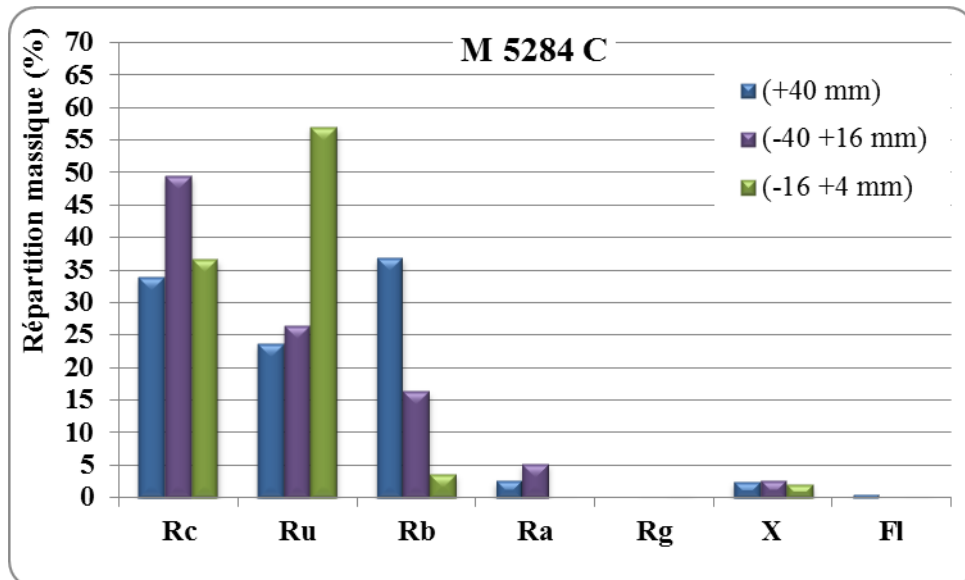


Figure 28 : Distribution en fonction de la granulométrie pour l'échantillon M 5284 C.

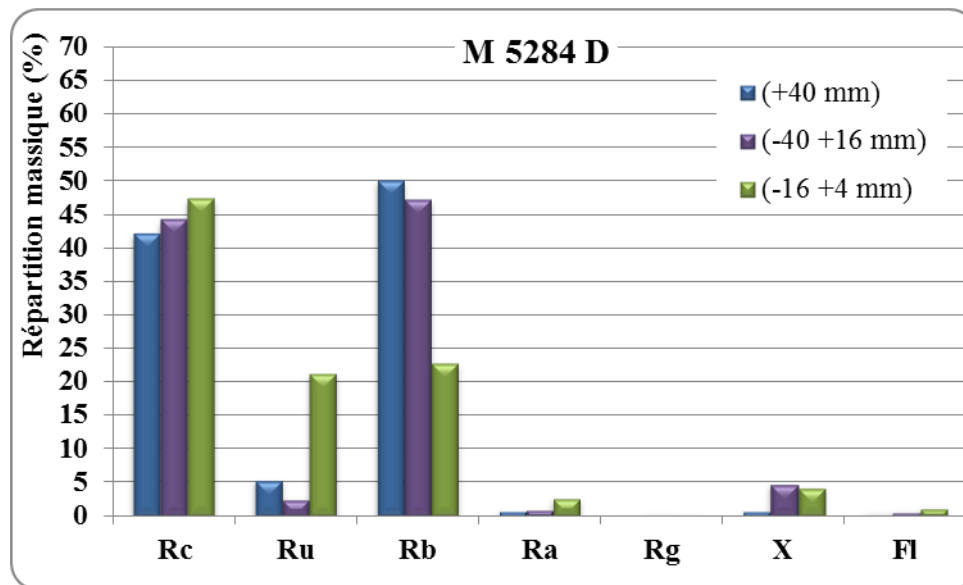


Figure 29 : Distribution en fonction de la granulométrie pour l'échantillon M 5284 D.

Deux tendances se dessinent nettement avec la comparaison de ces quatre échantillons en fonction de leur caractérisation selon la fraction granulométrique :

- la quantité de pierres naturelles reste semblable dans les fractions supérieures à 16 mm, pour ensuite augmenter considérablement entre 4 et 16 mm (une augmentation entre 15 et 30 %) ;
- les éléments en terre cuite sont en proportion plus élevée dans la fraction granulométrique supérieure à 40 mm, et leur teneur diminue avec la taille des grains. Cette catégorie reste cependant une catégorie principale, sauf pour l'échantillon M 5284 C, où cette proposition descend sous les 5 % pour la fraction (-16 +4 mm).

La teneur en béton varie aléatoirement d'un échantillon à l'autre en fonction de la fraction granulométrique, si bien qu'aucune tendance ne peut être observée. Malgré tout, cette catégorie se présente également comme l'une des trois catégories majoritaires identifiées.

Enfin, les quatre catégories restantes (mélanges hydrocarbonés, verre, autres (plâtre, métaux, ...) et flottants (bois, papier, ...) restent toujours sous les 5 %, et ce quelle que soit la fraction granulométrique.

1.5 Caractérisation en laboratoire des échantillons de matériaux recyclés traités

Dans cette section, la composition et les propriétés des recyclés sont étudiées. Etant donné leurs propriétés néfastes pour les recyclés, les fractions 0/4 de ces échantillons seront analysées dans le cadre de la Tâche 3 : Etude des paramètres néfastes.

1.5.1 Composition granulométrique des échantillons

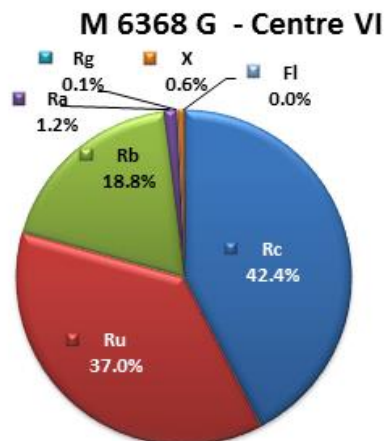
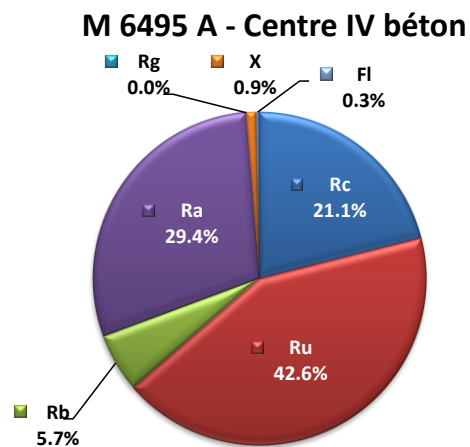
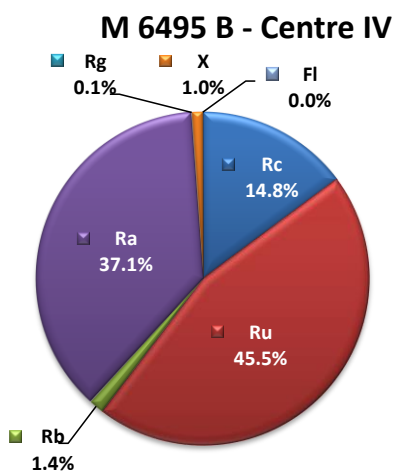
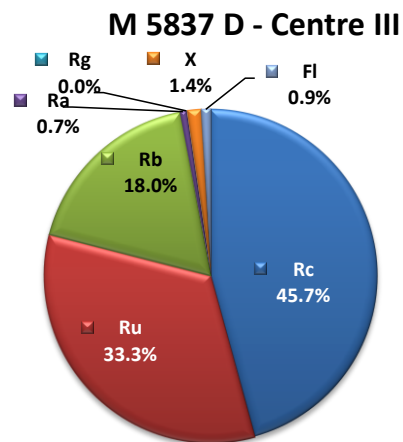
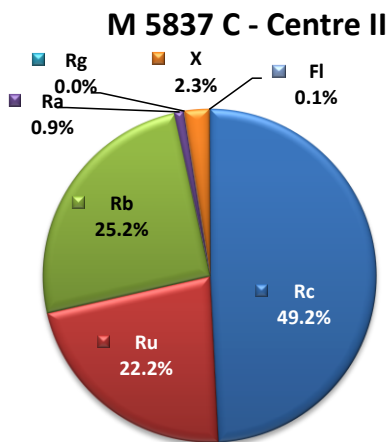
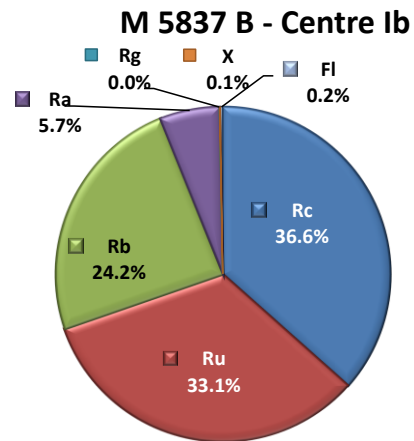
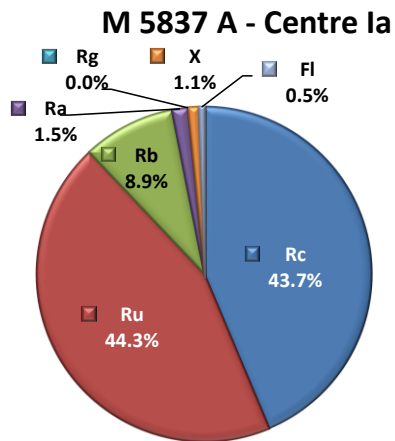
Les échantillons de granulats mixtes en provenance des différents centres de tri, ainsi que des granulats de béton du Centre IV (voir Tableau XVI) ont préalablement été échantillonnés jusqu'à obtention d'une quantité représentative (de l'ordre de 3 à 4 kg). Les échantillons de granulats mixtes et de béton du Centre V n'ayant pas été réceptionnés au CTP, ils n'ont pas été caractérisés.

La caractérisation des constituants des différentes fractions granulométriques a été réalisée sur base de l'annexe A.2 de la norme NBN EN 933-11 (également reprise dans la PTV 406) (Voir Annexe II). Selon cette norme, les granulats ont préalablement été tamisés en voie humide à 4 mm, de manière à récupérer la fraction 0/4 trop fine pour être caractérisée visuellement. La fraction (4/30 mm), après étuvage à 60°C durant 24 heures, a été caractérisée visuellement sur base des sept catégories reprises dans la norme. Les résultats sont présentés dans le Tableau XXVII et graphiquement aux Figures 30.

Tableau XXVII : Répartitions massiques des granulats mixtes ou de béton des différents centres de tri.

	M 5837 A Centre Ia	M 5837 B Centre Ib	M 5837 C Centre II	M 5837 D Centre III	M 6495 B Centre IV	M 6495 A Centre IV - Béton	M 6368 Centre VI
Fraction granulométrique	Répartition massique (%)						
(4/30 mm)	66.3	73.5	73.1	63.5	99.4	99.3	99.3
(0/4 mm)	33.7	26.5	26.9	36.5	0.6	0.7	0.7
Catégories	Répartition massique de la fraction supérieure à 4 mm (%)						
Rc	43.7	36.6	49.2	45.7	14.8	21.1	42.4
Ru	44.3	33.1	22.2	33.3	45.5	42.6	37.0
Rb	8.9	24.2	25.2	18.0	1.4	5.7	18.8
Ra	1.5	5.7	0.9	0.7	37.1	29.4	1.2
Rg	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	0.0	0.1
X	1.1	0.1	2.3	1.4	1.0	0.9	0.6
Fl	0.5	0.2	0.1	0.9	0.0	0.3	0.0

La teneur en fraction 0/4 des échantillons issus des centres I à III est élevée. Cette fraction granulométrique représente en effet entre le quart et le tiers de l'échantillon total.



Figures 30 : Distribution des granulats mixtes ou de béton des différents centres de tri.

Ces résultats ont été comparés au tableau de la prescription technique PTV 406 qui permet de classer les granulats selon leur composition (Annexe III). L'examen de ce tableau montre que les teneurs sont dépassées en ce qui concerne :

- la catégorie Ra (mélange hydrocarboné) pour l'échantillon M 5837 B qui doit être $\leq 5\%$;
- la catégorie X (divers = métaux, plastiques, plâtre,...) pour les échantillons M 5837 A, C et D qui doit être $\leq 1\%$;
- la catégorie Ra est largement dépassée dans le cas des échantillons en provenance de Centre IV (de 29 à 37 %). La teneur en béton (Rc) ne respecte pas le critère des granulats de béton ($\geq 70\%$) pour l'échantillon M 6495 A. Bien qu'aucun requis ne soit imposé pour la teneur en béton des granulats mixtes de l'échantillon M 6495 B, cette teneur s'avère également assez faible, puisque le critère Rcug, qui somme les teneurs en béton, en pierres naturelles et en verre, n'est pas respecté, ni pour l'échantillon de granulats mixtes, qui doit atteindre 70 %, ni pour l'échantillon de granulats de béton, qui doit atteindre 90 %. Ce critère varie entre 60 et 65 %. Ces deux échantillons, bien que repris dans des catégories de granulats différentes, sont relativement proches, et se rapprochent plus de granulats asphaltiques ou de béton et asphaltique ;

Les teneurs des autres catégories respectent les teneurs imposées par la norme et caractérisant les granulats mixtes. Seul l'échantillon M 6368 G, issu du Centre VI, répond favorablement à tous les critères de la norme.

A noter que les échantillons M 5837 A et B proviennent du même centre de traitement, à savoir du Centre I, mais à des périodes de prélèvement différentes. Le dépassement du critère Ra peut donc s'expliquer par une hétérogénéité à la source des déchets entrant dans le centre de traitement.

1.5.2 Courbe granulométrique des échantillons

Les courbes granulométriques des échantillons provenant des différents centres ont été déterminées par tamisage au CRR (Tableau XXVIII). Elles sont représentées à la Figure 31.

Tableau XXVIII : Composition granulométrique des échantillons.

D (mm)	Centre I		Centre II	Centre III	Centre IV		Centre V		Centre VI
	Mixte 0/32 Éch. a	Mixte 0/32 Éch. b	Mixte 0/32	Mixte 0/32	Mixte 0/40	Béton 0/40	Mixte 0/32	Béton 0/32	Mixte 0/32
	Passant (%)	Passant (%)	Passant (%)	Passant (%)	Passant (%)	Passant (%)	Passant (%)	Passant (%)	Passant (%)
0.063	7.3	8.3	9.0	14.4	15.3	6.5	6.4	3.9	9.1
0.08	/	9.3	10.3	16.0	16.2	7.4	6.8	4.4	9.4
0.125	9.5	11.2	12.8	17.8	17.4	8.1	7.8	6.1	11.1
0.25	12.8	14.3	18.1	25.7	24.1	15.2	11.4	8.3	14.6
0.5	18.5	19.5	27.0	31.8	30.0	21.4	15.1	19.8	20.0
1	22.5	23.6	31.8	36.6	34.7	25.8	18.6	24.0	23.8
2	28.6	29.8	38.4	43.0	42.6	32.9	23.7	28.9	29.3
4	37.3	38.0	47.0	51.5	52.9	42.3	31.3	35.1	36.7
6.3	47.2	48.9	57.3	59.7	59.8	52.3	40.7	43.9	43.7
8	52.8	54.9	62.4	65.5	66.2	57.9	48.5	51.9	49.3
10	58.5	61.3	67.8	72.2	72.3	63.9	56.5	60.3	55.7
12.5	64.5	69.2	75.2	79.5	78.4	70.4	64.4	68.2	65.7
14	67.0	71.6	78.3	82.6	81.4	74.5	69.2	72.7	70.9
16	70.7	75.2	82.0	86.1	83.9	77.9	73.7	76.5	74.5
20	78.7	82.3	88.8	90.6	87.7	82.5	79.0	81.6	79.7
25	88.4	91.2	95.5	95.1	92.3	88.5	85.8	87.5	88.0
31.5	96.6	99.4	99.9	100.0	95.9	94.0	93.4	92.6	97.5
40	100.0	100.0	100.0		99.7	99.3	100.0	95.4	100.0
50					100.0	100.0		100.0	

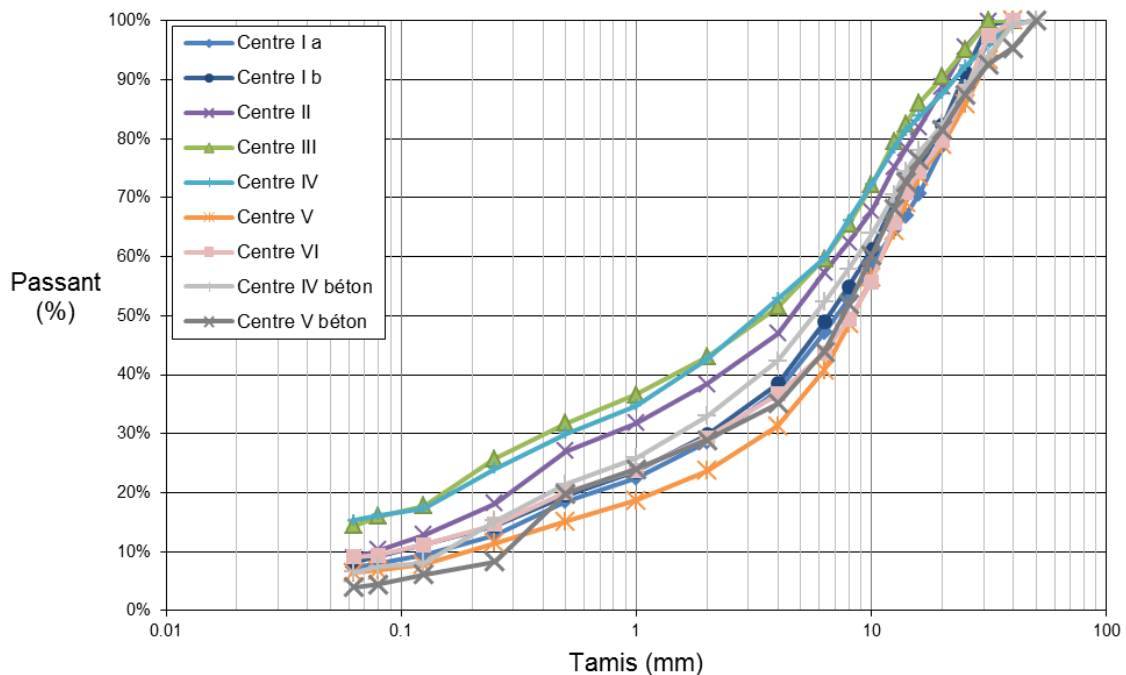


Figure 31 : Courbes granulométriques des différents échantillons mixtes.

Plusieurs différences peuvent être remarquées entre les compositions granulométriques des échantillons. Ainsi, les échantillons issus des centres III et IV contiennent plus de fines (14.4 et 15.3 %) que les échantillons issus des autres centres (7.3-9%). L'échantillon issu du Centre IV, qui produit un 0/40 et non un 0/32, contient en toute logique légèrement plus d'éléments supérieurs à 31.5.

Si on compare le passant à 4 mm à celui mesuré lors de la préparation des échantillons pour l'estimation de la composition granulométrique (§1.5.1), on voit qu'il est ici plus important puisqu'il varie entre 37 et 52% pour les centres I à III.

La Figure 32 compare ces courbes granulométriques aux spécifications du cahier des charges type Qualiroutes sur les sous-fondations en empierrement 0/32 (§F.3.2.1.3.1).

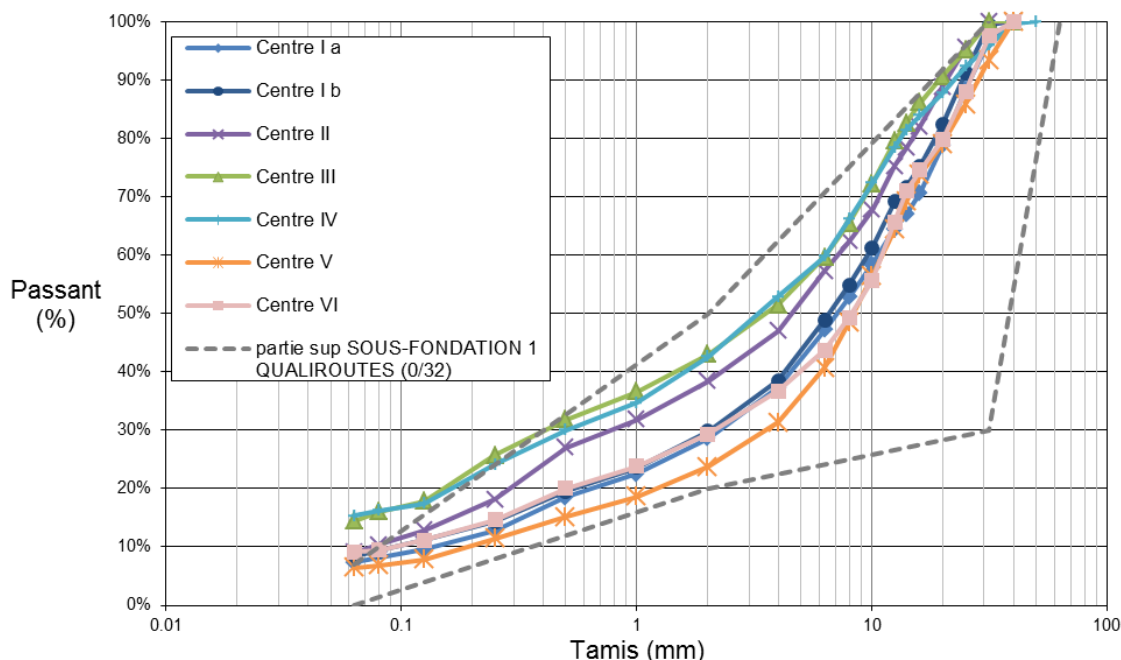


Figure 32 : Comparaison des courbes granulométriques des deux échantillons traités avec les spécifications de Qualiroutes pour les sous-fondations I (0/32).

On constate que tous les matériaux fournis présentent trop de fines (f) pour être utilisés seuls dans la partie supérieure d'une sous-fondation de type 1 (la limite fixée par le Qualiroutes est de 7%). Certains présentent même plus du double de la quantité autorisée. Cette quantité importante de fines (f) ne correspond pas aux valeurs annoncées dans les cahiers de charges des produits, pour lesquels la teneur annoncée est en général assez largement inférieure à 7%.

Une telle différence est trop importante pour être générée par la seule hétérogénéité du produit. D'autres facteurs peuvent intervenir : la méthode d'essai, le transport des échantillons ou le mode de prélèvement. Ce dernier paramètre est probablement celui qui est le plus susceptible d'avoir influencé les résultats. En effet, tandis que les échantillons prélevés pour cette étude ont été directement recueillis dans un bigbag à la sortie de la bande transporteuse, les échantillons destinés à l'établissement des fiches techniques ont été prélevés à plusieurs endroits sur le tas conformément à la norme NBN EN 932-1.

Afin de confirmer l'importance de ce facteur, des mesures comparatives ont été effectuées par le laboratoire du CRR et celui du producteur sur un échantillon prélevé conjointement conformément à la norme NBN EN 932-1, homogénéisé et quarté. Les courbes granulométriques résultantes sont tracées à la Figure 33.

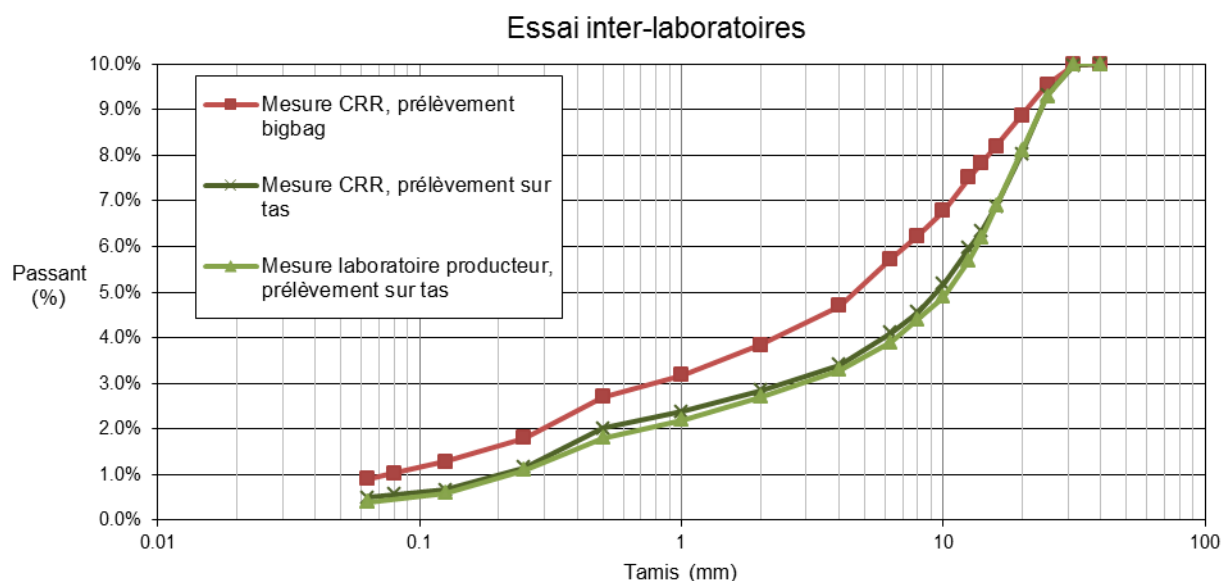


Figure 33 : Comparaison des courbes granulométriques mesurées par le CRR et par le laboratoire du producteur sur un échantillon prélevé conjointement sur le stock avec la courbe mesurée par le CRR sur un échantillon prélevé précédemment au bout de la bande transporteuse dans le même centre.

Les courbes des échantillons prélevés conjointement sont très similaires (moins de 3% de différence absolue). Ces courbes ont aussi une teneur en fines (f) beaucoup plus conforme aux cahiers des charges et aux courbes présentées dans les fiches techniques. Cet essai prouve que le mode de prélèvement des échantillons a une influence très importante sur la courbe granulométrique résultante.

1.5.3 Essais Micro-Deval en présence d'eau (M_{DE})

L'essai Micro-Deval a été réalisé sur la fraction [10/14] de neuf échantillons. Comme l'exige la norme, chaque essai a été doublé (Figure 34).

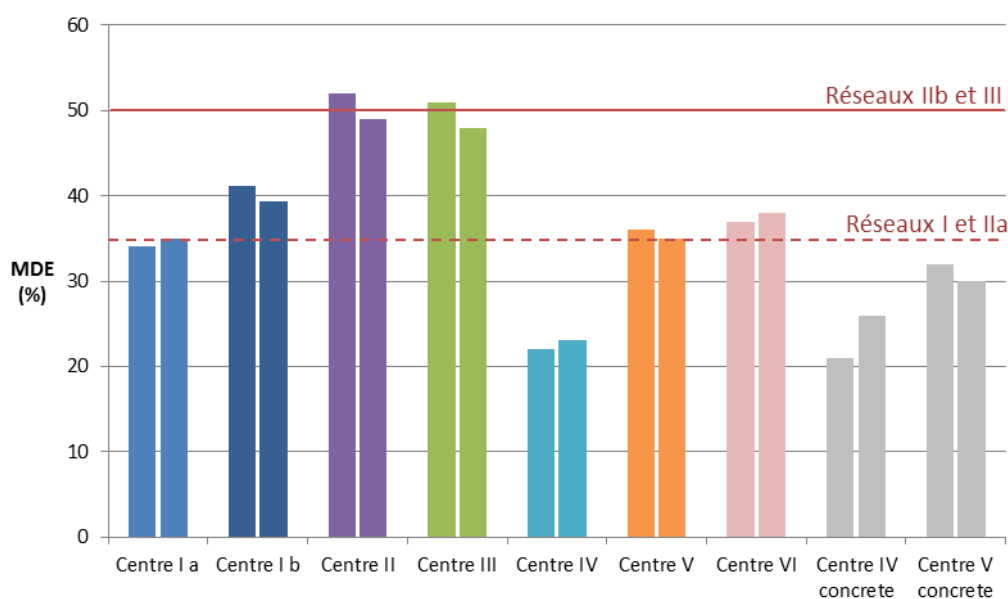


Figure 34 : Résultats de l'essai Micro-Deval.

La différence observée d'un centre à l'autre est très importante. Les valeurs moyennes mesurées varient de 23.5% (Centre IV) à 50.5% (Centre II). Les recyclés de béton présentent en toute logique des valeurs

assez faibles de M_{DE} , mais on remarque que, pour le Centre IV, le recyclé mixte présente de meilleurs résultats que le recyclé de béton.

Les critères figurant dans le Qualiroutes pour une application en sous-fondation sont une valeur moyenne maximale de 35% pour le réseau routier de types I et IIa (réseau primaire) et une valeur moyenne inférieure ou égale à 50% pour les réseaux IIb et III (routes secondaires). Un seul échantillon (Centre II) devrait donc être écarté pour toutes les applications, tandis que l'utilisation des échantillons issus des Centres III et V devrait être limitée au réseau secondaire. Les échantillons de béton, ainsi que l'échantillon mixte du Centre IV peuvent être utilisés sans restriction sur base uniquement de ce critère. En ce qui concerne le Centre I, l'échantillon Ia pourrait être utilisé sans restriction tandis que l'utilisation de l'échantillon Ib devrait être limitée au réseau secondaire. Ainsi, pour un même centre, des hétérogénéités de valeurs existent. Il est donc préférable d'utiliser cet échantillon pour une application en routes secondaires.

1.5.4 Essais Los Angeles (LA)

L'essai Los Angeles a été mené sur la fraction [10/14], comme prévu dans la norme. Les résultats varient de 25 à 46% (Figure 35). Seuls deux échantillons, issus des Centres II et III, dépassent la valeur maximale du coefficient LA imposée par Qualiroutes, qui est de 40%. Comme pour l'essai Micro-Deval, les échantillons de béton présentent d'excellentes performances, mais la meilleure résistance reste atteinte par le recyclé mixte issu du Centre IV. A nouveau, l'échantillon Ib présente de moins bons résultats que l'échantillon Ia, montrant la variabilité des performances pour des granulats issus d'un même centre.

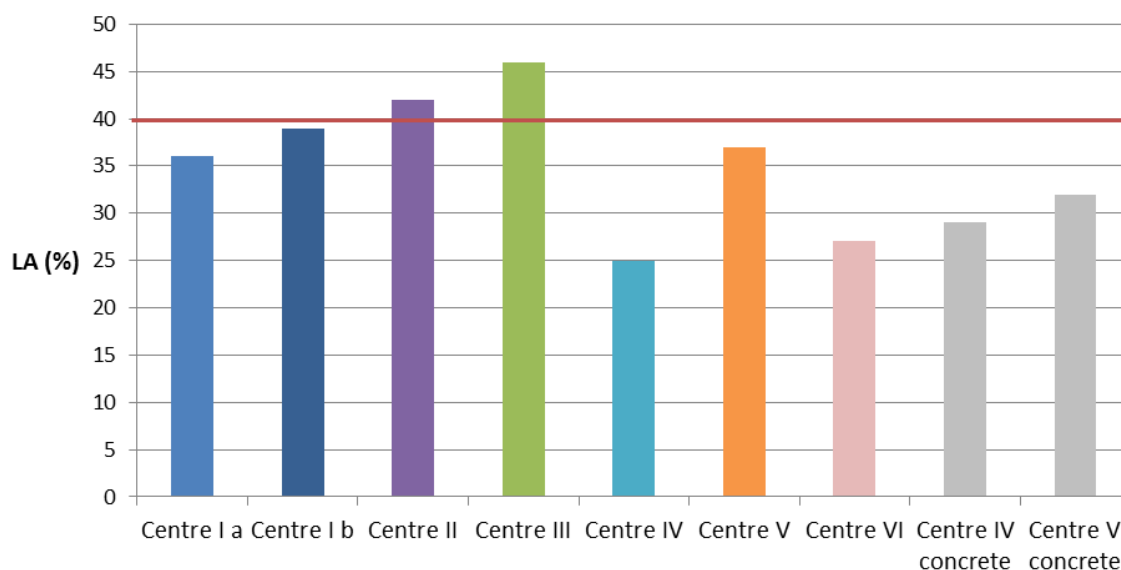


Figure 35 : Résultats de l'essai Los Angeles pour les échantillons traités.

1.5.5 Critère $M_{DE}+LA$

Pour qu'un granulat satisfasse aux exigences de Qualiroutes pour une application en sous-fondation, il ne suffit pas que les valeurs de LA et M_{DE} soient inférieures aux valeurs prescrites : il faut également que leur somme soit inférieure de 10% à la somme des valeurs maximales tolérées (Tableau XXIX). Les différentes valeurs mesurées, les valeurs seuils de Qualiroutes ainsi que les valeurs moyennes et extrêmes mesurées par FERREDECO en 2013 et 2014 sont représentées à la Figure 36.

Tableau XXIX : Comparaison des valeurs de LA, M_{DE} et M_{DE}+LA des échantillons recyclés avec les spécifications de Qualiroutes.

				LA (%)	M _{DE} (%)	M _{DE} +LA (%)
Valeurs seuils Qualiroutes	Réseaux IIb et III			40	50	80
	Réseaux I et IIa			40	35	65
Mesures Aperrout	Centre I	Mixte 0/32	Éch. a	36	34.5	70.5
		Mixte 0/32	Éch. b	39	40.2	79.2
	Centre II	Mixte 0/32		42	49.5	91.5
	Centre III	Mixte 0/32		46	50.5	96.5
	Centre IV	Mixte 0/40		25	22.5	47.5
		Béton 0/40		29	23.5	52.5
	Centre V	Mixte 0/32		37	35.5	72.5
		Béton 0/32		32	31	63
	Centre VI	Mixte 0/32		27	37.5	64.5
Moyenne FEREDCO	2013			38.9	39	77.9
	2014			39.6	39.4	78.9

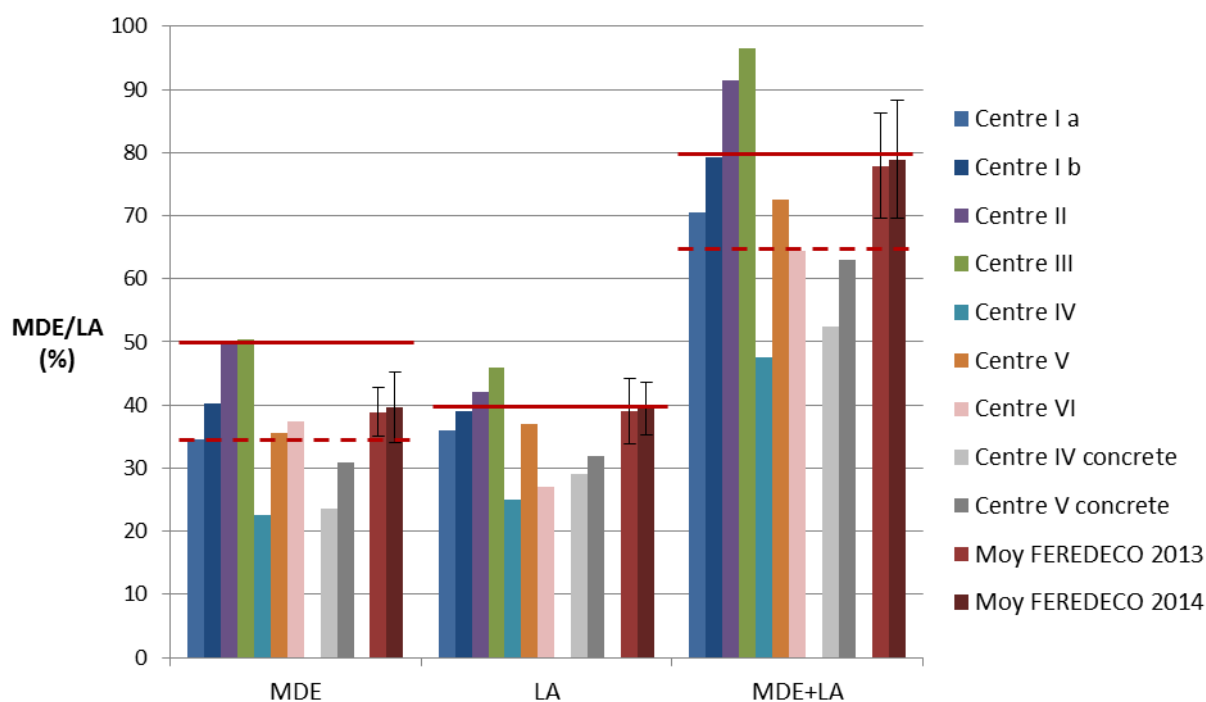


Figure 36 : Comparaisons des valeurs mesurées de M_{DE}, LA et M_{DE}+LA avec les valeurs seuils de Qualiroutes et les moyennes FEREDCO.

Deux échantillons (issus des Centres II et III) ne satisfont pas aux exigences de Qualiroutes pour les routes du réseau secondaire (IIb et III). Le critère M_{DE}+LA est déterminant en ce qui concerne l'échantillon Ia, puisqu'il limite son utilisation au réseau secondaire alors que cet échantillon satisfaisait à chacun des deux critères M_{DE} et LA pour l'utilisation dans le réseau primaire.

A la Figure 36, les valeurs mesurées sont également comparées aux valeurs moyennes mesurées en 2013 et 2014 par FERREDECO. Les résultats sont cohérents, même si des valeurs supérieures aux maxima et inférieures aux minima ont été mesurées, montrant une variabilité encore plus importante des propriétés des granulats.

1.5.6 Essais liés aux cycles gel–dégel

Un essai de sensibilité au gel et au dégel (selon la norme 1367-1, voir §1.1.5.2) a été mené sur les différents échantillons de granulats traités.

Avant de réaliser le test proprement dit, un essai d’absorption d’eau a été effectué sur les fractions 0.063/4 et 4/31.5 des différents échantillons recyclés. En effet, en Wallonie, un échantillon est considéré comme résistant au gel–dégel si la valeur de WA_{24} est inférieure à 2%. Il ne doit alors pas subir d’essai de sensibilité au gel–dégel. Le choix de la fraction à utiliser (0.063/4 ou 4/31.5) dépend de la granularité du matériau. Dans le cadre de ce projet, les deux fractions ont été testées.

Les valeurs du coefficient d’absorption d’eau WA_{24} mesurées varient de 4.7 à 12.2 %, ce qui est bien supérieur à la limite de 2% fixée par la norme comme valeur maximale assurant un caractère non gélif. Les matériaux présentent donc un risque de sensibilité au gel–dégel. Les résultats sont détaillés au Tableau XXX et représentés à la Figure 37.

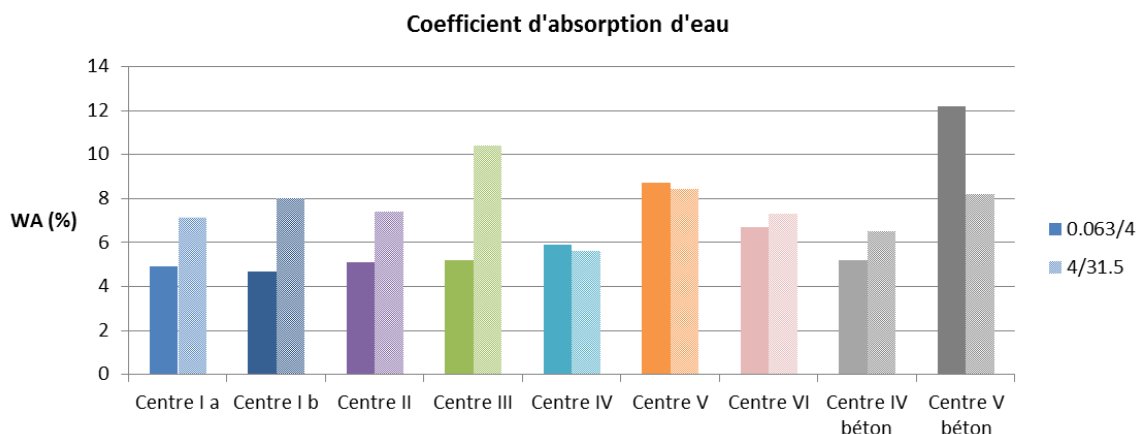


Figure 37 : Résultats de l’essai d’absorption d’eau, effectué sur les fractions 0.063/4 et 4/31.5 des recyclés.

On observe que le coefficient d’absorption d’eau est en général plus élevé lorsqu’il est mesuré sur la fraction grossière. Des différences de plus de 4% peuvent apparaître pour un même échantillon. Une analyse plus détaillée de la corrélation entre les coefficients d’absorption pour les deux fractions ainsi qu’entre le coefficient d’absorption et les résultats de l’essai de sensibilité au gel–dégel sera effectuée au paragraphe 2.1.2.1.

Le coefficient de perte au gel–dégel F calculé par l’essai de sensibilité au gel et au dégel a été calculé pour l’ensemble des échantillons. Les valeurs de F sont détaillées dans le Tableau XXX et représentées à la Figure 38. Le pourcentage de fines (f) produites durant l’essai est également représenté.

Tableau XXX : Résultats des essais de sensibilité aux cycles de gel-dégel et d'absorption d'eau menés sur les échantillons traités.

			Coefficient d'absorption d'eau (%)		Essai de sensibilité aux cycles de gel-dégel	
			0.063/4	4/31.5	F (%)	f (%)
Valeurs seuils Qualiroutes			2	2	2	-
Mesures Aperrou	Centre Ib	Mixte 0/32	4.7	8	9.4	0.4
	Centre II	Mixte 0/32	5.1	7.4	15.21	3.99
	Centre III	Mixte 0/32	5.2	10.4	18.11	2.78
	Centre IV	Mixte 0/40	5.9	5.6	7.51	0.47
		Béton 0/40	5.2	6.5	6.37	0.45
	Centre V	Mixte 0/32	8.7	8.4	3.99	0.36
		Béton 0/32	12.2	8.2	11.57	0.23
	Centre VI	Mixte 0/32	6.7	7.3	9.31	0.51

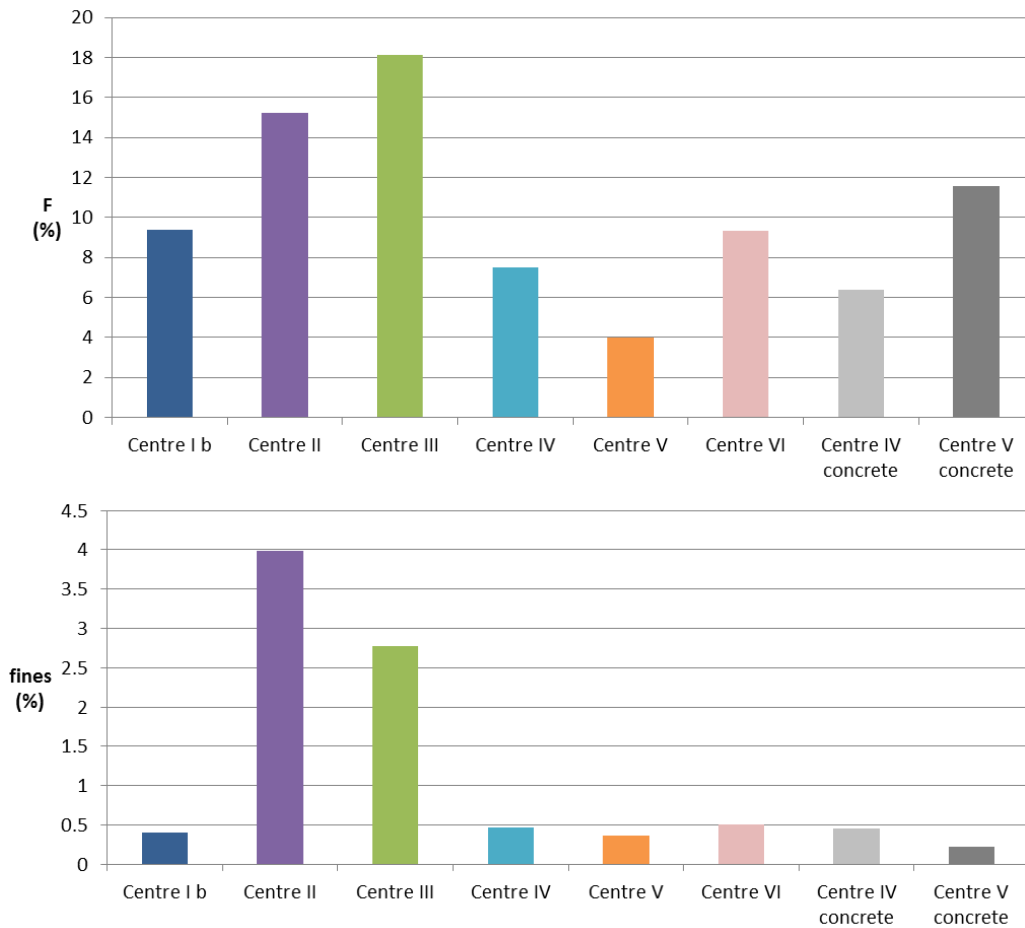


Figure 38 : Résultats de l'essai de résistance aux cycles de gel-dégel mené sur les échantillons traités et teneur en fines (f-%) après l'essai.

A la Figure 38, on observe qu'aucun des granulats recyclés testés n'obtient un résultat sous le seuil du critère de 2% fixé par Qualiroutes : les résultats varient entre 4 et 18%. Les granulats de béton recyclé ne semblent pas significativement plus performants que les granulats mixtes à cet essai.

Cette constatation concorde bien avec les observations des producteurs de recyclés : quasiment aucun granulat secondaire ne parvient à atteindre ce critère de résistance au gel-dégel. Cette observation est également valable pour les granulats créés à partir de recyclés de béton à hautes performances (plus de 90% de déchets de béton), pourtant fréquemment utilisés avec succès en fondation et sous-fondation dans certains autres régions et pays. Le critère gel-dégel imposé par Qualiroutes aux granulats recyclés est donc plus que probablement trop sévère pour pouvoir être appliqué en pratique.

Pour cette raison, après une étude bibliographique sur ce qui se faisait dans les autres pays d'Europe et d'Amérique, le CRR a introduit auprès de la Région wallonne une proposition afin de modifier le critère gel-dégel et de le rendre atteignable par les meilleurs granulats recyclés. Selon cette proposition, inspirée du critère allemand, un granulat serait accepté si l'un des critères suivants est rempli :

- $F \leq 4\%$
ou
- $F \leq 10\%$, à condition que les recyclés soient protégés des venues d'eau et que $f \leq 2\%$
(où f est la teneur en fines produites durant l'essai et non la teneur totale en fines).

Selon ces critères, deux granulats mixtes parmi ceux testés dans le cadre de cette étude et un granulat de béton seraient écartés. Le cas du granulat de béton est étonnant, puisqu'il s'agit d'un granulat fabriqué à partir de béton de haute qualité et que la quantité de fines produites (f) durant l'essai est la plus faible parmi toutes celles qui ont été mesurées. Le fait que les deux granulats mixtes ne satisfassent pas à la norme semble plus logique, puisqu'il s'agit des matériaux qui avaient déjà échoué aux critères M_{DE} et LA.

Tâche 2: Mise au point d'un test spécifique aux granulats recyclés

Afin de mener à bien cette tâche, différents axes de recherche ont été investigués. Tout d'abord, l'influence des différents paramètres des essais classiques de durabilité (LA – M_{DE} – gel-dégel) sur les résultats des essais menés sur les recyclés ont été étudiés. Les résultats de ces essais classiques ont également été comparés les uns aux autres afin d'observer à quel point les performances d'un même granulats peuvent varier en fonction de la sollicitation appliquée.

Certains de ces granulats recyclés mixtes ont également été testés selon les essais préconisés par la norme française pour les matériaux utilisés en remblais. Ces essais, moins sévères que les tests classiques, visent à évaluer la dégradabilité, la friabilité et la fragmentabilité du matériau.

Pour finir, des essais au triaxial cyclique ont été menés sur les matériaux.

2.1 Modification des essais de durabilité

Avant de développer un essai spécifique aux granulats recyclés, nous nous sommes intéressés aux essais de durabilité existants (M_{DE} , LA et gel-dégel). Nous avons essayé de déterminer quels paramètres de ces essais avaient la plus grande influence sur les résultats.

2.1.1 Etude des paramètres influençant les résultats des essais de durabilité

2.1.1.1 Modification de l'essai Micro-Deval en présence d'eau (M_{DE})

Au cours de la convention Recywall (1996-1997), l'influence de différents paramètres sur les performances des recyclés mixtes à l'essai Micro-Deval avait été étudiée. Le test avait ainsi été effectué pour trois fractions différentes et deux teneurs en béton en 1996. En 1997, il avait été répété pour deux fractions et quatre teneurs en béton. Les résultats sont représentés à la Figure 39.

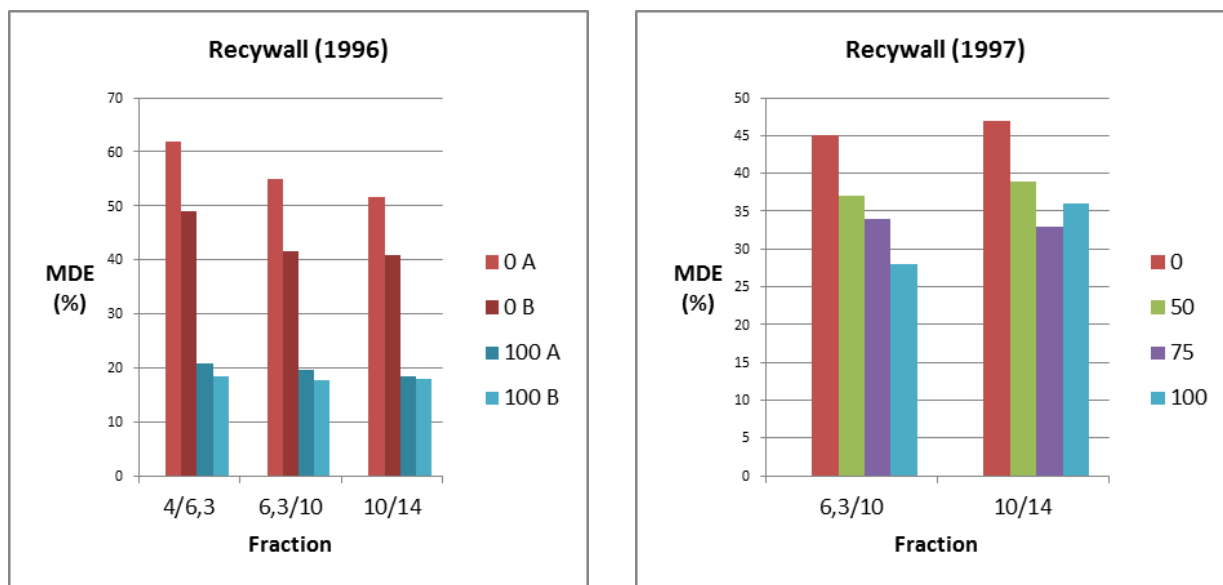


Figure 39 : Résultats des études Recywall de 1996 et 1997 portant sur l'influence de la fraction granulométrique et de la teneur en granulat de béton sur les résultats du test Micro-Deval.

Sans surprise, plus la teneur en béton du granulat mixte est importante, plus le granulat est résistant à l'attrition et moins le coefficient M_{DE} est élevé. En ce qui concerne l'influence de la granulométrie, l'étude de 1996 semble montrer une tendance à la diminution du coefficient lorsque la fraction augmente, alors que l'étude de 1997 semble mener à la conclusion opposée. La quantité d'abrasif utilisée au cours de l'essai dépend de la fraction testée (Tableau IX). On peut imaginer que celle-ci a été déterminée pour que la fraction testée ait une influence minimale sur les résultats de l'essai, ce qui semble être le cas ici.

Dans le cadre du programme de recherche Aperrou, différentes variantes ont été testées. Tout d'abord (Figure 40), l'essai a été réalisé à sec (l'essai classique étant effectué en présence de 2.5 l d'eau). Le paramètre mesuré s'appelle alors MDS (Micro-Deval à sec), et s'évalue en pourcents également.

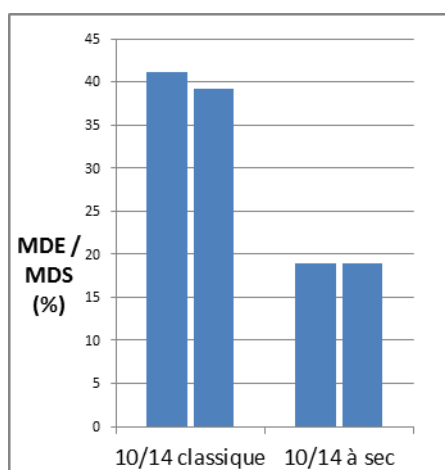


Figure 40 : Comparaison d'essais Micro-Deval avec et sans eau.

Le pourcentage de perte suite à l'essai Micro-Deval est très fortement diminué lorsque le test est effectué à sec. L'eau joue donc un rôle important dans l'attrition des granulats au cours de l'essai.

Le second paramètre dont l'influence a été étudiée est la fraction granulométrique soumise au test. En plus de la fraction [10/14] imposée dans la norme, nous avons effectué l'essai sur les fractions [4/8] et [16/32]. Pour cette dernière, le poids de l'abrasif a été augmenté à 10 kg (au lieu de 5kg), conformément à la variante de l'essai appliquée au ballast de chemin de fer (§1.1.4.2). Les résultats sont représentés à la Figure 41.

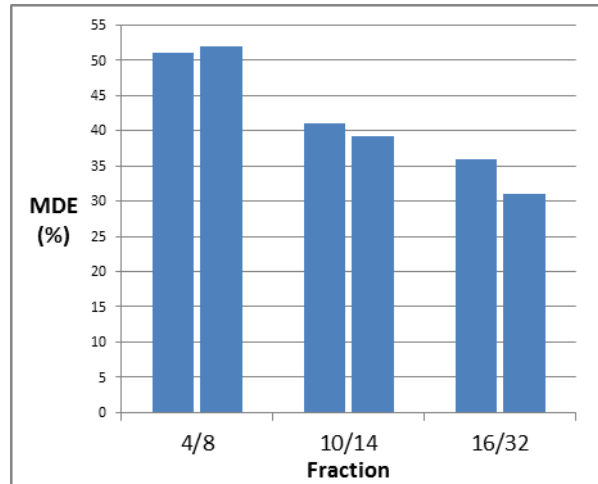


Figure 41 : Influence de la fraction granulométrique testée sur l'essai Micro-Deval.

La perte en masse de l'échantillon suite à l'essai diminue clairement lorsque la fraction granulométrique augmente. Cette diminution se vérifie malgré le fait que le poids de l'abrasif ait été doublé pour la fraction la plus importante. Cette diminution est logique puisque l'attrition est un phénomène lié à la surface des granulats, qui est d'autant plus importante que la granulométrie est faible.

2.1.1.2 Modification de l'essai Los Angeles (LA)

Comme c'était le cas pour l'essai Micro-Deval, le programme d'essai de la convention Recywall (1996-1997) a étudié l'influence de la teneur en béton et de la fraction granulaire sur les résultats des recyclés mixtes à l'essai Los Angeles. Ces résultats sont représentés à la Figure 42.

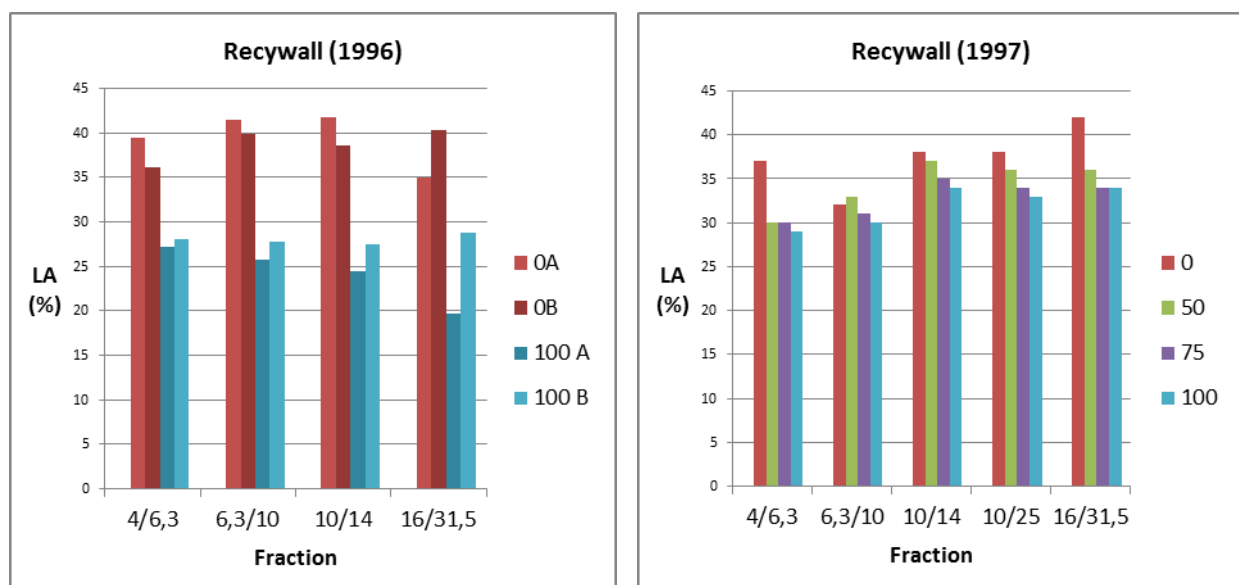


Figure 42 : Résultats des études Recywall de 1996 et 1997 portant sur l'influence de la fraction granulométrique et de la teneur en granulats de béton sur les résultats du test Los Angeles.

A nouveau, une augmentation de la teneur en béton mène clairement à la diminution du coefficient Los Angeles. En ce qui concerne l'influence de la fraction granulométrique sur les résultats, les essais ne mènent pas à une conclusion simple : l'évolution du coefficient LA en fonction de la fraction granulométrique montre des tendances différentes pour chaque échantillon. A nouveau, le nombre de boulets utilisé est adapté en fonction de la granulométrie, ce qui mène à une relative invariabilité des résultats en fonction de la fraction testée.

Dans le cadre du projet Aperrout, des tests ont été réalisés sur différentes fractions des échantillons Ib, II et III afin d'estimer l'influence de la granulométrie sur les résultats de l'essai Los Angeles (Figure 43). Pour la plupart des essais menés sur la fraction 16/32, la quantité d'abrasif a été augmentée à 14 boulets, comme préconisé dans la norme et comme précédemment réalisé dans les études Recywall. Pour comparaison, un seul essai a été mené, sur la fraction 16/32 de l'échantillon Ib, en maintenant la quantité d'abrasif à 11 boules de 430 g sont ajoutées aux 5 kg de granulats.

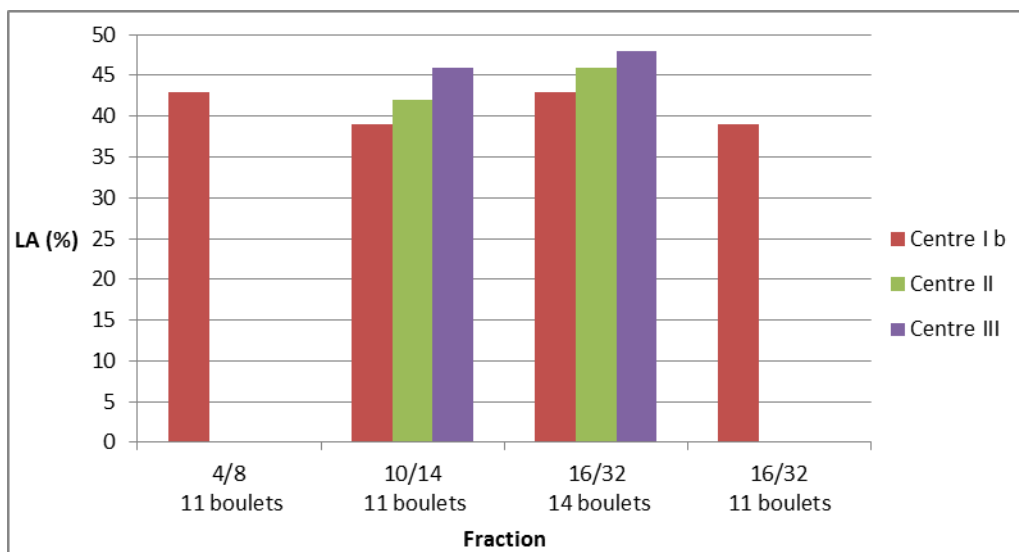


Figure 43 : Résultats des échantillons traités des Centres Ib, II et III à l'essai Los Angeles modifié avec des fractions et des charges d'abrasif variables.

Pour une même charge abrasive, on observe une légère tendance à la diminution des pertes lorsque la granulométrie augmente. Cette tendance est beaucoup moins marquée que dans le cas de l'essai Micro-Deval. A l'inverse, lorsque la charge d'abrasif est augmentée, en accord avec la norme, à 14 boulets pour la fraction 16/32, on observe une augmentation des pertes par rapport à l'essai de référence.

2.1.1.3 Modification de l'essai gel-dégel

Deux variantes du test normalisé de résistance aux cycles de gel-dégel ont été testées. La première consiste à ne pas effectuer l'essai sur l'échantillon saturé, mais plutôt sur un échantillon égoutté pendant une minute avant l'essai. La seconde variante consiste à effectuer l'essai sur un échantillon ayant déjà subi le test : après les 10 cycles de gel-dégel prescrits par la norme, l'échantillon est à nouveau tamisé pour isoler la fraction 8/16 et est soumis à 10 cycles de gel-dégel supplémentaires. Cette dernière variante a été proposée lors du comité de parrainage pour réduire la valeur du coefficient de perte au gel-dégel des granulats, et ainsi potentiellement pouvoir atteindre la valeur de 2% imposée par la norme. Les résultats sont représentés à la Figure 44, ainsi que la quantité de fines produites (f) durant les essais.

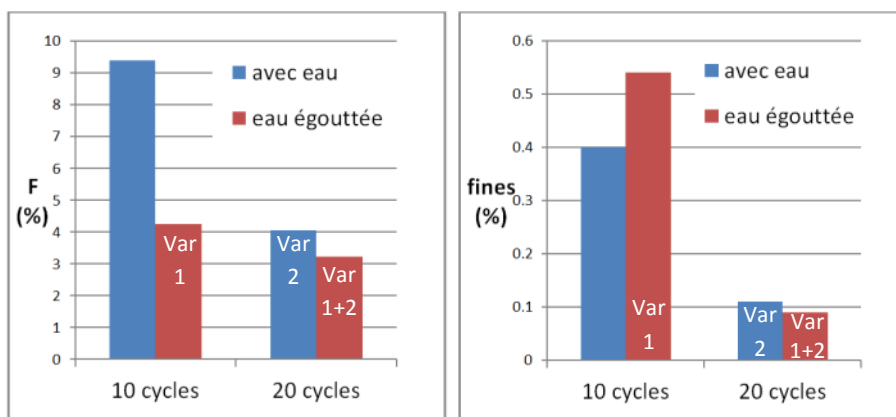


Figure 44 : Résultats du test de résistance aux cycles de gel-dégel réalisé sur l'échantillon du Centre Ib, ainsi que des tests réalisés avec les variantes « sans eau » et « 20 cycles » : coefficient de perte F (%) et teneur en fines produites.

Les variantes apportées à l'essai permettent effectivement de réduire de façon importante le coefficient de perte F (avec des valeurs respectives de 4.2% et 4.1%, alors que le coefficient calculé selon l'essai standard s'élève à 9.4%), mais cela ne suffit pas à obtenir une valeur inférieure à la limite de 2% fixée par le Qualiroutes. Même la combinaison de ces deux variantes donne une valeur qui reste supérieure à cette limite (3.2%).

De plus, si ces variantes permettent bien de réduire le coefficient de perte, rien ne prouve qu'elles permettent réellement une meilleure approche du comportement réel du granulat lorsqu'il est soumis au gel. En particulier, le fait d'estimer la perte au gel sur un granulat ayant déjà subi une première fois les 10 cycles de gel-dégel ne pourrait représenter que le cas de granulats mis en place après avoir subi un hiver rigoureux durant leur stockage. Si cette situation peut représenter la réalité dans quelques cas, elle ne pourra pas, pour des raisons logistiques, être imposée de façon systématique à tous les producteurs.

Une autre approche relative à l'essai de résistance au gel-dégel consiste à s'intéresser à la teneur en fines produites (f), à l'instar du critère allemand. Celui-ci stipule que le coefficient F peut être accepté jusque 10% pour des granulats recyclés, à condition que la teneur en fines (f) de l'échantillon après essai soit inférieure à 2% et que la somme de cette teneur et de la teneur en fines de l'échantillon initial soit inférieure à 5%.

Les teneurs en fines (f) mesurées après l'essai sont toutes inférieures à 1% (Figure 38). Le critère allemand pourrait donc être vérifié si la teneur en fines (f) initiale était inférieure à 4%. Dans le cas de l'échantillon considéré, ce n'est pas le cas car la teneur mesurée est de 8,3% (Tableau XXVIII). Néanmoins, un simple criblage du matériau visant à évacuer les éléments fins excédentaires pourrait conduire à un granulat suffisamment résistant au gel-dégel sur base de ce critère. Il serait utile d'effectuer des recherches sur les études qui ont été menées avant l'établissement de ce critère allemand, afin de voir s'il est vraiment représentatif du comportement réel des granulats recyclés.

2.1.1.4 Influence de la nature des matériaux sur les résultats aux essais de durabilité

Des essais de durabilité ont été menés sur des échantillons de matériaux purs, afin de déterminer à quel point la composition des recyclés était susceptible d'influencer les résultats.

Les échantillons testés ont été obtenus à partir de la fraction supérieure à 40 mm des échantillons bruts M 5284 A et M 5284 C. Après criblage, les échantillons ont été triés visuellement avant d'être concassés par percussion.

Etant donné la faible quantité de matériaux pouvant être obtenus par tri visuel, seuls les essais Micro-Deval et gel-dégel ont été réalisés, en effectuant seulement une partie de l'essai lorsque la quantité disponible était insuffisante. Les résultats sont détaillés au Tableau XXXI, où ils sont comparés à la moyenne des résultats obtenus sur les recyclés ainsi qu'aux résultats mesurés sur les matériaux bruts traités à l'aide du protocole expérimental (voir Tâche 5). Les résultats pour l'essai Micro-Deval sont représentés à la Figure 45.

Tableau XXXI : Résultats des essais Micro-Deval et Gel-dégel effectués sur des matériaux purs.

	Micro-Deval	Gel-dégel	
	M _{DE} (%)	F (%)	fines (%)
Bétons + mortiers	55	30.77	2.46
Briques	69	6.96	0.68
Pierres naturelles	17	1.77	0.31
Céramiques	20	3.93	0.3
Mixtes (brut+ simple concassage)	54.5		
Mixtes (brut+ double concassage)	45	10.81	0.67
<i>Moyenne recyclés mixtes</i>	<i>39.28</i>	<i>10.59</i>	<i>1.42</i>
<i>Moyenne recyclés de béton</i>	<i>27.25</i>	<i>8.97</i>	<i>0.34</i>

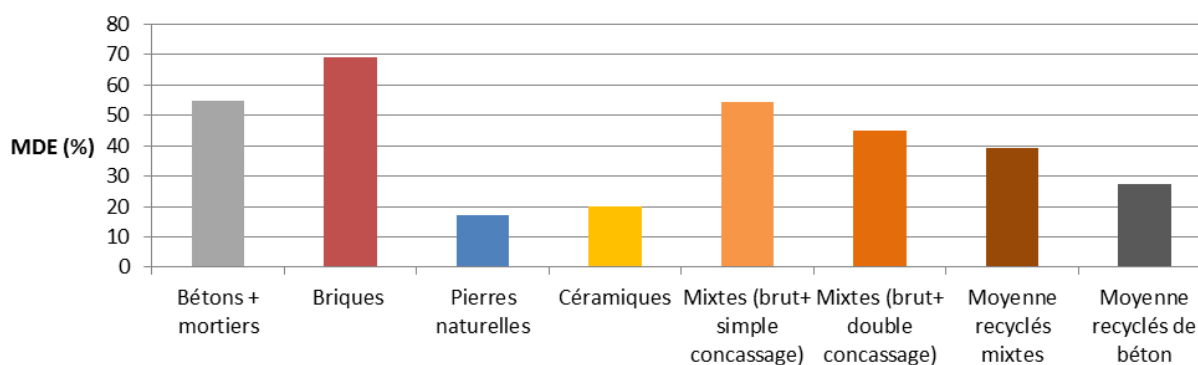


Figure 45 : Résultats de l'essai Micro-Deval sur matériaux purs et comparaison avec des mesures effectuées sur des granulats bruts traités par protocole expérimental et avec les résultats moyens mesurés sur granulats recyclés.

Les bétons, et surtout les briques, présentent un coefficient M_{DE} très élevé, alors que les pierres naturelles et les céramiques présentent un coefficient très faible ($\leq 20\%$). Les matériaux recyclés contiennent des pierres naturelles (entre 9 et 25%), qui compensent probablement en partie les valeurs élevées observées pour leurs constituants principaux que sont la brique et le béton. Néanmoins, les valeurs mesurées semblent indiquer que les matériaux purs testés sont particulièrement fragiles (ou que le traitement qui leur a été appliqué est insuffisant). Les résultats confirment néanmoins que ce sont les briques qui ont l'impact le plus néfaste sur les performances des matériaux mixtes.

Les résultats mesurés pour l'essai de sensibilité au gel-dégel sont présentés à la Figure 46.

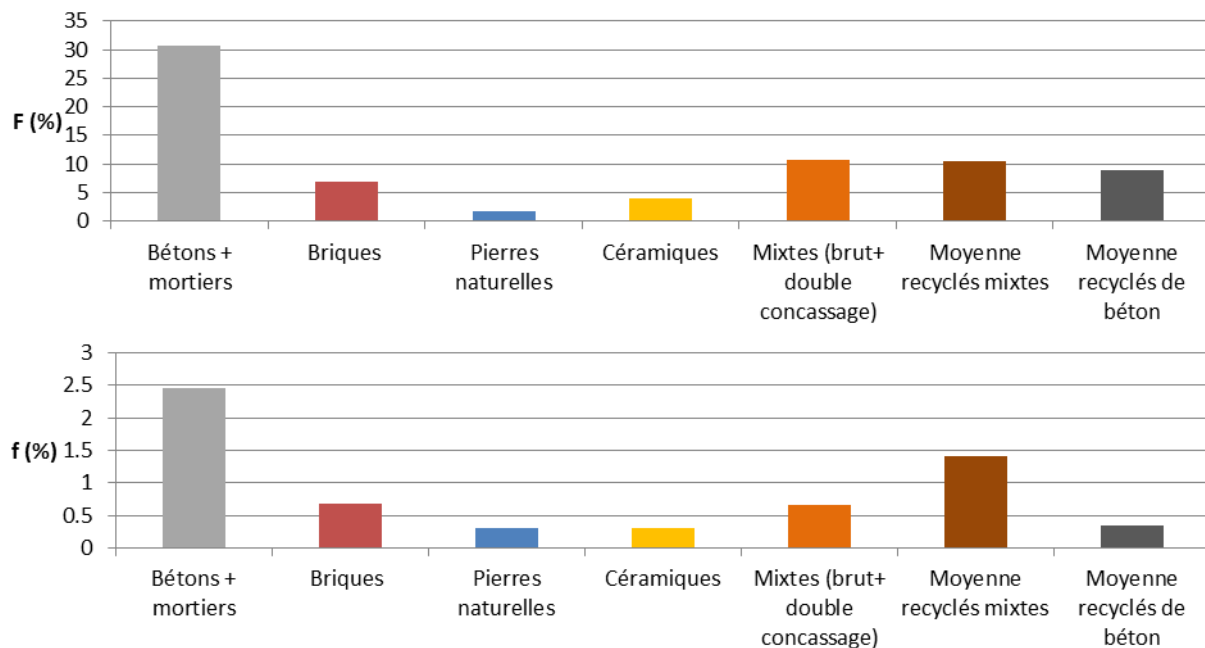


Figure 46 : Coefficient de sensibilité au gel-dégel F (%) et teneur en fines produites f (%) mesurés sur matériaux purs et comparaison avec des mesures effectuées sur des granulats bruts traités par protocole expérimental et avec les résultats moyens mesurés sur granulats recyclés.

Les bétons et mortiers purs testés ici présentent un coefficient F supérieur à 30, ce qui est extrêmement élevé. De même, la quantité de fines produites (f) est elle-aussi supérieure à la moyenne. Même si les essais réalisés sur les recyclés de béton avaient montré que ceux-ci n'étaient pas significativement plus performants vis-à-vis de l'essai de résistance au gel-dégel (Figure 38), ces pertes importantes sont trop élevées pour être représentatives des résultats obtenus sur les recyclés de béton. Comme hypothèse pour expliquer ces valeurs élevées, outre le fait que les recyclés de béton contiennent une part importante de pierres naturelles, on peut supposer que le béton présent dans les déchets bruts d'origine était probablement de mauvaise qualité.

2.1.2 Corrélation entre les résultats des essais

2.1.2.1 Essais d'absorption (WA_{24}) et de sensibilité au gel-dégel

Comme décrit au chapitre 1.1.5.1, l'essai d'absorption peut être utilisé comme essai de sélection avant de réaliser l'essai de résistance au gel-dégel et peut être effectué sur la fraction 0.063/4 ou la fraction 4/31.5 du granulat, en fonction de sa granularité.

En pratique, l'essai d'absorption et l'essai de sensibilité au gel-dégel sont rarement appliqués sur les mêmes matériaux. En effet, l'absorption d'eau des granulats naturels WA_{24} étant généralement inférieure ou égale à 2%, ils sont acceptés sans être soumis à l'essai de sensibilité au gel-dégel. A l'inverse, les granulats recyclés, présentant en général des valeurs plus élevées d'absorption d'eau, sont souvent soumis directement à l'essai de sensibilité au gel-dégel.

Toutes les valeurs d'absorption d'eau mesurées dans cette étude (Figure 37, Tableau XXX) sont largement supérieures à cette limite de 2%. Tous les granulats sont donc considérés par la norme comme

potentiellement sensibles au gel-dégel, ce qui est confirmé par les valeurs relativement élevées obtenues pour le coefficient de perte au gel-dégel F. La Figure 47 compare les résultats de l'essai d'absorption obtenus pour les deux fractions des mêmes granulats.

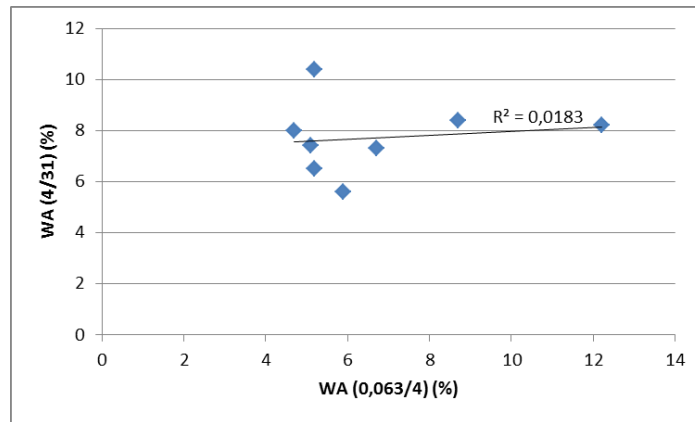


Figure 47 : Comparaison entre les coefficients d'absorption d'eau mesurés sur les fractions 0.063/4 et 4/31.5 des recyclés (mixtes et de béton).

Sur base des essais réalisés, il n'existe pas de corrélation claire entre les absorptions d'eau mesurées sur les fractions 0.063/4 et les fractions 4/31.5. Les valeurs sont en général plus élevées pour les mesures effectuées sur la fraction grossière (4/ 31.5).

A la Figure 48, on observe que la corrélation entre les coefficients d'absorption d'eau et le coefficient de pertes au gel-dégel F n'est pas évidente, quelle que soit la fraction testée. Elle est néanmoins plus cohérente pour la fraction plus grossière des granulats. En ce qui concerne la fraction 0.063/4, on constate en effet que des absorptions relativement faibles (<6%) peuvent correspondre à des coefficients F supérieurs à 15%.

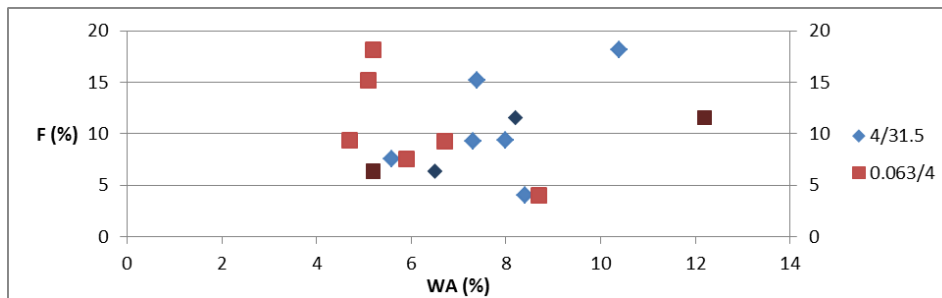


Figure 48 : Comparaison entre les résultats de l'essai de sensibilité au gel-dégel (F) et l'absorption d'eau mesurée sur deux fractions des recyclés. Les points plus foncés correspondent aux échantillons de recyclés de béton.

2.1.2.2 Coefficient de gel-dégel et teneur en fines

Pour chaque essai de sensibilité au gel-dégel, la teneur en fines produites (f) durant l'essai a été mesurée. Nous avons comparé cette teneur au coefficient de sensibilité F pour chaque échantillon (Figure 49).

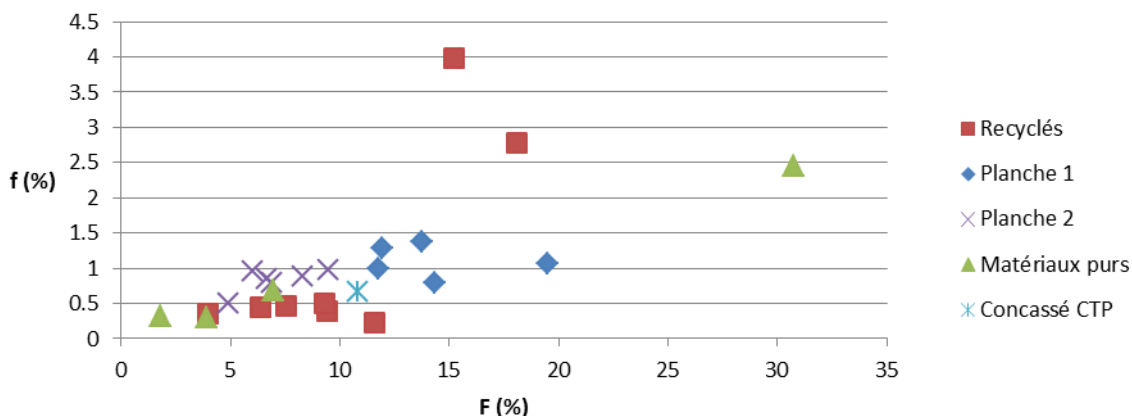


Figure 49 : Comparaison entre les résultats de l'essai de sensibilité au gel-dégel (F) et la teneur en fines produite durant chaque essai (f).

La corrélation globale entre les deux paramètres est relativement faible. Les résultats varient fortement en fonction de l'origine des granulats.

2.1.2.3 Essais M_{DE} et LA

En théorie, les essais Los Angeles et Micro-Deval évaluent des propriétés différentes des granulats. Le premier évalue la résistance aux impacts du matériau, tandis que le second évalue leur résistance à l'usure par attrition (voir §§ 1.1.4.1-1.1.4.2). Les résultats de ces essais pour les différents matériaux recyclés testés dans le cadre du projet (y compris dans les planches d'essai de la Tâches 7) sont comparés à la Figure 50.

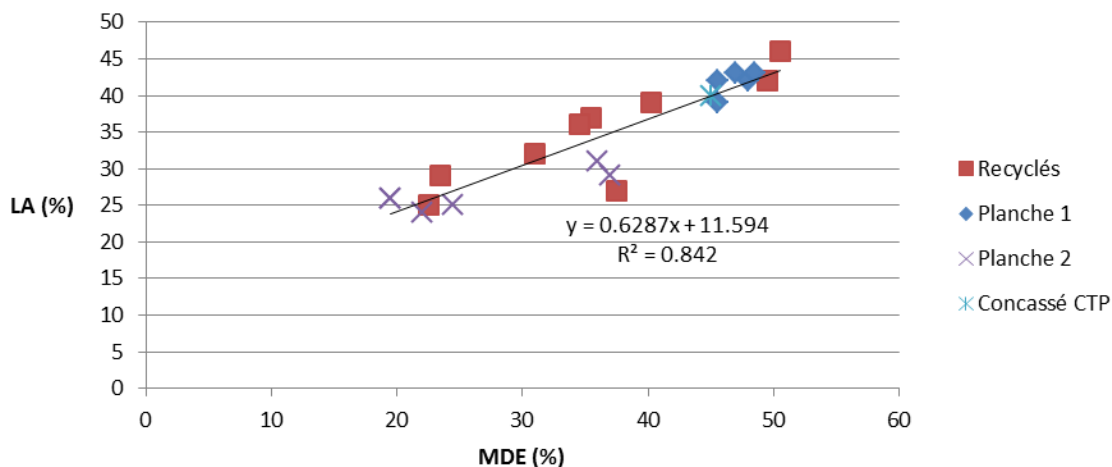


Figure 50 : Comparaison des résultats des essais LA et M_{DE} pour tous les recyclés testés dans le cadre du projet.

On observe que la corrélation entre les résultats des deux essais est très bonne, puisqu'on a $R^2=0.842$. De façon assez surprenante, on n'observe pas de différences significatives pour les recyclés de béton ou pour les matériaux des planches d'essai, dont certains ont été soumis aux intempéries durant un hiver.

Si on compare les résultats de l'essai M_{DE} à la somme des résultats $M_{DE}+LA$ (Figure 51), la corrélation entre les valeurs est encore meilleure.

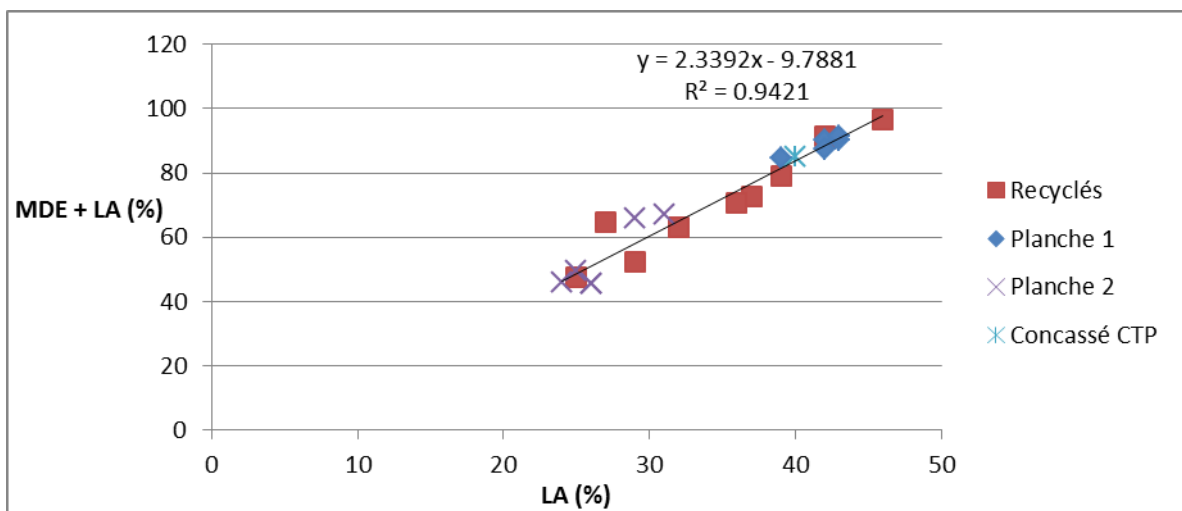
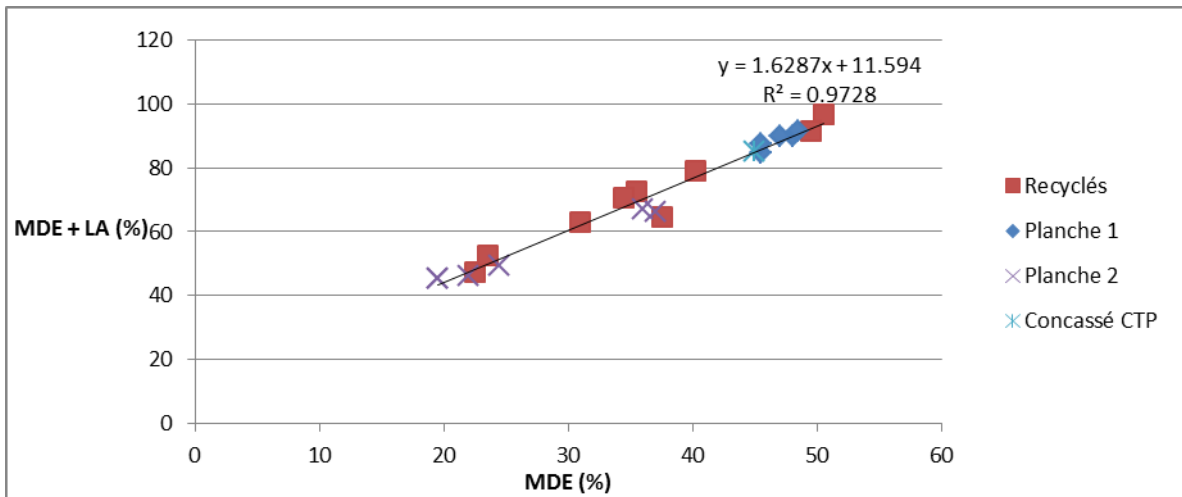


Figure 51: Comparaison des valeurs de M_{DE} et $M_{DE}+LA$ pour tous les recyclés testés dans le cadre du projet.

Cette bonne correspondance entre valeurs de M_{DE} et LA pourrait quelque peu relativiser l'intérêt d'effectuer les deux essais sur les granulats. En effet, un matériau très performant à l'un de ces essais a de très fortes chances de satisfaire également à l'autre critère. Il pourrait être envisageable d'établir une valeur de M_{DE} (ou LA) pour laquelle l'autre essai ne serait pas demandé.

2.1.2.4 Essais M_{DE} , LA et gel-dégel

Les résultats des essais M_{DE} et LA ont également été comparés au coefficient de perte de l'essai de gel-dégel (F) ainsi qu'à la teneur en fines produites. Les résultats sont représentés à la Figure 52.

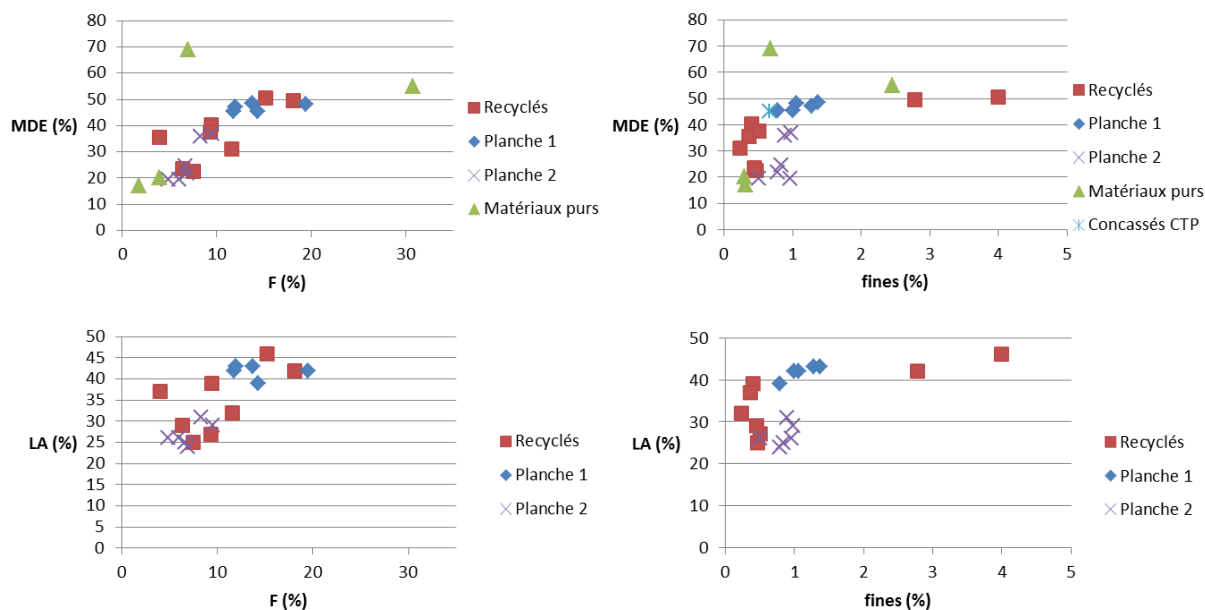


Figure 52 : Comparaison des valeurs de LA et M_{DE} avec les résultats F et f de l'essai de sensibilité au gel-dégel.

On observe une certaine corrélation positive entre les valeurs de M_{DE} et LA et le coefficient F pour les recyclés. Cette corrélation n'est pas linéaire et ne s'étend pas aux briques (qui présentent un F faible pour un M_{DE} élevé). Par contre, aucune corrélation n'est observée pour la teneur en fines produites.

2.2 Essais triaxial cyclique

2.2.1 Matériel et méthodes

L'essai triaxial cyclique a été décrit au paragraphe 1.1.4.3.

Pour l'étude des déformations permanentes, la norme NBN EN 13286-7 propose d'appliquer minimum 80 000 cycles à un niveau de contraintes constant ou d'appliquer successivement, à la même éprouvette, différents niveaux de contraintes (essai par paliers, 10 000 cycles par niveau de contraintes).

Dans le cadre de ce projet, il est proposé de mesurer les déformations permanentes selon une procédure modifiée par rapport à la norme : 2500 cycles sont appliqués à un niveau de contraintes élevé afin de simuler la mise en place du matériau et 100 000 cycles sont appliqués à un niveau de contraintes plus faible correspondant aux contraintes d'une sous-fondation après mise en place de la structure routière. Les essais sont réalisés à pression de confinement variable.

Les premiers essais réalisés en 2014 sur le granulat de débris mixtes (Centre I b) imposent les contraintes suivantes : 2500 cycles avec $\sigma_3=10$ à 110 kPa et $\sigma_{d,max}=300$ kPa et ensuite 100 000 cycles avec $\sigma_3=5-15$ kPa et $\sigma_{d,max}=50$ kPa. Les résultats sont présentés ci-après. Les essais ont été réalisés sur des éprouvettes ayant une teneur en eau de 10 et 12 % et compactées à 97 % de la densité optimale mesurée par le Proctor Modifié (NBN EN 13286-2).

Après une longue interruption due à des problèmes techniques, les essais ont repris en août 2015 sur le même granulat de débris mixtes (Centre Ib). Les pressions de confinement ont été légèrement modifiées par rapport aux essais de 2014. En effet, il a été observé que la pression de confinement initiale était

toujours légèrement supérieure à 5 kPa et qu'il était physiquement difficile de descendre sous cette valeur. Pour cette raison, la pression de confinement imposée est de 8 à 110 kPa durant 2500 cycles et ensuite 8 à 20 kPa durant 100 000 cycles. Les contraintes axiales sont les mêmes que pour les essais de 2014 : $\sigma_{d,max}=300$ kPa durant les premiers 2500 cycles et ensuite $\sigma_{d,max}=50$ kPa durant 100 000 cycles.

Pour un même granulat mixte (Centre Ib), l'influence sur les déformations permanentes de la teneur en 0-2 mm et de la teneur en eau est étudiée, ainsi que l'influence de cycles gel-dégel. Le gel-dégel consiste à appliquer à l'éprouvette 10 cycles gel-dégel comme définis dans la norme EN 1367-1.

Pour l'influence de la teneur en éléments fins, deux mélanges ont été étudiés : le mélange d'origine (29,1 % fraction 0-2 mm) et un mélange reconstitué contenant 20 % de la fraction 0-2mm.

Tableau XXXII : Granulométrie des mélanges étudiés (granulat mixte, Centre Ib).

	Mélange original	Mélange 2 - 20 % 0/2 mm
	%	%
0/2	29,8	20
2/7.1	21,9	25
7.1-14	19,9	22,7
14/20	10,7	12,2
20/..	17,7	20,2

Des essais ont été réalisés sur un granulat naturel (calcaire 0-32) à titre comparatif. Les éprouvettes de calcaire sont préparées à la teneur en eau optimale définie par le Proctor modifié (4,5 %) et compactées à 97 % de la densité optimale définie par le Proctor Modifié.

Pour les différents matériaux, les teneurs en eau optimales et densités optimales ont été déterminées par l'essai Proctor modifié. Les résultats sont donnés dans le Tableau XXXIII.

Tableau XXXIII : Résultats de l'essai Proctor Modifié.

	Granulat mixte Mélange original	Granulat mixte Mélange 2 - 20 % 0/2	Calcaire 0/32
Teneur en eau optimale	12 %	10 %	4,5 %
Densité optimale	1,9206 g/cm ³	1,9553 g/cm ³	2,3734 g/cm ³

2.2.2 Résultats

2.2.2.1 Premiers essais

Les premiers résultats obtenus (2014) montrent que les déformations permanentes augmentent avec la teneur en eau (Figure 53). Elles atteignent 2 % à une teneur en eau de 12 %, ce qui est élevé. Néanmoins, les tests montrent que les déformations permanentes évoluent surtout pendant la mise en œuvre (2500 cycles appliqués) et se stabilisent par après, lorsque les charges appliquées correspondent au trafic.

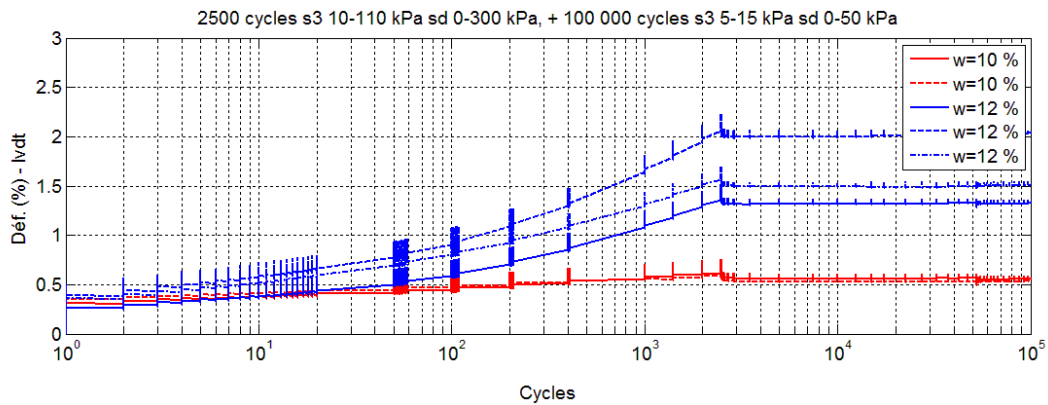


Figure 53 : Déformations permanentes sur granulats mixtes.

2.2.2.2 Essais 2015

Les résultats de ces essais sont présentés à la Figure 54. Le mélange d'origine (29,8 % de particules 0/2 mm) développe des déformations permanentes de 2,5 % qui se stabilisent au cours des 100 000 cycles.

L'influence de la teneur en éléments 0-2 mm et de la teneur en eau est détaillée au §3.2.

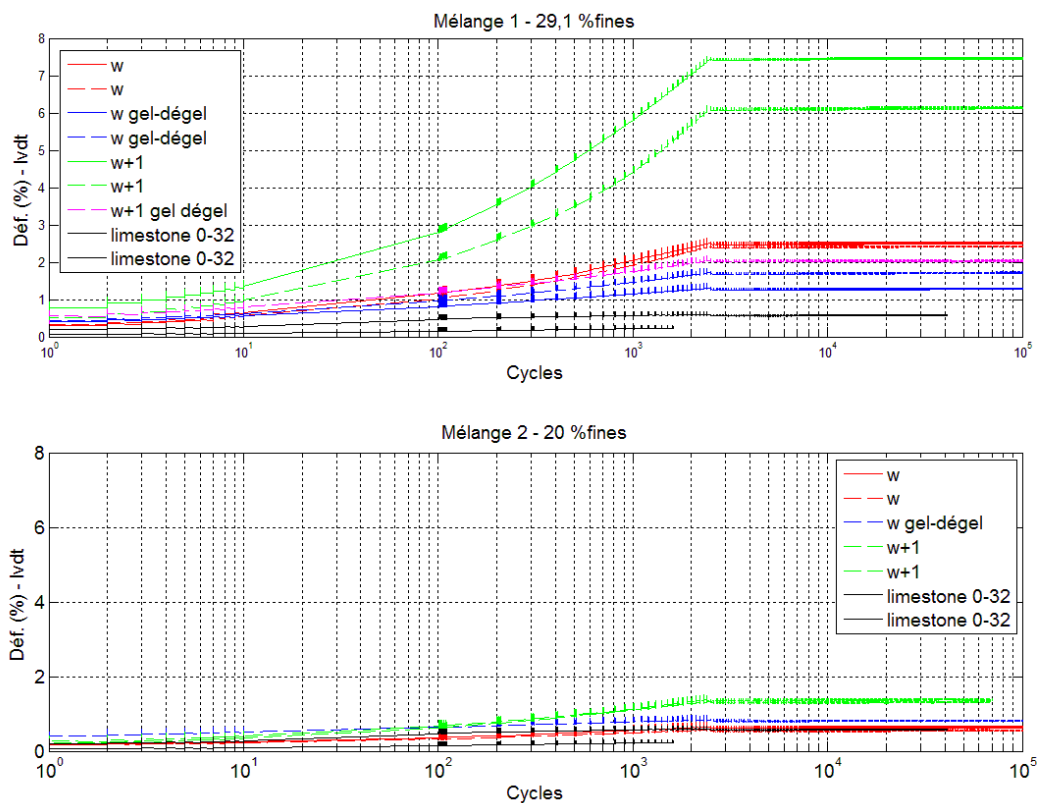


Figure 54 : Déformations permanentes sur granulats mixtes (Centre Ib) et calcaire.

L'influence de cycles gel-dégel est présentée sur la figure suivante. Pour le mélange d'origine, à 29,1 % de 0-2 mm, les déformations permanentes mesurées après l'application des cycles gel-dégel sont légèrement inférieures à celles mesurées sans l'application des cycles gel-dégel. Le contraire est observé pour le mélange à 20 % de 0-2 mm. Pour ce matériau, il n'y a donc pas influence significative des cycles gel-dégel sur les déformations permanentes mesurées avec le triaxial cyclique. On peut penser que des

particules fines se sont créées lors des cycles gel-dégel et que le matériau subit donc moins d'attrition lors de l'essai triaxial cyclique. Ceci sera à vérifier sur d'autres matériaux.

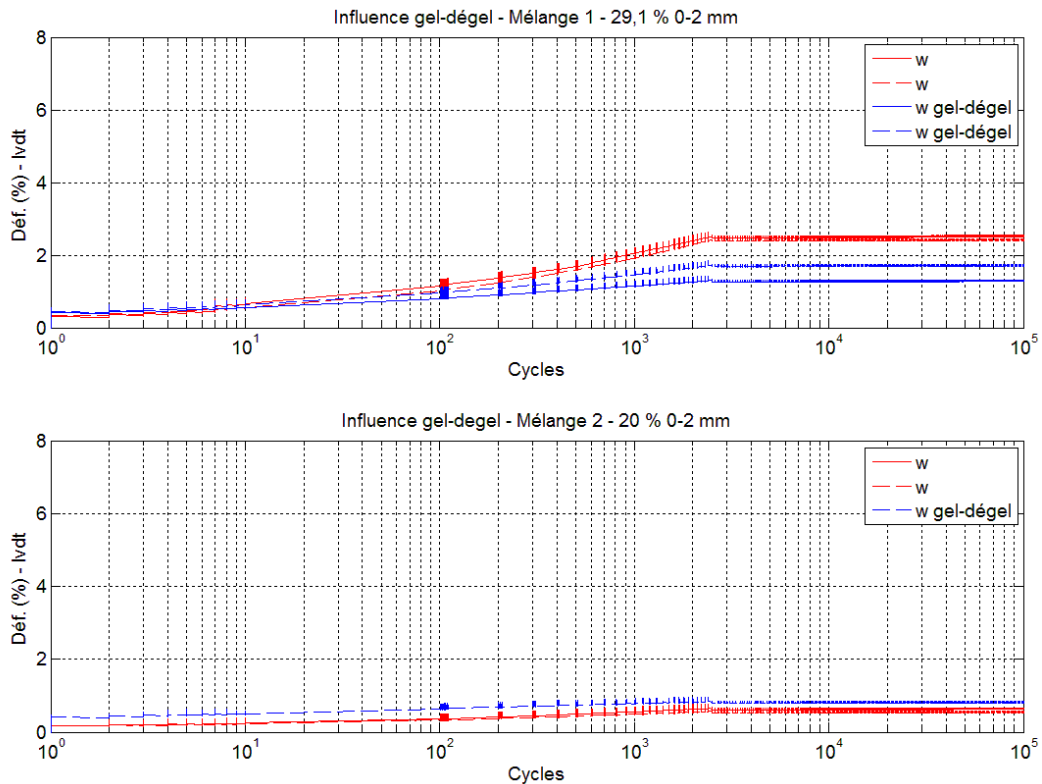


Figure 55 : Influence des cycles gel-dégel sur les déformations permanentes d'un granulat mixtes (Centre Ib).

La figure suivante compare les déformations permanentes du granulat mixte (Centre Ib) avec celles du calcaire 0/32 mm dans les mêmes conditions de compactage (97 % de la densité optimale et teneur en eau (w_{OPM})). Le matériau de référence, à la teneur en eau optimale, présente des déformations permanentes plus faibles que le granulat recyclé mixte étudié.

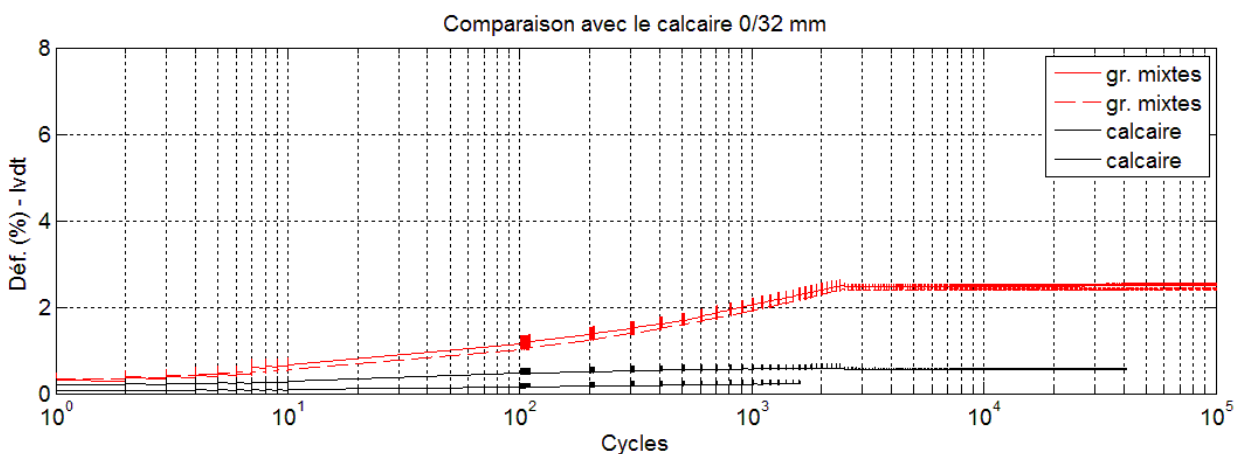


Figure 56 : Déformations permanentes d'un granulat mixtes (Centre Ib) et du calcaire de référence.

2.2.2.3 Conclusion

Les essais réalisés montrent que les déformations permanentes augmentent durant les 2500 cycles à niveau de contraintes élevé et se stabilisent ensuite. A un niveau de contraintes fixé, la valeur atteinte après 2500 cycles dépend de la teneur en eau et de la teneur en éléments fins du granulat mixte. L'influence de la teneur en eau et de la teneur en particules 0-2mm est détaillée au §3.2.

L'essai gel-dégel tel que réalisé ne semble pas avoir une influence significative sur les déformations permanentes du granulat mixte étudié. Ce point doit néanmoins être vérifié sur d'autres matériaux.

Le matériau de référence, à la teneur en eau optimale, présente des déformations permanentes plus faibles que le granulat recyclé mixte étudié. Il serait intéressant de vérifier la sensibilité des déformations permanentes du calcaire vis-à-vis de la teneur en eau. Par manque de temps, cet essai n'a pas pu être réalisé.

2.3 Essais de friabilité, dégradabilité et fragmentabilité selon la norme française

Dans le but d'évaluer la résistance des recyclés mixtes à différents types de sollicitations, nous les avons soumis à des tests préconisés par les normes françaises pour les matériaux utilisés en remblais. Ces tests, s'intéressant à la friabilité, la dégradabilité et la fragmentabilité des matériaux, sont donc a priori moins sévères que les essais de Los Angeles et Micro-Deval.

Les essais ont été menés sur deux échantillons, sélectionnés sur base de leurs valeurs Micro-Deval et Los Angeles. Le premier (Centres Ib) présente des bonnes résistances à la fragmentation et à l'attrition tandis que le second (Centre II) obtient des valeurs largement supérieures aux valeurs seuil de Qualiroutes.

2.3.1 Essai de friabilité (NF P 18-576)

2.3.1.1 Description

L'essai de friabilité ou friabilité des sables (FS) vise à évaluer l'évolution des matériaux sableux sous le trafic de chantier. Il peut s'appliquer aux sables contenus dans les matériaux naturels ou artificiels utilisés en génie civil et est mené sur la fraction 0.2/2 ou sur la fraction 0.2/4.

Le protocole de l'essai est similaire à celui de l'essai Micro-Deval en présence d'eau : 500 g de matériau, de fraction 0.2/2 ou 0.2/4, est soumis à 1500 tours à la vitesse de 100 tours/minute, en présence de 2.5 l d'eau et de 2500 g de charge abrasive. Celle-ci est répartie en différentes granulométries : 9 billes de 30 mm de diamètre, 9 billes de 18 mm de diamètre et des billes de 10 mm de diamètre, dont le nombre est adapté pour atteindre la charge totale de 2500 g.

Si m est la masse en grammes des éléments inférieurs à 0.1 mm produits durant l'essai, le coefficient de friabilité mesuré F_S est alors :

$$F_S = 100 \frac{m}{500} (\%)$$

La limite entre matériaux friables et peu friables est fixée à $F_S = 60\%$.

2.3.1.2 Résultats

Les essais ont été menés sur les deux fractions prévues par la norme : 0.2/2 et 0.2/4. Les résultats sont présentés à la Figure 57.

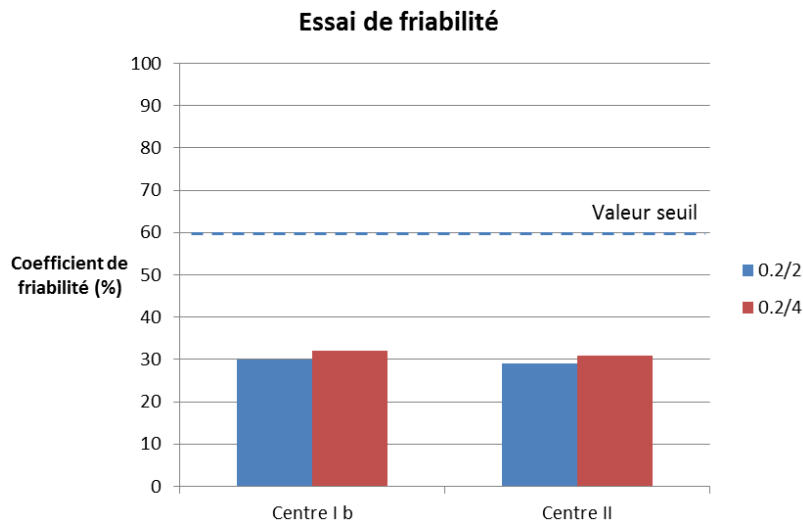


Figure 57 : Résultats à l'essai de friabilité des échantillons provenant des centres I et II.

On observe que les résultats sont bons, toutes les valeurs se situant largement en dessous de la valeur seuil de 60% considéré en France pour une application en remblai et non en sous-fondation. Les résultats sont également très semblables d'un échantillon à l'autre et d'une fraction à l'autre puisqu'ils varient entre 29 et 32%. Les résultats de l'essai de friabilité ne semblent donc pas varier avec ceux des essais Los Angeles et Micro-Deval en présence d'eau. Ceci pourrait s'expliquer par le fait que la fraction testée est différente.

2.3.2 Essai de fragmentabilité (NF P 94-066)

2.3.2.1 Description

L'essai de fragmentabilité vise à déterminer la capacité des matériaux rocheux peu résistants à être affectés par le trafic de chantier et à être compatibles avec un réemploi en remblai.

Deux fractions peuvent être testées : la fraction 10/20 (pour les marnes, argilites...) et la fraction 40/80 (pour les schistes, roches magmatiques...). Une quantité de 2 kg de matériaux est nécessaire pour l'essai, dont le principe général est présenté à la Figure 58.

La courbe granulométrique de la fraction testée est mesurée sur trois points. Ensuite, l'échantillon est introduit dans un moule CBR et soumis à 100 coups de dame Proctor Normal. Après pilonnage, un nouveau tamisage est effectué (avec 4 tamis).

Sur les courbes granulométriques mesurées, on détermine les valeurs avant et après essai du D_{10} , la dimension des grains en dessous de laquelle se situe 10% de la masse du matériau. Le coefficient de fragmentabilité FR se détermine alors selon l'expression

$$FR = \frac{D_{10} \text{ avant pilonnage}}{D_{10} \text{ après pilonnage}}$$

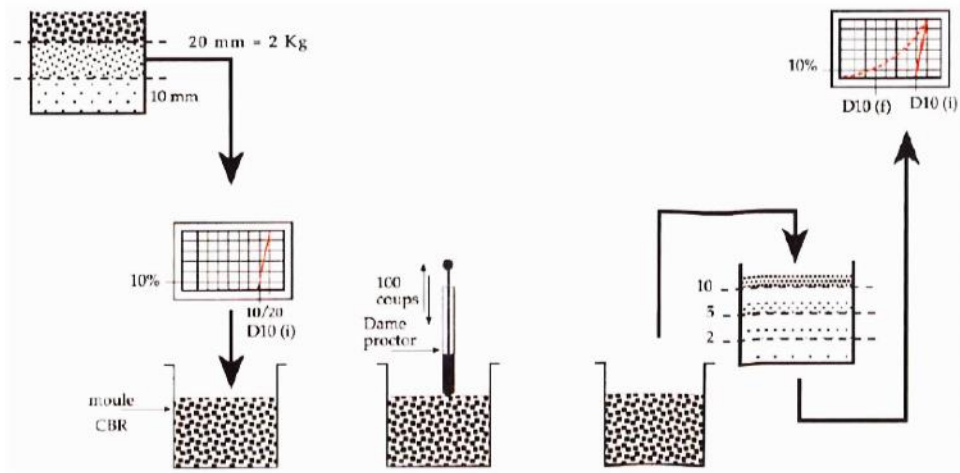


Figure 58 : Fragmentabilité (source : SETRA).

Le seuil de fragmentabilité est fixé à $FR = 7$. Au-delà de ce seuil, la roche est considérée comme fragmentable.

2.3.2.2 Résultats

Les courbes granulométriques des deux échantillons sont représentées à la Figure 59, avant et après pilonnage par la dame Proctor. Les valeurs à 10 % D_{10} , calculées pour les deux échantillons, sont détaillées dans le Tableau XXXIV et représentées à la Figure 60.

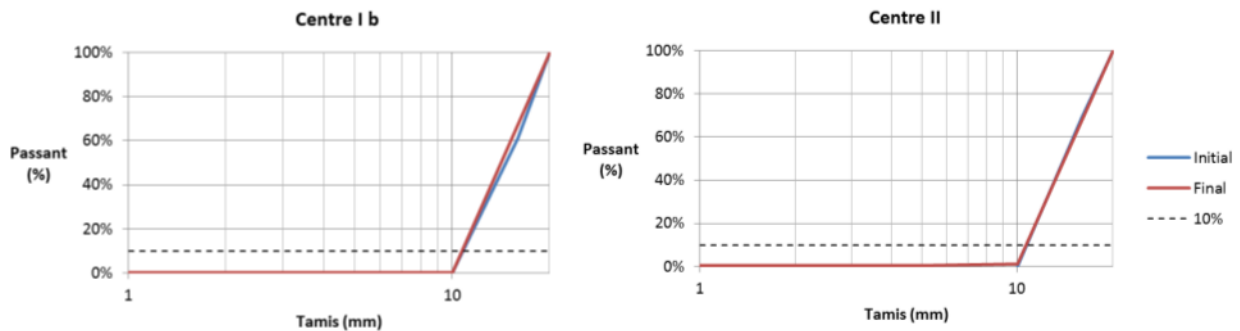


Figure 59 : Courbes granulométriques des échantillons testés avant et après pilonnage.

Tableau XXXIV : Résultats de l'essai de fragmentabilité.

	Centre I b	Centre II
D_{10} avant pilonnage (mm)	10.79	10.70
D_{10} après pilonnage (mm)	6.06	5.70
FR	1.780	1.876

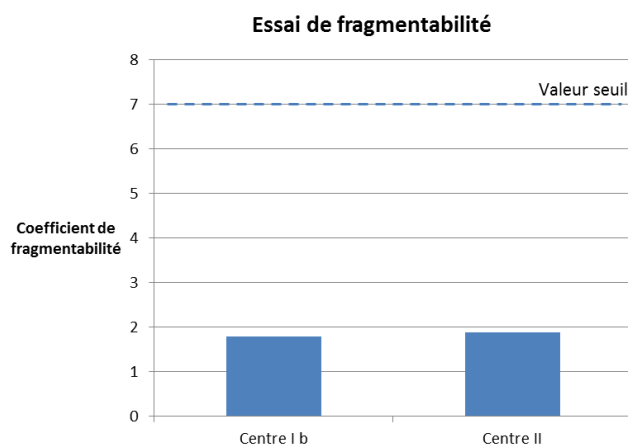


Figure 60 : Résultats de l'essai de fragmentabilité.

Ces valeurs sont largement inférieures à la valeur seuil de 7 proposée par la norme pour une application en remblai. Le matériau peut donc être considéré comme non fragmentable. On remarque également qu'il n'y a pratiquement pas de différence entre les échantillons.

2.3.3 Essai de dégradabilité (NF P 94-067)

2.3.3.1 Description

L'essai de dégradabilité vise à évaluer la sensibilité du matériau rocheux aux sollicitations hydriques, et donc le risque d'évolution à long terme sous l'action combinée de l'eau et des sollicitations mécaniques.

L'échantillon testé est identique à celui préparé pour l'essai de fragmentabilité, avec une fraction 10/20 ou 40/80 et une masse totale de 2 kg.

La granulométrie de l'échantillon est déterminée sur 3 points. L'essai consiste à soumettre l'échantillon à quatre cycles alternant 8h d'imbibition et 16h de séchage en étuve à 105°. Après l'essai, la granulométrie est à nouveau déterminée à l'aide de quatre tamis.

Sur les courbes granulométriques mesurées, on détermine les valeurs avant et après essai du D_{10} , la dimension des grains en dessous de laquelle se situe 10% de la masse du matériau. Le coefficient de dégradabilité DG se détermine alors selon l'expression :

$$DG = \frac{D_{10} \text{ du matériau avant le 1}^{\text{er}} \text{ cycle imbibition - séchage}}{D_{10} \text{ du matériau après le 4}^{\text{e}} \text{ cycle imbibition - séchage}}$$

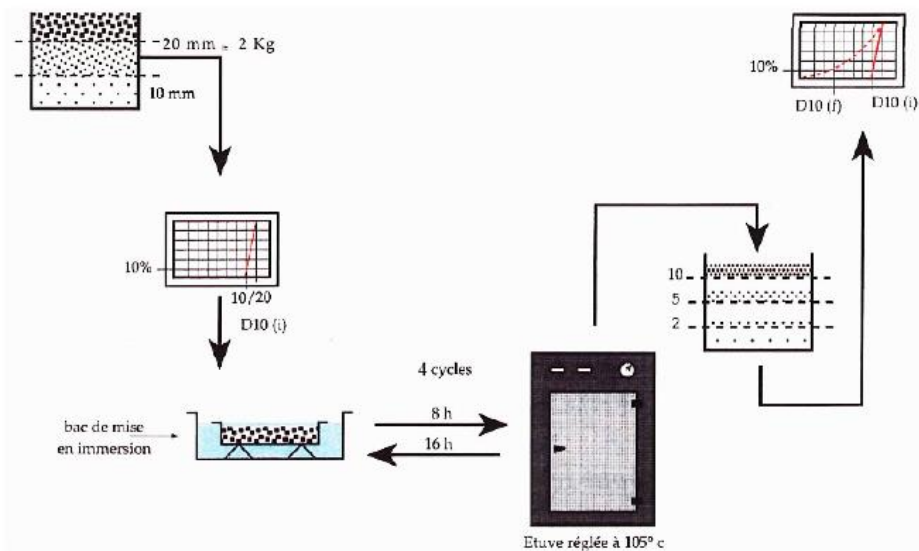


Figure 61 : Dégradabilité (source : SETRA).

Deux valeurs seuils sont retenues dans la classification française des roches (NF P11-300) pour le coefficient de dégradabilité. Les matériaux pour lesquels $DG < 5$ sont considérés comme peu dégradables, ceux pour lesquels $DG > 20$ sont considérés comme très dégradables, tandis que les matériaux présentant une valeur intermédiaire de DG sont moyennement dégradables.

2.3.3.2 Résultats

Les résultats de l'essai de dégradabilité sont présentés dans le Tableau XXXV et à la Figure 62.

Tableau XXXV : Résultats de l'essai de dégradabilité.

	Centre I b	Centre II
D_{10} avant le 1 ^{er} cycle imbibition-séchage (mm)	10.80	10.70
D_{10} après le 4 ^e cycle imbibition-séchage (mm)	10.70	10.64
DG	1.009	1.006

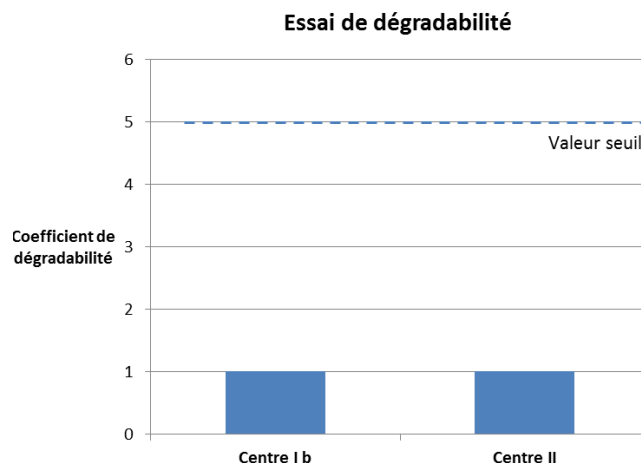


Figure 62 : Résultats de l'essai de dégradabilité.

Les valeurs du coefficient de dégradabilité sont quasiment égales à 1, ce qui signifie que les matériaux testés ne sont pas dégradables sous l'action de sollicitations hydriques.

2.3.4 Conclusion

Les deux recyclés testés présentent de bons résultats aux essais de friabilité, dégradabilité et fragmentabilité, ce qui n'est pas surprenant puisque ces essais sont initialement prévus pour une utilisation en remblais (et non en sous-fondation) et sont donc moins stricts que les essais Los Angeles et Micro-Deval. On retiendra néanmoins que les deux échantillons testés présentent des résultats similaires, et ce malgré leurs performances très différentes aux essais classiques de durabilité.

Tâche 3: Etude des paramètres néfastes

Au cours de la première année de la convention, l'étude bibliographique a montré que la teneur en éléments fins des granulats recyclés avait une influence importante sur leurs propriétés et leur durabilité. Pour cette raison, nous avons concentré nos efforts sur ce paramètre particulier et tant la fraction 0/4 des déchets bruts que la fraction 0/4 de recyclés mixtes ont été analysées en détail, chimiquement et physiquement.

3.1 Caractérisation en laboratoire des fractions 0/4 issues des différents échantillons recyclés mixtes

Les propriétés granulométriques, physiques, chimiques mais aussi de forme ont été établies sur des recyclés fabriqués en centrale (M5837 – Centres I à III) et sur le site de la première planche d'essai (voir §7.1), après compactage (CRR 11555) et après gel-dégel dans la couche superficielle (CRR 12000). Cette planche d'essai a été réalisée avec des matériaux issus du Centre III, ce qui permet également une comparaison avec des échantillons issus du stock (mais prélevés à une date différente)

Les caractéristiques physiques étudiées sont : la densité, la teneur en eau, la demande en eau ainsi que la granulométrie. Afin d'avoir une idée sur la « composition minéralogique » de ces poudres, la diffraction des rayons X (DRX) a été utilisée. Enfin, la fluorescence X (XRF) et l'analyse chimique (par voie humide et sèche) clôturent la caractérisation chimique des matériaux.

3.1.1 Caractérisation physique

Les propriétés physiques sont globalement semblables à celles des échantillons bruts (de type M5284) (voir §1.4.2.2).

Tableau XXXVI : Masses volumiques et teneur en eau des échantillons.

Echantillon	Référence ULg	Masse volumique (gr/cm ³)	Densité (pycnomètre He) (gr/cm ³)	Teneur en eau (%)
Centre Ia	M5837Af	-	2,676	3,80
Centre Ib	M5837Bf	-	2,649	6,12
Centre II	M5837Cf	-	2,648	8,82
Centre III	M5837Df	-	2,635	6,50
Planche 1 après compactage	11555CRR	1,33	2,628	8,62
Planche 1 après gel-dégel	12000CRR	1,37	2,720	0,6

La prise d'eau (Tableau XXXVII) montre également un comportement similaire pour l'échantillon prélevé après gel-dégel.

Tableau XXXVII : Variation de masse en fonction du temps pour l'échantillon prélevé après gel-dégel.

Temps (h)	Essai 1 (%)	Essai 2 (%)	Moyenne (%)
0	0	0	0
1	0,27	0,23	0,25
2	0,32	0,31	0,32
3	0,45	0,42	0,44
5	0,60	0,59	0,60
24	1,2	1,22	1,21
48	1,65	1,65	1,65
72	1,91	1,99	1,95
96	2,13	2,13	2,13
120	2,59	2,58	2,59
144	2,82	2,84	2,83
168	3,1	3,04	3,07
192	3,3	3,15	3,23
264	3,5	3,4	3,45

La courbe granulométrique de l'échantillon prélevé après gel-dégel (Figure 63) ne révèle pas spécifiquement la formation de fines (f) en quantités plus importantes.

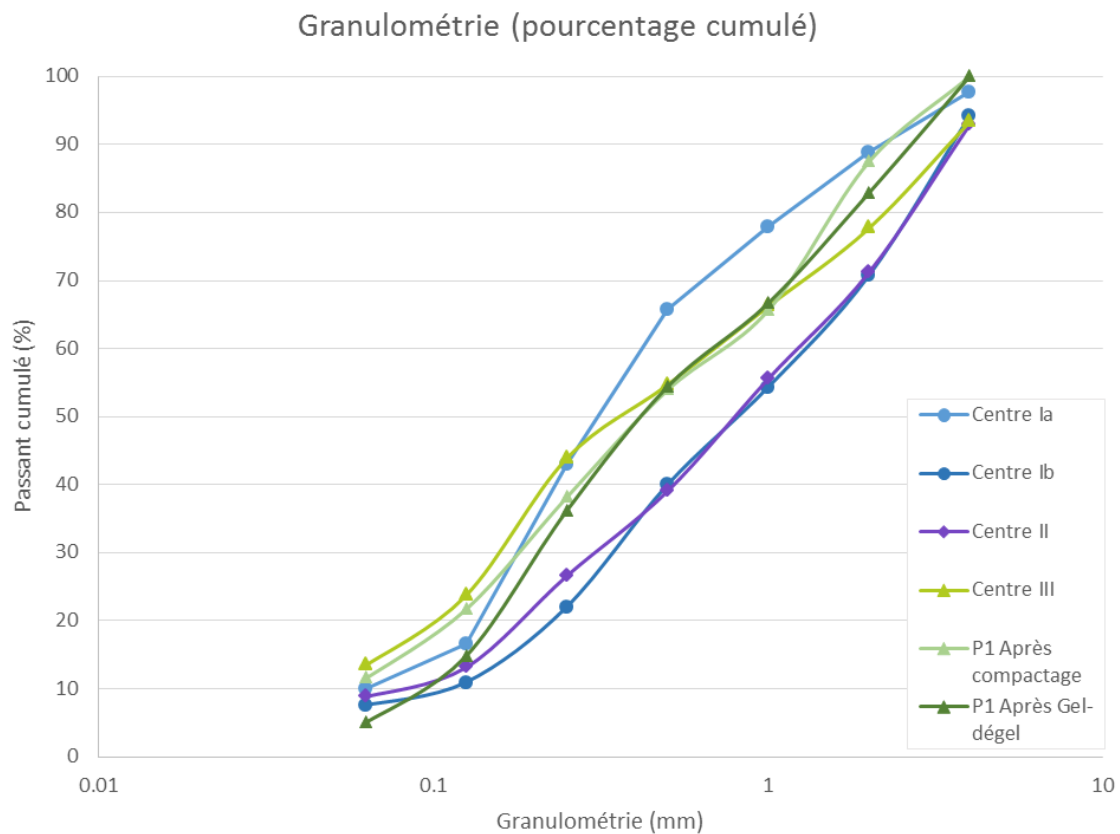


Figure 63 : Courbe granulométrique des fractions fines des échantillons.

3.1.2 Caractérisation « minéralogique » et chimique

La granulométrie trop fine de ces échantillons ne nous permettant pas une reconnaissance visuelle des différents constituants, la « caractérisation minéralogique » a été tentée au moyen de la diffraction des

rayons X (DRX). Pour ce faire, les échantillons ont subi un broyage, avant d'être soumis aux rayons X. La position, ainsi que l'intensité relative des pics du diffractogramme des poudres, ont permis de déterminer la nature des constituants (Tableau XXXVIII). L'analyse semi-quantitative, présentée à titre indicatif, a été déterminée selon le protocole décrit dans Cook *et al.* (1975).

Tableau XXXVIII : Analyses semi-quantitatives obtenue par diffraction des rayons X.

		Calcite (%)	Dolomite (%)	Quartz (%)	Plagioclases (%)	Feldspaths potassiques (%)
Centre Ia	M5837A	18	17	55	5	5
Centre Ib	M5837B	30	1	59	7	4
Centre II	M5837C	20	3	59	14	4
Centre III	M5837D	25	7	56	4	9
Planche 1 – après compactage	CRR11555	20	-	60	≥ 3	16
Planche 1 – après gel-dégel	CRR12000	17	-	74	3	6

Les diffractogrammes de poudre ne montrent pas de différences significatives entre les échantillons, sauf pour le Centre I qui contient beaucoup de composés à base de MgO. Ils sont, en effet, essentiellement composés de quartz (un peu plus pour l'échantillon prélevé après gel-dégel) et, en de plus faibles proportions, de calcite, de plagioclases et de feldspaths potassiques. Le taux élevé en feldspaths potassiques révèle la présence de quantités importantes de matériaux argileux.

Les essais de perte au feu permettent de montrer qu'il y a peu de différences entre les échantillons. Il en est de même pour les teneurs en chlorures et sulfates qui restent faibles

Tableau XXXIX : Perte au feu, teneur en sulfates et en chlorures des échantillons.

Essai	500°C	1000°C	SO ₃ ²⁻	Cl ⁻
Echantillons traités				
M5837Af	2,25	17,76	0,617	0,020
M5837Bf	2,60	12,72	0,722	0,028
M5837Cf	2,12	10,01	0,541	0,020
M5837Df	2,71	17,76	0,674	0,028
Planche 1 – après compactage	3,61	10,98	0,525	0,022
Planche 1 – après gel-dégel	2,63	9,88	0,331	0,011

La spectrométrie de fluorescence X permet une évaluation de la proportion des différents composés présents dans les échantillons (Tableau XL).

Tableau XL : Spectrométrie de fluorescence X sur les échantillons prélevés sur la première planche.

	Après compactage	Après gel-dégel
SiO ₂	60,62	64,19
TiO ₂	0,35	0,32
Al ₂ O ₃	6,44	6,43
Fe ₂ O ₃	2,89	2,75
MnO	0,06	0,06
MgO	0,97	0,97
CaO	12,35	11,87
Na ₂ O	0,11	0,14
K ₂ O	1,37	1,28
P ₂ O ⁵	0,12	0,11
LOI	10,81	10,02
SOMME	96,09	98,14

3.1.3 Caractérisation de forme

3.1.3.1 Matériel et méthodes

Les échantillons (Tableau XLI) ont été divisés en huit fractions granulaires. Ils ont été emballés dans des sacs plastiques scellés et étiquetés.

Tableau XLI : Références des échantillons testés.

Identification	Abréviation
Echantillons bruts	
M5284 Af	84A
M5284 Bf	84B
M5284 Cf	84C
M5284 Df	84D
Echantillons traités	
M5837Af	37A
M5837Bf	37B
M5837Cf	37C
M5837Df	37D
CRR1155	CRR

La mesure des paramètres de forme des particules est basée sur le calcul de paramètres à partir d'images de projection 2D de particules reposant sur un panneau de verre, à l'état sec. Une mesure précise requiert une bonne acquisition d'image et une résolution adéquate. Un nombre statistiquement suffisant de particules doit être analysé. Le traitement d'image est facilité par le fait que chaque particule est isolée des autres. De plus, la littérature montre que de meilleurs résultats sont obtenus quand les images sont enregistrées avec les particules immobiles sur un plan. Ce mode spécifique est souvent appelé « imagerie statique ».

Deux équipements ont été utilisés pour l'acquisition des images:

- Nano500 by Occhio Instrument (Figure 64)
- A high resolution scanner EPSON V750PRO.

Leurs caractéristiques sont décrites au Tableau XLII et détaillées à l'Annexe IV.



Figure 64 : OCCHIO 500Nano (0.5 mm~2 mm).

Tableau XLII : Caractéristiques des appareils de mesure de forme.

Size range	Nomenclature	Equipment	Aprox. pixel size (μm)
+ 4 MM	4	Epson scanner	21,2
- 4 +2 MM	2	Epson scanner	21,2
- 2 +1 MM	1	Epson scanner	21,2
- 1 + 0.5 MM	0,5	Nano500	4,4
- 0.5 + 0.25 MM	0,25	Nano500	3,2
- 0.25 + 0.125 MM	0,125	Nano500	2,2
- 0.125 + 0.063 MM	+ 0.063	Nano500	1,4
- 0.063 MM	- 0.063	Nano500	0,9

3.1.3.2 Analyse d'image et traitement des données

Les paramètres sélectionnés pour l'analyse de forme sont les suivants:

- 1) Elongation (de l'ellipse d'inertie).

Formule: $1 - \frac{\text{Ell.Width}}{\text{Ell.Length}}$ valeur par défaut de 1 si Ell. Length = 0.

- 2) Convexity

Formule: $\frac{\text{Perimeter}}{\text{Convex perimeter}}$

Où *Perimeter* est la longueur du périmètre calculé en ajoutant 1 pour chaque lien entre pixels horizontaux et verticaux et $\sqrt{2}$ pour les autres liens. *Convex Perimeter* est la somme des longueurs des segments de périmètres convexes. Si le périmètre convexe contient seulement 3 segments ou moins, *Convex perimeter* = 1.

3) Occhio Bluntness

Le calcul de l'*Occhio Bluntness* est basé sur la thèse d'Eric Pirard; ce paramètre est lié à la variabilité de la distribution du *particle caliper*. Le *caliper* est la distribution des rayons de cercles tangents aux pixels extérieurs et inclus dans la particule. Les valeurs de *bluntness* sont illustrées à la Figure 65.

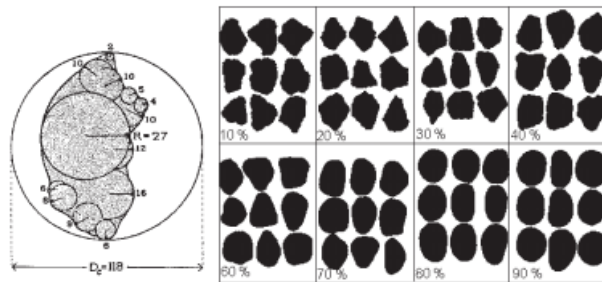


Figure 65 : Valeurs de l'Occhio Bluntness. (Krumbein, 1941).

3.1.3.3 Résultats

Les résultats sont présentés ci-dessous, de la fraction granulométrique la plus grossière à la plus fine, sous forme graphique. La légende est présentée à la Figure 66.

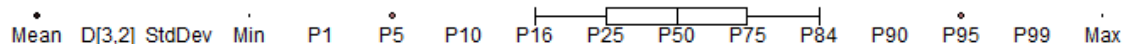


Figure 66 : Légende pour la représentation graphique des résultats des analyses de forme.

(a) Fractions >4mm

Seulement quatre des neuf échantillons contenaient des particules de granulométrie supérieure à 4 mm. Il convient de remarquer que ces analyses ont porté uniquement sur 63 à 130 particules, ce qui est assez faible pour une caractérisation de forme précise. Aucune conclusion définitive ne peut donc être déduite en ce qui concerne cette fraction granulométrique.

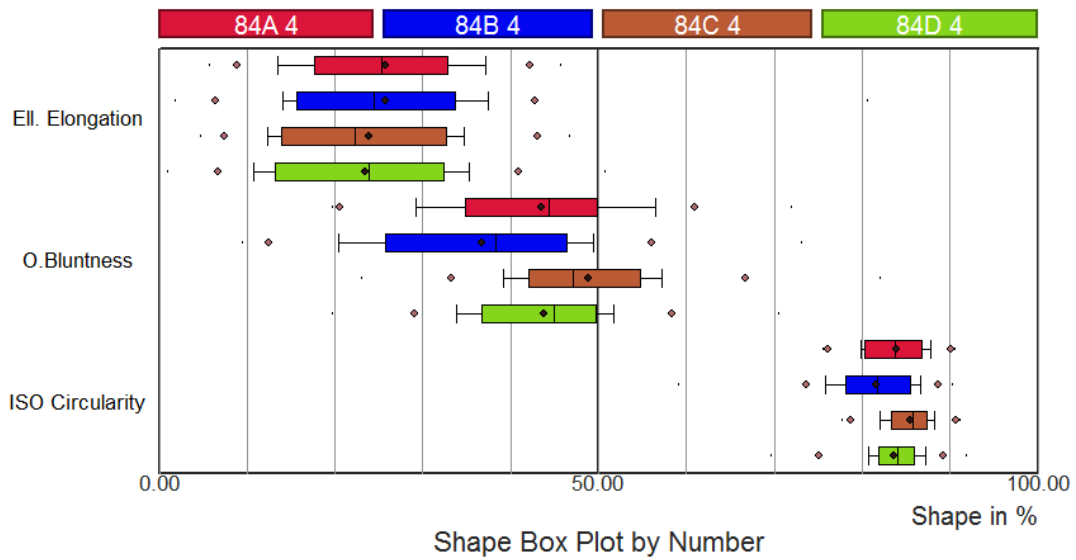


Figure 67 : Analyse de forme des particules (>4 mm).

(b) Fraction 2-4 mm

Entre 500 et 1000 particules ont été analysées pour tous les échantillons à l'exception du CRR (~1900).

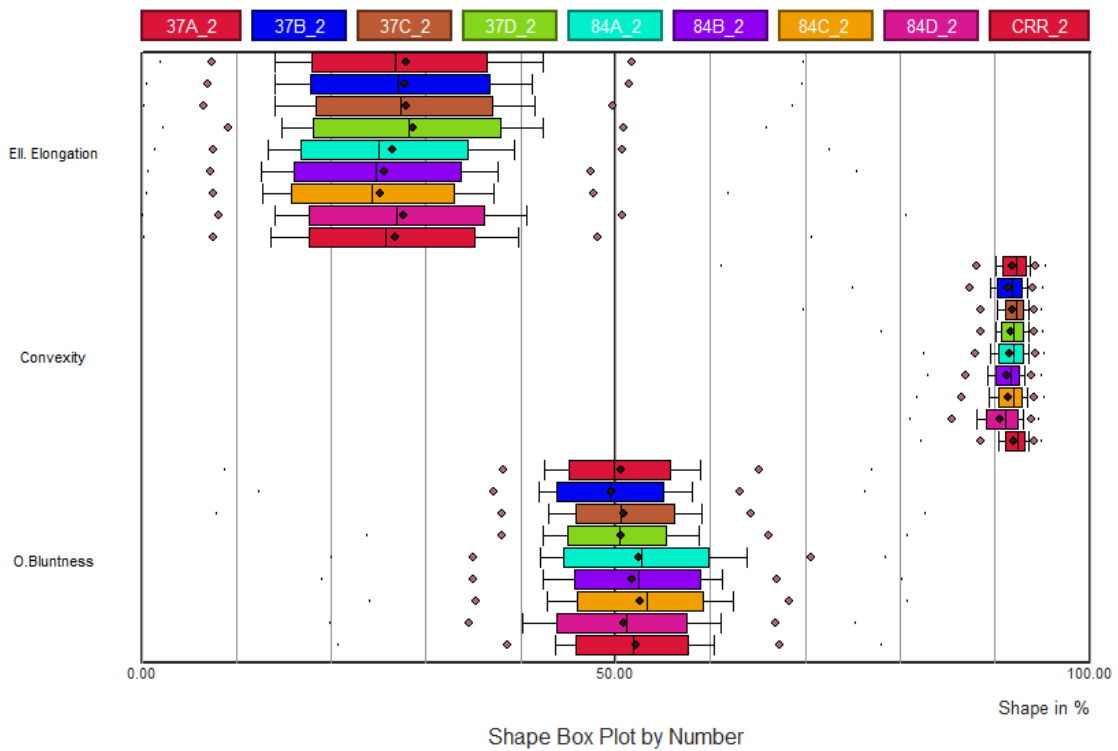


Figure 68 : Analyse de forme des particules (2-4 mm).

(c) Fraction 1-2 mm

Entre 1200 et 2000 particules ont été analysées.

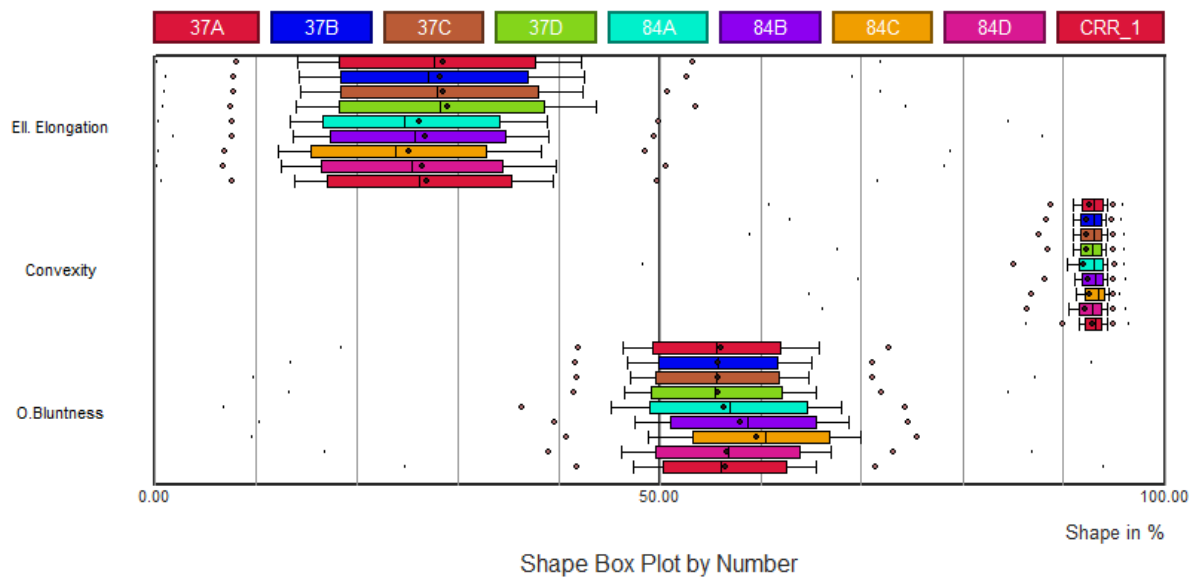


Figure 69 : Analyse de forme des particules (1-2 mm).

(d) Fraction 0.5 - 1 mm

Plus de 400 particules ont été analysées.

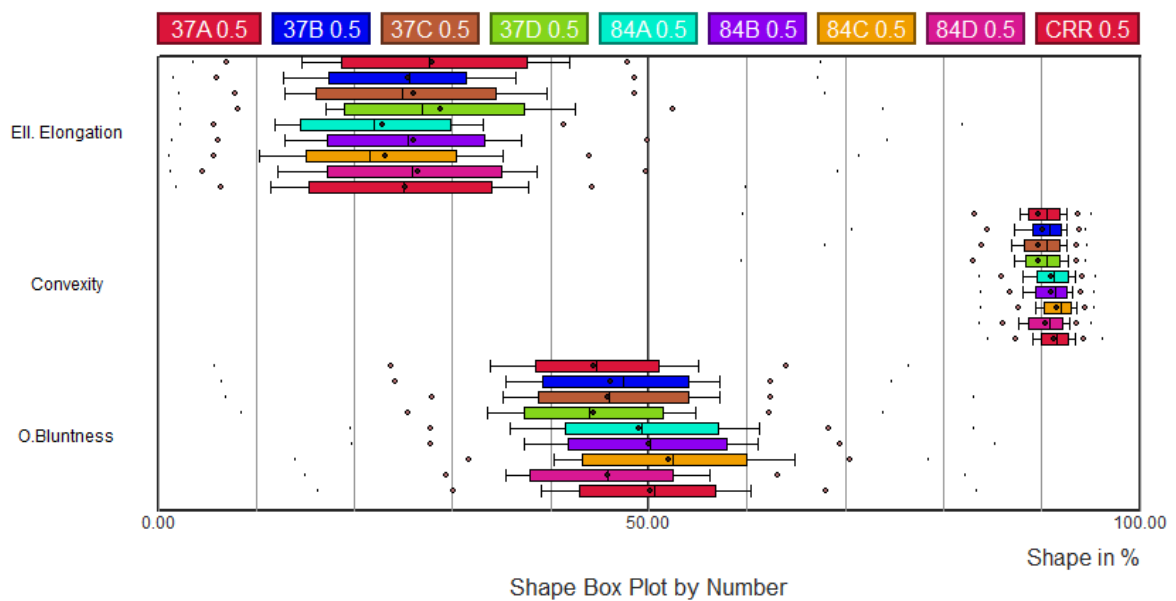


Figure 70 : Analyse de forme des particules (0.5-1 mm).

(e) Fraction 0.25 - 0.5 mm size

Environ 400 particules ont été analysées.

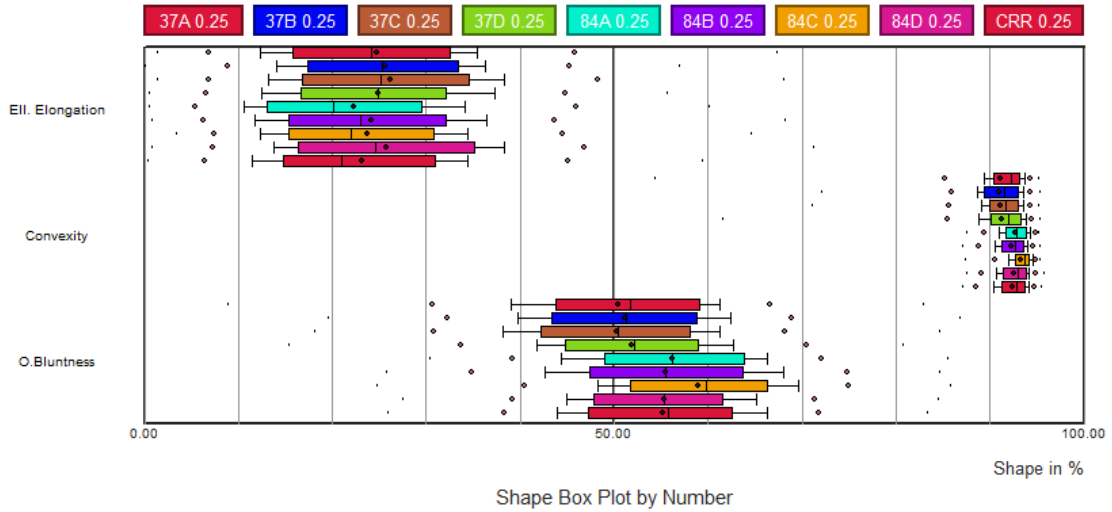


Figure 71 : Analyse de forme des particules (0.25-0.5 mm).

(f) Fraction 0.125-0.25 mm

Plus de 1200 particules ont été analysées.

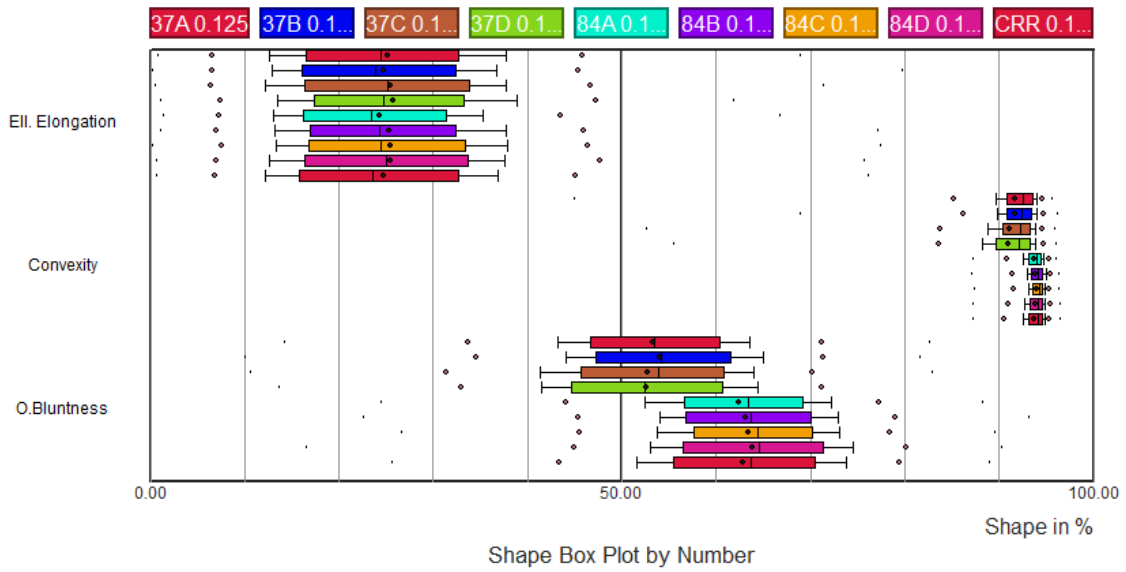


Figure 72: Analyse de forme des particules (0.125-0.25 mm).

(g) Fraction 0.063 - 0.125 mm

1500 à 3000 particules analysées.

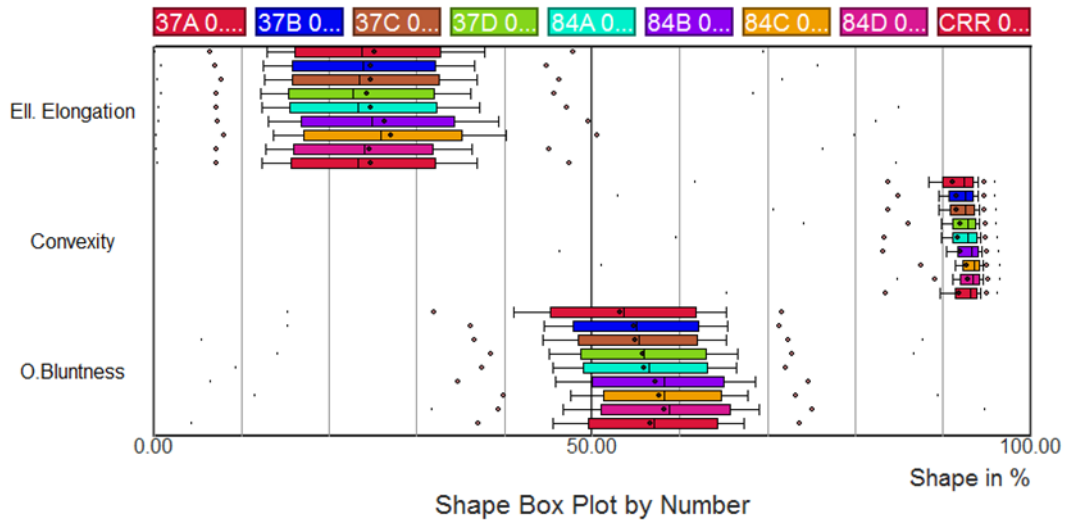


Figure 73 : Analyse de forme des particules (0.063-0.125 mm).

(h) Fraction 0.020 – 0.063

Un traitement d’image a été appliqué sur cette fraction granulaire pour écarter les particules inférieures à 0.020 mm. En effet, en-dessous de cette dimension, le nombre de pixels utilisés dans la mesure de forme est trop faible pour obtenir des résultats significatifs. Environ 8000 particules ont été analysées pour chaque échantillon.

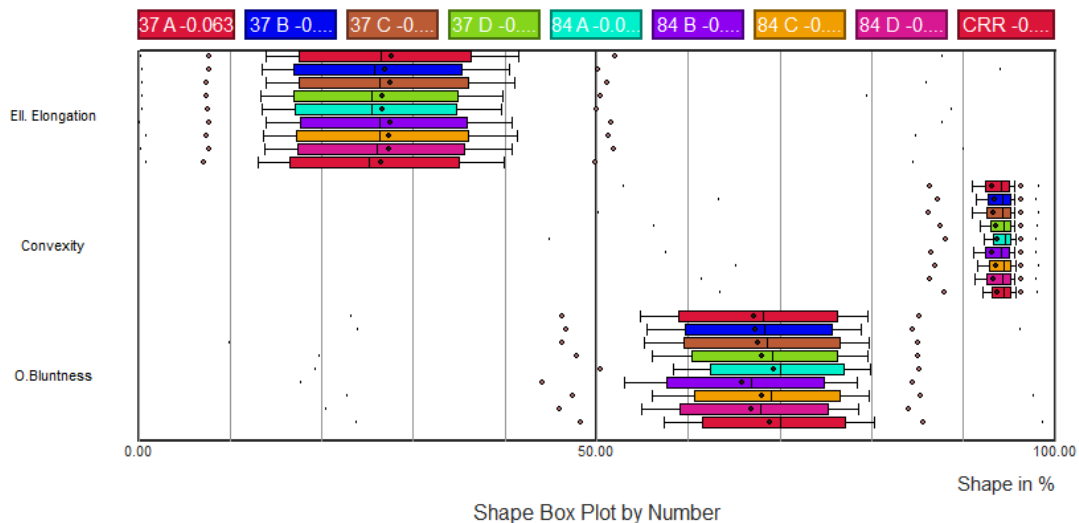


Figure 74 : Analyse de forme des particules (0.020 -0. 063 mm).

(i) Conclusions

Des différences de forme significatives ont été observées pour les neuf échantillons dans chacune des fractions granulaires testées. La plupart du temps, les tendances sont cohérentes pour un même échantillon d’une fraction granulaire à l’autre. L’échantillon brut 84C contient globalement plus de particules arrondies que tous les autres, notamment à cause des particules grossières. Cependant, en ce qui concerne les fractions inférieures à 0.125 mm, l’échantillon 84D a des valeurs de *bluntness* sensiblement plus élevées. Dans la fraction granulométrique 0.125 - 0.25 mm, et dans une moindre mesure pour les autres fractions, la différence entre les échantillons bruts (84) et les échantillons recyclés (37) est particulièrement visible. De façon assez surprenante, le recyclé prélevé sur la première planche d’essai (CRR) se comporte plutôt comme les matériaux bruts. Aucune différence majeure entre

les quatre échantillons recyclés (37 A-D) n'est apparue, mais aucune ressemblance particulière n'est visible entre les échantillons provenant du même centre (37 A et 37 B).

3.2 Influence des éléments fins et de la teneur en eau sur les déformations permanentes du matériau

L'influence en éléments 0-2 mm sur les déformations permanentes mesurées par l'essai triaxial cyclique a été étudiée pour les granulats mixtes (Centre Ib). Les niveaux de contraintes ont été décrits au §2.2. La teneur en éléments 0-2 mm du mélange d'origine est égale à 29,1 %. Un mélange a été constitué à partir du même matériau avec 20 % en 0-2 mm. La teneur en fines (f) de ce second mélange est ainsi réduite à 5,6 % alors qu'elle est égale à 8,3 % dans le matériau d'origine.

Les essais réalisés montrent que les déformations permanentes sont plus importantes pour le mélange à 29,1 % d'éléments 0-2 mm : ces déformations permanentes atteignent 2,5 % après les 2500 cycles pour les éprouvettes compactées à la teneur en eau optimale (w_{OPM}). Pour les mélanges à 20 % en 0-2 mm, les déformations permanentes atteignent 0,6 % après 2500 cycles. L'influence de la teneur en 0-2 mm est encore plus néfaste pour les éprouvettes compactées à une teneur en eau plus élevée (Figure 75).

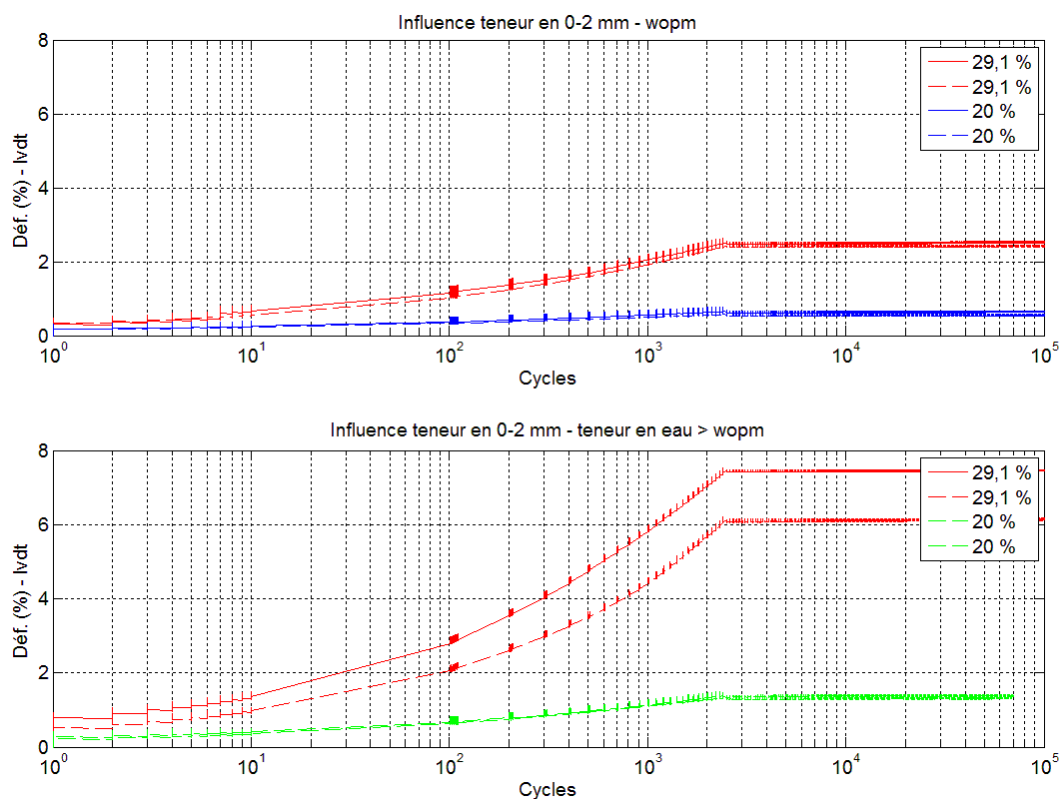


Figure 75 : Influence de la teneur en 0-2 mm sur les déformations permanentes des granulats mixtes (Centre Ib).

L'influence de la teneur en eau sur les déformations permanentes a été étudiée pour les granulats mixtes (Centre Ib). La figure suivante correspond aux premiers essais réalisés en 2014. Les déformations permanentes atteignent 2 % à la teneur en eau de 12 %, ce qui est élevé.

Elles évoluent surtout pendant la mise en œuvre (2500 cycles appliqués) et se stabilisent par après, lorsque les charges appliquées correspondent au trafic.

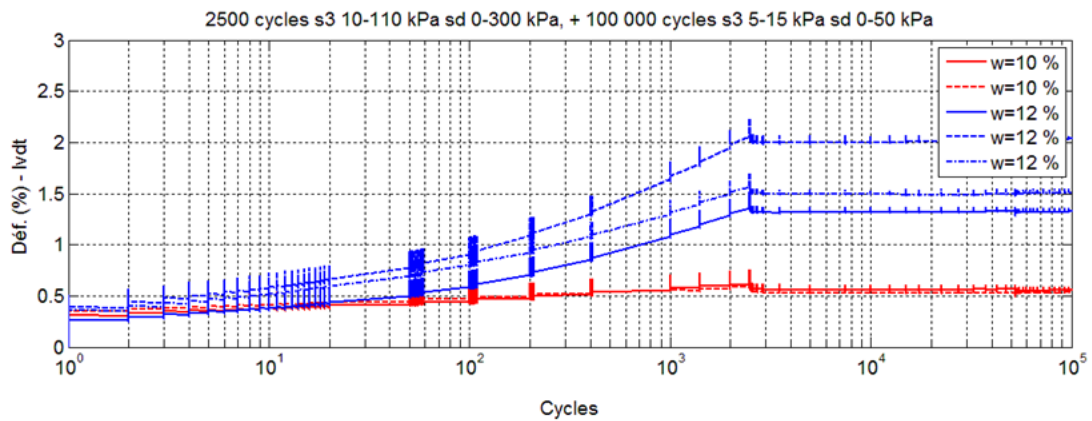


Figure 76 : Influence de la teneur en eau sur les déformations permanentes mesurées par l'essai triaxial cyclique des granulats mixtes (Centre Ib) - Essais 2014.

La figure suivante présente les résultats des essais réalisés en 2015. Pour les deux mélanges de recyclés mixtes (Centre Ib avec granulométrie d'origine et granulométrie modifiée), une augmentation de la teneur en eau résulte en des déformations permanentes plus élevées. L'effet est plus marqué pour le mélange à 29,1 % de la fraction 0-2 mm.

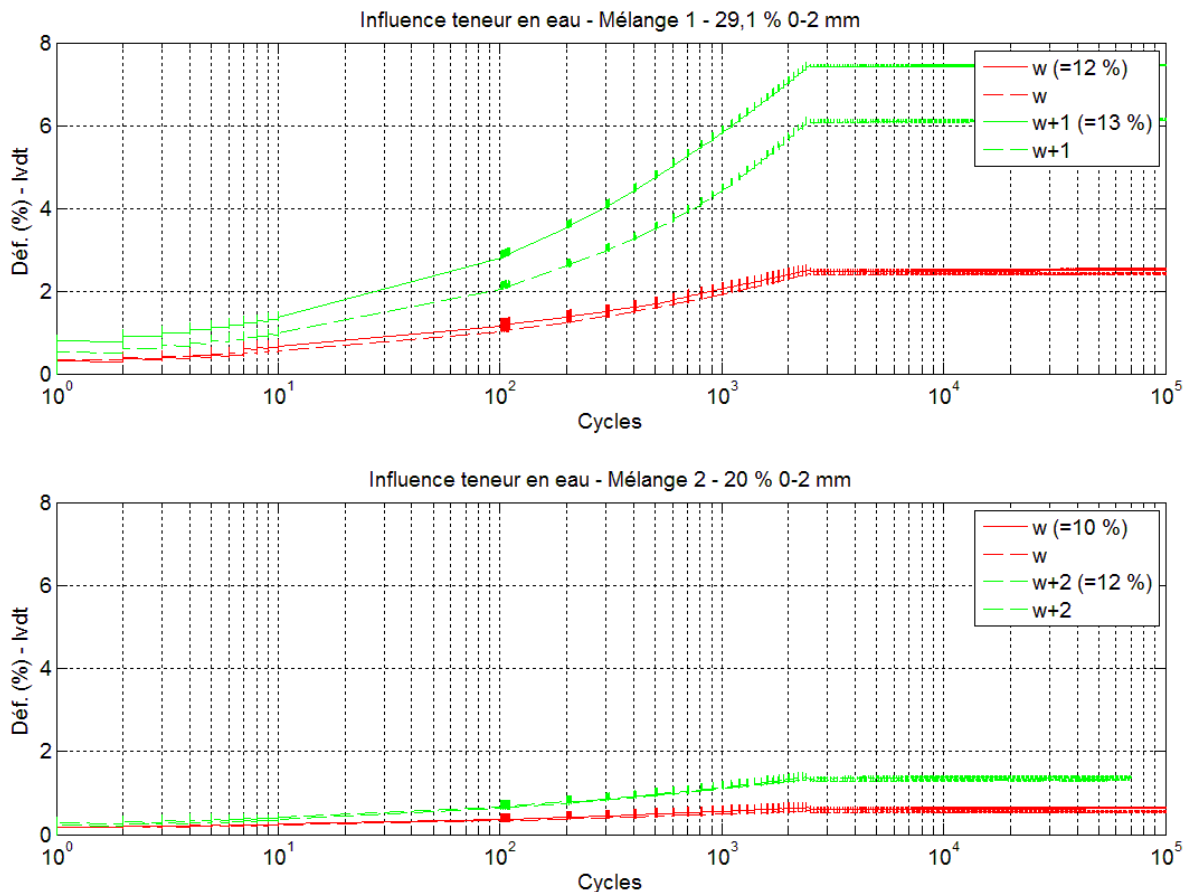


Figure 77 : Influence de la teneur en eau sur les déformations permanentes mesurées par l'essai triaxial cyclique.

Ces résultats montrent la sensibilité des déformations permanentes des granulats mixtes vis-à-vis de la teneur en eau et de la teneur en fines. Ces paramètres seront à vérifier lors de la mise en œuvre de ce type de matériaux.

Tâche 4: Protocole de traitement

4.1 Description globale du protocole de traitement

Un protocole de traitement a été mis en place afin de récupérer des granulats mixtes à partir de déchets bruts de démolition (Figure 78). Il a été conçu de manière à permettre une épuration maximale des granulats, notamment en éléments divers type métaux, plastique ou plâtre, qui sont les éléments qui se sont révélés être les plus problématiques lors de la caractérisation des différentes matières, tout en pouvant fournir en sortie trois types de granulats répondant aux granulométries classiques pour les différentes applications possibles, à savoir des granulats (0/31,5 mm), (31,5/63 mm) et (63/100 mm).

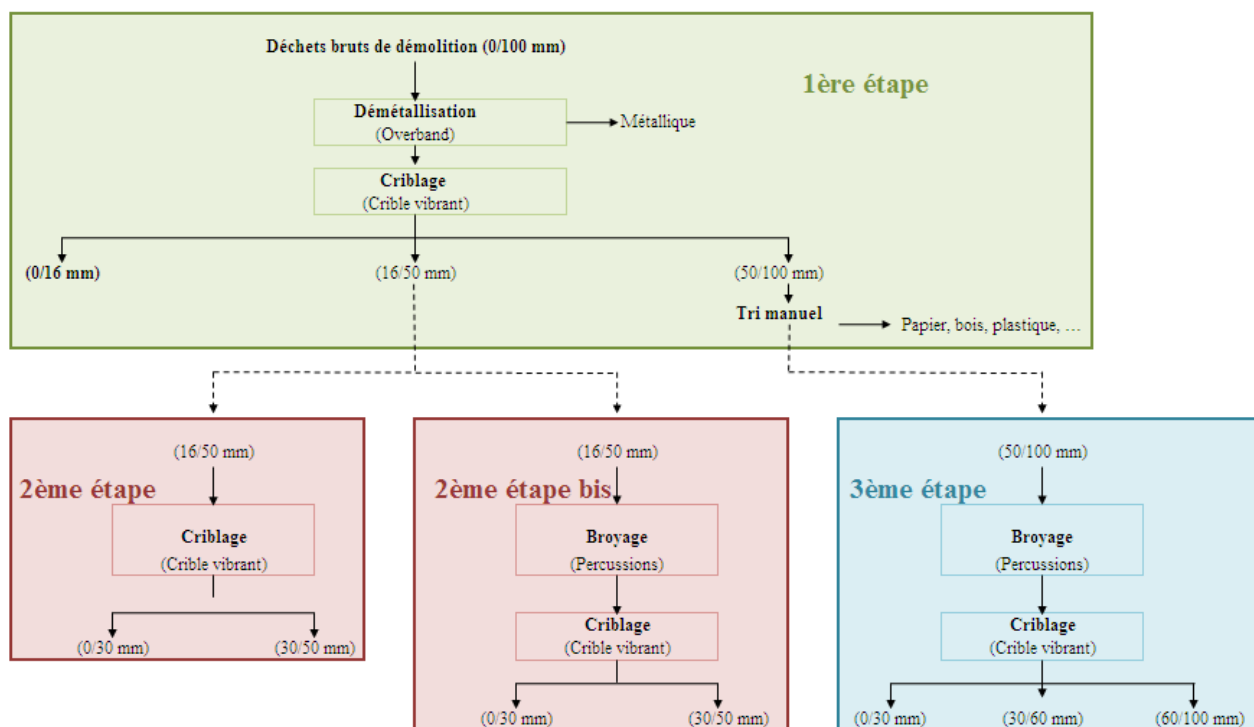


Figure 78 : Schéma de traitement des déchets bruts.

Ce schéma de traitement est composé de trois étapes principales :

- La première étape va permettre de fractionner le flux entrant en trois tranches granulométriques. Elle est composée de :
 - un **overband** pour éliminer les pièces métalliques les plus volumineuses ;
 - un **crible vibrant double étages** avec des grilles à mailles carrées de dimension 16 et 50 mm pour récupérer les trois tranches granulométriques : (50/100 mm), (16/50 mm) et (0/16 mm). La fraction (0/16 mm) est composée essentiellement de terre et est éliminée. La fraction (16/50 mm) est traitée dans une deuxième étape qui est développée ci-dessous. Et enfin, la fraction (50/100 mm) va subir un tri manuel de manière à éliminer une majorité d'éléments faisant partie de la catégorie X (papier, bois, plastique, métal, plâtre, ...) avant d'être traitée dans la troisième étape du schéma ;

- La deuxième étape, qui va traiter la fraction granulométrique (16/50 mm), est composée des équipements suivants :
 - un **concasseur à percussion** avec une puissance motrice de 9 kW ;
 - un **crible vibrant double étages** avec des grilles à mailles carrées de dimension 30 et 50 mm. Des granulats de granulométrie (0/30 mm) et (30/50 mm) sont récupérés.

Afin d'évaluer l'impact du concassage de la fraction (16/50 mm) sur la granulométrie finale des granulats, cette étape a également été envisagée sans réaliser le concassage de la fraction (16/50 mm) ;

- La troisième étape, qui va traiter la fraction granulométrique (50/100 mm), est composée des équipements suivants :
 - un concasseur à percussion avec une puissance motrice de 9 kW ;
 - un crible vibrant double étages avec des grilles à mailles carrées de dimension 30 et 60 mm. Trois granulométries de granulats sont alors récupérés : (60/100 mm), (30/60 mm) et (0/30 mm).

En fin de boucle, l'ensemble des granulats (0/30 mm) ont été recombines et les granulats (30/50 mm) issus de l'étape deux sont recombines avec les granulats (30/60 mm) issus de l'étape trois pour former une fraction granulométrique globale (30/60 mm).

La répartition massique de chaque fraction a été déterminée et est présentée à la Figure 79.

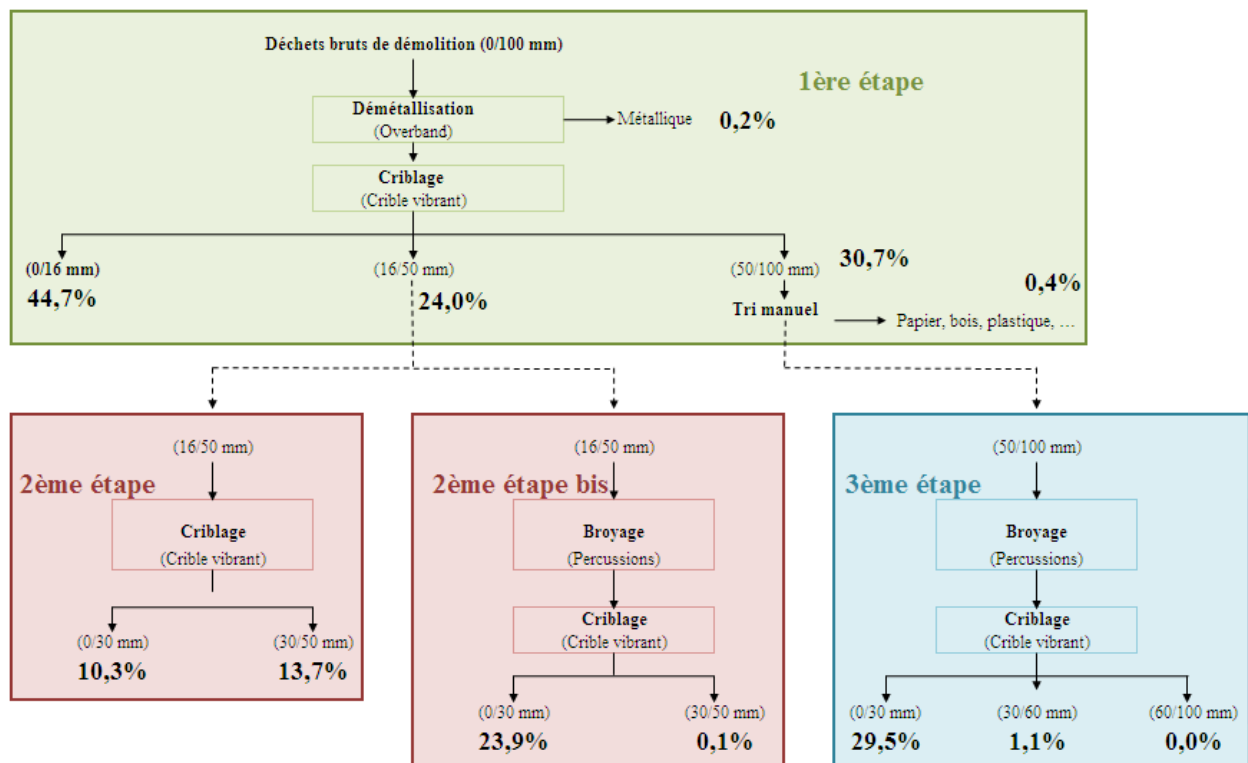


Figure 79 : Schéma de traitement des déchets bruts – répartition massique.

Le traitement indique que +/- 45 % a dû être éliminée car principalement constituée de terre (fraction (0/16 mm) – étape I).

L'emploi d'un broyeur à percussion (puissance motrice de 9 kW) conduit à des granulats de (0/30 mm) voire même (0/16 mm) comme cela a pu être précisé par une analyse granulométrique supplémentaire sur les fractions obtenues (Tableau XLIII) et ce quelle que soit la granulométrie d'entrée dans le broyeur, à savoir (16/50 mm) ou 50/100 mm).

Tableau XLIII : Répartition massique des granulats (0/30 mm) obtenus après les étapes 2 et 3.

Traitement des granulats (0/30 mm)	Etape 2	Etape 2 bis	Etape 3
Fraction granulométrique	Répartition massique (%)		
(0/16 mm)	25.6	94.9	90.8
(16/30 mm)	74.4	5.1	9.2

4.2 Broyage sélectif

Ces précédents résultats révèlent que l'utilisation du concasseur à percussion à une puissance motrice de 9 kW entraîne une production importante de fines.

Sur base de cette constatation, une étude plus poussée a été réalisée sur cette étape de concassage en envisageant :

- L'emploi d'un autre type de concasseur, à savoir un concasseur à mâchoires ;
- La réduction de la puissance motrice du concasseur à percussion dans le but de limiter cette production d'éléments fins.

Les essais ont été réalisés séparément sur les catégories de matériaux, puis à partir des mélanges de matériaux (typiquement des mélanges béton – maçonnerie qui sont les deux catégories les plus présentes dans les déchets bruts) dans le but de déterminer si un broyage sélectif est possible, ce qui entraînerait une facilité de séparation ultérieure des différents matériaux.

4.2.1 Réduction granulométrique à l'aide d'un concasseur à mâchoires

4.2.1.1 Matériel et méthode

Exploitant un mode de fragmentation par compression et écrasement, l'appareil est constitué de deux mâchoires (plaques dentées) disposées face à face en forme de V. Une plaque est fixe, l'autre est mobile et animée d'un mouvement oscillant par le jeu d'un système bielle-excentrique (Figure 80). La compression est produite lors du mouvement de la mâchoire mobile vers la mâchoire fixe et provoque l'éclatement des gros blocs du matériau introduit à la partie supérieure du concasseur. L'éloignement de la mâchoire mobile permet à ceux-ci de descendre dans la machine, où ils subissent encore plusieurs réductions successives de taille avant d'être déchargés à sa partie inférieure.

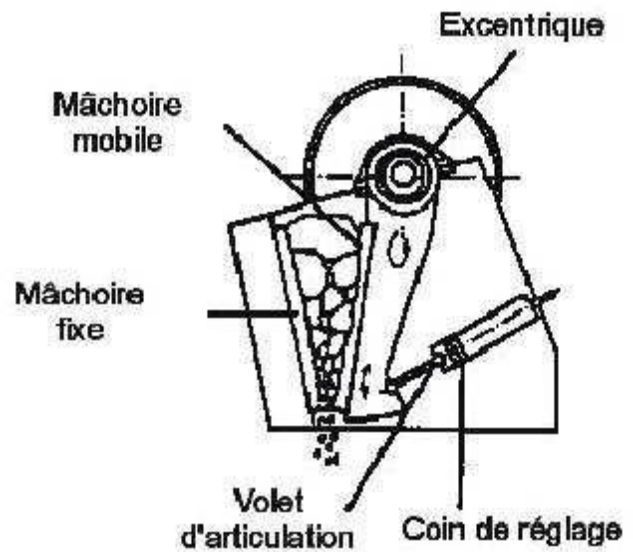


Figure 80 : Principe de fonctionnement du concasseur à mâchoires.

Les essais de concassage ont été réalisés sur trois matériaux de granulométrie (+40 mm) : du béton, de la brique et un mélange de béton et de briques. La distance minimale entre les mâchoires a été fixée entre 20 et 24 mm.

4.2.1.2 Analyse granulométrique

Un tamisage discontinu à 50 ; 31,5 ; 25 ; 16 ; 12,5 ; 8 ; 6,5 et 4 mm a été réalisé sur les différents broyats récupérés en sortie du concasseur à mâchoires. Les résultats sont donnés au Tableau XLIV et représentés graphiquement à la Figure 81.

Tableau XLIV : Analyse granulométrique des broyats obtenus en sortie du concasseur à mâchoires.

Matériau	Béton		Brique		Béton + brique	
	Masse (%)	Passant cumulatif (%)	Masse (%)	Passant cumulatif (%)	Masse (%)	Passant cumulatif (%)
(+50)	1,4	98,6	0,0	100,0	0,0	100,0
(31,5/50)	8,3	90,3	3,1	96,9	3,1	96,9
(25/31,5)	12,9	77,4	16,4	80,5	13,6	83,3
(16/25)	39,4	38,0	34,9	45,6	38,9	44,4
(12,5/16)	7,9	30,1	7,5	38,1	7,7	36,7
(8/12,5)	9,0	21,1	11,1	27,0	10,4	26,3
(6,5/8)	2,5	18,6	3,1	23,9	3,0	23,3
(4/6,5)	5,0	13,6	6,3	17,6	5,6	17,7
(-4)	13,6	0,0	17,6	0,0	17,7	0,0

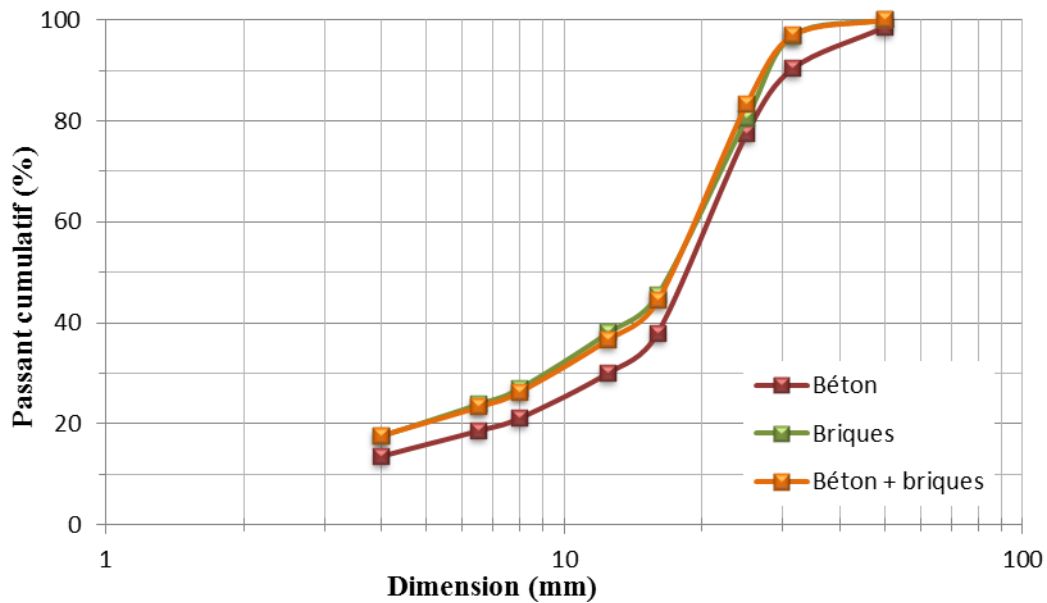


Figure 81 : Courbes granulométriques des broyats obtenus en sortie du concasseur à mâchoires.

La première constatation qui peut être apportée est que le concasseur à mâchoires ne permet pas de broyer sélectivement le béton de la brique pour ensuite arriver à une séparation de ces deux matériaux par simple séparation granulométrique.

A titre de comparaison, le broyage au concasseur à percussion à une puissance motrice de 9 kW conduisait à une répartition de la tranche granulométrique (0/16 mm) de 90 à 95 %, contre 40 % avec le concasseur à mâchoires. **L'objectif de diminuer en partie la proportion d'éléments fins formés est donc bien atteint.**

En observant plus attentivement la courbe, il est possible de remarquer que la fraction granulométrique majoritaire est la fraction (16/25 mm), et que la proportion de la matière au-delà de 31,5 mm est quasiment nulle. Cela est dû à l'écartement choisi entre les mâchoires, ce qui a pour effet indirect de donner à la courbe granulométrique une allure discontinue.

4.2.2 Réduction granulométrique à l'aide d'un concasseur à percussion

4.2.2.1 Influence de la puissance motrice sur le concassage d'un béton

(a) Matériel et méthode

Le concasseur à percussion se compose d'un rotor à axe horizontale équipé de quatre battoirs animés d'une vitesse périphérique de 25 à 40 m/s (Figure 82). Le matériau alimenté à la partie supérieure de la machine est projeté par les battoirs sur les plaques de choc fixes et solidaires du châssis, où il éclate par percussion. Les fragments les plus gros rebondissent et sont repris dans le mouvement du rotor. Les fragments les plus fins sont évacués à la partie inférieure de la machine.

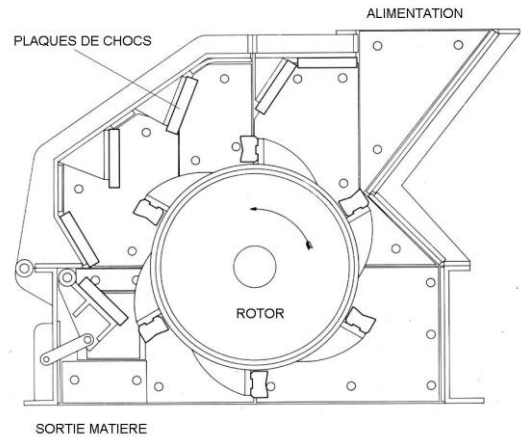


Figure 82 : Principe de fonctionnement du concasseur à percussion.

Le concassage du béton a été réalisé sur trois échantillons de granulométrie (+40 mm) à trois puissances motrices : 9 kW, soit la même puissance que lors de la boucle de traitement, 6 kW et 4,5 kW, ce qui correspond respectivement à 60, 40 et 30 % de la puissance maximale de l'équipement.

(b) Analyse granulométrique

Un tamisage discontinu à 50 ; 31,5 ; 25 ; 16 ; 12,5 ; 8 ; 6,5 et 4 mm a été réalisé sur les différents broyats récupérés en sortie du concasseur à percussion. Les résultats sont donnés au Tableau XLV et représentés graphiquement à la Figure 83 et mis en comparaison avec ce même matériau concassé au moyen du broyeur à mâchoires.

Tableau XLV : Analyse granulométrique des broyats de béton obtenus en sortie du concasseur à percussion à différentes puissances motrices.

Puissance motrice	9 kW		6 kW		4,5 kW	
	Masse (%)	Passant cumulatif (%)	Masse (%)	Passant cumulatif (%)	Masse (%)	Passant cumulatif (%)
(+50)	0,7	99,3	12,0	88,0	34,5	65,5
(31,5/50)	12,4	86,9	23,6	64,4	25,6	39,9
(25/31,5)	5,1	81,8	6,0	58,4	5,8	34,1
(16/25)	17,2	64,6	17,6	40,8	10,2	23,9
(12,5/16)	7,8	56,8	5,7	35,1	3,3	20,6
(8/12,5)	13,6	43,2	7,8	27,3	4,5	16,1
(6,5/8)	7,3	35,9	3,6	23,7	1,9	14,2
(4/6,5)	11,6	24,3	5,0	18,7	2,8	11,4
(-4)	24,3	0,0	18,7	0,0	11,4	0,0

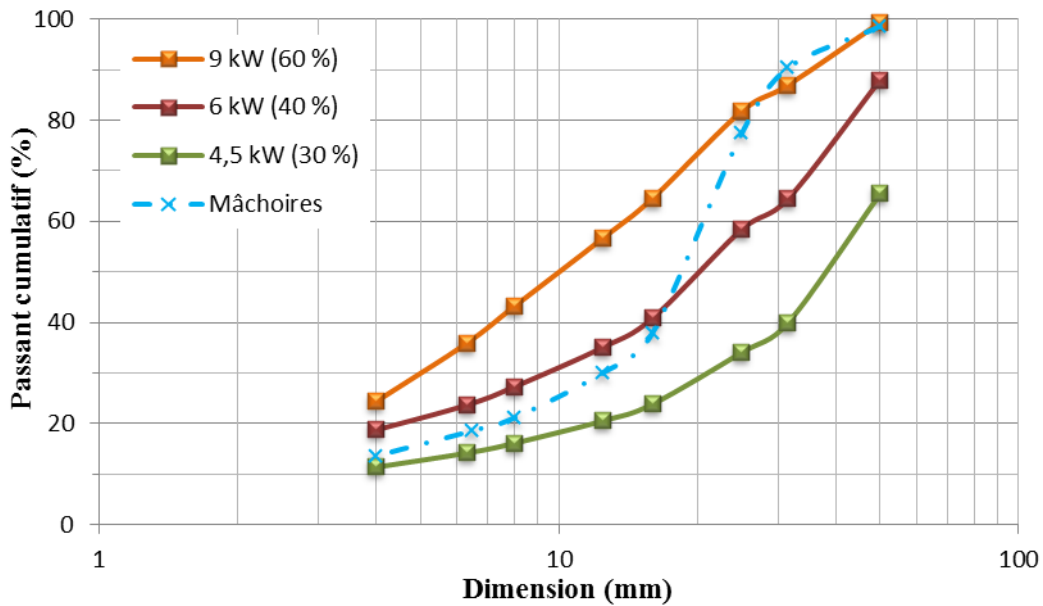


Figure 83 : Courbes granulométriques des broyats de béton obtenus en sortie du concasseur à percussion à différentes puissances motrices.

L'augmentation de la puissance motrice du concasseur à percussion appliquée lors du broyage du béton entraîne une diminution de la granulométrie finale. Ainsi, la teneur en (+50 mm) qui était de 35 % pour une puissance de broyeur de 4,5 kW chute à 1 % lorsque la puissance du broyeur augmente à 9 kW, ce qui a pour conséquence une augmentation de la teneur de la fraction (0/4 mm) qui passe respectivement de 11 à 25 %.

De ces résultats, il est déjà possible de spécifier que les deux concasseurs testés pourront trouver leur utilité dans un schéma de traitement selon l'objectif souhaité :

- le concasseur à percussion (à puissance motrice réduite) si la volonté est d'obtenir une large gamme de granulats ;
- le concasseur à mâchoires si le souhait est d'obtenir une fraction granulométrique préférentielle. Dans ce cas, la distance entre les mâchoires devra être définie en conséquence.

L'ensemble des résultats indique, toutefois, que le broyage sélectif n'est pas envisageable.

4.2.2.2 Concassage individuel des principaux matériaux rencontrés dans les granulats

(a) Matériel et méthode

Avant de s'intéresser au concassage d'un mélange de différents matériaux, un essai de broyage a été réalisé sur les cinq matériaux principaux rencontrés dans les déchets bruts, à savoir le béton/mortier, les pierres naturelles, la brique, la céramique et la tuile. Chacun de ces matériaux, d'une granulométrie initiale supérieure à 40 mm, a été broyé individuellement au moyen du concasseur à percussion à une puissance motrice définie de 4,5 kW (soit 30 % de sa puissance maximale).

Ces matériaux étant issus d'un échantillon de déchets bruts caractérisés (par tri manuel), les quantités disponibles pour chacun étaient significativement variables : de moins de 10 kg pour les tuiles à près de 120 kg pour le béton/mortier.

(b) Analyse granulométrique

Un tamisage discontinu à 50 ; 31,5 ; 25 ; 16 ; 12,5 ; 8 ; 6,5 et 4 mm a été réalisé sur les différents broyats récupérés en sortie du concasseur à percussion. Les résultats sont donnés au Tableau XLVI et représentés graphiquement à la Figure 84.

Tableau XLVI : Analyse granulométrique des broyats des différents matériaux obtenus en sortie du concasseur à percussion à 4,5 kW de puissance motrice.

Matériau	Béton/mortier		Pierre naturelle		Brique		Céramique		Tuile	
	Masse (%)	Passant cumulatif (%)	Masse (%)	Passant cumulatif (%)	Masse (%)	Passant cumulatif (%)	Masse (%)	Passant cumulatif (%)	Masse (%)	Passant cumulatif (%)
(+50)	30,5	69,5	32,6	67,4	26,8	73,2	13,7	86,3	1,5	98,5
(31,5/50)	26,9	42,6	31,2	36,2	26,6	46,6	19,3	67,0	28,3	70,2
(25/31,5)	5,3	37,3	7,4	28,8	8,0	38,6	11,0	56,0	9,9	60,3
(16/25)	12,0	25,3	11,2	17,6	13,0	25,6	24,4	31,6	28,6	31,7
(12,5/16)	3,0	22,3	3,1	14,5	4,1	21,5	8,1	23,5	7,5	24,2
(8/12,5)	5,3	17,0	4,6	9,9	6,6	14,9	11,2	12,3	9,9	14,3
(6,5/8)	2,4	14,6	1,4	8,5	2,1	12,8	2,7	9,6	3,1	11,2
(4/6,5)	2,1	12,5	2,3	6,2	3,4	9,4	2,9	6,7	3,7	7,5
(-4)	12,5	0,0	6,2	0,0	9,4	0,0	6,7	0,0	7,5	0,0

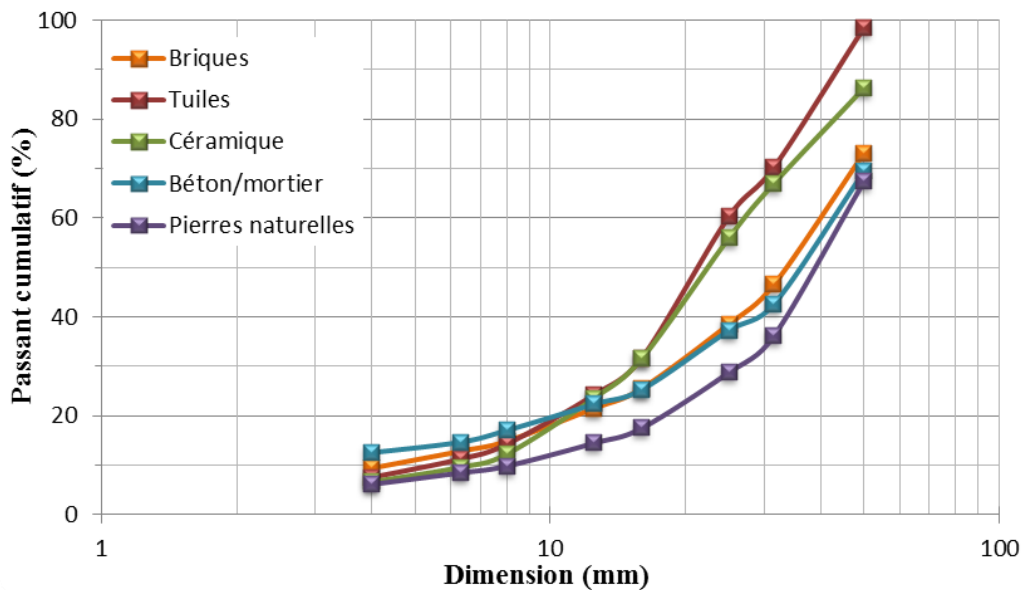


Figure 84 : Courbes granulométriques des broyats des différents matériaux obtenus en sortie du concasseur à percussion à 4,5 kW de puissance motrice.

L'examen de ces différentes courbes granulométriques révèle une différence de broyabilité. En effet, les flux de matière ayant tous une granulométrie de départ supérieure à 40 mm (voire 50 mm), les lots de tuiles et de céramique semblent être plus facilement broyables avec des teneurs de refus à 50 mm respectivement de 1,5 et 13,7 % contre +/- 30 % pour le béton, la brique et les pierres naturelles. Sous la dimension de 16 mm, les proportions massiques récupérées pour ces cinq matériaux sont relativement semblables, variant entre 15 et 25 %, soit une production d'éléments fins qui reste modérée. Il est dès lors possible de conclure que les tuiles et la céramique sont deux matériaux qui ont tendance à se

fragmenter plus facilement au sein du concasseur à percussion et qui vont former préférentiellement des granulats (0/30 mm).

A l'inverse, pour une même puissance motrice modérée de 4.5 kW, le béton, la brique et la pierre naturelle, de par une dureté intrinsèque plus élevée, vont produire de manière équivalente autant de granulats (0/30 mm) que de granulats (30/60 mm).

4.2.2.3 Influence de la puissance motrice sur le concassage d'un mélange béton/briques

(a) Matériel et méthode

Après avoir observé la broyabilité des différents matériaux individuellement, des essais ont été réalisés sur les deux matériaux majoritairement rencontrés dans ces échantillons, à savoir le béton et la brique, afin d'observer une éventuelle influence d'un de ces matériaux sur l'autre.

Le concassage des mélanges a été réalisé sur des échantillons de granulométrie (+40 mm) à deux puissances motrices déjà testées précédemment, à savoir 9 et 4,5 kW

(b) Analyse granulométrique

Un tamisage discontinu à 50 ; 31,5 ; 25 ; 16 ; 12,5 ; 8 ; 6,5 et 4 mm a été réalisé sur les différents broyats récupérés en sortie du concasseur à percussion. Les résultats sont donnés au Tableau XLVII et représentés graphiquement à la Figure 85 et mis en comparaison avec les courbes granulométriques de ces mêmes matériaux concassés indépendamment sur avec les différents broyeurs.

Tableau XLVII : Analyse granulométrique des broyats d'un mélange béton/briques obtenus en sortie du concasseur à percussion à différentes puissances motrices.

Puissance motrice	9 kW		4,5 kW	
	Masse (%)	Passant cumulatif (%)	Masse (%)	Passant cumulatif (%)
(+50)	2,7	97,3	28,4	71,6
(31,5/50)	7,6	89,7	24,1	47,5
(25/31,5)	7,3	82,4	6,2	41,3
(16/25)	15,3	67,1	13,0	28,3
(12,5/16)	6,1	61,0	3,9	24,4
(8/12,5)	13,5	47,5	6,8	17,6
(6,5/8)	4,7	42,8	2,3	15,3
(4/6,5)	10,5	32,3	4,3	11,0
(-4)	32,3	0,0	11,0	0,0

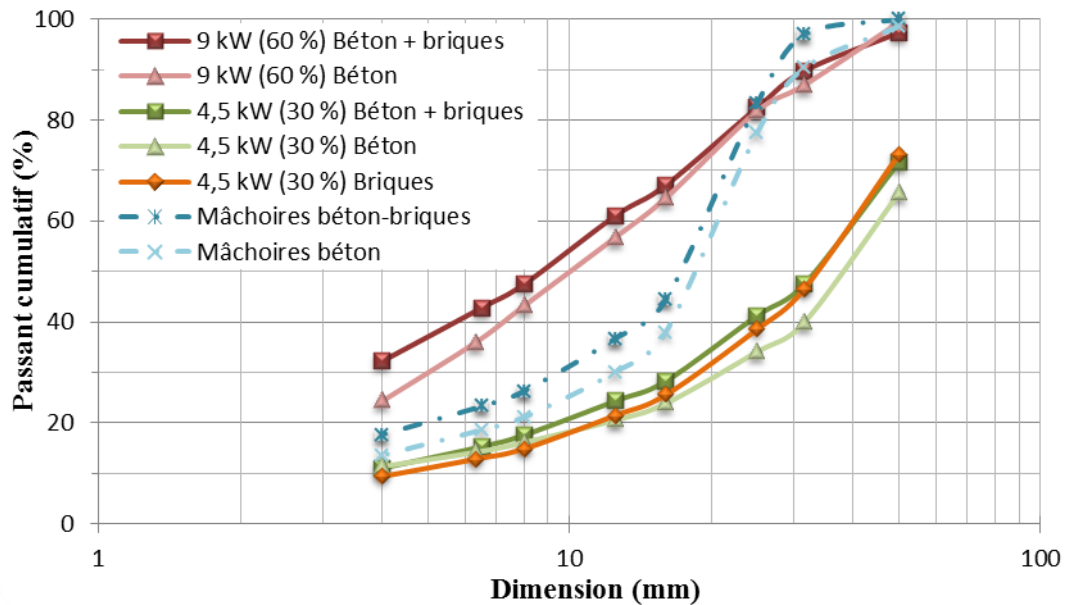


Figure 85 : Courbes granulométriques des broyats d'un mélange béton/briques obtenus en sortie du concasseur à percussion à différentes puissances motrices.

Les courbes granulométriques représentées à la Figure 85 confirment les conclusions qui avaient déjà pu être tirées aux points 4.2.1 et 4.2.2.1 suite au concassage comparatif du béton, de la brique et du mélange des deux au broyeur à mâchoires et au concassage du béton au broyeur à percussion à différentes puissances motrices. Quelle que soit la technique de broyage utilisé et la puissance apportée le cas échéant, la répartition massique des différentes fractions granulométriques varie peu selon que ce soit du béton, de la brique ou un mélange des deux. De la même façon, quel que soit le matériau ou mélange de matériaux introduit dans le concasseur, l'équipement à percussion conduit à une courbe granulométrique linéaire, avec une production plus importante de fines (0/4 mm) ou de grenus (+30 mm) selon la puissance utilisée, tandis que l'équipement avec les mâchoires concentrera préférentiellement les granulats dans la fraction granulométrique correspondant à l'écartement des mâchoires.

Tâche 5: Analyse en laboratoire du comportement des nouveaux granulats obtenus

Le CTP a transmis au CRR deux échantillons de recyclés issus du protocole de traitement expérimental (voir §4.1). Ces échantillons sont issus du même matériau brut de base (M 5284 D), qui a subi un premier criblage pour séparer les fractions -16 mm (directement écartée), -50+16 mm et +50 mm. Dans les deux cas, la fraction + 50 est concassée (par percussion) puis criblée, afin d'en extraire une fraction -30 mm. Dans le cas « à simple concassage », cette fraction est recombiningée avec la fraction -30 issue du criblage de la fraction-50+16. Dans le cas « à double concassage », la fraction -50+16 mm est elle-même concassée par percussion avant d'être criblée et que sa fraction -30 mm soit recombiningée avec la fraction -30 mm issue du concassage de la fraction + 50 mm (Figure 86).

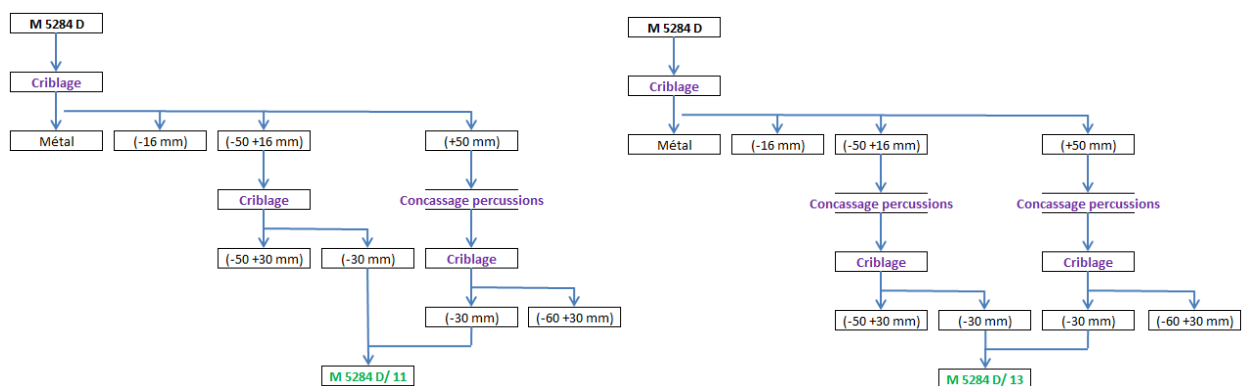


Figure 86 : Comparaison des traitements subis par les échantillons traités par les protocoles expérimentaux « à simple concassage » (gauche) et « à double concassage » (droite).

La Figure 87 compare la granulométrie des deux échantillons aux fuseaux imposés par QualiRoutes pour des fondations et sous-fondations 0/32.

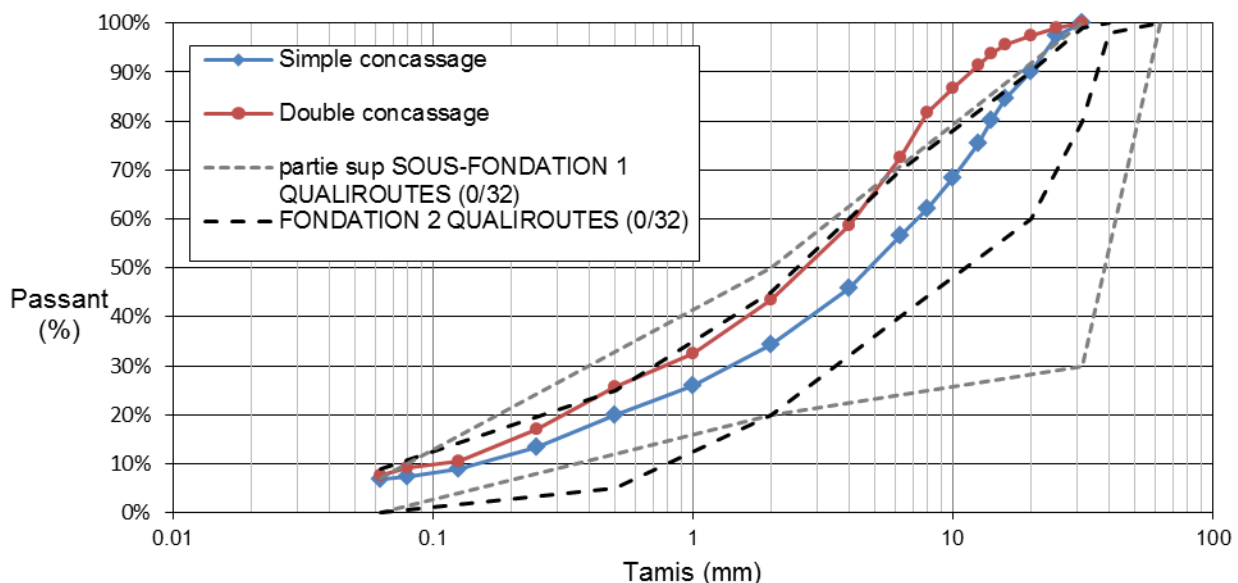


Figure 87 : Granulométrie des échantillons issus du protocole expérimental du CTP.

On observe à la Figure 87 que les granulométries des deux échantillons sont assez différentes : l'échantillon ayant subi un double concassage présente trop d'éléments moyens (<16 mm) et trop peu d'éléments grossiers pour un 0/32. Par contre, l'échantillon n'ayant subi qu'un simple concassage, préservant les débris initiaux de dimension 16/30, a une courbe granulométrique plus conforme aux fuseaux de Qualiroutes, même si elle manque légèrement d'éléments grossiers. De façon assez surprenante, la présence du second concassage n'augmente que légèrement (0.8%) la teneur en fines (f) de l'échantillon.

La Figure 88 présente les résultats des échantillons aux essais Micro-Deval et Los Angeles et les compare aux valeurs mesurées sur les échantillons recyclés prélevés dans les centres de traitement (voir § 1.5.3). L'essai Los Angeles n'a pu être réalisé que sur l'échantillon ayant subi un double concassage. En effet, suite à la quantité plus limitée de matériaux produits par simple concassage, il a été choisi de donner la priorité aux autres essais (M_{DE} et gel-dégel), qui requièrent une masse plus faible de matériaux.

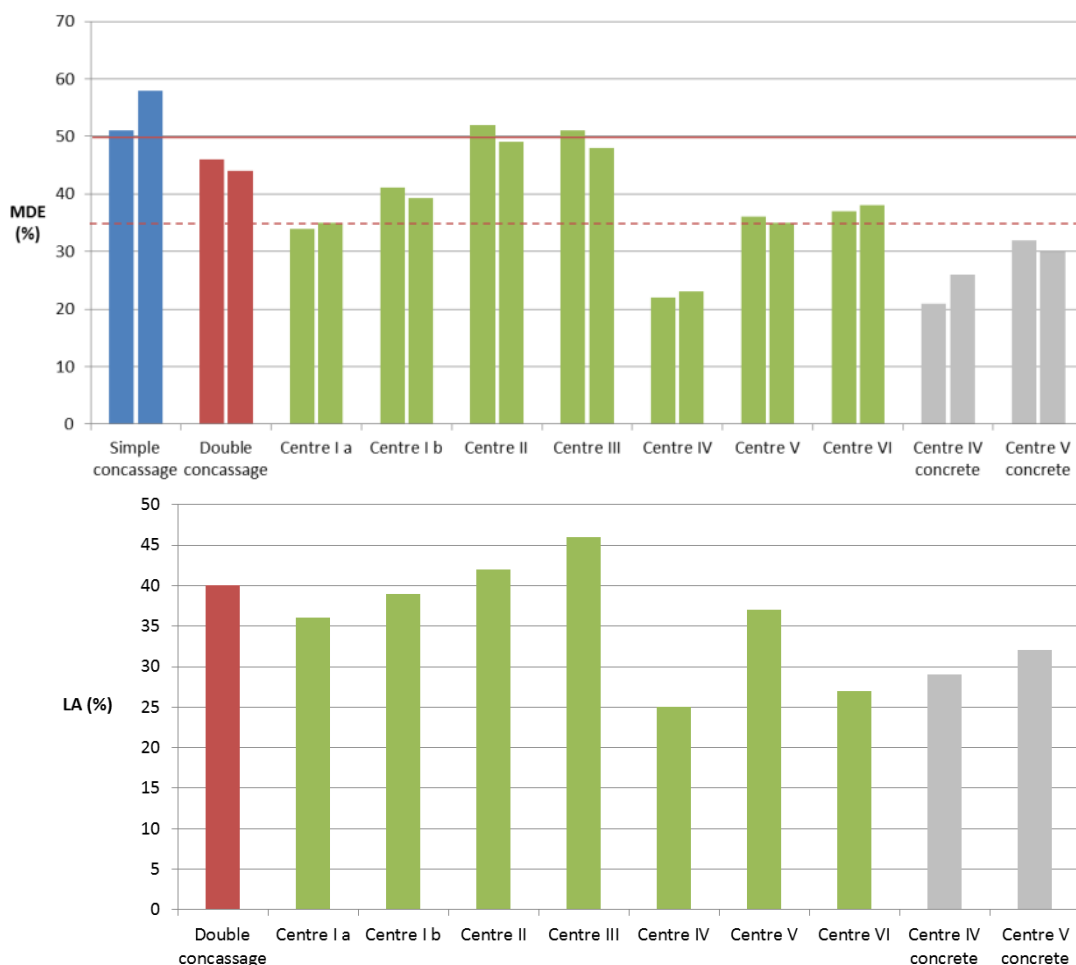


Figure 88 : Résultats aux essais Micro-Deval et Los Angeles des échantillons issus du protocole expérimental du CTP et comparaison avec les autres échantillons recyclés du projet Aperrou.

Les valeurs de M_{DE} et LA sont élevées mais restent comparables aux valeurs mesurées pour les Centres II et III. Il est donc impossible de juger dans l'absolu de l'efficacité du traitement expérimental par rapport au traitement opéré en centrale puisque l'origine des déchets de base est inconnue.

Par contre, si on compare les résultats des deux échantillons, on s'aperçoit que la valeur de M_{DE} est plus faible pour l'échantillon ayant subi un double concassage. Ceci pourrait s'expliquer par le fait que cette

étape a probablement contribué à briser certains granulats plus fragiles, améliorant ainsi la qualité des granulats restants.

La Figure 89 présente les résultats de l'essai de sensibilité au gel-dégel obtenus sur les deux échantillons.

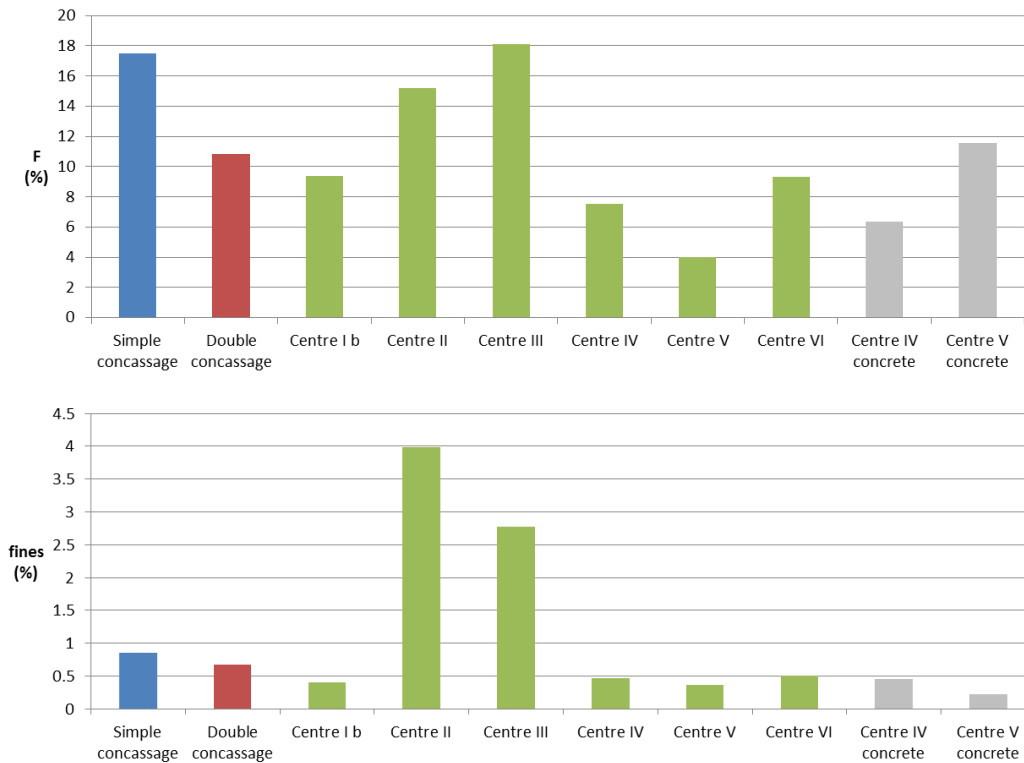


Figure 89 : Résultats à l'essai de sensibilité au gel-dégel d'un échantillon issu du protocole expérimental du CTP et comparaison avec les autres échantillons recyclés de Qualiroutes.

Les échantillons issus du protocole expérimental sont les troisième et quatrième mixtes les moins performants, derrière les mixtes issus des Centres II et III. Néanmoins, si on s'intéresse aux pourcentages de fines produites au cours de l'essai, on voit que ceux-ci sont nettement inférieurs à ceux mesurés pour les Centres II et III, se rapprochant beaucoup plus des valeurs mesurées pour les autres centres.

Il est difficile de tirer des conclusions définitives en ce qui concerne l'efficacité des protocoles expérimentaux par rapport aux traitements appliqués dans les centres, puisque l'origine des déchets n'est pas connue. Il semblerait néanmoins que le traitement peut jouer un rôle sur la qualité des granulats obtenus, puisque l'un des deux protocoles testés (à double concassage) permet de produire des granulats présentant de meilleures propriétés.

Tâche 6: Etude des nouveaux déchets issus de la démolition et adaptation du protocole de traitement

Des blocs de béton cellulaire (Ytong) ont été réceptionnés au CTP en février 2015 (M 6034). Ce type de matériau est de plus en plus présent dans les flux de démolition et fait partie des éléments flottants dont la teneur dans les granulats mixtes, d'après la norme NBN EN 933-11, ne peut dépasser 5 %. Afin d'éliminer ces matériaux, des essais de broyabilité ont été réalisés sur les blocs mêmes, et ces derniers ont ensuite été incorporés aux déchets bruts avant de passer sur la boucle de traitement afin d'évaluer sa capacité à éliminer le béton cellulaire.

6.1 Influence du béton cellulaire sur les résultats aux essais de durabilité

Des essais de résistance au gel-dégel, Micro-Deval et Los Angeles ont été effectués sur des échantillons contenant un pourcentage contrôlé de granulats de blocs de béton cellulaire, préalablement concassés. Les résultats de l'essai de sensibilité au gel-dégel sont représentés à la Figure 90, pour un pourcentage de 0 et 10% de béton cellulaire.

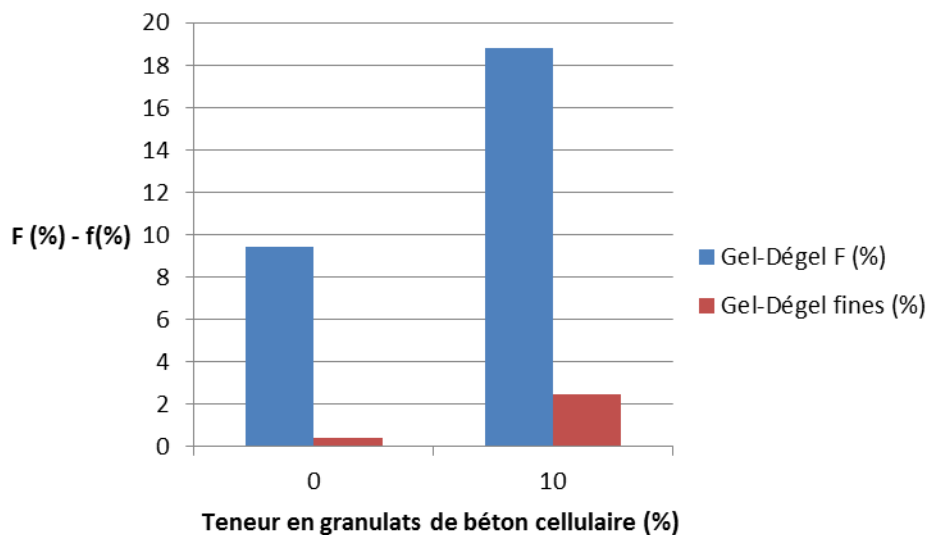


Figure 90 : Influence de l'introduction de 10% de granulats de béton cellulaire dans un recyclé mixte sur les résultats de l'essai de sensibilité au gel-dégel.

Les augmentations du coefficient F et de la teneur en fines (f) produites durant l'essai sont très importantes. En fait, l'augmentation de F correspond à une désintégration totale des 10% de béton cellulaire. Parmi ces 10%, 20% sont réduits à l'état de fines (f), créant l'augmentation de 2% de la teneur en fines (f) mesurée.

Les résultats de l'essai Micro-Deval sont présentés à la Figure 91 :

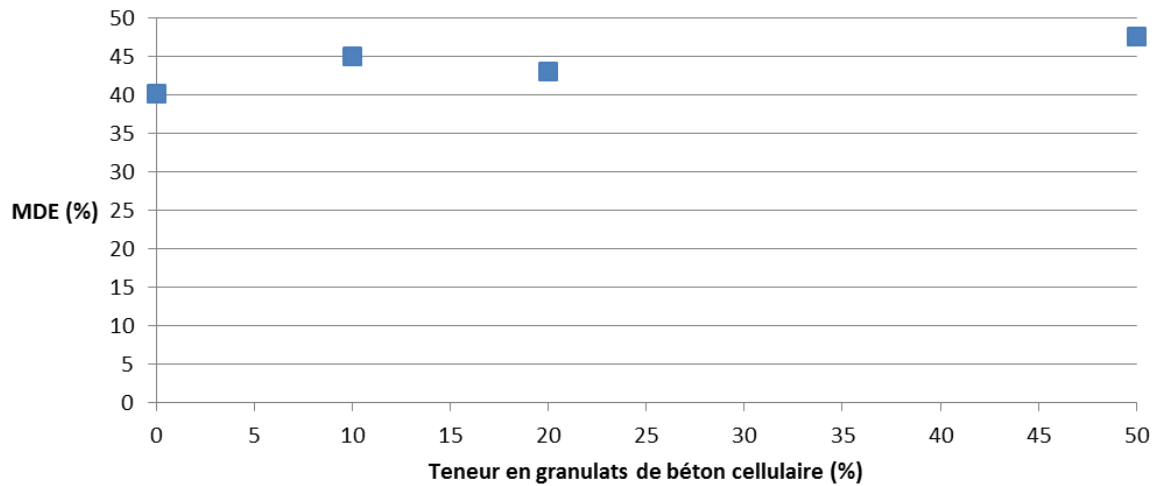


Figure 91 : Influence de l'introduction de granulats de béton cellulaire dans un recyclé mixte sur les résultats de l'essai de sensibilité au gel-dégel.

La présence de granulats de béton cellulaire ne modifie pas fondamentalement les résultats. Même pour 50% en masse de granulats cellulaires, M_{DE} n'augmente que de 7.3%. L'augmentation mesurée est même plus faible lorsque 20% de béton cellulaire est ajouté que lorsque 10% sont ajoutés.

Cette faible augmentation du coefficient M_{DE} peut s'expliquer par le caractère flottant du matériau, qui surnage au cours de l'essai et ne subit donc que modérément l'attrition due aux granulats mixtes.

Les résultats de l'essai Los Angeles sont présentés à la Figure 92, pour une teneur en granulats cellulaires de 10 et 20%.

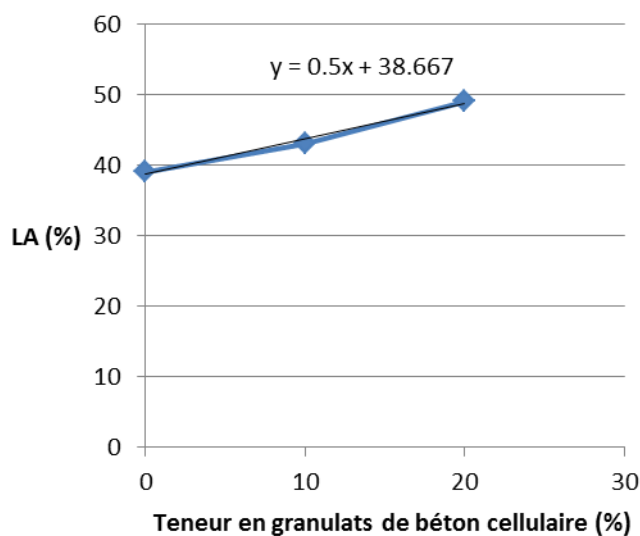


Figure 92 : Influence de l'introduction de granulats de béton cellulaire dans un recyclé mixte sur les résultats de l'essai Los Angeles.

Le coefficient Los Angeles augmente de façon linéaire avec la teneur en granulats de béton cellulaire, qui se désintègrent à environ 89% lors de l'essai. Puisqu'il n'y a pas d'eau permettant la séparation des matériaux comme dans l'essai Micro-Deval en présence d'eau, le béton cellulaire reste mélangé au granulat mixte et subit les chocs de façon beaucoup plus forte. Cet essai est probablement plus réaliste quant au comportement réel du matériau mis en œuvre.

6.2 Concassage de béton cellulaire

6.2.1 Matériel et méthode

Si pour l'instant, le béton cellulaire est un matériau qui est peu retrouvé dans les déchets bruts, et donc par conséquent dans les granulats mixtes, il représente à la fois un nouveau déchet de démolition, avec un flux estimé, dans les années à venir, à 50 000 tonnes/an en Wallonie, et un élément délétère au comportement des granulats recyclés en domaine routier. Il a donc été décidé de s'intéresser à son comportement lorsqu'il est soumis au broyage, et plus particulièrement au concasseur à percussion, à une puissance motrice de 9 kW. A noter que les blocs de béton cellulaire trop volumineux pour être introduits directement dans le concasseur, ont été pré-concassés à la masse.

6.2.2 Analyse granulométrique

Un tamisage discontinu à 50 ; 31,5 ; 25 ; 16 ; 12,5 ; 8 ; 6,5 et 4 mm a été réalisé sur le broyat récupéré de béton cellulaire en sortie du concasseur à percussion. Le résultat est donné au Tableau XLVIII et représenté graphiquement à la Figure 93, où il est mis en comparaison avec les courbes granulométriques du béton et du mélange béton/brique concassés dans les mêmes conditions.

Tableau XLVIII : Analyse granulométrique du broyat de béton cellulaire obtenu en sortie du concasseur à percussion à 9 kW de puissance motrice.

Fraction granulométrique (mm)	Masse (%)	Passant cumulatif (%)
(+50)	4,7	95,3
(31,5/50)	13,6	81,7
(25/31,5)	6,2	75,5
(16/25)	8,7	66,8
(12,5/16)	7,6	59,2
(8/12,5)	7,2	52,0
(6,5/8)	3,3	48,7
(4/6,5)	4,3	44,4
(-4)	44,4	0,0

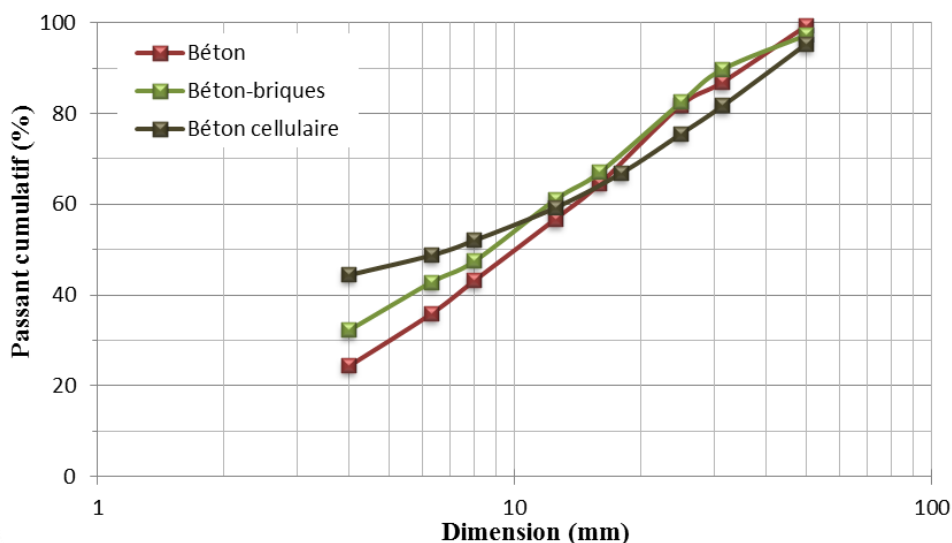


Figure 93 : Courbes granulométriques des broyats des différents matériaux obtenus en sortie du concasseur à percussion à 9 kW de puissance motrice.

A l'aide d'un concasseur à percussion, et à paramètres opératoires identiques, le béton cellulaire a tendance à produire beaucoup plus d'éléments fins que le béton et le mélange béton/briques, avec près de 50 % de la matière sous les 4 mm. Malgré cela, l'allure des courbes granulométriques des trois matériaux broyés est similaire, avec des proportions massiques pour les fractions supérieures à 10 mm très proches.

Cette granulométrie du béton cellulaire broyé rend difficile sa séparation des granulats mixtes par une simple coupure granulométrique.

6.3 Séparation gravimétrique sur un mélange béton/brique/béton cellulaire

Les essais de broyage sélectif s'avérant peu concluants pour permettre une séparation des différents matériaux, et plus particulièrement des éléments néfastes à la bonne tenue des granulats mixtes pour une application routière, des essais de séparation gravimétrique au moyen d'une table densimétrique ont été réalisés.

6.3.1 Matériel et méthode

La séparation gravimétrique aéroulique est obtenue grâce à une plaque inclinée perforée soumise à un mouvement vibratoire. De plus, un flux d'air ascendant passe au travers de cette plaque, agissant de différentes manières sur la matière à traiter :

- les éléments ultra légers sont entraînés par le flux d'air vers le cyclone ;
- les éléments légers sont fluidisés. Ils flottent sans être en contact avec la plaque et se dirigent vers la sortie aval en raison de l'inclinaison de la table ;
- les éléments lourds, en contact avec la plaque, sont entraînés vers la sortie en amont à l'aide de la vibration.

Les essais de séparation gravimétrique ont été réalisés au moyen d'une table densimétrique de type TTS 300/1000/1 KV (Figure 94). Les caractéristiques de l'équipement sont reprises au Tableau XLIX. Les deux paramètres principaux qui peuvent être modifiés pour obtenir une séparation optimale des lourds et légers, sont l'inclinaison de la plaque perforée et la vitesse d'entraînement du ventilateur de la table de séparation. Pour ces essais, l'inclinaison a été maintenue à son maximum, à savoir 12°, et la vitesse d'entraînement du ventilateur a été adaptée en fonction de la granulométrie de la matière testée pour assurer une séparation optimale.

Tableau XLIX : Caractéristiques de la table densimétrique.

Caractéristique de l'équipement	
Longueur de la plaque (mm)	1000
Largeur de la plaque (mm)	290
Inclinaison de la plaque (°)	8... 12
Puissance moteur excentré (kW)	0,37
Puissance moteur ventilateur (kW)	2,20
Vitesse d'entraînement du ventilateur de la table de séparation (t/min)	600... 3000

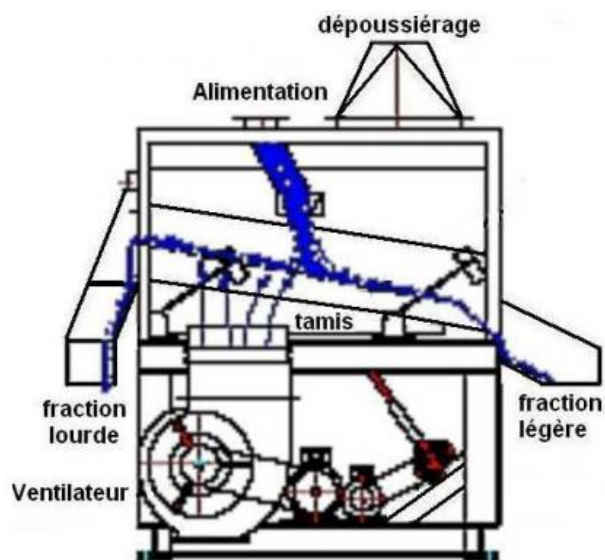
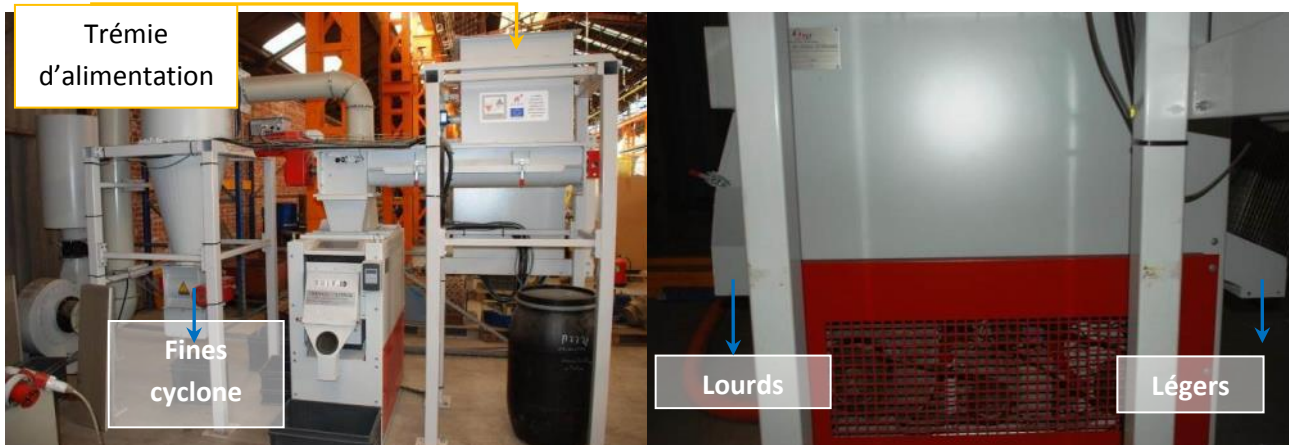


Figure 94 : Principe de fonctionnement de la table densimétrique.

Les différents essais ont été réalisés sur un mélange de béton, de brique et de béton cellulaire, préalablement concassés au moyen du broyeur à percussion à une puissance motrice de 9 kW. La dimension d'entrée maximale admissible de la table étant de 20 mm, seules les fractions inférieures à 16 mm ont subi cette étape de séparation.

Les premiers essais ont été effectués sur deux fractions granulométriques : (4/10 mm) et (10/16 mm). L'intérêt de travailler sur des tranches granulométriques étroites est d'améliorer l'efficacité de la séparation densimétrique en réduisant l'influence du critère morphologique. Toutefois, comme une application industrielle nécessitant de multiples coupures granulométriques pourrait s'avérer complexe d'un point de vue logistique et entraînerait des coûts supplémentaires, l'efficacité de séparation a également été évaluée sur une tranche granulométrique plus large, à savoir (4/16 mm).

6.3.2 Résultats

6.3.2.1 Fraction (4/10 mm)

Pour le traitement de cette fraction, la vitesse d'entraînement du ventilateur de la table a été fixée à **2400 t/min**. La Figure 95 permet de juger qualitativement la séparation entre béton cellulaire et béton/briques.



Figure 95 : Fractions récupérées après séparation gravimétrique de la fraction (4/10 mm).

La séparation du béton cellulaire du mélange béton/brique par gravimétrie est efficace, comme le montre la Figure 95, avec une fraction lourde composée de granulats mixtes béton/brique et épurée des granulats de béton cellulaire qui sont concentrés dans la fraction légère.

6.3.2.2 Fraction (10/16 mm)

Le traitement sur la fraction (10/16 mm) a initialement été effectué à la même vitesse d'entraînement du ventilateur de la table qui a conduit à une bonne séparation de la fraction (4/10 mm), à savoir **2400 t/min**. A cette vitesse, les éléments les plus grossiers de béton cellulaire se retrouvent dans la fraction lourde (Figure 96).



Figure 96 : Fraction lourde récupérée par traitement gravimétrique de la fraction (10/16 mm) à une vitesse d'entraînement du ventilateur de 2400 t/min.

La fraction lourde et la fraction légère ont été recombinaées et la vitesse du ventilateur a été augmentée à **3000 t/min**. La Figure 97 permet de juger qualitativement la séparation entre béton cellulaire et béton/brique.

Fraction légère



Fraction lourde



Figure 97 : Fractions récupérées après séparation gravimétrique de la fraction (10/16 mm).

Comme attendu, la différence de densité entre le béton cellulaire et le mélange briques/béton est suffisamment grande pour avoir une séparation gravimétrique efficace. La sélection de la vitesse du ventilateur a dû être adaptée en fonction de la tranche granulométrique traitée et un seul passage a été suffisant pour obtenir une très bonne qualité de séparation.

6.3.2.3 Fraction (4/16 mm)

Afin d'estimer l'impact que peut entraîner le traitement d'une matière possédant une plus large tranche granulométrique sur l'efficacité de séparation, les fractions légères et lourdes récupérées suite au traitement des fractions (4/10 mm) et (10/16 mm) ont été recombinaées pour former une fraction (4/16 mm).

Le premier essai a été réalisé avec une valeur définie de **2400 t/min** pour la vitesse d'entraînement du ventilateur, qui correspond au paramètre opératoire pour obtenir une séparation efficace de la fraction (4/10 mm). Sans être parfaite, la séparation du béton cellulaire et du mélange béton/brique est visible

(Figure 98). Seuls quelques éléments, les plus grossiers, de béton cellulaire ne sont pas entrainés et restent dans la fraction lourde.



Figure 98 : Fractions récupérées par traitement gravimétrique de la fraction (4/16 mm) à une vitesse d'entraînement du ventilateur de 2400 t/min.

Les deux fractions ont été recombinaées et la vitesse d'entraînement du ventilateur a ensuite été augmentée jusque **3000 t/min**. Avec cette nouvelle valeur opératoire, la fraction lourde est épurée de toute présence de béton cellulaire. En contrepartie, les pertes de granulats de béton et de brique se retrouvant dans la fraction légère sont très importantes (Figure 99).



Figure 99 : Fractions récupérées par traitement gravimétrique de la fraction (4/16 mm) à une vitesse d'entraînement du ventilateur de 3000 t/min.

Afin de récupérer les granulats de béton et de brique entrainés dans les éléments légers, cette fraction a été retraitée avec la table densimétrique en redescendant la vitesse d'entraînement du ventilateur à **2400 t/min**. La fraction lourde qui en résulte reste composée uniquement de béton et de brique, et la fraction légère est majoritairement constituée de béton cellulaire, avec quelques égarés de béton et de brique (Figure 100).

Fraction légère



Fraction lourde



Figure 100 : Fractions récupérées par traitement gravimétrique à une vitesse d'entraînement du ventilateur de 2400 t/min de la fraction légère issue d'une première séparation gravimétrique de la fraction (4/16 mm) à une vitesse d'entraînement du ventilateur de 3000 t/min.

Les essais ont montré que la séparation des granulats de béton cellulaire pouvait être réalisée aisément par une technique gravimétrique.

La qualité de la séparation dépend de la vitesse du ventilateur et de la tranche granulométrique qui est traitée. Le tamisage préalable des matières permet de travailler avec des paramètres de séparation gravimétrique préétablis et fixes, ce qui semble plus facilement gérable d'un point de vue industriel.

6.3.2.4 Fraction (0/4 mm)

La fraction (0/4 mm), constituée à partir des flux de granulométrie identique de béton, brique et béton cellulaire, a également fait l'objet du traitement gravimétrique.

Compte tenu de la faible granulométrie de cette fraction, la vitesse d'entraînement du ventilateur de la table densimétrique a été initialement fixée à sa plus faible valeur, à savoir **600 t/min**. Suite à l'essai de séparation gravimétrique :

- une fraction lourde constituée de béton et de brique et exempte de béton cellulaire a pu être récupérée (Figure 101) ;
- la majeure partie de la matière légère est entraînée avec le flux d'air ascendant utilisé pour mettre en fluidisation l'échantillon et se retrouve dans les ultra-fines récupérées en sortie du cyclone ;
- la quantité de granulats composant la fraction légère est donc très faible et cette dernière est constituée des granulats de béton cellulaire de dimensions trop importantes pour être entraînés avec les fines et de quelques granulats de béton et de brique.

Fraction légère



Fraction lourde



Fraction fine



Figure 101 : Fractions récupérées par traitement gravimétrique de la fraction (0/4 mm) à une vitesse d'entraînement du ventilateur de 600 t/min.

La séparation gravimétrique effectuée sur la fraction (0/4 mm) est particulièrement intéressante puisqu'elle permet, d'une part, d'éliminer efficacement le béton cellulaire des granulats béton/brique, et, d'autre part, d'éliminer les particules ultra-fines, typiquement (0/63 μm). Cette fraction granulométrique (0/63 μm) est généralement en proportion trop élevée dans les granulats mixtes en sortie des centres de tri (entre 5 et 15 % pour les granulats (0/32 mm)) pour répondre aux spécifications imposées par le Qualiroutes pour une application en sous-fondation (entre 0 et 7 % de passant à 63 μm).

La Figure 102 présente l'analyse granulométrique de la fraction (0/4 mm) après traitement. Les résultats confirment que 99 % de la matière a une granulométrie supérieure à 63 μm et 90 % supérieure à 1 mm. Le traitement de cette fraction (0/4 mm) par gravimétrie permettrait donc à la fois de réduire la teneur en éléments néfastes pour une classification des granulats et la teneur en fines (0/63 μm) pour répondre aux critères de spécificité imposé par le Qualiroutes pour une application routière.

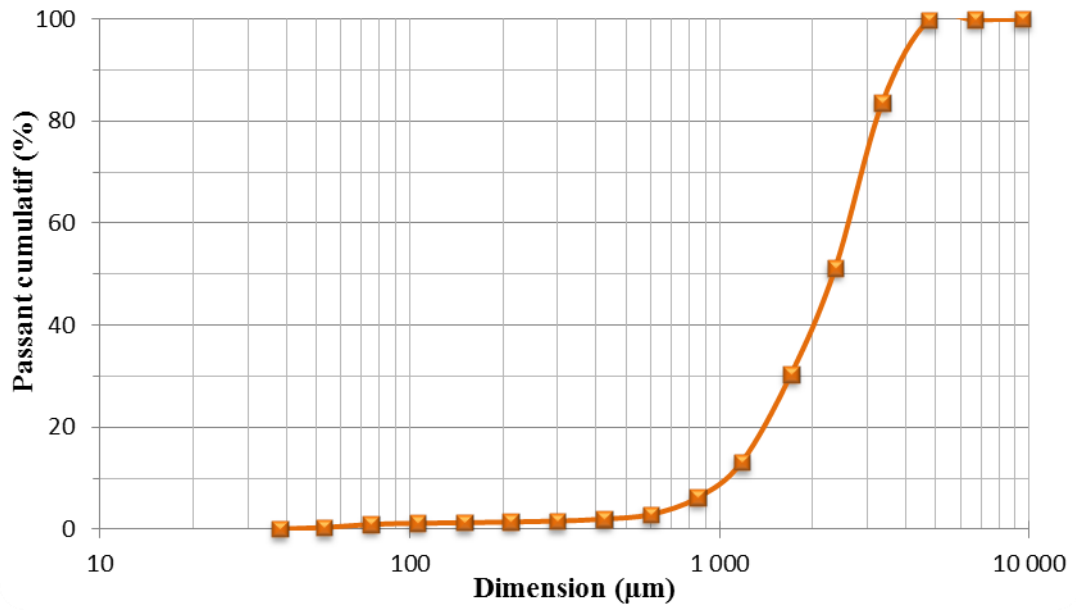


Figure 102 : Courbe granulométrique de la fraction lourde issue de la séparation gravimétrique (avec comme paramètre opératoire 600 t/min pour la vitesse d'entraînement du ventilateur) de la fraction (0/4 mm).

Tâche 7: Validation à grande échelle

7.1 Première planche d'essais : résistance au gel-dégel

La première planche d'essais a été réalisée afin de pouvoir étudier le comportement *in situ* de granulats recyclés mixtes 0/32 vis-à-vis des conditions météorologiques hivernales (*alternance de cycles gel-dégel, précipitations*) et de déterminer s'il existe des similitudes entre les résultats observés sur le terrain et les résultats obtenus par l'essai de sensibilité au gel-dégel (NBN 1367-1). Cette planche a été équipée de sondes de température disposées en surface et à différentes profondeurs de la couche testée. Des repères topographiques ont également été disposés à six endroits sur la surface de la planche.

7.1.1 Mise en place et démontage partiel de la planche

La planche d'essais a été réalisée le 4 décembre 2014 et partiellement démontée le 6 mai 2015, soit 6 mois après la mise en œuvre.

Le plan d'implantation de la planche d'essais est repris dans la Figure 103, ainsi que la position des différents capteurs et essais *in situ*.

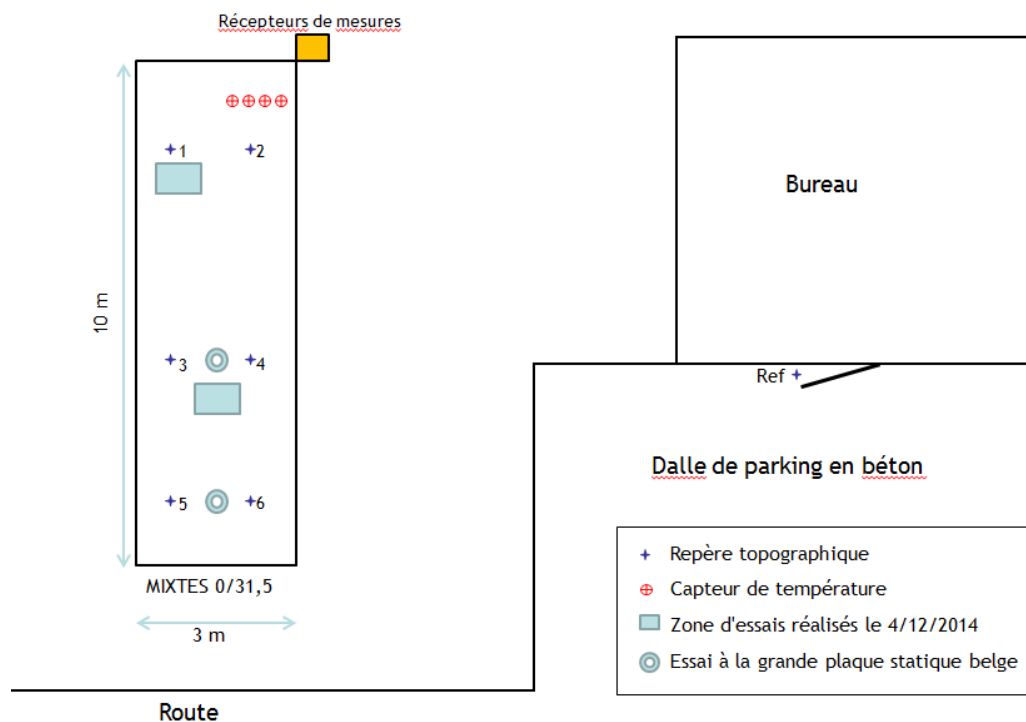


Figure 103 : Implantation de la planche d'essais et des différents points de mesure.

Les principales opérations réalisées sont les suivantes:

- Le terrassement du sol présent initialement sur une épaisseur de 30 cm (Figure 104);
- Le contrôle du sol-support au moyen de deux essais à la grande plaque statique belge. Les valeurs mesurées du coefficient de compressibilité sont égales à 33.2 et 29.4 MPa, ce qui est nettement supérieure à la valeur requise dans le CCT QUALIROUTES pour un fond de coffre ($M_1 \geq 17 \text{ MPa}$);

- La pose d'un géotextile (Figure 105);
- La mise en œuvre du recyclé mixte prélevé sur le stock de l'unité de traitement, situé à 300 mètres de la planche d'essais. Après versage au début de la planche, le matériel est étalé au moyen d'une lame sur toute la superficie de la planche sur une épaisseur d'une trentaine de centimètres avec l'incorporation des capteurs de température à différentes profondeurs (Figure 106);
- Le compactage de la couche au moyen d'un compacteur type BOMAG BW 213D selon la méthode couramment pratiquée sur chantier par l'entrepreneur, à savoir quatre passes au rouleau vibrant à faible amplitude et deux passes au rouleau non vibrant afin de fermer la couche (Figure 107).



Figure 104 : Préparation du sol-support (terrassement et compactage).



Figure 105 : Pose du géotextile.



Figure 106 : Mise en œuvre du recyclé 0/31,5.



Figure 107 : Compactage de la couche.

Des échantillons ont été prélevés pour analyses à différents stades de la mise en œuvre :

- Sur le stock
- Après versage sur la planche
- Après compactage.

La planche a été partiellement démontée le 6 mai 2015 (Figure 108), laissant en place les capteurs de températures ainsi que quatre des six repères topographiques.



Figure 108 : Démontage partiel de la planche.

Lors de ce démontage, il s'est avéré que l'épaisseur de la planche était plus importante que les 30 cm initialement prévus, atteignant par endroit 44 cm. Des échantillons ont été prélevés à trois profondeurs différentes :

- 0-10 cm
- 10-20 cm
- 20-44 cm

La partie de la planche laissée en place a fait l'objet d'un suivi jusqu'à la fin du projet. Néanmoins, la planche étant exposée aux intempéries, son état de surface se dégrade rapidement (Figure 109).



Figure 109 : Etat de la planche d'essai au 1/12/2015.

7.1.2 Evolution des températures

La planche d'essais a été équipée de 4 capteurs de température afin de mesurer, en surface et en profondeur, les variations climatiques et de s'assurer de la présence de périodes de gel et de périodes de dégel.

La dénomination des différents capteurs est la suivante :

- **Capteur 1** : capteur positionné en surface de la planche d'essais
- **Capteur 2** : capteur positionné à 5 centimètres sous la surface
- **Capteur 3** : capteur positionné en milieu de couche
- **Capteur 4** : capteur posé sur le géotextile

L'ensemble des valeurs mesurées par les capteurs est présenté à l'Annexe V, tandis que la Figure 110 présente l'évolution des températures au cours du mois de janvier 2015, le plus froid de l'hiver de cette année.

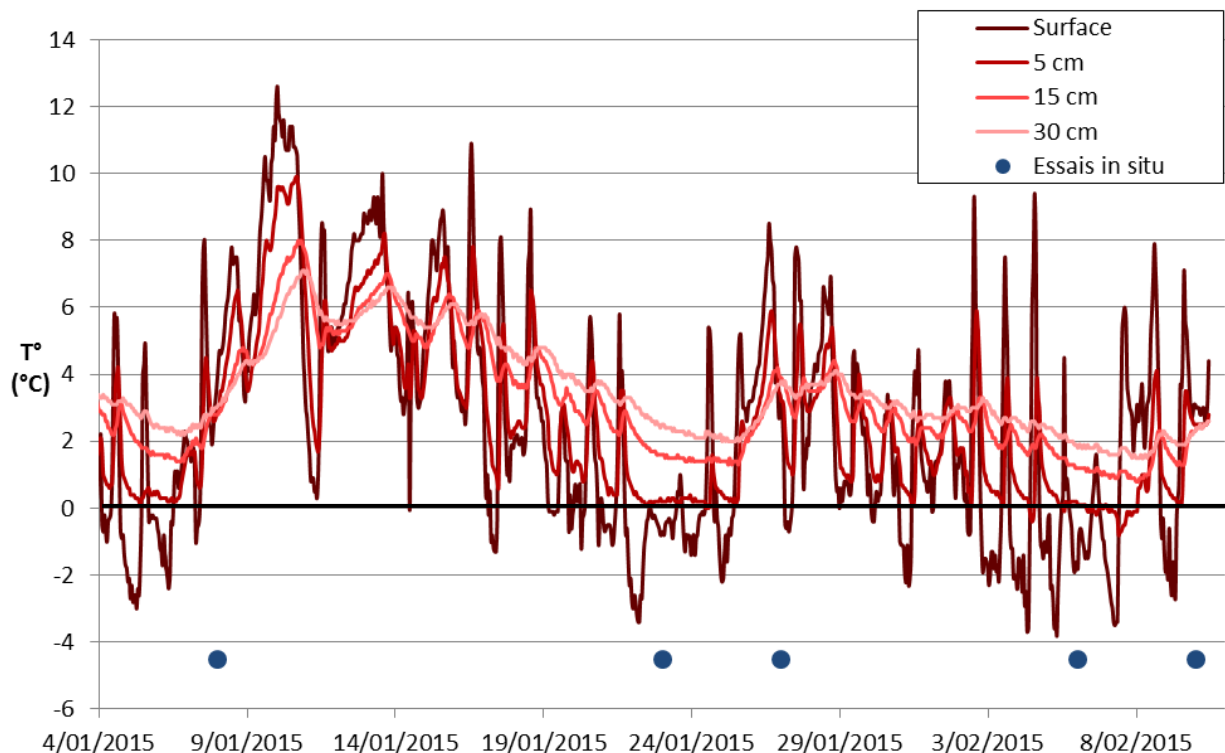


Figure 110 : Evolution des températures mesurées par les différents capteurs au cours du mois de janvier 2015.

Les capteurs de température ont montré la présence d'une succession de cycles de gel-dégel en surface. Le front de gel associé est cependant rarement descendu à une profondeur supérieure à 5 cm et en aucun moment il n'a atteint les 15 cm.

Sur la Figure 110 sont également représentées les dates lors desquelles des essais in situ ont été menés. A deux reprises, ils ont été réalisés au cours d'une période de gel de plus de 24h, puis quelques jours plus tard, après le dégel.

Au cours de l'hiver 2015-2016, pour la portion de la tranchée qui n'a pas été démontée, les températures observées ont été relativement clémentes, avec une seule période de gel prolongé entre le 18 et le 22 janvier.

7.1.3 Levers topographiques

Six repères topographiques ont été placés à différents endroits de la planche. Leur implantation est reprise à la Figure 111.



Figure 111 : Positionnement des six repères topographiques sur la planche d'essai.

Des relevés topographiques ont été réalisés à différents moments. Le Tableau L reprend les principaux résultats mesurés.

**Tableau L – Résultats des levés topographiques réalisés sur la planche d'essais gélivité
(valeurs exprimées en mm).**

Date	Remarque	1	2	3	3 corr	4	5	6	Moyenne
4/12/2012	Mise en place	0	0	0	0	0	0	0	
9/12/2014	7°C – soleil	0.5	0.2	-3.1	/	0.3	0.8	0.4	0.44
22/12/2014	12°C – vent	0.8	0.7	-3.1	/	0	1.2	1.4	0.82
8/01/2015	9°C – Pluie après périodes gel	1.4	1.5	-1.5	1.6	1	1.8	1.9	1.53
23/01/2015	0°C – Sec et gel nocturne	4.6	3.9	1	4.1	2.1	4.3	5.1	4.02
27/01/2015	3°C – Dégel et soleil	1.6	1.5	-1.4	1.7	1.1	2.2	2.3	1.73
6/02/2015	-2°C – Gel depuis 2 jours	8	8.5	5.2	8.3	6.9	9.4	8.7	8.3
10/02/2015	6°C – Dégel	2.9	2.8	0.1	3.2	2.3	4	4.3	3.25
5/03/2015	4°C – Soleil	2.3	2.1	-0.2	2.9	2	2.3	3.2	2.47
10/04/2015	13°C – Soleil	3.5	3.5	0.9	4	3.3	4.3	4.8	3.9
6/05/2015	15°C – Soleil + Vent – Démontage	4.3	3.3	0.6	3.7	3.4	4.1	5.9	4.1
28/05/2015	16°C – Temps gris sans pluie	3	3.3	0.8	3.90	4	/	/	3.55
27/07/2015	15°C – Temps pluvieux	3.3	3.6	1.7	4.80	4.4	/	/	4.03
28/08/2015	17°C – Temps pluvieux	2.9	3.1	2.2	5.30	4.4	/	/	3.93
1/12/2015	11°C – Temps pluvieux	5.9	5.7	8.7	6.8	5.9	/	/	6.62
22/12/2015	11°C – Temps pluvieux	5.7	5.4	8.8	6.4	5.7	/	/	6.61
13/01/2016	3.5°C – Soleil + nuages	6.4	6.4	5.8	7.3	6.4	/	/	6.48
20/01/2016	3.5°C – Soleil + nuages	14	17.9	12.4	15.9	14	/	/	15.05
28/01/2016	7°C – Soleil + nuages	7.6	3.8	5.6	8.5	7.6	/	/	6.38
29/02/2016	3°C – Soleil + nuages	6.1	6.4	6.5	6.8	6.1	/	/	6.45

Dans le Tableau L, les mesures pour le point 3 montrent un tassement important de 3.1 mm entre la mise en place et la seconde mesure, puis un comportement similaire aux autres points à partir de ce moment. Le tassement est probablement dû à un évènement ponctuel (enfouissement de la borne de référence) plutôt qu'à un tassement des recyclés. Pour cette raison, les valeurs pour le point 3 ont été corrigées avant d'être intégrées dans la moyenne.

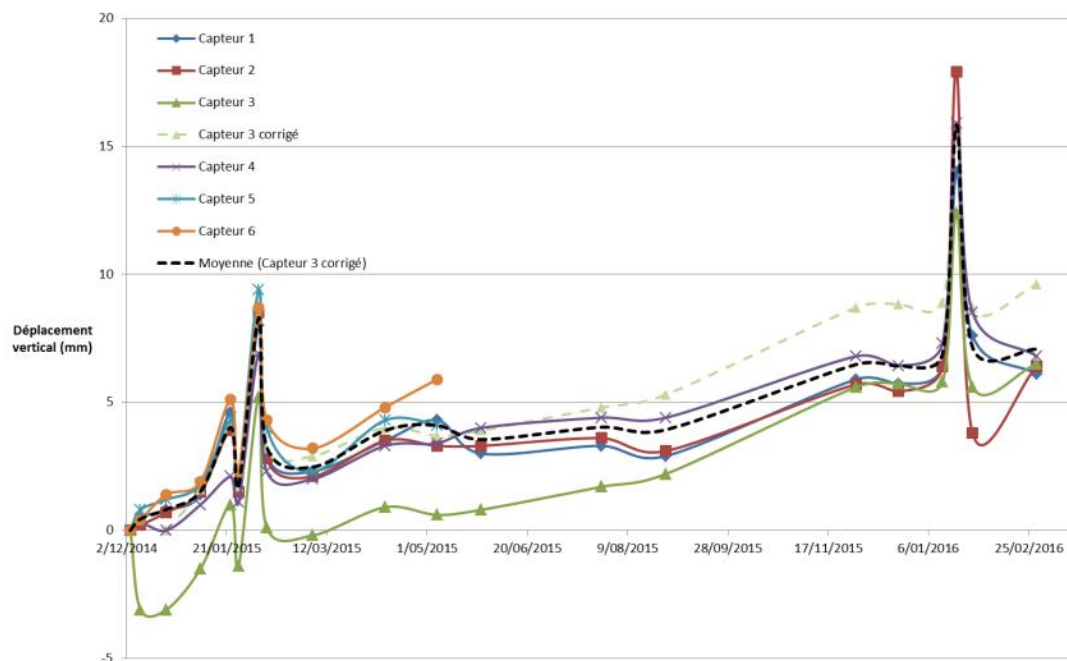


Figure 112 : Gonflements mesurés au théodolite sur la première planche d'essai.

On constate, d'une part, un gonflement temporaire apparaissant lorsque le sol est gelé et, d'autre part, une tendance globale au gonflement. Le gonflement global au démontage est de l'ordre de 1.5% (2.3% après le second hiver).

Le gonflement temporaire observé est probablement dû à la dilatation de l'eau présente en surface sous l'effet du gel. Le gonflement global est lui aussi probablement lié à la présence d'eau dans la planche, qui n'est pas protégée contre les intempéries. Il n'est donc pas nécessairement représentatif d'un comportement en sous-fondation, normalement protégée des intempéries par les couches de fondation et de revêtement.

Un gonflement progressif similaire avait été mesuré lors d'une précédente planche d'essais concernant des mâchefers. Afin de déterminer si ce phénomène est typique des matériaux recyclés, une troisième planche d'essai a été mise en œuvre au cours de l'hiver 2015-2016 avec des granulats naturels et des recyclés de béton exposés aux intempéries. Les résultats sont détaillés au §7.3.

7.1.4 Suivi des propriétés in situ

Différentes interventions sur chantier ont été faites, sous des conditions climatiques variables, afin d'avoir une idée de l'influence de ces conditions sur le comportement du matériau.

7.1.4.1 Gammadensimètre

(a) Description sommaire de l'essai

Le principe du gammadensimètre repose sur le comptage des particules gamma produites par une source radioactive (Césium 137) placée à l'extrémité d'une tige en acier dans le sol. Ces particules traversent un certain volume de matériau connu. La valeur dépend de la différence entre le nombre de particules émises par la source radioactive et le nombre de particules recueillies par le récepteur situé à la surface. Ce flux est fonction de la masse volumique du matériau traversé.

(b) Interprétation des résultats

Les mesures au gammadensimètre ont été réalisées en deux points à la mise en œuvre ainsi qu'au démontage de la planche. Les résultats sont détaillés dans le Tableau LI et représentés graphiquement à la Figure 113.

Tableau LI : Résultats des mesures effectuées au gammadensimètre sur la planche d'essai après la mise en œuvre et avant le démontage.

Date	Profondeur (cm)	Point 1		Point 2		Moyenne	
		Compactage (%)	Teneur en eau (%)	Compactage (%)	Teneur en eau (%)	Compactage (%)	Teneur en eau (%)
4/12/2014 Mise en œuvre	-5	82.13	10.59	84.13	10.31	83.13	10.45
	-15	86.97	9.10	89.16	9.12	88.07	9.11
	-30	90.45	8.33	89.67	9.35	90.06	8.84
6/5/2015 Démontage	-5	84.45	15.26	79.1	16.55	81.78	15.91
	-10	84.75	15.94	87.56	15.92	86.16	15.93
	-15	89.28	14.73	93.69	13.98	91.49	14.36
	-20	90.15	14.25	95.66	13.93	92.91	14.09
	-25	92.91	12.72	96.51	14.42	94.71	13.57
	-30	91.92	14.15	97.00	13.80	94.46	13.98

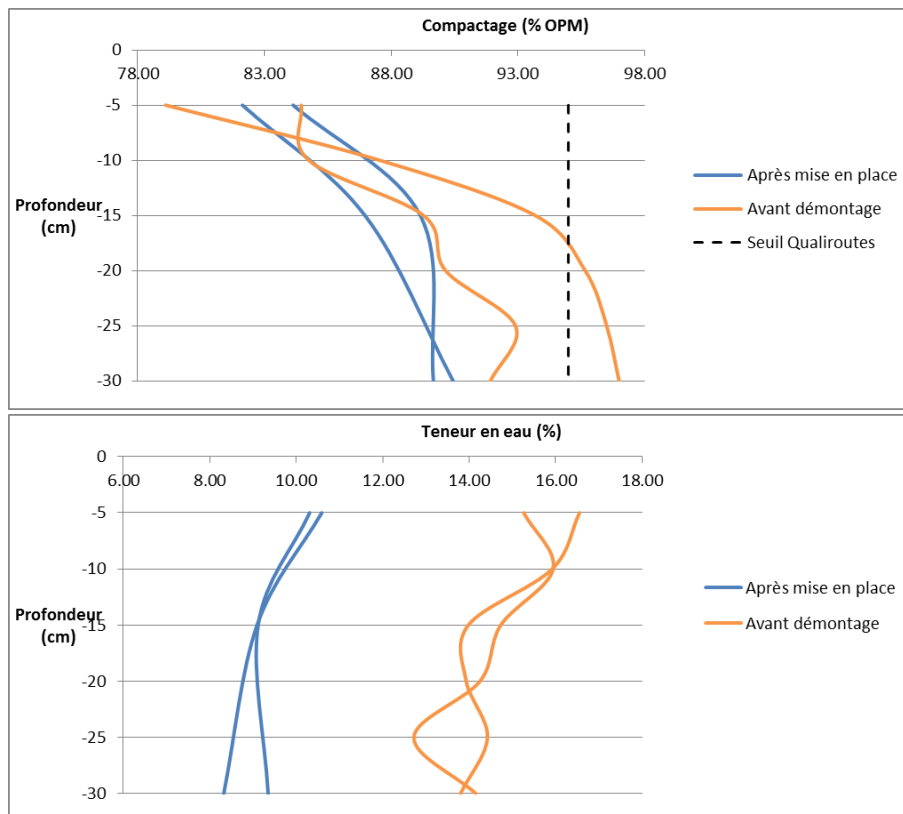


Figure 113 : Taux de compactage et teneur en eau mesurés au gammadensimètre sur la planche d'essai.

Le taux de compactage mesuré lors de la mise en œuvre varie de 82 à 90.5% de l'OPM (optimum Proctor modifié, voir §7.1.5.5). Le compactage est donc insuffisant au regard de la norme, qui requiert un taux de compactage au moins égal à 95% de l'optimum Proctor.

La teneur en eau mesurée lors de la mise en œuvre est de 8 à 11%. Elle est donc inférieure à la teneur en eau à l'optimum Proctor, qui est de 12% (§7.1.5.5), ce qui peut expliquer les valeurs trop faibles obtenues pour le taux de compactage. Le jour du démontage, la teneur en eau mesurée est de l'ordre de 14-16%. Cette teneur en eau élevée est probablement due aux précipitations qui sont tombées les jours avant le démontage, mais elle est peut-être liée également au fait que la planche d'essai ne soit pas drainée.

7.1.4.2 Essai à la plaque belge

L'essai à la plaque statique permet de déterminer la portance d'un sol au moyen d'un *coefficient de compressibilité* (M_1) en déterminant la déformation d'un sol (*milieu élastique*) soumis à une contrainte de charge statique.

(a) Description sommaire de l'essai

Le principe général de l'essai consiste à appliquer plusieurs paliers de charge statique au moyen d'un vérin hydraulique et d'une plaque circulaire sur le matériau et à mesurer l'enfoncement de la plaque. Le coefficient de compressibilité est ensuite obtenu par la formule suivante :

$$ME = 2 r \left(\frac{\Delta p}{\Delta s} \right) \text{ (MPa)} \quad \text{avec} \quad \begin{array}{l} r : \text{ rayon de la plaque (cm)} \\ \Delta p : \text{ Différence de pression (MPa)} \\ \Delta s : \text{ Différence de tassement (cm)} \end{array}$$

Les différents paliers de charge et les différences de pression entre les paliers Δp à prendre en compte dans la formule, dépendent du type de couche mesurée (*remblai, sous-fondation, fondation*).

Deux diamètres de plaque peuvent être utilisés selon la granulométrie du matériau testé :

- La petite plaque de 200 cm² (Ø 16 cm) est utilisée pour des sols fins (*argile, limon*) et des empierrements dont le diamètre maximal ne dépasse pas 40 mm.
- La grande plaque de 750 cm² (Ø 31 cm) est utilisée pour des matériaux sableux et des empierrements dont le diamètre maximal dépasse 40 mm.

L'essai mesure en réalité le comportement du matériau dans une zone d'influence située sous la plaque et dont le diamètre est souvent considéré comme égal à 2 fois le diamètre de la plaque.

Dans certains cas, un deuxième cycle de chargement est réalisé afin d'obtenir le *rapport* $m = M_2/M_1$. L'interprétation de ce rapport m est la suivante :

- La valeur de m est faible ($m < 2,5$) : il ne s'agit pas réellement d'un problème de compactage car le matériau a atteint son maximum de compacité. Cependant, d'autres paramètres tels que la mauvaise qualité du matériau, une mise en œuvre non conforme et/ou la faible portance des couches sous-jacentes peuvent expliquer que la couche ne convienne pas aux exigences demandées dans les documents.

- *La valeur de m est très élevée* : cela signifie que le premier palier a en réalité réalisé le compactage supplémentaire des terrains. Le matériau n'a pas atteint son maximum de compacité. Il faut poursuivre le compactage du terrain et refaire un nouvel essai.

(b) Interprétation des résultats

La grande plaque a été utilisée car le diamètre maximal du matériau excède 40 mm. Les résultats sont repris dans le tableau ci-dessous.

Tableau LII – Résultats des essais à la plaque statique réalisés sur la planche d'essais gélivité.

Période	Couche testée	Coefficient M_1 (MPa)	Coefficient M_2 (MPa)	Rapport $m = M_2/M_1$
4/12/2014 (1)	Fond de coffre	38.6	/	/
4/12/2014 (1)	Recyclés	33.2	110.36	3.32
4/12/2014 (2)	Recyclés	29.42	93.64	3.18
6/05/2015	Recyclés	68.67	181.76	2.65
29/02/2016	Recyclés	21	/	/

Les principales observations réalisées sont les suivantes :

- *Les valeurs du coefficient de compressibilité (M_1)* mesurées après la mise en œuvre des recyclés, sont comprises entre 29 et 34 MPa, soit des valeurs proches du critère généralement requis pour une sous-fondation, à savoir 35 MPa.
- *Les valeurs du rapport m* sont relativement élevées (> 2.5). Il est donc fort probable qu'un compactage supplémentaire aurait pu être réalisé lors de la mise en œuvre.
- *Le coefficient de compressibilité* au moment du démontage de la planche (6/5/2015) est deux fois plus élevé qu'après sa mise en œuvre. Ceci pourrait être dû à des réactions secondaires (prise hydraulique résiduelle) qui peuvent apparaître dans les matériaux recyclés. Une attention particulière doit cependant être portée à la perméabilité des matériaux qui sont utilisés en sous-fondation dont un des rôles importants est le drainage.
- La valeur mesurée après le second hiver est très faible. Il sera intéressant d'effectuer d'autres mesures afin de déterminer si cette dégradation est temporaire et due aux conditions climatiques ou si elle est permanente et résulte de l'état de dégradation de la surface de la planche (voir Figure 109).

7.1.4.3 Plaque dynamique allemande

(a) Description sommaire de l'essai

L'essai à la plaque dynamique allemande consiste à faire chuter d'un mètre de haut une masse de 10 ou 15 kg le long d'un tube guide sur une plaque rigide de 300 mm de diamètre et à mesurer la déflexion du sol sous la plaque. Le rayon d'influence de l'essai correspond à 1,5 fois le diamètre de la plaque, soit 45 cm.

Un essai complet comprend 6 impacts dont les 3 premiers servent à la bonne mise en place de la plaque pour éviter les erreurs de couche. Les trois derniers impacts servent à mesurer la déflexion et interviennent dans le calcul du module de déformation dynamique.

Le **module de déformation dynamique** (E_{vd}) peut être déterminé grâce à la relation suivante :

$$E_{vd} = \frac{1,5 r \cdot \sigma}{S} = \frac{22.5}{S} \text{ (MPa)} \quad \text{avec} \quad \begin{array}{l} r : \text{ rayon de la plaque} = 0.15 \text{ m} \\ \sigma : \text{ Charge appliquée} = 0,1 \text{ MN/m}^2 \\ S : \text{ Déflexion de la plaque (m)} \end{array}$$

Ce type d'essai n'est pas utilisé en Belgique. Il n'existe donc pas de critère belge. Cependant, en Allemagne, où cet essai est pratiqué, les différents documents administratifs recommandent des valeurs proches de 60 pour une sous-fondation. Ces valeurs varient d'une région à l'autre.

Il n'existe à ce jour pas de corrélation bien définie avec le coefficient de compressibilité (M_1) obtenu avec l'essai à la plaque statique belge.

(b) Interprétation des résultats

Les essais à la plaque dynamique légère allemande ont été réalisés à différents moments à partir de la mise en œuvre du matériau. Suite à une défaillance de l'appareil de mesure (de type ZORN), un dispositif plus ancien (de type HMP LFG) a été utilisé entre décembre 2015 et janvier 2016. Un essai comparatif, mené en février 2016, n'a néanmoins pas révélé de différence trop importante entre les mesures effectuées entre les deux dispositifs.

Le Tableau LIII reprend l'ensemble des résultats mesurés lors de la planche d'essais, tandis que la Figure 114 présente l'évolution du module moyen mesuré.

Tableau LIII – Résultats des essais à la plaque dynamique allemande réalisés sur la planche d'essais.

E _{vd} (essai à la plaque dynamique allemande)					
Date	Modèle	Evd1 (MN/m ²)	Evd2 (MN/m ²)	Evd 3 (MN/m ²)	Evd moy (MN/m ²)
4/12/2014 (1)	ZORN 10 kg	24.42	19.42	23.68	22.51
4/12/2014 (2)	ZORN 10 kg	19.37	24.23	20.72	21.44
9/12/2014	ZORN 10 kg	26.12	28.87	28.46	27.82
22/12/2014	ZORN 10 kg	43.1	35.9	38.48	39.16
8/01/2015	ZORN 10 kg	40.71	33.89	41.16	38.59
23/01/2015	ZORN 10 kg	51.53	61.03	62.15	58.24
27/01/2015	ZORN 10 kg	37.54	27.57	47.74	37.62
6/02/2015	ZORN 10 kg	78.31	68.74	62.73	69.93
10/02/2015	ZORN 10 kg	56.72	50.07	47.6	51.46
5/03/2015	ZORN 10 kg	38.62	38.4	37.25	38.09
10/04/2015	ZORN 10 kg	45.24	46.04	52.49	47.92
6/05/2015	ZORN 10 kg	41.56	51.53	54.97	49.35
27/07/2015	ZORN 10 kg	49.41	38.79	50.45	46.22
28/08/2015	ZORN 10 kg	40.08	52.9	52.92	48.63
1/12/2015	HMP LFG 10 kg	31.72	30.35	32.99	31.69
22/12/2015	HMP LFG 10 kg	18.53	14.49	12.74	15.25
13/01/2016	HMP LFG 10 kg	11.85	14.69	20.99	15.84
20/01/2016	HMP LFG 10 kg	127.12	119.82	115.38	120.77
28/01/2016	HMP LFG 10 kg	30.08	21.31	17.28	22.89
29/02/2016	HMP LFG 10 kg	21.91	21.84	21.11	21.62
	ZORN 10 kg	28.77	23.08	19.9	23.92

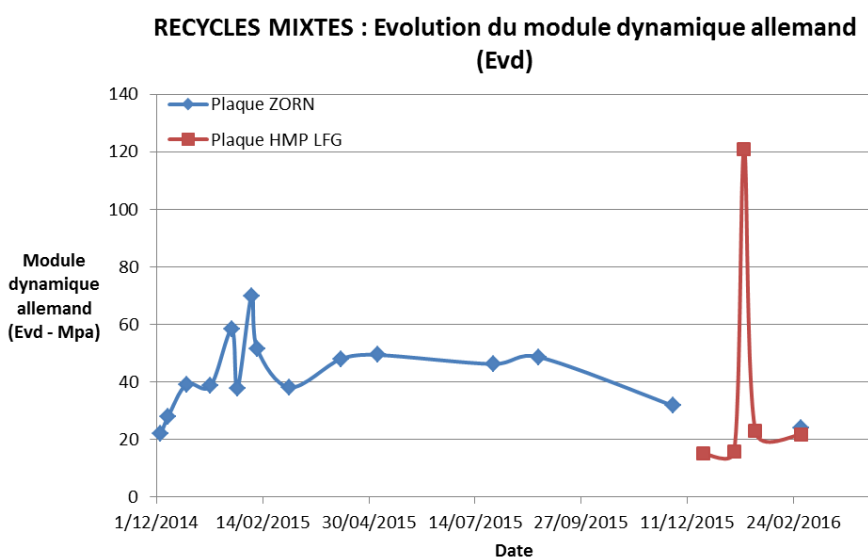


Figure 114 : Evolution du module dynamique allemand sur la planche d'essai.

Les observations principales sont les suivantes :

- Une augmentation temporaire de la rigidité de la surface par temps de gel, présentant des similitudes importantes avec le gonflement de la surface (Figure 112);
- Une augmentation progressive du module dynamique allemand au cours des premiers mois. On observe en effet qu'il a plus que doublé au cours des 10 premiers mois après la mise en œuvre ;
- Une diminution importante des valeurs entre le 10^{ème} et le 13^{ème} mois. Le module revient alors à des valeurs similaires voire inférieures à celles mesurées juste après la mise en œuvre. Cela peut probablement s'expliquer par une détérioration de la partie superficielle (présence d'une faible couverture végétale

Ces observations concordent bien avec les résultats de l'essai à la plaque belge statique : le matériau présente dans un premier temps une augmentation de module avant une forte diminution des valeurs.

7.1.4.4 Pénétrromètre Panda

(a) Description sommaire de l'essai

L'essai au pénétromètre dynamique à énergie variable de type PANDA consiste à enfoncer dans le sol par battage manuel, un train de tiges muni à son extrémité inférieure d'une pointe conique de diamètre de 4 cm² et à mesurer la résistance dynamique à l'enfoncement (q_d) du matériau en place à partir de la mesure de l'énergie de frappe et de l'enfoncement de la pointe, via la formule dite des Hollandais (*formule utilisée pour les pieux battus*).

Les résultats ainsi obtenus sont représentés sous forme de graphique appelé pénétrogramme montrant l'évolution de la résistance dynamique en fonction de la profondeur. L'interprétation des résultats peut se faire pour deux cas de figures : la reconnaissance de terrain (*identification des différents types de sol, détection d'anomalie éventuelle et prévision de certains comportements du terrain, etc.*) et le contrôle du compactage et de ses anomalies éventuelles à l'aide de courbes de référence adaptées au type de matériau utilisé dans le remblai.

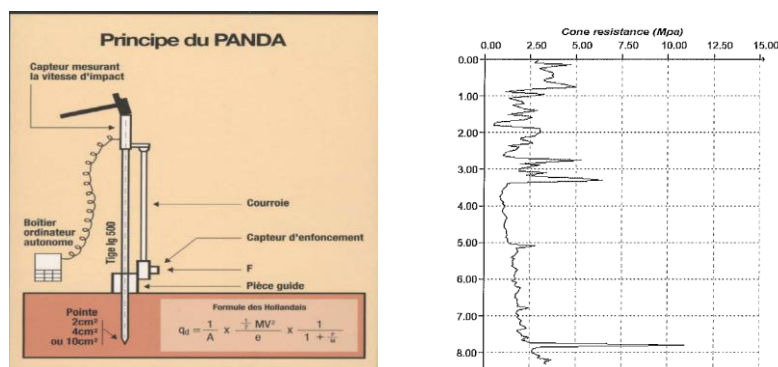


Figure 115 : Principe du PANDA et exemple de pénétrogramme.

(b) Interprétation des résultats

Les essais au PANDA ont été réalisés à différents moments sur la planche d'essais, et poursuivis après son démontage partiel. En raison d'une défaillance technique de l'appareil au cours du mois de février 2015, un ancien modèle a été utilisé pour les mesures effectuées durant son indisponibilité. Les résultats sont représentés à la Figure 116.

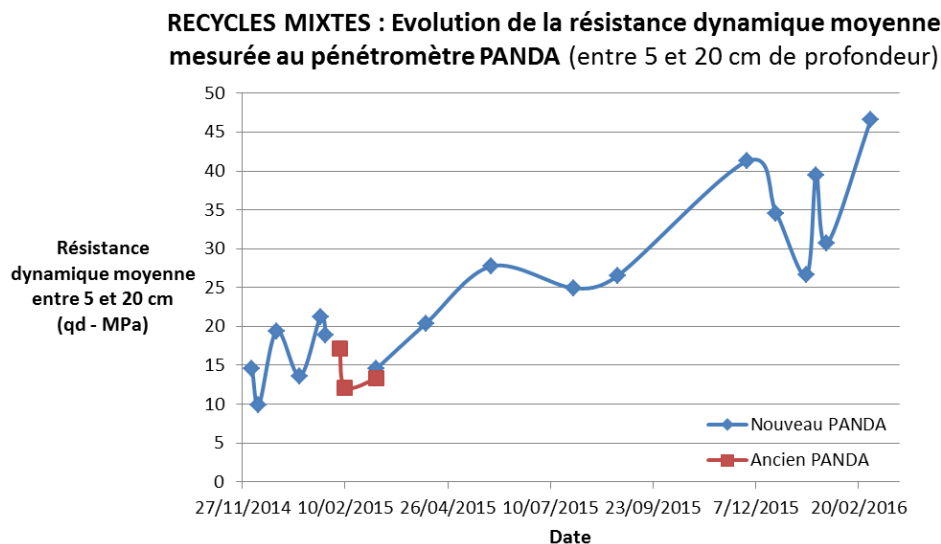


Figure 116 : Résistance dynamique moyenne mesurée au PANDA entre 5 et 20 cm sur la planche d'essai.

Les principales observations sont les suivantes :

- L'augmentation ponctuelle en cas de gel est beaucoup moins marquée que pour la plaque dynamique allemande. Ceci peut s'expliquer par le fait que les mesures concernent ici des profondeurs supérieures à 5 cm uniquement.
- On observe une tendance globale à l'augmentation de la résistance dynamique. Les valeurs après le second hiver ne semblent pas s'effondrer autant que pour les essais à la plaque statique et à la plaque dynamique allemande.
- L'évolution de la résistance dynamique évolue globalement de façon moins régulière que ce qui avait été observé pour la plaque dynamique allemande. Ceci est probablement lié au fait que l'essai PANDA est plutôt destiné aux sols qu'à des matériaux granulaires. En effet, les résultats peuvent être fortement influencés par la présence de granulats plus grossiers sous la pointe, ce qui génère une plus grande dispersion des valeurs.

7.1.5 Caractéristiques des échantillons prélevés sur le site

Des échantillons de matériaux ont été prélevés à différents moments de la mise en œuvre ainsi qu'au démontage partiel de la planche afin de pouvoir suivre l'évolution dans le temps de quelques-uns de leurs comportements et de leurs caractéristiques. Lors du démontage partiel, les échantillons ont été prélevés à différentes profondeurs afin de pouvoir différencier les granulats de surface ayant subi plusieurs cycles de gel des couches plus profondes, pour lesquelles la température n'est pas descendue sous les 0°C.

7.1.5.1 Composition

La composition de l'échantillon prélevé après compactage a été étudiée par le CTP de façon similaire aux échantillons recyclés (§1.5.1). Les résultats sont détaillés au Tableau LIV et représentés à la Figure 117.

Tableau LIV : Répartition massique des granulats mixtes M 6033.

Après compactage - M 5837 A	
Fraction granulométrique	Répartition massique (%)
(4/30 mm)	70,5
(0/4 mm)	29,5
Catégories	Répartition massique de la fraction supérieure à 4 mm (%)
Rc	41,3
Ru	24,6
Rb	32,1
Ra	1,3
Rg	0,1
X	0,3
Fl	0,3

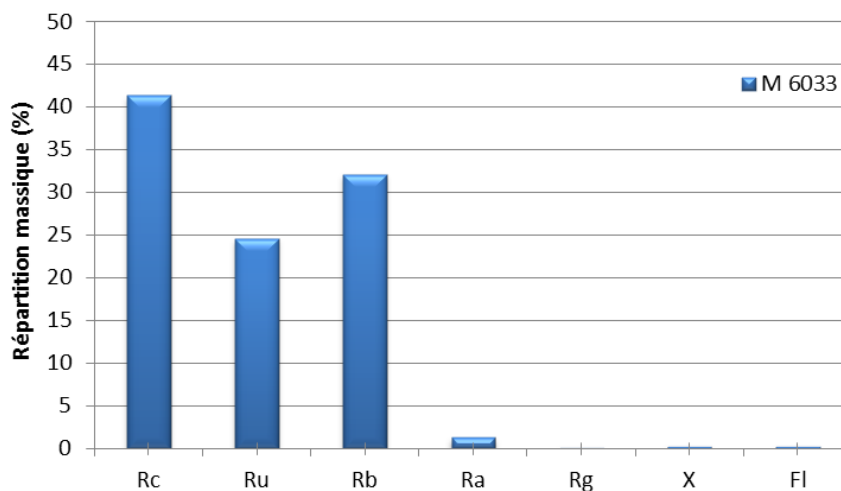


Figure 117 : Distribution des granulats mixtes M 6033.

Cet échantillon respecte tous les critères pour répondre à la classification de granulats mixtes. Il possède une teneur en fraction 0/4 de 30 %, soit une valeur équivalente à celles observées pour les granulats mixtes en provenance des différents centres de traitement.

7.1.5.2 Granulométrie

Des échantillons ont été prélevés à différents moments de la mise en œuvre des recyclés, notamment afin d'observer l'évolution du matériau (principalement de sa teneur en fines f) lors des opérations de

prélèvement, transport (bien que très court), versage et compactage. Les courbes correspondantes sont représentées à la Figure 118.

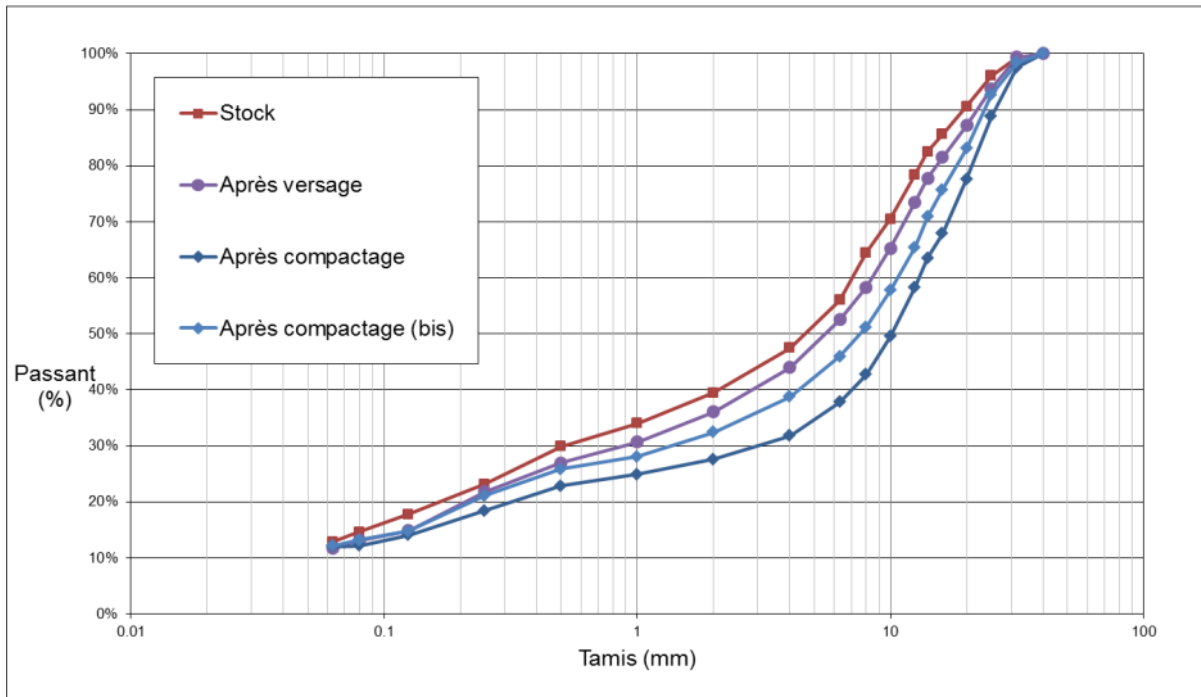


Figure 118 : Granulométrie des échantillons prélevés lors de la mise en œuvre de la planche.

Contrairement à ce qui était attendu, les échantillons ayant subi le plus de manipulations ont une granulométrie plus grossière, avec légèrement moins de fines (f) mais surtout beaucoup moins d'éléments moyens. Il convient d'être prudent dans l'interprétation des résultats vu la présence d'une certaine hétérogénéité dans les valeurs d'analyse granulométrique, d'où l'acceptation d'un fuseau granulométrique. Cette variation est probablement due à une migration des éléments plus fins en profondeur lors de la manipulation. Les échantillons prélevés sur la tranchée l'ont été en bordure de celle-ci, afin de ne pas l'endommager. Suite à la mise en œuvre, il est donc possible que la composition granulométrique de cette zone diffère de la composition moyenne de la fosse.

La courbe de l'échantillon après compactage s'écartait de façon très importante des courbes mesurées sur les échantillons prélevés sur stock et après versage. Sa granulométrie a donc été évaluée une seconde fois sur base du même échantillon. Ce second essai s'écarte moins des autres courbes mais illustre la variabilité des résultats de l'essai sur ce type d'échantillons. La différence constatée peut également être due au fait que les échantillons prélevés après compactage l'ont été en bordure de tranchée et non au centre. La ségrégation des différentes granulométries lors du versage a donc pu jouer un rôle dans le fait que la granulométrie est différente de ce que l'on trouve au centre de la tranchée.

Les granulométries mesurées lors du démontage de la planche sont comparées à celles mesurées sur le stock et après compactage à la Figure 119.

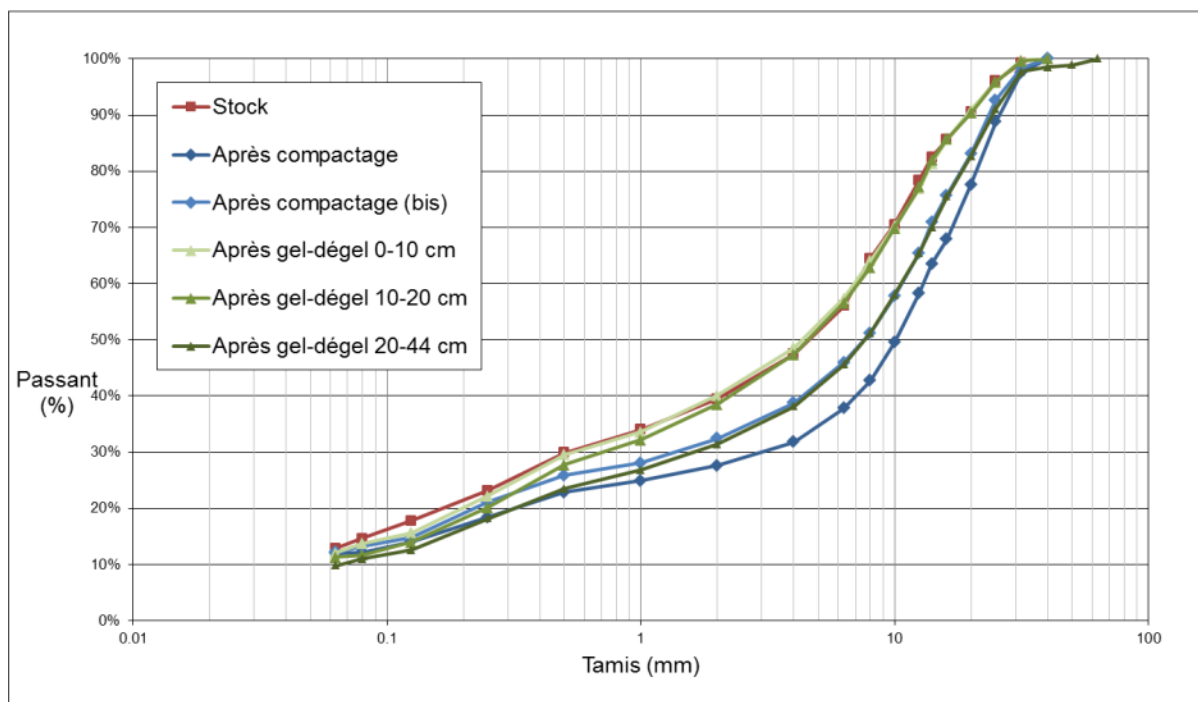


Figure 119 : Granulométrie des échantillons prélevés lors du démontage de la planche.

Sur la Figure 119, on observe que les granulométries mesurées sur les échantillons prélevés en surface (0-10 cm) et au centre (10-20 cm) ont une granulométrie assez similaires à celle mesurée sur le stock, tandis que l'échantillon prélevé plus profondément a une granulométrie qui se rapproche plus de celle mesurée juste après le compactage. Il est difficile à ce stade de distinguer clairement la part liée à la variabilité des échantillons et la part liée à l'influence des différentes contraintes.

Toutes les teneurs en fines (f) sont comprises dans un intervalle de 3%. Aucune production importante de fines (f) lors des différentes opérations ou suite à la succession de cycles gel-dégel n'a pu être observée. La variabilité importante des résultats pour un même échantillon ne nous permet pas d'interpréter les légères différences entre les courbes comme résultant d'une réelle évolution du matériau.

7.1.5.3 M_{DE} – LA

Les essais Micro-Deval et Los Angeles ont été effectués sur les échantillons prélevés sur le stock, après compactage et lors du démontage de la fosse. Les résultats sont détaillés dans le Tableau LV et représentés à la Figure 120.

Tableau LV : Résultats des essais Micro-Deval et Los Angeles menés sur les échantillons prélevés sur la planche d'essai.

	M _{DE-1} (%)	M _{DE-2} (%)	M _{DE} (%)	LA (%)	M _{DE+LA} (%)
Stock	49	47	48	42	90
Après compactage	46	45	45.5	39	84.5
Après gel-dégel, 0-10 cm	44	47	45.5	42	87.5
Après gel-dégel, 10-20 cm	47	47	47	43	90
Après gel-dégel, 20-44 cm	49	48	48.5	43	91.5

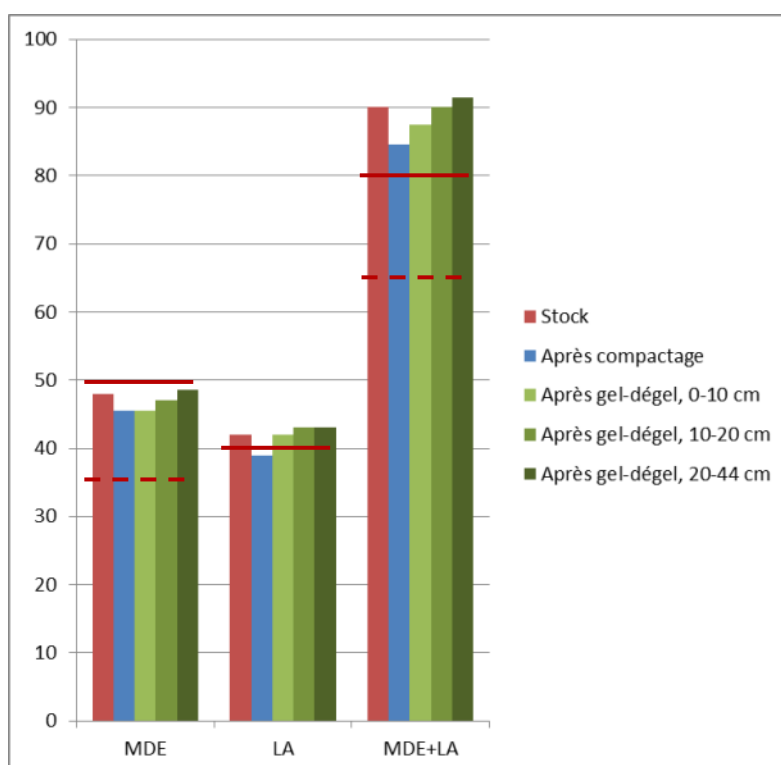


Figure 120 : Résultats des essais Micro-Deval et Los Angeles menés sur les échantillons prélevés sur la planche d'essai.

Les résultats des essais Micro-Deval et Los Angeles montrent une tendance très similaire, avec assez peu de variations d'un échantillon à l'autre. L'échantillon prélevé après compactage a des propriétés légèrement meilleures que celui prélevé sur le stock, tandis que l'échantillon prélevé en surface lors du démontage a de meilleures propriétés que ceux prélevés plus en profondeur. Ceci pourrait s'expliquer par une dégradation au cours de l'hiver ou du compactage des granulats les plus fragiles. Les granulats restants, pour une même fraction granulométrique, sont donc potentiellement plus résistants.

Néanmoins, les variations sont trop faibles par rapport à la variabilité intrinsèque du matériau pour tirer des conclusions définitives.

7.1.5.4 Gélivité

Les échantillons prélevés sur la planche d'essai ont été également soumis à un essai de gel-dégel. Les résultats sont détaillés dans le Tableau LVI et représentés à la Figure 121.

Tableau LVI : Résultats des essais de sensibilité au gel-dégel menés sur les échantillons prélevés sur la planche d'essai.

Echantillon	F (%)	Fines gel-dégel (%)
Stock	19.48	1.06
Après compactage	14.32	0.79
Après gel-dégel, 0-10 cm	11.77	1
Après gel-dégel, 10-20 cm	11.94	1.28
Après gel-dégel, 20-44 cm	13.77	1.37

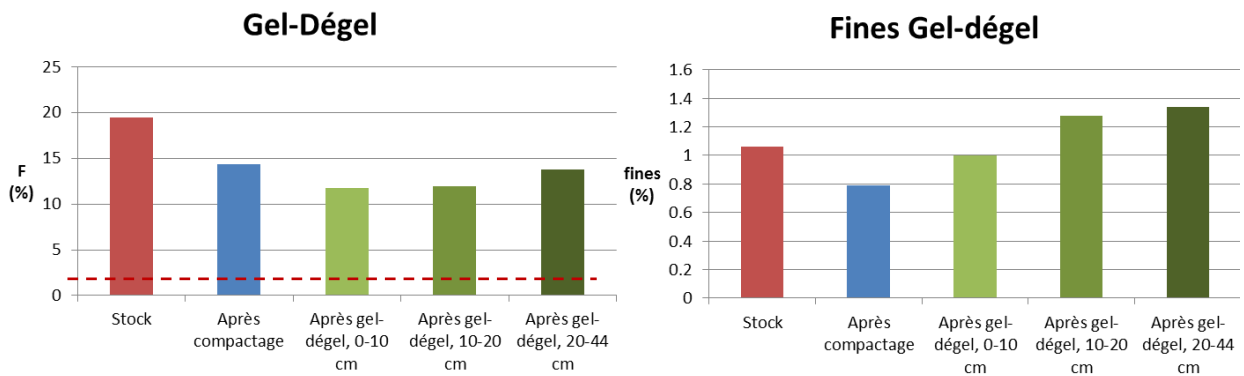


Figure 121 : Résultats de l'essai de sensibilité aux cycles de gel-dégel mené sur les échantillons prélevés sur la planche d'essai et teneur en fines des échantillons après l'essai.

On observe que les résultats obtenus par les granulats après vieillissement de la planche sont relativement comparables à ceux qui avaient été mesurés après sa mise en œuvre. La couche supérieure, soumise au gel-dégel, présente même un coefficient plus faible que tous les autres échantillons testés.

7.1.5.5 Proctor

Un essai Proctor modifié a été mené sur l'échantillon provenant du stock (Figure 122), révélant une teneur en eau optimale de 12% et une masse volumique sèche optimale de 1.8507 g/cm³. Ces valeurs ont été exploitées pour déterminer le taux de compactage à l'aide des mesures au gammadensimètre (voir §7.1.4.1)

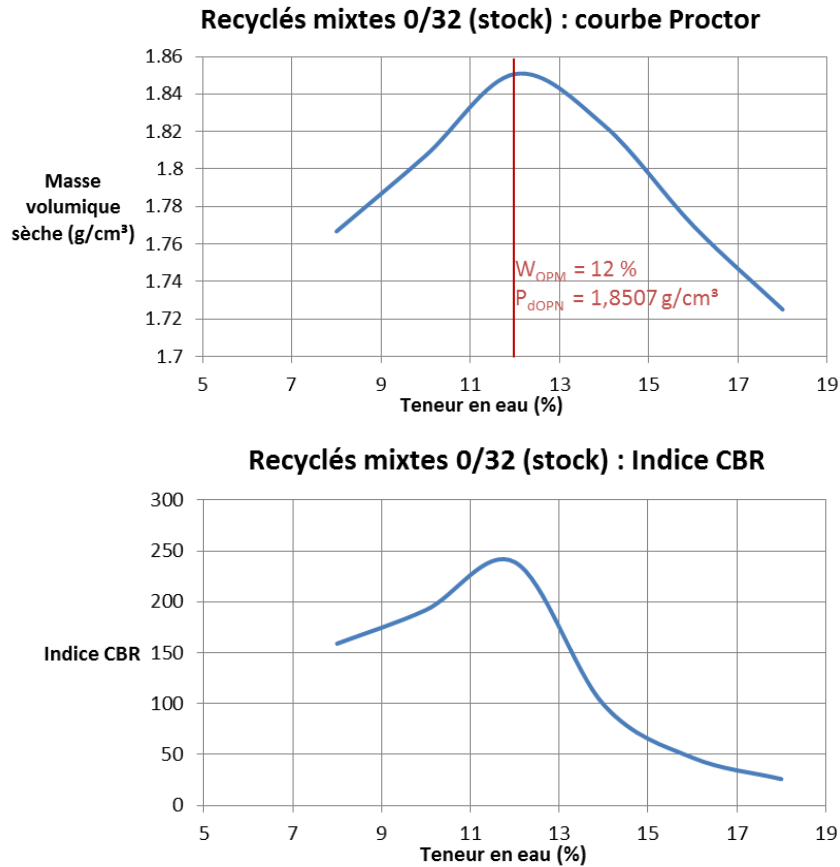


Figure 122 : Courbe Proctor modifié et indice CBR pour l'échantillon prélevé sur le stock.

7.1.5.6 Teneur en eau

La teneur en eau du matériau a été mesurée sur chacun des échantillons prélevés (Figure 123). Elle varie entre 8 et 10% pour les échantillons prélevés lors de la mise en œuvre et entre 14 et 18% pour les échantillons prélevés lors du démontage de la fosse.

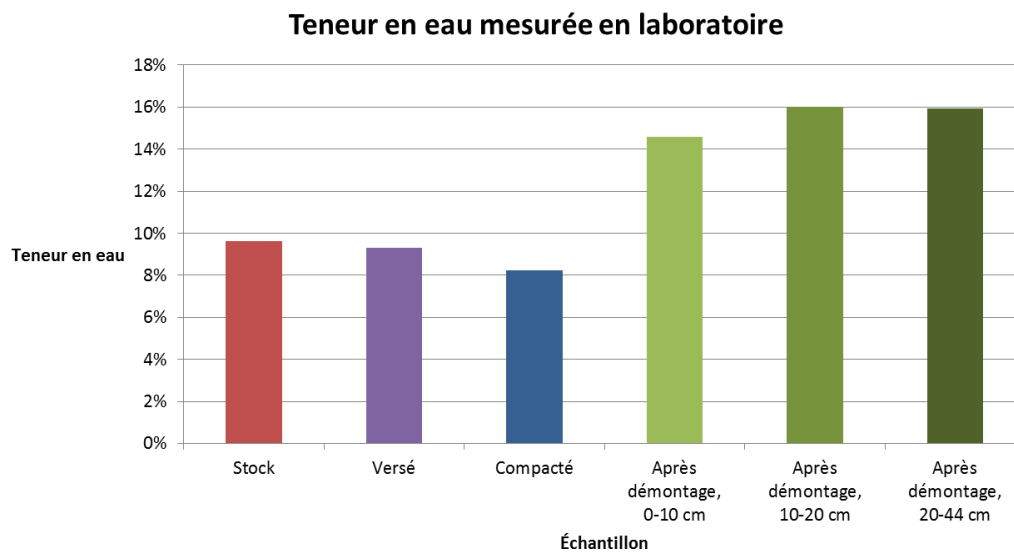


Figure 123 : Teneurs en eau mesurées en laboratoire sur les différents échantillons prélevés sur la planche d'essai.

Ces valeurs sont cohérentes avec les mesures effectuées in situ à l'aide du gammadensimètre (Figure 113). A la construction de la planche, la teneur en eau était inférieure à la teneur en eau optimale déterminée par l'essai Proctor, ce qui explique le faible taux de compactage qui a pu être atteint. Lors du démontage de la planche, la teneur en eau était supérieure à l'optimum. Cette augmentation importante de la teneur en eau était probablement due aux mauvaises conditions climatiques les jours ayant précédé le démontage, combinées à une faible porosité du sol en place (mauvais drainage).

7.1.6 Conclusions de la première planche d'essai

Suite à cette planche d'essai, plusieurs conclusions peuvent être tirées quant au comportement de recyclés in situ en période hivernale:

- Lorsqu'elle est soumise à des températures négatives, la planche d'essai subit l'impact temporaire du gel : des gonflements temporaires sont mesurés et la portance dynamique augmente momentanément.
- Plusieurs mois après la mise en œuvre de la planche d'essai, des phénomènes de gonflement et de raidissement progressifs apparaissent. Un gonflement d'environ 1.5% est ainsi observé entre la mise en œuvre et le démontage partiel de la planche. Les résultats des essais de portance concordent également dans ce sens : tous les indicateurs de portance (statique et dynamique) sont plus de deux fois plus élevés après le vieillissement de la planche que lors de sa mise en œuvre. Ceci tend à confirmer l'hypothèse selon laquelle des réactions secondaires se produisent dans les recyclés non liés. Cette observation est bien connue pour les recyclés de béton et nous avons pu la mettre en évidence pour les recyclés mixtes également. Cependant, dans le cas d'une sous-fondation où le rôle drainant est important, il conviendrait de voir comment la perméabilité du matériau est affectée par ces réactions.
- A plus long terme, on observe que, si les gonflements semblent se poursuivre, la portance décroît au cours du second hiver. Comme les résultats du Panda, qui ne prennent pas en compte les 5 premiers centimètres de la structure, ne semblent pas suivre cette tendance, cette dégradation des propriétés pourrait être imputée au mauvais état de la surface de la planche.
- En ce qui concerne la production de fines (f), les résultats sont différents de ce qui était attendu : la teneur en fines (f) apparente diminue au fur et à mesure des opérations de mise en œuvre. Ceci illustre parfaitement la difficulté de l'échantillonnage du matériau hétérogène, notamment à cause de la ségrégation des particules. Les différences entre les couches soumises ou non au gel sont donc trop faibles par rapport à la variabilité des résultats pour tirer des conclusions, si ce n'est que le gel ne semble pas modifier de façon importante la teneur en fines des échantillons.
- Afin de déterminer si les phénomènes observés (gonflement et augmentation de la portance) sont propres aux granulats recyclés, une petite planche d'essais similaire a été mise en œuvre l'hiver 2015-2016 avec des granulats naturels (voir §7.3).

7.2 Deuxième planche d'essais : concassage/compactage

En plus de la nature intrinsèque des matériaux bruts, le traitement en centrale, le transport et la mise en œuvre influencent les propriétés des recyclés mis en place. L'expérience de certains producteurs leur a ainsi montré que l'utilisation d'un concasseur à mâchoires à la place d'un concasseur à percussion permettait de limiter la teneur en éléments fins des matériaux. D'autre part, l'utilisation d'un compacteur à pneus à la place d'un compacteur à rouleaux lors de la mise en œuvre permettrait de réduire la production d'éléments fins et d'obtenir une meilleure compacité du matériau.

Pour vérifier ces hypothèses, nous avons mis en place une seconde planche d'essai le 8 juin 2015 avec plusieurs objectifs :

- Comparer l'influence du mode de compactage (à pneus ou à rouleaux) sur les propriétés finales du matériau en place : compacité, portance, création d'éléments fins.
- Comparer le comportement de matériaux produits avec différents concasseurs. Un recyclé mixte produit avec un concasseur à percussion est ainsi comparé à un recyclé mixte et à un recyclé de béton produits avec un concasseur à mâchoires.

7.2.1 Mise en œuvre

L'emplacement sélectionné pour la planche est composé d'empierrements compactés et stabilisés, dont le coefficient de compressibilité est égal à 48.3 MPa. Cette valeur est supérieure aux 17 MPa requis dans le cahier des charges QUALIROUTES pour un fond de coffre (Figure 124).



Figure 124 : Site sélectionné pour la planche d'essai concassage/compactage.

Les trois matériaux ont été mis en place le même jour, suivant le plan présenté à la Figure 126. La Figure 125 présente des photos du versage des matériaux, tandis que le compactage des deux zones est présenté à la Figure 127. Dans un premier temps, la zone compactée au rouleau l'a été via un petit compacteur, sensiblement trop léger par rapport à l'épaisseur mise en œuvre (20 cm). Pour cette raison, un second compacteur à rouleaux, plus imposant, a été utilisé pour finir le travail et effectuer la finition des deux zones.

Malgré le passage de finition au rouleau non vibrant, la zone traitée via le compacteur à pneus garde une apparence plus irrégulière que la zone compactée au rouleau.



Figure 125 : Mise en œuvre de la seconde planche d'essai.

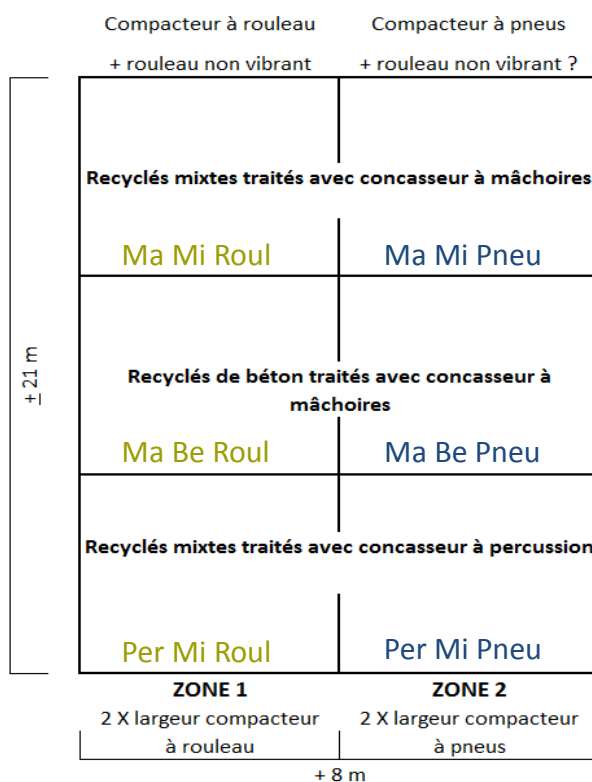


Figure 126 : Schéma de principe de la planche de la seconde planche d'essai (Ma=Mâchoires, Per=Percussion, Mi=Mixtes, Be=béton, Roul= Compacteur à rouleaux, Pneu= Compacteur à pneus).



Figure 127 : Compactage de la seconde planche d'essai (a) compactage simultané avec le petit compacteur à rouleaux et le compacteur à pneus ; (b) Compactage complémentaire avec le gros compacteur à rouleaux.

7.2.2 Essais in situ

7.2.2.1 Gammadensimètre

Des mesures ont été effectuées au gammadensimètre lors des opérations de compactage afin d'estimer le taux de compactage par rapport à l'optimum Proctor, sur une épaisseur de 15 cm. Cette mesure a d'abord été effectuée sur chaque zone après 6 passes, le petit modèle de compacteur à rouleaux étant utilisé, puis après trois passes supplémentaires, en utilisant le gros compacteur à rouleaux. Ensuite, 6 passes supplémentaires ont été effectuées avec le compacteur à pneus, jusqu'à ce que les résultats montrant qu'un palier de compactage était atteint (Figure 128).

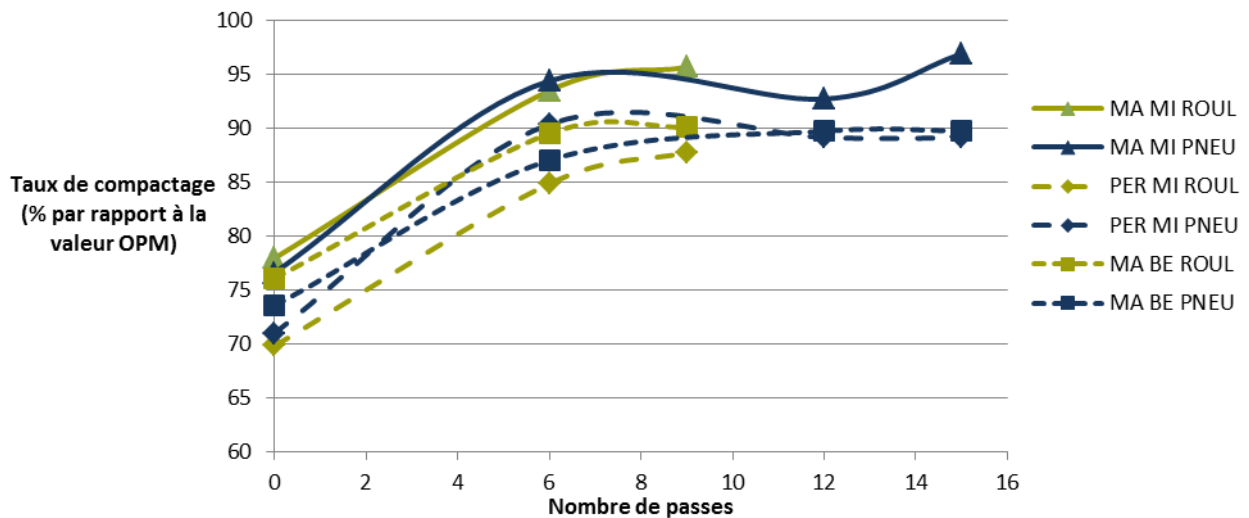


Figure 128 : Evolution du compactage pour les différentes zones de la deuxième planche d'essai en fonction du nombre de passes et du type de compacteur.

Le taux de compactage est plus faible que les 95% escomptés, qui ne sont atteints que pour les recyclés mixtes concassés par mâchoires. Pour chaque recyclé, les taux de compactage obtenus avec les deux compacteurs sont comparables.

7.2.2.2 Epaisseur

Le terrain original n'étant pas parfaitement horizontal, l'épaisseur nominale de la planche de 20 cm n'a pas été respectée en tout point. Des mesures ont donc été effectuées dans chacune des zones (Figure 129).

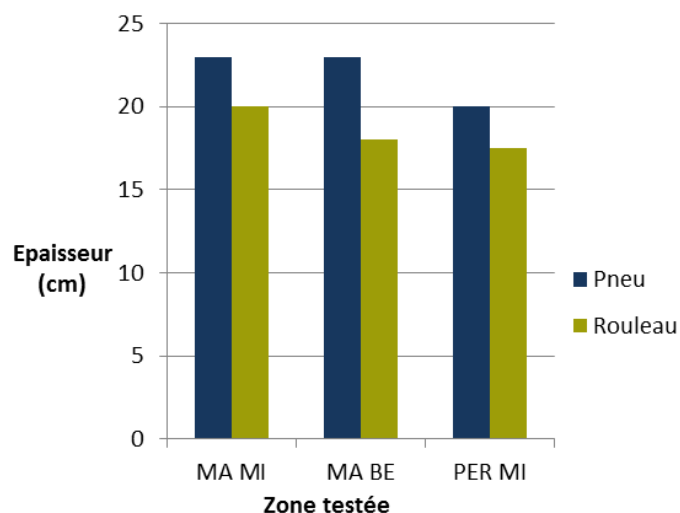


Figure 129 : Epaisseur de la planche d'essai au droit des différente zones.

La Figure 129 montre que la planche est légèrement plus épaisse dans la zone compactée avec les pneus que dans la zone compactée au rouleau. D'autre part, l'épaisseur est également légèrement plus importante pour le mixte concassé avec des mâchoires que pour les autres matériaux.

7.2.2.3 Plaque statique belge

Un essai à la petite plaque statique belge a été effectué sur chacune des parcelles, en plus de l'essai réalisé sur le sol support avec la grande plaque. Les différents coefficients de compressibilité M_1 et les rapports m sont représentés à la Figure 130.

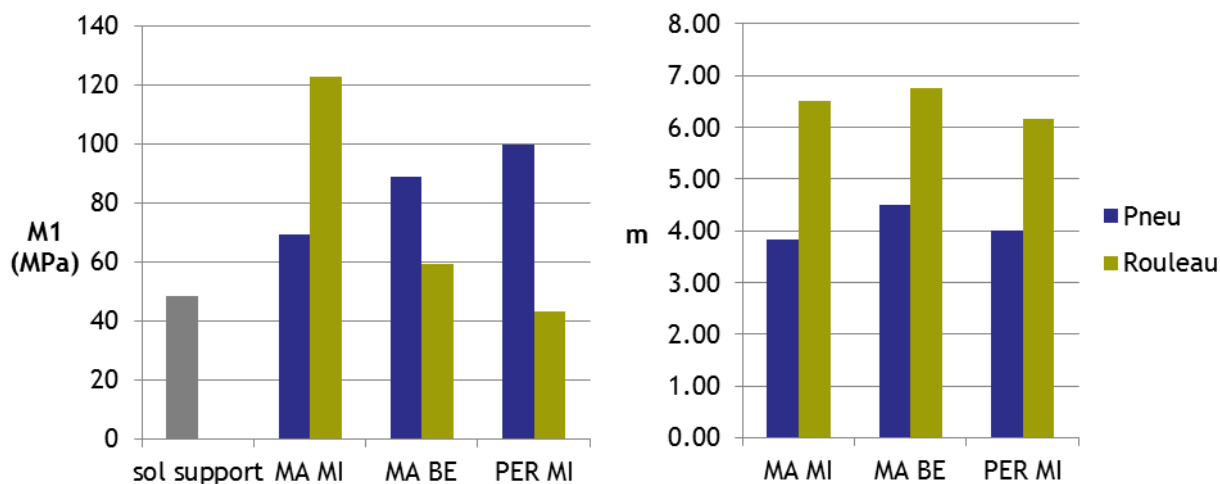


Figure 130 : Résultats des essais à la plaque statique belge sur la deuxième planche d'essai – Coefficient de compressibilité M_1 et rapport des coefficients de compressibilité $m=M_2/M_1$

Les coefficients de compressibilité M_1 ont tous une valeur supérieure à 35 MPa, qui est la valeur requise pour une sous-fondation dans le cahier des charges Qualiroutes. Leur valeur varie beaucoup d'une zone à l'autre, sans qu'il soit possible de tirer de conclusions quant aux portances respectives des matériaux. En effet, les zones pour lesquelles le coefficient le plus élevé et le plus bas ont toutes deux été mesurés ont été compactées au rouleau. De plus, les matériaux ayant la meilleure portance avec une méthode de compactage sont ceux ayant la portance la plus faible avec l'autre méthode.

Par contre, le rapport des coefficients de compressibilité m apporte une tendance plus nette : ses valeurs sont 30 à 40% plus faibles lorsque le compacteur à pneus est utilisé. Ceci pourrait indiquer un compactage plus complet lorsque ce type de compacteur est utilisé. Il faut toutefois être prudent car le compactage dépend également des caractéristiques du compacteur utilisé.

7.2.2.4 Plaque dynamique allemande

Des essais ont également été menés à l'aide de la plaque dynamique allemande de 15 kg. Sur chaque zone, trois points ont ainsi été mesurés. Les résultats moyens sont représentés à la Figure 131, ainsi que les écart-types.

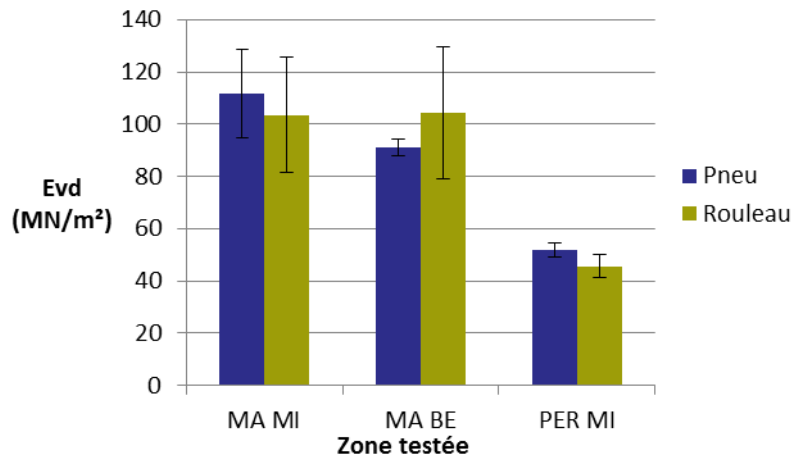


Figure 131 : Résultats obtenus avec la plaque dynamique allemande de 15 kg sur la deuxième planche d'essai.

A nouveau, les résultats ne mènent pas à une conclusion directe. L'écart-type des mesures est relativement important. La principale tendance se dessinant serait le fait que les recyclés concassés par percussion ont un module dynamique plus faible.

7.2.2.5 Dynaplaque

(a) Description sommaire de l'essai

Originellement développée en France par le LCPC, la Dynaplaque est utilisée pour la détermination de la mesure du module dynamique des différentes couches (remblai, sous-fondation et fondation) en construction routière française. La sollicitation dynamique appliquée sur la plate-forme à étudier est analogue en intensité et en fréquence à celle provoquée par le passage d'un essieu supportant une charge de 13 tonnes et roulant à 60 km/h. Elle est générée par la chute d'une masse de 125 kg sur un ressort amortisseur placé sur une plaque de charge de 600 mm de diamètre (Figure 132).

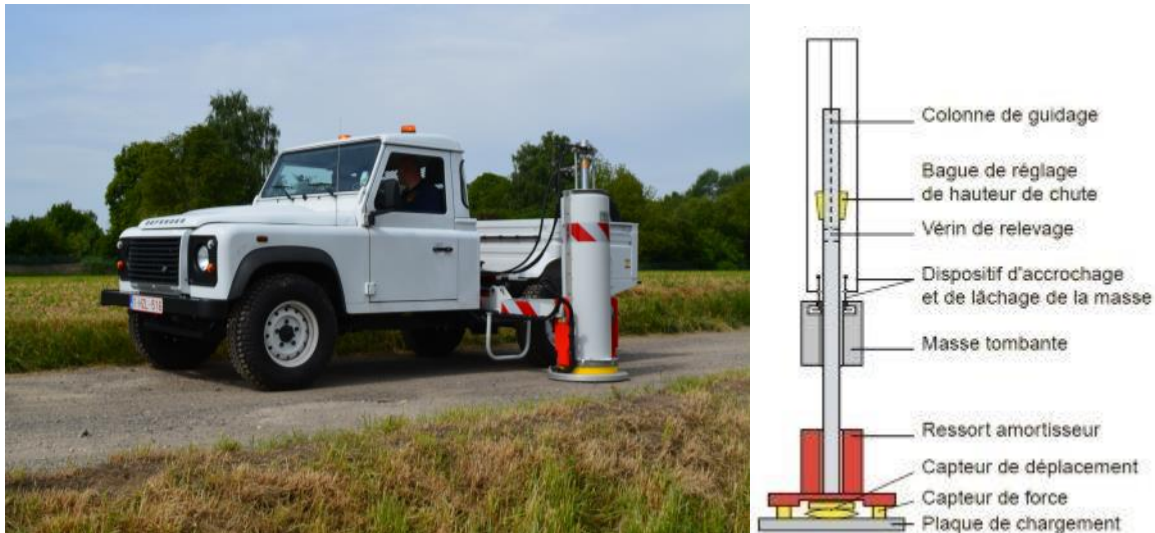


Figure 132 : Photo et principe de la Dynaplaque.

La déflexion du sol provoquée par cette impulsion et la force d'impact sont mesurées en fonction du temps. La combinaison de ces deux paramètres pendant la phase de chargement (montée en force) dans un diagramme force/déflexion permet de calculer le module de déformation dynamique de la structure au point d'essai.

(b) Interprétation des résultats

Quatre essais à la Dynaplaque ont également été effectués par zone. Deux essais ont été réalisés dans les axes de pneus du camion chargé nécessaire à la réalisation des essais à la plaque statique belge. Les deux autres essais ont été réalisés hors axe. Alors que l'utilisation normale de l'appareil prévoit de mesurer le module dynamique après 3 chutes, nous avons choisi de les mesurer après chacune des 6 chutes, afin d'avoir plus de matière pour l'interprétation. Les résultats sont détaillés au Tableau LVII. A gauche de la Figure 133, les modules de déformation moyens en dehors des traces de pneus de la Dynaplaque et dans celles-ci sont représentés après trois chocs (ce qui correspond à la valeur traditionnellement fournie par l'appareil). A droite de la Figure 133, les rapports entre les modules après le deuxième et le premier choc sont représentés. Ces rapports sont susceptibles d'être comparable au paramètre m de l'essai à la plaque statique belge (§7.2.2.3) puisqu'il compare la différence de module entre une seconde et une première sollicitation.

Tableau LVII : Modules de déformation E_{dyn} mesurés à la Dynaplaque sur la planche d'essai.

	Modules de déformation E_{dyn} mesurés à la Dynaplaque						
		1° essai			2° essai		
		1	2	3	4	5	6
MA MI PNEU	DYN 1	44	101	105	109	111	111
	DYN 2	62	122	127	133	134	135
	MOY DIN	53	111.5	116	121	122.5	123
	DYN 3	54	118	123	126	127	129
	DYN 4	48	108	114	119	122	123
	MOY DIN pn	51	112	118	122.5	124.5	126
MA BE PNEU	DYN 1	66	139	144	149	150	152
	DYN 2	43	177	185	190	191	192
	MOY DIN	54.5	158	164.5	169.5	170.5	173
	DYN 3	53	176	184	189	188	192
	DYN 4	53	171	178	185	184	187
	MOY DIN pn	53	173.5	181	187	186	189.5
PER MI PNEU	DYN 1	74	168	175	180	181	181
	DYN 2	> 80	165	166	(170)	173	173
	MOY DIN	> 77	166.5	170.5	175	177	177
	DYN 3	> 80	149	158	162	164	166
	DYN 4	35	113	119	123	124	126
	MOY DIN pn	> 57,5	131	138	142.5	144	146
MA MI ROUL	DYN 1	55	137	147	153	155	156
	DYN 2	73	160	170	176	180	180
	MOY DIN	64	148.5	158.5	164.5	167.5	168
	DYN 3	---	237	> 250	> 250	> 250	> 250
	DYN 4	45	100	107	107	114	115
	MOY DIN pn	---	---	---	---	---	---
MA BE ROUL	DYN 1	33	179	188	194	198	198
	DYN 2	47	191	199	208	209	211
	MOY DIN	40	185	193.5	201	203.5	204.5
	DYN 3	30	150	156	165	161	162
	DYN 4	---	172	183	189	187	192
	MOY DIN pn	---	161	169	177	174	177
PER MI ROUL	DYN 1	32	131	138	147	144	149
	DYN 2	23	97	107	110	112	112
	MOY DIN	27.5	114	122	128.5	128	130.5
	DYN 3	< 20	77	92	97	99	99
	DYN 4	< 20	69	74	77	78	79
	MOY DIN pn	< 20	73	83	87	88.5	89

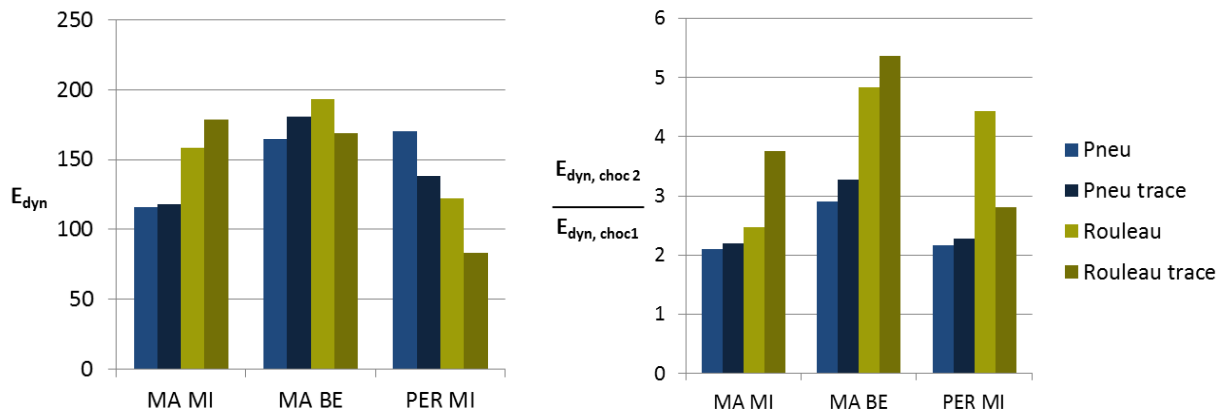


Figure 133 : (a) Modules de déformation E_{dyn} mesurés à la Dynaplaque sur la planche d'essai après trois chutes ; (b) rapports entre les modules après le deuxième et le premier choc.

A nouveau, il est difficile de comparer les deux types de compactage en ce qui concerne le module de déformation. Les meilleures valeurs sont obtenues alternativement pour l'une ou l'autre méthode, et les conclusions ne concordent pas nécessairement avec les observations faites pour les autres méthodes.

Par contre, si on s'intéresse aux rapports entre les modules après le deuxième et le premier cycle, on constate que l'on a des valeurs dans tous les cas plus faibles (donc meilleures) avec le compacteur à pneus, tant pour les mesures effectuées au milieu des zones que pour celles effectuées dans les traces de pneus. Il faut toutefois être prudent car la variabilité des mesures est importante et le compactage dépend également des caractéristiques du compacteur utilisé. On observe par contre que le fait d'effectuer ces mesures dans les traces, donc dans une zone à priori précompactée, ne semble pas diminuer les rapports des modules mais plutôt les augmenter.

7.2.3 Essais de laboratoire

Des échantillons ont été prélevés dans chacune des six zones de la planche d'essais. Les propriétés de ces matériaux après compactage peuvent être comparées à celles des matériaux prélevés sur le stock.

7.2.3.1 Granulométrie

Les courbes granulométriques des différents échantillons prélevés sur la planche d'essai sont comparés à la Figure 134 aux courbes des échantillons prélevés sur stock.

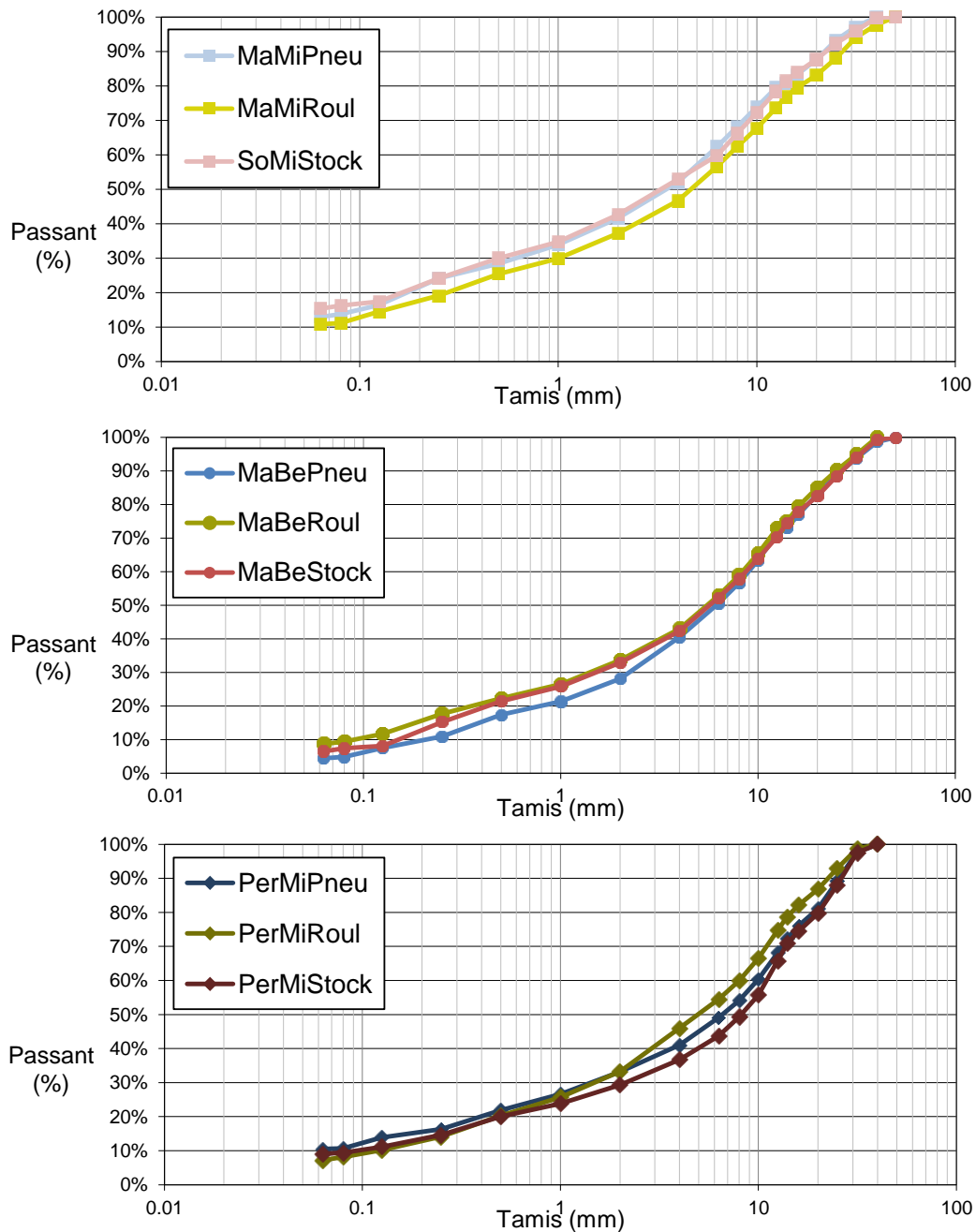


Figure 134 : Courbes granulométriques des échantillons prélevés sur la deuxième planche d'essai et comparaison avec les échantillons prélevés sur stock.

Les variations d'une courbe à l'autre ne sont pas plus importantes que les variations généralement observées pour différents échantillons prélevés sur un même matériau. De plus, la méthode de compactage ne semble pas influencer les résultats puisque les teneurs en fines (f) et en fractions moyennes sont plus élevées pour l'une ou l'autre méthode en fonction de l'échantillon.

7.2.3.2 Micro-Deval et Los-Angeles

Les résultats des essais Micro-Deval et Los Angeles sont représentés à la Figure 135.

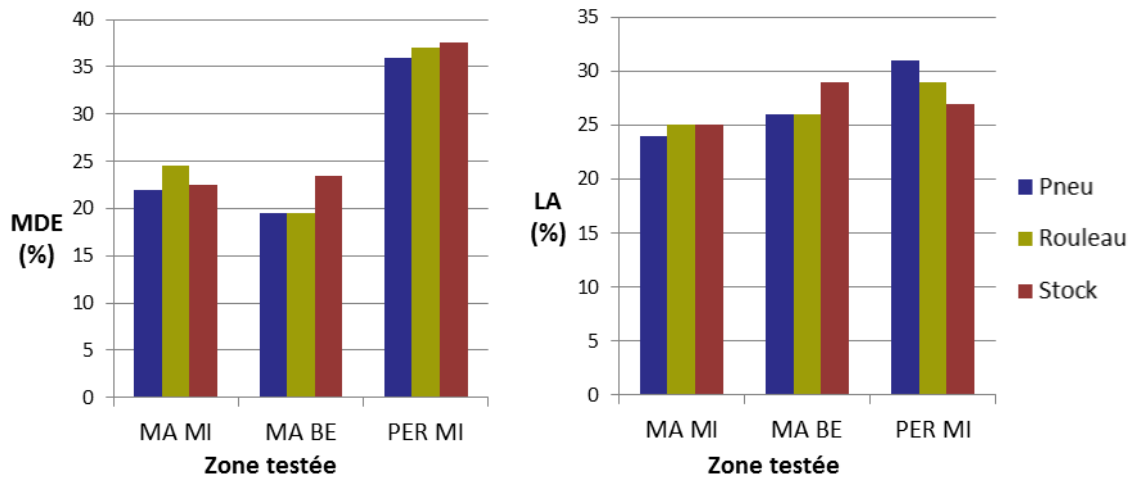


Figure 135 : Résultats des essais Micro-Deval et Los Angeles réalisés sur les échantillons prélevés sur la deuxième planche d'essais.

On observe assez peu de variation d'un échantillon à l'autre. Pour trois échantillons sur six, le compactage par pneus mène à un meilleur résultat que le compactage au rouleau, alors que le compactage au rouleau ne donne des meilleurs résultats que dans un seul cas. Néanmoins, ces variations sont trop faibles pour être significatives.

7.2.3.3 Essai gel-dégel

Les coefficients de sensibilité au gel-dégel, ainsi que les teneurs en fines produites durant l'essai, sont présentés à la Figure 136.

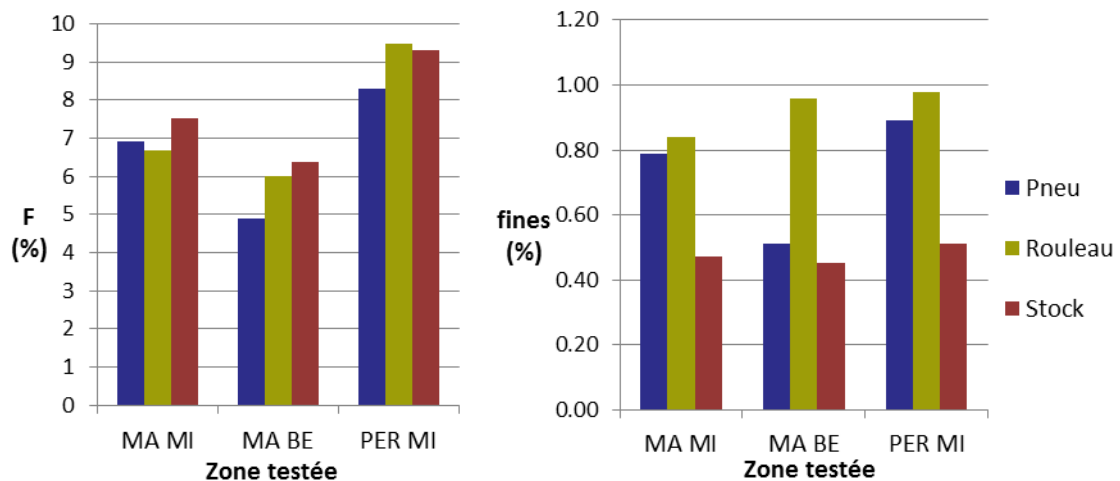


Figure 136 : Résultats de l'essai de sensibilité aux cycles de gel-dégel mené sur les échantillons prélevés sur la deuxième planche d'essai et teneur en fines des échantillons après l'essai.

Cinq résultats sur six sont meilleurs pour le compacteur à pneus que pour le compacteur à rouleau. Le coefficient F est en général inférieur pour les échantillons compactés que pour les échantillons issus du stock alors que la production de fines durant l'essai est supérieure pour les matériaux compactés. Cette dernière tendance n'avait pas été observée lors de la première planche d'essai.

7.2.4 Conclusions de la deuxième planche d'essais

La seconde planche d'essai a permis d'étudier l'influence du type de compactage (compacteur à rouleaux et à pneus) sur les recyclés de béton et mixtes mis en œuvre.

On n'observe pas de différence significative en ce qui concerne les modules statiques et dynamiques mesurés par les essais à la plaque. Par contre, le coefficient m et le rapport E_{dyn2}/E_{dyn1} sont plus petits pour les matériaux compactés au compacteur à pneus, ce qui indique un meilleur compactage. Toutefois, il faut être prudent car le compactage dépend également des caractéristiques du compacteur utilisé.

Les analyses des prélèvements ont montré qu'il n'y avait pas de différence significative pour les coefficients LA et M_{DE} des matériaux mis en œuvre. Il en est de même pour le coefficient F et la production de fines (f) déterminés par des essais gel-dégel.

Il est surprenant d'observer que la production de fines (f) des matériaux compactés est supérieure à celle des matériaux prélevés sur le stock.

7.3 Troisième planche d'essais : gélivité/gonflement

Lors de la première planche d'essais réalisée sur les recyclés mixtes (influence du gel), un gonflement général de la surface de quelques millimètres a été mesuré en fonction du temps. Ce phénomène est accentué en période de gel et avait déjà été observé sur une planche d'essais comparable, composée d'un autre matériau secondaire.

Sur base de ces observations, il a été décidé, lors des réunions du comité de parrainage, de réaliser une planche d'essais équivalente à la première planche mais contenant des granulats naturels afin d'étudier leur comportement durant la période hivernale 2015/2016.

Cette planche d'essais a pu être réalisée grâce à la société SAGREX sur leur site de Quenast. Il s'agit d'un ancien remblai graveleux situé à proximité de leur carrière de porphyre.

Cette société a également fourni deux natures distinctes de granulats : un calcaire 0/32, fréquemment utilisé en sous-fondation routière, et un recyclé de béton 0/20.

7.3.1 Mise en œuvre

La réalisation de la planche d'essai a eu lieu le 14 décembre 2015.

Elle mesure 5.5 m de large et 8.5 m de long. Une fosse de dimensions 10 m*5.5 m*30 cm a été initialement creusée et a été partiellement remblayé par d'autres matériaux suite à un déficit de granulats à tester (Figure 137).



Figure 137 : Mise en œuvre et compactage de la troisième planche d'essai à Quenast.

Les principales opérations de mise en œuvre sont similaires à celles de la première planche d'essais et sont les suivantes :

- Le terrassement du sol présent initialement sur une épaisseur approximative de 25 cm;
- Le contrôle du sol-support au moyen d'un essai à la grande plaque statique belge (*sol à graviers grossiers*). La valeur du coefficient de compressibilité équivaut à 54 MPa, soit une valeur nettement supérieure à celle requise dans le CCT QUALIROUTES pour un fond de coffre ($M_1 \geq 17 \text{ MPa}$) ;
- La pose d'un géotextile ;
- La mise en œuvre des matériaux granulaires côte à côte à partir de la pelle mécanique (Figure 137) ainsi que le comblement du reste de la fosse par un granulat plus grossier suite au déficit de matériaux. L'épaisseur des matériaux avant compactage est de l'ordre de 30 cm. Les capteurs de températures ont été positionnés à différentes profondeurs. Une mesure de la densité au gammadensimètre a été réalisée à différentes profondeurs avant compactage afin de pouvoir déterminer la densité initiale du matériau (non compacté). Les résultats figurent dans le tableau ci-dessous ;
- Le compactage des matériaux granulaires a été réalisé au moyen d'un compacteur monocylindre vibrant de type RAMMAX RW 3005-SPT (Figure 137). L'augmentation de la densité a été suivie régulièrement par des mesures au gammadensimètre à différentes profondeurs. Le tableau ci-joint reprend une synthèse des mesures de densité effectuées. Le compactage a été arrêté au moment où il ne semblait plus y avoir d'augmentation de la densité.

Tableau LVIII : Evolution des densités en fonction du nombre de passes de compactage.

Etat du compactage	Profondeur de la mesure (cm)	Densité des granulats (% par rapport à l'Optimum Proctor modifié)	
		Calcaire ($\rho_{OPM} = 2,325 \text{ g/cm}^3$)	Recyclé de béton ($\rho_{OPM} = 1,886 \text{ g/cm}^3$)
Avant compactage	5	69.77	75.13
	15	73.73	79.59
Après 8 passes vibrantes	5	86.20	85.31
	15	88.10	92.31
Après 10 passes vibrantes	5	84.18	93.43
	15	89.13	97.08
Après 12 passes vibrantes	5	85.56	92.63
	15	89.13	96.24
Après 12 passes vibrantes et 4 passes non vibrantes	5	88.19	92.04
	15	92.40	94.89

REMARQUE : Une passe correspond à un passage du compacteur.

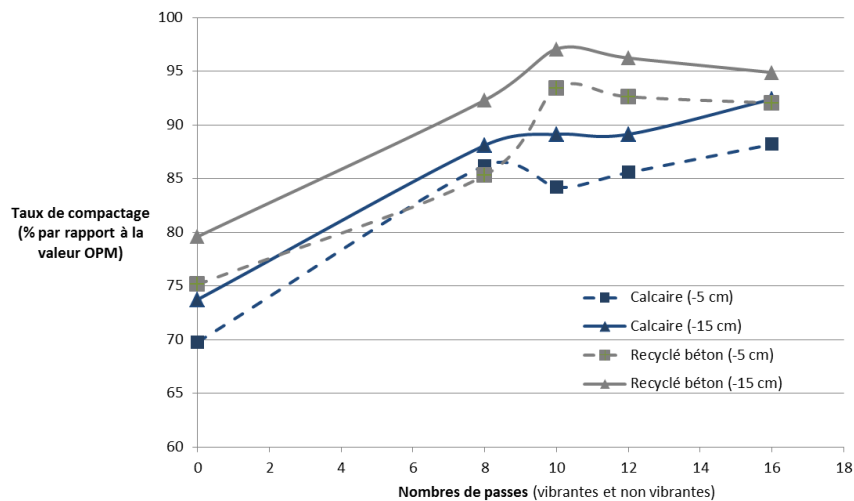


Figure 138 : Evolution du compactage pour les différentes zones de la troisième planche d'essai en fonction du nombre de passes et du type de compacteur.

A la fin du compactage, un essai à la grande plaque statique a été réalisé sur chaque matériau granulaire. Les principales valeurs obtenues sont les suivantes :

- L'essai à la plaque statique réalisé sur l'empierrement calcaire a fourni une valeur de coefficient de compressibilité (M_1) de 64 MPa, soit une valeur nettement supérieure à la valeur du critère prescrit dans le CCT QUALIROUTES pour une sous-fondation ($M_1 \geq 35 \text{ MPa}$). La valeur du rapport M_2/M_1 équivaut à 2,5, soit une valeur qui montre que le matériau ne présente pas de problème de compactage ;
- L'essai à la plaque statique réalisé sur l'empierrement en recyclés de béton a fourni une valeur de coefficient de compressibilité (M_1) de 84 MPa, soit une valeur nettement supérieure à la valeur du critère prescrit dans le CCT QUALIROUTES pour une sous-fondation ($M_1 \geq 35 \text{ MPa}$). La valeur du

rapport M_2/M_1 équivaut à 2,1, soit une valeur qui montre que le matériau ne présente pas de problème de compactage.

La position des différents capteurs de température et des repères topographiques est reprise à la figure ci-dessous.

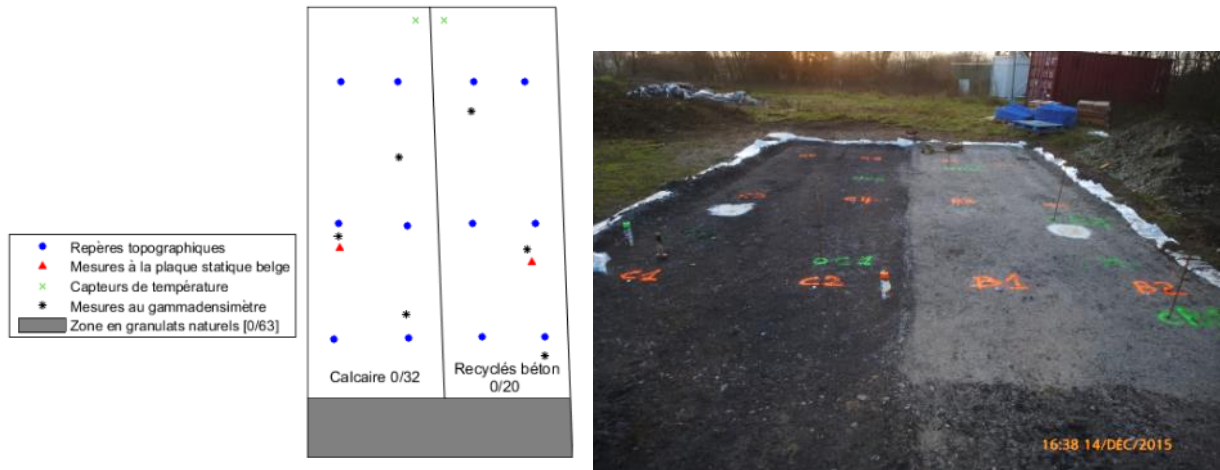


Figure 139 : Implantation des repères topographiques (*en orange*), des capteurs de température et d'autres essais réalisés sur la planche lors de la première journée.

7.3.2 Evolution des températures

Cinq sondes de température ont été placées à différentes profondeurs dans les empierrements. Une sonde a été placée en surface. La dénomination et la localisation précises de ces sondes sont reprises dans le tableau ci-dessous.

Tableau LIX : Dénomination et implantation des différents capteurs de température.

Dénomination	Empierrément	Profondeur (cm)
EXT	(Recyclé de béton)	0
BET - 5	Recyclé de béton	5
BET - 10	Recyclé de béton	10
CALC - 5	Calcaire	5
CALC - 10	Calcaire	10
CALC - 20	Calcaire	20

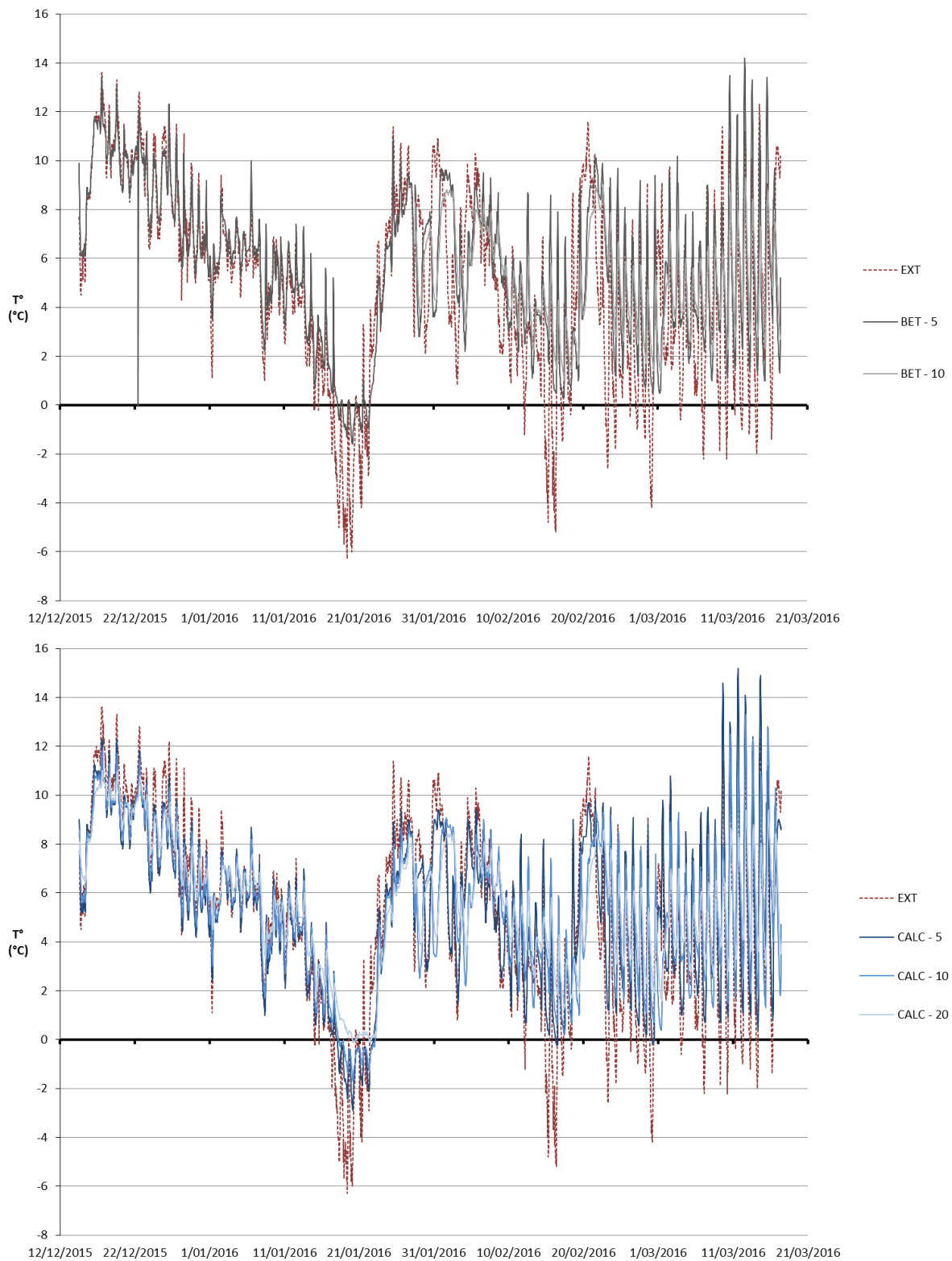


Figure 140 : Evolution de la température au droit la planche d'essais de Quenast.

De la Figure 140, les observations suivantes peuvent être effectuées:

- Le capteur situé à 10 cm dans le recyclé de béton s'est révélé défectueux dans un premier temps. Aucune donnée n'est donc disponible pour ce capteur au cours des premières semaines.

- La planche d'essais a connu une seule période prolongée de températures superficielles négatives, entre le 17 et le 22 janvier 2016 (*5 jours*). Les températures du capteur de surface (EXT) ont varié entre 0 et - 6°C. Les autres gelées, souvent limitées à quelques heures, n'ont quasiment pas généré de températures négatives au niveau des capteurs enfouis.
- Durant cette période de gel prolongée, tous les capteurs ont mesuré des valeurs négatives, même celui situé à 20 cm en profondeur (CALC – 20).
- Le capteur enfoui à 5 cm dans le béton enregistre parfois des températures plus élevées en journée que celui enfoui dans le calcaire. Cette constatation est étonnante dans la mesure où le calcaire est plus foncé que le recyclé de béton et serait donc susceptible d'absorber une partie plus importante du rayonnement solaire. La nuit, le capteur enfoui dans le béton enregistre généralement des températures moins froides. Ceci pourrait s'expliquer par un certain pouvoir isolant du matériau recyclé.

7.3.3 Levers topographiques

Six repères topographiques ont été placés sur chaque zone de la fosse. Leur implantation est reprise à la Figure 139. Les résultats sont repris à la Figure 141 pour l'empierrement calcaire et les recyclés de béton.

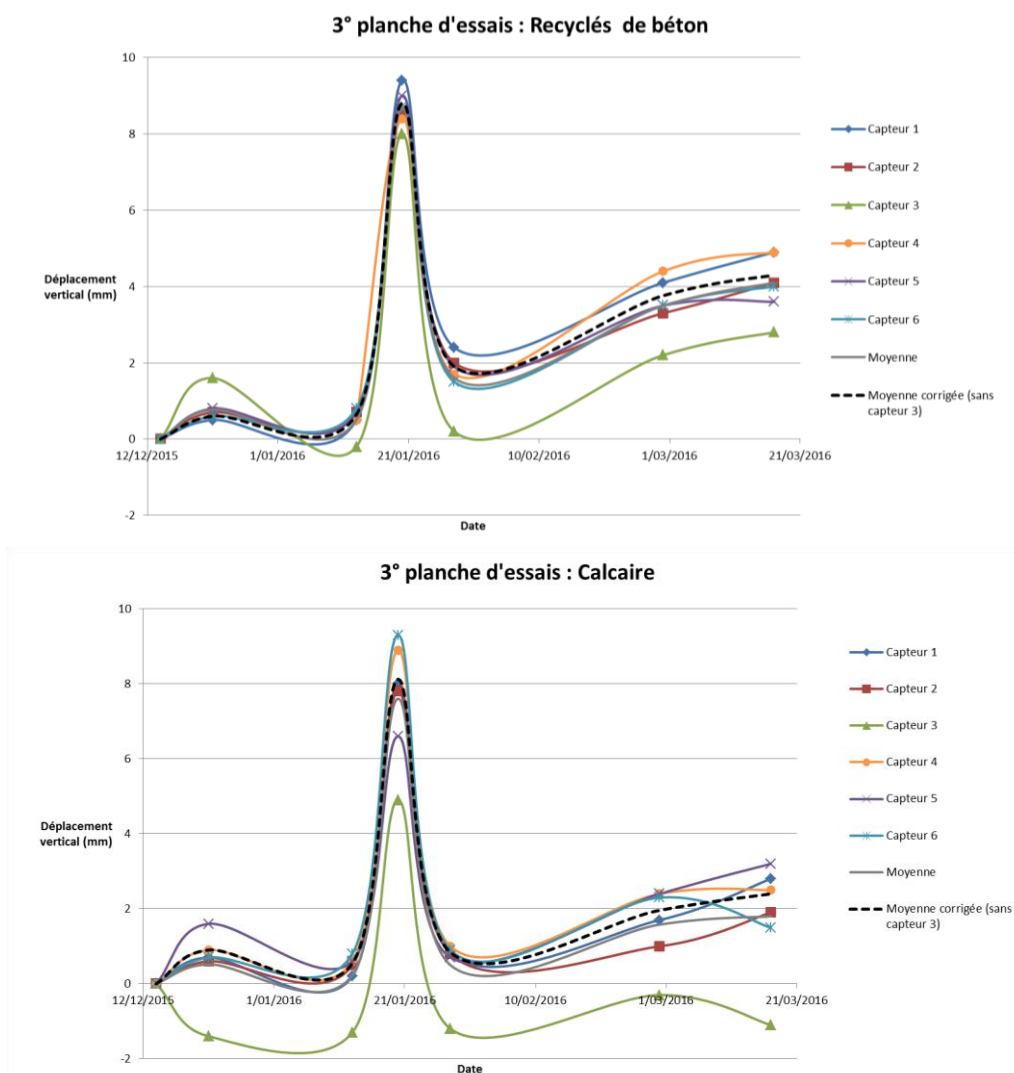


Figure 141 : Gonflements mesurés au théodolite sur la troisième planche d'essai.

Comme sur la première planche d'essai, on observe une tendance globale au gonflement à long terme. Ce gonflement est environ deux fois plus important pour les recyclés de béton que pour les granulats calcaires.

Lors des mesures effectuées par temps de gel, un gonflement temporaire très important (de l'ordre de 2.5%) est observé sur les deux matériaux.

7.3.4 Autres essais in situ

Comme pour la première planche d'essai, des essais in situ (plaque dynamique allemande, pénétromètre PANDA et gammadensimètre) ont été effectués régulièrement sur la planche d'essai afin de contrôler l'évolution de la portance en fonction du temps.

7.3.4.1 Essai à la plaque dynamique allemande

Les résultats sont présentés à la Figure 142.

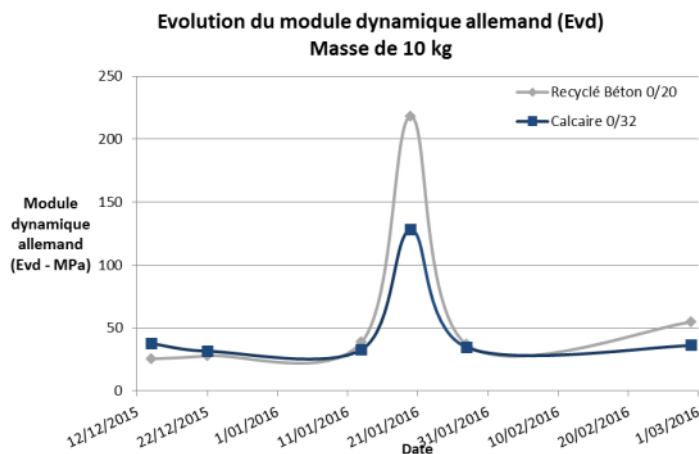


Figure 142 : Evolution du module dynamique allemand sur la troisième planche d'essais.

Le module dynamique semble présenter une augmentation à long terme pour les granulats recyclés de béton (+ 100%) mais pas pour les naturels. Le raidissement temporaire par températures négatives s'est également révélé plus important pour les granulats recyclés que pour les granulats naturels. Ces informations sont à considérer avec prudence étant donné le faible nombre de mesures qui ont pu être réalisées.

7.3.4.2 Pénétromètre dynamique léger de type PANDA

Les résultats sont présentés à la Figure 143. Une campagne de mesure effectuée après la fin de la convention Aperrouit a été intégrée aux résultats.

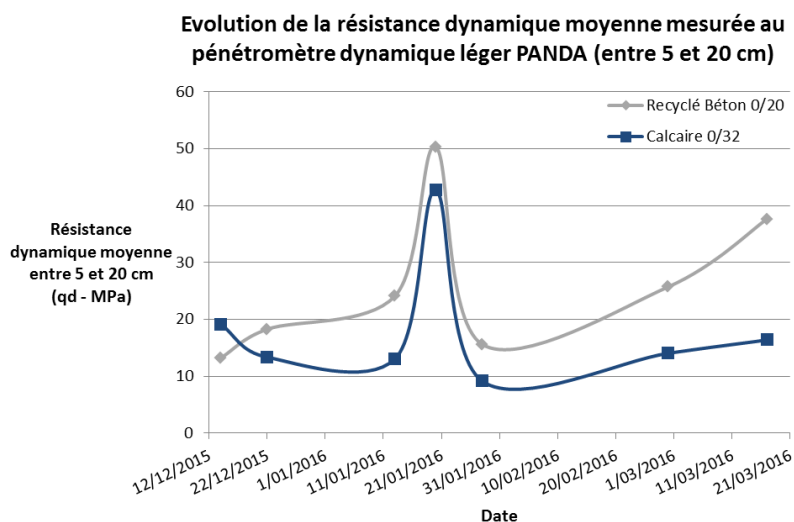


Figure 143 : Evolution de la résistance dynamique moyenne mesurée au pénétrömètre PANDA sur la troisième planche d'essais.

Les observations effectuées au §7.3.4.1 sur base des mesures dynamiques effectuées avec la plaque allemande restent globalement valables, même si elles sont moins marquées. Le raidissement en période de gel est ici comparable pour les deux matériaux, alors que le raidissement à long terme semble bien présent pour les recyclés de béton uniquement.

7.3.4.3 Gammadensimètre

Les mesures au gammadensimètre ont été réalisées régulièrement en trois points de référence sur chaque planche. Les résultats sont détaillés dans le Tableau LX.

Tableau LX : Résultats des mesures effectuées au gammadensimètre sur la planche d'essai après la mise en œuvre et avant le démontage.

Nature	Date	Profondeur (cm)	Point 1		Point 2		Point 3		Moyenne	
			Compactage (%)	Teneur en eau (%)	Compactage (%)	Teneur en eau (%)	Compactage (%)	Teneur en eau (%)	Compactage (%)	Teneur en eau (%)
Calcaire	14/12/2015 Mise en œuvre	-5	87.71	5.17	88.66	4.58	---	---	88.19	4.88
		-10	90.33	4.57	91.07	5.03	---	---	90.70	4.80
		-20	91.11	4.23	91.75	4.43	---	---	91.43	4.33
	28/1/2016 Après période gel-dégel	-5	89.60	6.88	87.45	6.31	91.02	5.97	89.36	6.39
		-10	90.89	6.19	90.64	6.21	92.40	5.83	91.31	6.08
		-20	90.38	5.93	91.02	5.80	91.02	5.33	90.81	5.69
	29/2/2016 Fin projet	-5	86.56	6.47	90.45	4.81	89.33	5.36	88.78	5.55
		-10	92.89	5.49	92.87	4.97	93.43	4.89	93.06	5.11
		-20	94.21	5.55	93.44	4.46	94.74	4.39	94.13	4.8
Recyclés de béton	14/12/2015 Mise en œuvre	-5	91.78	19.88	92.31	19.90	---	---	92.05	19.89
		-10	96.24	18.97	94.43	19.67	---	---	95.34	19.32
		-20	97.93	16.86	90.14	19.35	---	---	94.04	18.11
	28/1/2016 Après période gel-dégel	-5	92.10	18.38	91.30	18.15	95.07	17.45	92.82	17.99
		-10	95.81	17.42	91.30	19.13	97.24	17.06	94.78	17.87
		-20	97.08	17.02	87.06	18.81	98.41	16.77	94.18	17.53
	29/2/2016 Fin projet	-5	85.89	19.67	84.61	18.64	91.27	18.00	87.25	18.77
		-10	91.25	18.63	88.34	18.37	92.54	18.01	90.71	18.34
		-20	93.17	17.65	83.05	19.35	92.64	17.24	89.62	18.08

On constate globalement assez peu de variation, si ce n'est que le taux de compactage à la fin du projet semble diminuer sensiblement pour les recyclés de béton alors qu'il augmente légèrement pour les granulats calcaires.

7.3.5 Essais de laboratoire

Des échantillons des deux matériaux ont été prélevés juste avant leur mise en œuvre.

7.3.5.1 Teneur en eau

La teneur en eau mesurée sur les échantillons prélevés est de 3.2% pour les calcaires et de 17.1% pour les recyclés de béton. Ces valeurs sont du même ordre de grandeur, même si légèrement inférieures, à celles mesurées via le gammadensimètre.

7.3.5.2 Essais Proctor et CBR

Les courbes Proctor modifié et CBR des deux matériaux sont présentées à la Figure 144.

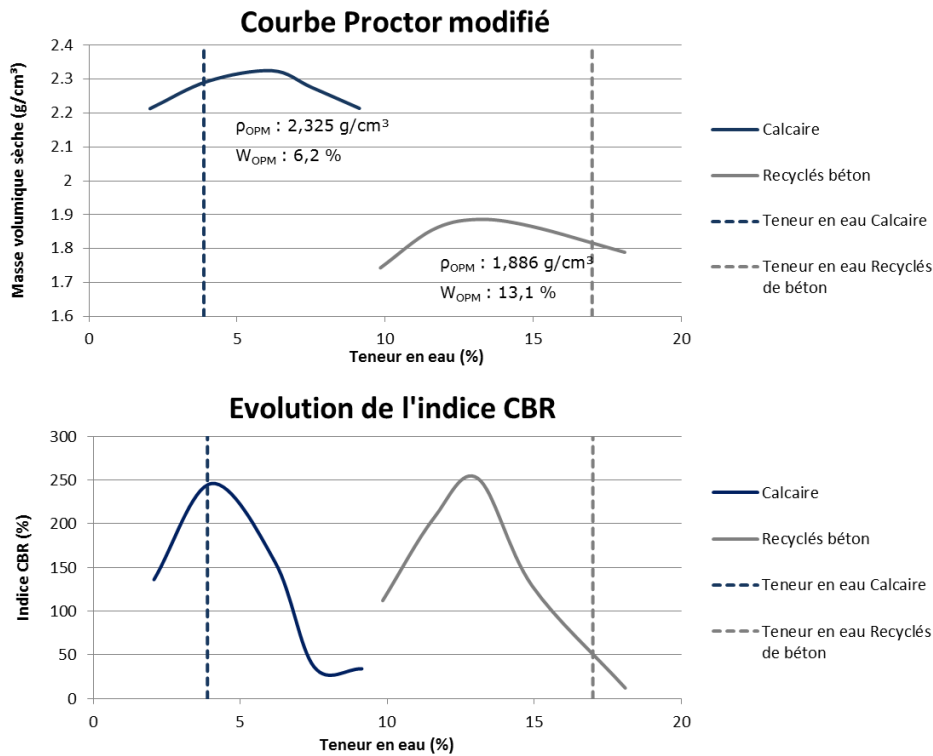


Figure 144 : Courbes Proctor et CBR des échantillons prélevés sur la troisième planche d'essai. Comparaison avec les teneurs en eau mesurées.

On observe que les courbes Proctor et CBR des deux matériaux ont une allure assez semblable, alors qu'on aurait pu s'attendre à une sensibilité à l'eau moindre pour le matériau naturel. A l'inverse, les teneurs en eau optimales des deux matériaux sont assez différentes : 6.2% pour le calcaire et 13.1% pour le recyclé. Les teneurs en eau mesurées étant respectivement de 3.9% et 17%, cela signifie que le calcaire est trop sec alors que les recyclés de béton sont trop humides pour une mise en œuvre optimale. Néanmoins, l'écart à l'optimum est plus faible pour le calcaire (qui a même la teneur en eau idéale en ce qui concerne l'indice CBR). On considère donc que les granulats naturels sont plus susceptibles d'avoir été mis en œuvre de façon satisfaisante.

7.3.5.3 Essais de durabilité

Les résultats des essais de durabilité menés sur les échantillons de la troisième planche d'essai sont représentés à la Figure 145.

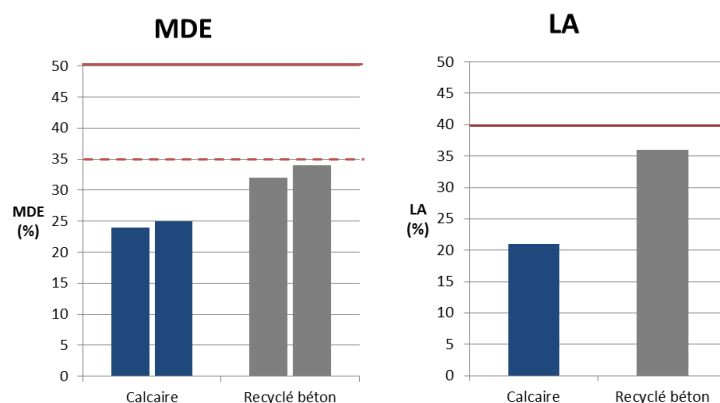


Figure 145 : Résultats des essais de durabilité menés sur les échantillons de la troisième planche d'essai.

Sans surprise, les performances du calcaire sont tout à fait satisfaisantes par rapport aux exigences de Qualiroutes. Les résultats du recyclé de béton sont dans la lignée des recyclés de béton testés dans le cadre du §1.5, même si les valeurs sont légèrement plus élevées.

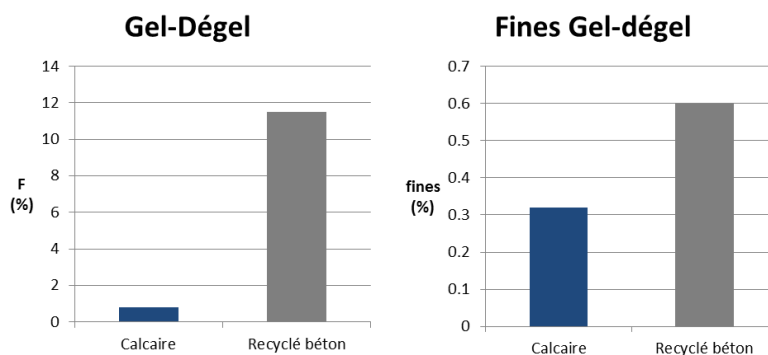


Figure 146 : Résultats des essais de sensibilité au gel-dégel menés sur les échantillons de la troisième planche d'essais.

Contrairement aux essais Los Angeles et Micro-Deval, l'essai gel-dégel donne des résultats très différents entre les granulats naturels ($F < 1\%$) et recyclés ($F = 11.5\%$). Cette différence est moins marquée en ce qui concerne la production de fines.

7.3.6 Conclusions de la troisième planche d'essai

La troisième planche d'essai a été mise en œuvre afin de comparer l'effet du gel-dégel sur des recyclés de béton et sur des granulats naturels. Les relevés ont été réalisés durant deux mois, avec une période de gel accentué. Le gonflement à long terme du recyclé de béton est deux fois plus important que celui du calcaire. Par temps de gel prononcé, on observe un gonflement de +/- 8 mm pour les deux matériaux. Les premières observations semblent confirmer également un raidissement progressif des granulats recyclés de béton, qui n'apparaît pas pour les granulats naturels.

Des essais de durabilité ont été réalisés sur ces deux matériaux. Sans surprise, le calcaire présente un meilleur comportement vis-à-vis du gel-dégel que le recyclé de béton, ainsi que de meilleurs coefficients LA et M_{DE} . Néanmoins, les coefficients LA et M_{DE} du recyclé de béton satisfont aux critères du CCT Qualiroutes.

Conclusions

Le but général de la recherche Aperroux concernait la valorisation des déchets de démolition et en particulier des recyclés mixtes pour des applications dans le domaine routier. Trois objectifs principaux étaient visés :

- **La mise au point d'un ou plusieurs essais de durabilité spécifiques ou mieux adaptés aux granulats recyclés.**
- **La mise au point d'un protocole de traitement** tenant compte des dernières technologies de traitement dans le domaine de la valorisation des déchets en vue d'améliorer et de garantir une stabilité dans le temps des caractéristiques intrinsèques et des propriétés géotechniques des matériaux recyclés dans le domaine routier.
- **La prise en compte dans le processus de traitement de nouveaux matériaux de construction** (bétons cellulaires, résines, isolants divers, etc.) qui commencent à apparaître de manière de plus en plus fréquente dans les centres de traitement et qui peuvent poser des problèmes dans le schéma classique de traitement.

Pour remplir ces objectifs, les travaux des différents partenaires, le CTP, l'ULg et le CRR, ont été répartis en neuf tâches distinctes.

Tâche 1 : Etat des lieux et caractérisation des matériaux

Une étude bibliographique et une visite de différents centres de traitement ont permis de mettre en évidence un certain nombre d'observations :

- Il existe une grande diversité dans la nature et les origines des déchets bruts arrivant dans les centres de traitement ;
- Il n'existe pas deux centres de traitement identiques. Chaque centre a mis au point son propre dispositif de traitement sur base notamment des déchets qu'il reçoit. Ainsi, il existe des installations de traitement relativement simples, souvent mobiles et constituées d'un concasseur, d'un crible et dans la plupart des cas d'un séparateur magnétique (overband) et des installations fixes complexes comprenant plusieurs concasseurs, cribles et divers dispositifs de séparation.
- Les essais de durabilité pour les granulats comme l'essai Micro-Deval en présence d'eau (M_{DE}), l'essai Los Angeles (LA) et l'essai de sensibilité au gel-dégel (F) ont été mis au point pour des granulats naturels. Ces essais ne sont pas nécessairement adaptés aux comportements des granulats recyclés. De plus, la majorité de ces essais ne représentent qu'une partie des sollicitations présentes dans une structure routière tant au moment de sa mise en œuvre que de sa mise en service.
- Le pourcentage de fines (f) et la teneur en eau jouent un rôle important dans le comportement des matériaux en domaine routier.

Une étude de caractérisation a été effectuée sur des déchets bruts prélevés à l'entrée de quatre centres de recyclage, situés dans quatre régions différentes de Wallonie. Cette étude a été réalisée sur deux fractions séparées : la fraction 4/100 (fraction grossière) et la fraction 0/4, vu l'influence souvent néfaste de cette fraction dans le comportement du matériau.

L'examen séparé de la fraction 0/4 a comporté une grande variété de tests :

- L'analyse granulométrique : une certaine hétérogénéité granulométrique a été observée, mais les teneurs en fines restent assez faibles (moins de 4% de $\varnothing < 63 \mu\text{m}$).
- Les densités des matériaux (*bulk density*) varient entre 918 et 1040 kg/m³.
- La teneur en eau varie entre 11 et 14 %. Il n'existe pas de relation bien établie entre la teneur en eau et la demande en eau, qui ne s'élève qu'à environ 3% après stabilisation pour tous les échantillons. Par contre, l'échantillon présentant la demande en eau la plus importante est celui qui présente la teneur en fines ($\varnothing < 63 \mu\text{m}$) la plus importante.
- La composition qualitative de la fraction 0/4 par DRX a montré que cette fraction est principalement composée de quartz (68 – 75%), de calcite (issue du ciment), de plagioclases et de feldspaths potassiques. Quelques traces d'argiles ont été observées dans certains échantillons.
- La perte au feu à deux températures différentes (550 et 1.000°C) a montré de faibles teneurs en matières organiques.
- Les teneurs en chlorures et sulfates sont généralement faibles.

La fraction granulaire grossière a été divisée en trois fractions, avant de faire l'objet de différents tests :

- L'examen de la composition des déchets montre la présence d'une certaine variabilité au sein des échantillons. Les fractions les plus grossières contiennent généralement plus de briques, ce qui peut avoir une influence sur le comportement lors des essais de durabilité (M_{DE} et LA).
- Certains déchets sont riches en pierres naturelles. La comparaison de la composition des quatre échantillons avec le tableau présent dans la norme NBN EN 933-11 montre que les matériaux entrants ne correspondent pas à la définition stricte des recyclés mixtes, même si la plupart s'en approchent. Certains éléments comme les briques, les pierres naturelles et certains corps étrangers doivent être partiellement éliminés durant le protocole de traitement.

De même, 9 échantillons de matériaux recyclés, produits par 6 centres de traitement différents, ont fait l'objet d'une caractérisation via des analyses granulométriques et les principaux essais de durabilité que sont les essais Los Angeles (LA), Micro-Deval en présence d'eau (M_{DE}) et l'essai de sensibilité aux cycles gel – dégel (F). Des comparaisons avec les critères généralement requis dans le CCT QUALIROUTES pour une application en sous-fondation ont été également réalisées.

- Sur base du critère de la composition, peu d'échantillons satisfont à tous les critères requis pour un recyclé mixte. Il existe une variation de composition dans le temps pour une même unité de traitement.
- L'analyse granulométrique montre la présence de 6 à 15 % de teneur en fines (f). De nombreux échantillons ne répondent pas au critère du CCT QUALIROUTES (7% maximum de fines pour une application en sous-fondation).
- Le mode d'échantillonnage a une certaine importance sur les résultats de l'analyse granulométrique : la teneur en fines (f) mesurée est plus faible lorsque le prélèvement est effectué sur le tas.
- L'essai Micro-Deval en présence d'eau (M_{DE}) montre une grande dispersion de valeurs (valeurs comprises entre 23 et 51 alors que la limite fixée par Qualiroutes pour une utilisation sur le réseau secondaire est de 50%). Il en va de même pour les résultats de l'essai Los Angeles (LA), compris entre 25 et 46%, alors que la limite fixée par Qualiroutes est de 40%.

- Sept échantillons sur neuf respectent les critères M_{DE} , LA, et $M_{DE}+LA$ pour une application en sous-fondation sur les réseaux IIb et III. Trois échantillons, dont les deux recyclés de béton, satisfont même aux exigences pour les réseaux I et IIa.
- Les résultats de l'essai d'absorption d'eau varient de 4.7 à 12.2%. Tous les échantillons sont donc susceptibles d'être gélifs. Les résultats de l'essai sont plus élevés lorsqu'il est effectué sur la fraction (4/31.5 mm) que sur la fraction (0.063/4 mm).
- Le résultat de l'essai de sensibilité au gel-dégel, le facteur F varie de 4 à 18% pour les recyclés mixtes et de 6 à 11.6% pour les recyclés de béton. Ces valeurs sont très éloignées du seuil de 2% fixé par le CCT Qualiroutes. Pour cette raison, une proposition de modification du critère de gel-dégel, plus proche du critère Allemand, a été introduite au niveau du groupe de travail du CCT Qualiroutes. Ce nouveau critère tolérerait notamment un F jusque 10%, à condition que le matériau ne produise pas trop de fines (f) lorsqu'il est soumis au gel et qu'il soit protégé des venues d'eau.

Tâche 2 : Mise au point d'un essai spécifique aux granulats recyclés

Dans l'objectif de poursuivre la mise au point d'un essai spécifique aux granulats recyclés, nous avons travaillé sur quatre axes différents. Nous avons étudié les paramètres qui influençaient les résultats des essais de durabilité actuellement réalisés ainsi que les éventuelles relations entre les résultats de ces essais. Nous avons également testé des essais utilisés à l'étranger ou alors récemment développés comme le triaxial cyclique.

Les variantes des essais classiques de durabilité (LA, M_{DE} et F) ont montré que :

- Les résultats de l'essai Micro-Deval en présence d'eau sont meilleurs lorsque la teneur en béton est élevée. Les résultats ont en revanche tendance à diminuer légèrement avec la granulométrie, malgré le fait que la quantité d'abrasif est adaptée en fonction de la fraction granulométrique testée.
- La présence d'eau dans l'essai M_{DE} est responsable d'une partie importante des pertes subies par le matériau.
- La teneur en béton de l'échantillon mène à une amélioration des résultats à l'essai Los Angeles. En revanche, la modification de la fraction testée (avec adaptation de la charge abrasive) ne semble pas influencer les résultats.
- Le coefficient de perte à l'essai de sensibilité au gel-dégel F diminue de façon importante lorsque l'échantillon testé n'est pas saturé mais égoutté avant l'essai. De même, un échantillon qui a déjà subi préalablement un cycle de gel-dégel et un tamisage présente un coefficient F plus faible.
- Lorsque les essais sont effectués sur les matériaux « purs », on observe que les pierres naturelles et les céramiques sont plus résistantes que les bétons et les mortiers vis-à-vis de l'essai Micro-Deval en présence d'eau, tandis que ce sont les bétons qui montrent la plus grande sensibilité à l'essai de gel-dégel. Ces résultats n'ayant été obtenus que sur les matériaux issus d'une seule centrale, il est difficile de dire si ces résultats sont généralisables à tous les bétons ou si le béton testé est de faible qualité.

Des corrélations ont été recherchées entre les différents résultats obtenus pour chaque matériau :

- Il n'y a pas de relation évidente entre les résultats de l'essai d'absorption (W_A) obtenus pour des fractions différentes. De même, il n'y a pas de relation claire entre le coefficient de perte à l'essai gel-dégel (F) et la teneur en fines (f) produites durant l'essai.
- A l'inverse, la corrélation entre LA et M_{DE} est très bonne, malgré l'hétérogénéité des matériaux testés. Cette bonne corrélation pourrait être utilisée pour ne soumettre au second essai que les matériaux qui n'auraient pas été performants au premier.
- Une relation un peu moins nette apparaît entre les résultats LA et M_{DE} et les résultats F et f de l'essai de sensibilité au gel-dégel. Cette relation n'est pas linéaire et ne s'étend pas aux briques.

Des essais triaxiaux cycliques ont également été réalisés sur un recyclé mixte, en utilisant des niveaux de contraintes adaptés pour être représentatifs de la mise en œuvre et des sollicitations en sous-fondation. Les essais réalisés ont montré que :

- Les déformations permanentes sont fortement influencées par les teneurs en eau et en éléments fins (cet aspect est plus détaillé en Tâche 3). En contrôlant ces deux paramètres (teneur en eau proche de la teneur en eau de l'optimum Proctor et teneur en fines limitée), les déformations permanentes du matériau restent inférieures à 1 % et donc acceptables.
- Le fait de soumettre des éprouvettes soumises à des cycles gel-dégel avant d'effectuer l'essai ne semble pas impacter les déformations permanentes. Ce point reste à vérifier sur d'autres matériaux.
- Les déformations permanentes mesurées sur un granulat naturel (calcaire compacté à la teneur en eau de l'optimum Proctor) sont moins élevées que celles mesurées sur le granulat mixte analysé.

Deux échantillons traités ont été soumis à des essais recommandés par la norme française pour les matériaux de remblai (*essais de friabilité, de fragmentabilité et de dégradabilité*). Les résultats obtenus montrent que les matériaux testés respectent largement les critères généralement repris dans les cahiers des charges français en ce qui concerne les remblais. Ces critères ne sont pas repris pour des applications en sous-fondation et sont donc moins stricts que les essais classiques.

Tâche 3 : Etude des paramètres "néfastes"

Sur base des informations obtenues lors de la veille technologique et des résultats d'essais réalisés dans le cadre de la tâche 2, il s'avère que la teneur en fines joue un rôle non négligeable dans le comportement des matériaux recyclés utilisés en sous-fondation routière. Pour cette raison, les travaux de cette tâche se sont concentrés sur ce paramètre en particulier.

Une analyse plus détaillée de la composition et de différentes caractéristiques de la fraction 0/4 mm des matériaux recyclés mixtes prélevés dans le cadre de la tâche 1 a été réalisée à l'ULg. Les résultats obtenus sont les suivants :

- La densité, mesurée au pycnomètre, est similaire pour l'ensemble des matériaux et varie entre 2.63 et 2.72.
- La composition des échantillons révèle qu'ils contiennent beaucoup de quartz (55-74%) et pas mal de calcite (17-30%), le reste étant composé de dolomite, feldspath et plagioclases. Les deux échantillons provenant du même centre sont assez différents l'un de l'autre, ce qui traduit une variabilité de composition au sein d'un même centre.

- La perte au feu à 500°C varie assez peu d'un échantillon à l'autre, et est plus faible que les valeurs mesurées sur les échantillons bruts. La perte au feu à 1000°C présente une dispersion plus importante.
- Les teneurs en sulfates et chlorures varient assez peu d'un échantillon à l'autre. Les teneurs en sulfates sont sensiblement plus faibles que pour les fines des déchets bruts testées à la tâche 1.
- Selon les analyses par fluorescence X, la composition minéralogique varie peu d'un échantillon à l'autre.

Une caractérisation de la forme de ces particules a également été réalisée par imagerie statique, sur différentes fractions de la partie 0/4 mm. Les caractéristiques des fractions 0/4 prélevées sur les matériaux recyclés ont ainsi pu être comparées aux fractions 0/4 issues des déchets bruts. Cette analyse a permis de tirer les conclusions suivantes :

- Des différences de forme significatives ont été observées pour les neuf échantillons dans chacune des fractions granulaires testées. La plupart du temps, les tendances sont cohérentes pour un même échantillon d'une fraction granulaire à l'autre.
- L'échantillon brut 84C contient globalement plus de particules arrondies que tous les autres, notamment à cause des particules grossières.
- Dans la fraction granulométrique 0.125/0.25 mm principalement, la différence entre les échantillons bruts (prélevés avant traitement en centrale, voir tâche 1) et les échantillons recyclés est particulièrement visible. De façon assez surprenante, le recyclé prélevé sur la première planche d'essai se comporte plutôt comme les matériaux bruts.
- Aucune différence majeure entre les quatre échantillons recyclés n'est apparue, mais aucune ressemblance particulière n'est visible entre les deux échantillons provenant du même centre.

Des essais au triaxial cyclique ont été réalisés sur un granulat mixte en faisant varier la teneur en eau et la teneur en éléments fins. Ces essais ont montré la sensibilité des déformations permanentes vis-à-vis de ces deux paramètres. Les déformations permanentes augmentent avec la teneur en eau et peuvent devenir trop importantes (jusque 7% de déformations permanentes pour le granulat mixte avec une teneur en eau dépassant de 1% celle de l'optimum Proctor). Lorsque la teneur en particules 0/2 mm du matériau est réduite de 30% par tamisage, les déformations permanentes à la teneur en eau de l'optimum Proctor sont réduites d'un facteur quatre et la sensibilité à l'eau diminue également.

Tâche 4 : Protocole de traitement

L'objectif de cette tâche était de déterminer si une adaptation du protocole de traitement des recyclés pouvait être envisagée pour trier les différents composants ainsi qu'éliminer ou améliorer certains paramètres néfastes.

Un protocole de traitement des déchets bruts a été mis en place, en combinant des techniques de séparations granulométriques et de broyage, au moyen d'un concasseur à percussion, de façon à récupérer trois fractions granulométriques de granulats : (0/30 mm), (30/60 mm) et (60/100 mm). Le concassage au moyen du broyeur à percussion entraîne une réduction granulométrique trop importante de la matière (90 à 95 % inférieure à 16 mm).

La méthode de broyage a dès lors été investiguée de façon à limiter la production de fines (f) mais également afin de s'intéresser à la possibilité d'avoir recours à un broyage sélectif qui faciliterait la séparation ultérieure des granulats par simple coupure granulométrique. Deux types de concasseurs ont

été envisagés : le concasseur à mâchoires et le concasseur à percussion. Pour ce second équipement, la puissance motrice a été modifiée afin de voir l'évolution sur la production de fines (f). Les essais ont été réalisés à la fois sur les matières seules (essentiellement le béton et la brique) et également sur un mélange béton/brique afin d'observer les éventuelles interactions. Les conclusions sont les suivantes :

- Le concasseur à mâchoires présente l'avantage de concentrer les granulats dans une tranche granulométrique particulière, correspondant à l'écartement défini entre les mâchoires, tandis que le concasseur à percussion génère une distribution granulométrique plus régulière, avec une production de fines (f) qui évolue proportionnellement à la puissance motrice appliquée à l'équipement.
- La distribution granulométrique est peu influencée par la nature des matériaux broyés, ce qui rend difficilement applicable une séparation liée à un broyage sélectif. Tout au plus peut-on signaler, dans le cas d'un broyage au moyen d'un concasseur à mâchoires, une production plus importante de granulats fins (0/8 mm) pour le béton cellulaire par rapport à la brique et au béton, ou la faible proportion d'éléments supérieurs à 50 mm pour les tuiles et la céramique.

Tâche 5 : Analyse en laboratoire du comportement des nouveaux granulats obtenus

Des recyclés mixtes issus de deux variantes du protocole expérimental développés dans la Tâche 4 ont été prélevés: l'un où deux fractions sont concassées avant criblage et recombinaison et l'autre où seule une fraction est concassée.

Les performances en termes de durabilité de ces granulats ont été testées. Elles sont relativement moyennes si on les compare à l'ensemble des granulats mixtes testés dans le cadre d'Aperrou, mais il est difficile d'en tirer des conclusions sur la qualité du protocole dans la mesure où la provenance et la qualité des déchets d'origine ne sont pas connues. Il semblerait néanmoins que le traitement peut jouer un rôle sur la qualité des granulats obtenus, puisque l'un des deux protocoles testés (à double concassage) permet de produire des granulats présentant de meilleures propriétés.

Tâche 6 : Etude des nouveaux déchets de démolition et adaptation du protocole de traitement

Les bétons cellulaires sont des matériaux rencontrés de plus en plus fréquemment dans les centrales de démolition, où ils se retrouvent souvent mélangés aux déchets inertes. Pour cette raison, nous avons choisi d'étudier l'impact de la présence de ce matériau sur les performances des recyclés et les adaptations possibles du protocole de traitement.

La présence de granulats de béton cellulaire a un impact très variable sur les résultats des matériaux aux essais de durabilité :

- Les performances aux essais gel-dégel et Los Angeles sont fortement dégradées en présence de ces granulats qui se désintègrent en proportion très importante au cours des essais.
- Les résultats à l'essai Micro-Deval varient peu lorsque des granulats de béton cellulaire sont introduits. Ceci est dû au caractère flottant des matériaux, qui leur permet de ne pas se mélanger aux autres granulats et donc de subir une attrition limitée. L'indicateur M_{DE} serait donc moins représentatif des performances réelles des matériaux que les indicateurs F et LA.

Des essais ont également été menés afin de voir si les granulats de béton cellulaire pouvaient efficacement être séparés d'un mélange béton/brique en étant traités par un protocole spécifique incluant des techniques gravimétriques et plus particulièrement la table densimétrique.

- Une très bonne séparation des granulats de béton cellulaire et du mélange béton/brique est obtenue avec le béton cellulaire se retrouvant dans les éléments légers et le béton et la brique dans les éléments lourds. Il convient toutefois au préalable de réduire la tranche granulométrique de la matière, en procédant à des coupures granulométriques, de façon à en optimiser l'efficacité de séparation.
- En travaillant avec une distribution granulométrique plus étendue, il reste possible d'appauvrir considérablement les granulats mixtes du béton cellulaire, mais cela se traduit par une perte, parfois non négligeable, du béton et de la brique entraînés avec les éléments légers.
- La séparation gravimétrique effectuée sur la fraction 0/4 est particulièrement intéressante puisqu'elle permet, d'une part, d'éliminer efficacement le béton cellulaire des granulats béton/brique, et d'autre part, d'éliminer les fines (0/63 μm).

Tâche 7 : Validation à grande échelle

Afin de contrôler *in situ* le comportement des recyclés mixtes, trois planches d'essais ont été réalisées dans le cadre du projet. Ne disposant pas de suffisamment de matériaux issus du protocole expérimental, celles-ci ont été réalisées sur base de recyclés issus de centrales de traitement.

Une première planche d'essais a été réalisée afin de pouvoir étudier le comportement *in situ* de granulats recyclés vis-à-vis des conditions météorologiques hivernales. Cette planche a été équipée de sondes de température ainsi que de repères topographiques. Elle a fait l'objet d'un suivi régulier *in situ* au cours de deux périodes hivernales. Des échantillons de matériaux ont été prélevés à différentes étapes de la réalisation ainsi que lors du démontage partiel réalisé à la fin de la première période hivernale afin de pouvoir suivre l'évolution dans le temps de quelques-unes de leurs caractéristiques.

Suite à cette planche d'essai, plusieurs conclusions peuvent être tirées quant au comportement de recyclés en période hivernale :

- Les capteurs de température ont montré la présence d'une succession de cycles de gel-dégel en surface. Le front de gel associé est cependant rarement descendu à une profondeur supérieure à 5 cm.
- Lorsqu'elle est soumise à des températures négatives, la planche d'essai subit l'impact temporaire du gel : des gonflements temporaires sont mesurés et la portance dynamique augmente momentanément.
- Un gonflement d'environ 1.5% est observé entre la mise en œuvre et le démontage partiel de la planche.
- Après le premier hiver, tous les indicateurs de portance (statique et dynamique) sont plus de deux fois plus élevés que lors de la mise en œuvre. Ceci tend à confirmer l'hypothèse selon laquelle des réactions secondaires se produisent dans les recyclés non liés. Cette observation est bien connue pour les recyclés de béton et nous avons pu la mettre en évidence pour les recyclés mixtes également. Cependant, dans le cas d'une sous-fondation où le rôle drainant est important, il conviendrait de voir comment la perméabilité du matériau est affectée par ces réactions.
- Au cours de la seconde période hivernale, le module dynamique de la planche a décru fortement. Comme les résultats de l'essai Panda, qui ne prennent pas en compte les 5 premiers centimètres de la structure, ne semblent pas suivre cette tendance, cette dégradation des propriétés pourrait être imputée à la dégradation de l'état de la surface de la planche (végétation,...).

- La teneur en fines (f) mesurée diminue au fur et à mesure des opérations de mise en œuvre. Ceci illustre parfaitement la difficulté de l'échantillonnage du matériau hétérogène, notamment à cause de la ségrégation des particules.
- Les différences entre les résultats aux différents essais de laboratoire (LA, M_{DE} , gel-dégel et granulométrie) des couches soumises ou non au gel sont trop faibles par rapport à la précision des essais et à l'hétérogénéité des matériaux pour tirer des conclusions, si ce n'est que le gel ne semble pas modifier de façon importante la teneur en fines (f) des échantillons.

La seconde planche d'essai a permis d'étudier l'influence du type de concasseur (à mâchoires ou à percussion) et du type de compacteur (à rouleaux ou à pneus) sur les propriétés des recyclés mis en œuvre. Les observations réalisées sur base de cette planche sont les suivantes :

- Les analyses des prélèvements ont montré qu'il n'y avait pas de différence significative pour les coefficients LA et M_{DE} des différents matériaux mis en œuvre. Il en est de même pour le coefficient F et la production de fines (f) déterminés par des essais gel-dégel.
- On n'observe pas de différence significative en ce qui concerne les modules statiques et dynamiques mesurés par les essais à la plaque. Par contre, le coefficient m et le rapport Ed_{dyn2}/Ed_{dyn1} sont plus petits pour les matériaux compactés au compacteur à pneus, ce qui pourrait indiquer un meilleur compactage. Toutefois, il faut être prudent car le compactage dépend également des caractéristiques du compacteur utilisé.

La troisième planche d'essai a été mise en œuvre afin de comparer l'effet du gel-dégel sur des recyclés de béton et sur des granulats naturels (calcaire). Les relevés ont été réalisés durant deux mois, avec une période de gel accentué. Les observations principales sont les suivantes :

- Sans surprise, le calcaire présente de meilleurs résultats aux essais de durabilité que le recyclé de béton. Les coefficients LA et M_{DE} des deux matériaux satisfont aux critères du CCT Qualiroutes alors que seul le coefficient de sensibilité au gel-dégel F du recyclé calcaire est conforme.
- Par temps de gel prononcé, on observe un gonflement de +/- 2.5% pour les deux matériaux. Les matériaux subissent également un raidissement temporaire, moins prononcé pour les granulats naturels que pour les matériaux recyclés.
- Le gonflement global sur la période testée du recyclé de béton est presque deux fois plus important (1.35%) que celui du calcaire (0.75%).
- Les premières observations semblent confirmer un raidissement progressif des recyclés de béton, qui n'apparaît pas pour les granulats naturels.

Perspectives

Tant la revue bibliographique que les essais réalisés au cours de ce projet indiquent que les éléments fins ont une influence néfaste sur le comportement des granulats recyclés. Parmi ces fines, on distingue les éléments fins issus des déchets bruts, plus riches en argiles et matières organiques (également appelés fines de précriblage) et les éléments fins issus des opérations de concassage, composées de matériaux inertes (appelés fines de concassage).

Les éléments fins issus des déchets bruts sont souvent écartés au début du protocole de traitement dans les centrales, par un crible séparant les particules inférieures à quelques millimètres du reste du matériau. Ces fines de précriblage peuvent être réutilisées comme matériau de remblais après stabilisation. Par contre, les fines de concassage sont rarement éliminées avant commercialisation et se trouvent donc en grande quantités dans les matériaux produits (jusque 15 % pour les matériaux prélevés au cours de ce projet).

Ces fines de concassage pourraient être écartées en utilisant un crible à 4 ou 5 mm après le concasseur (un crible plus fin posant des problèmes lorsque le matériau est humide). Une des raisons invoquées par les centres de recyclage pour expliquer l'absence d'un tel crible est la difficulté actuelle de valoriser commercialement cette fraction seule. Il serait donc intéressant de développer de **nouvelles voies de valorisation** pour ces matériaux. On pourrait ainsi imaginer une utilisation en sous-fondation ou en fondation liée au ciment pour des voies à faible trafic, par exemple pour les pistes cyclables du réseau RAVeL. En fonction des résultats obtenus, des applications pour des voiries à trafic plus importantes pourraient être envisagées. Les fines de concassage pourraient également être intégrées dans la formulation d'un MAR (matériau autocompactant réexcavable).

Les planches d'essais mises en œuvre dans le cadre du projet présentent des conditions très défavorables pour les recyclés puisque ceux-ci ne sont pas protégés par une couche de revêtement. Il serait donc utile de réaliser une **planche d'essai dans des conditions réelles** (revêtement et route sollicitée par du trafic) avec mise en place de différents matériaux recyclés et naturels en sous-fondation ou au moins d'assurer le suivi à long terme d'un tronçon de route pour lequel un recyclé a été mis en œuvre en sous-fondation.

Suite à une accumulation de problèmes techniques, le programme des essais au triaxial cyclique a dû être limité à un granulat recyclé et un granulat naturel. Ces essais seront poursuivis sur davantage de matériaux recyclés et naturels, à différentes teneurs en eau et différentes teneurs en fines afin de définir des valeurs seuils. Idéalement, il faudrait faire des **comparaisons entre les essais de durabilité classiques, la mesure des déformations permanentes via le triaxial cyclique et le comportement en situation réelle** des recyclés mixtes.

Références

(a) Articles

- Babic, B., Prager, A. and Rukavina, T. (2000). Effect of fines particles on some characteristics of granular base courses – Materials and Structures/ Matériaux et Construction, Vol.33, pp 419-424
- Balay, J., Gomes Correia, A., Jouve, P., Hornych, P. and Paute J.-L. (1998). Etude expérimentale et modélisation du comportement mécanique des graves non traitées et des sols supports de chaussées – Dernières avancées. Bulletin liaison Labo. P. et Ch. 216, pp. 3-18.
- Brown S. F. and Thom N.H. (2013). Recent developments in pavement foundation design, Proceedings 18th congrès international de mécanique des sols et de géotechnique, p. 1237-1240, Paris.
- Cook, H.E., Johnson, P.D., Matti, J.C., & Zemmels, I. (1975). Methods of sample preparation and x-ray diffraction data analysis in x-ray mineralogy laboratory. In A.G. Kaneps, Initial Reports of the DSDP, Print Office, Washington DC, 997–1007.
- Cooley, L. and James, R. (2003). Micro-Deval Testing of Aggregates in the Southeast. Transportation Research Record N°1837, National Research Council, 2003, p 73.
- Corté, J.-F., Caractéristiques mécaniques des graves non traitées au triaxial à chargements répétés. Bulletin liaison Labo. P. et Ch. 190, 1994, pp. 17-26.
- Ekse, M. and Morris, H. (1959). A Test for Production of Plastic Fines in the Process of Degradation of Mineral Aggregates. Symposium on Road and Paving Materials, ASTM STP 277, Philadelphie, pp 122.
- Esa, S., Hozayen, H. and Garif, A. (1993). Estimating Aggregate Water Absorption from the Los Angeles Abrasion test Results. Proceedings of the 1993 Annual Conference of the Transportation Association of Canada., Vol. 1, Ontario, Canada.
- Gomes Correia, A. (editor). Unbound Granular Materials - Laboratory testing, In-situ testing and modelling, Balkema, Rotterdam, 1999.
- Gomes Correia, A. (2004). Evaluation of mechanical properties of unbound granular materials for pavements and rail tracks. Proceedings of the international Seminar on Geotechnics in Pavement and Railway Design and Construction, Athens. Gomes Correia & Loizos eds., Millpress Rotterdam, Netherlands, pp. 35-60.
- Goto, S. Tatsuoka, F., Shibuya, S., Kim, Y.-S. & Sato, T. (1991). A simple gauge for local small strain measurements in the laboratory. *Soils and foundations*, vol. 31, 1: 169-180.
- Hoque, E., Sato, T. & Tatsuoka, F. (1997). Performance evaluation of LDTs for use in triaxial tests. *Geotechnical testing Journal*, Vol. 20, 2: 149-167.
- Hossain, S., Lane, S. and Schmidt, B. (2007). Use of the Micro-Deval test for Assessing the Durability of Virgin Aggregates. Research Report of Virginia Transportation Research Council, VTRC 07-R29.

- Hunt, E. (2001). Micro-Deval Coarse Aggregate Test Evaluation. OR-RD-01-13, Oregon Department of Transportation, Salem.
- Jayawickrama, P., Phillips, W., and Hossain, M. (2001). Comparative Analysis of the Micro-Deval and Magnesium Sulfate Soundness Tests. Report n° 1771-S, Texas Tech. University, Center for Multidisciplinary Research in Transportation.
- Kandhal, P and Parker, F. (1998). Aggregate Test Related to Asphalt Concrete Performance in Pavements. NCHRP Report n°405, Transportation Research Board, Washington D.C.
- Krumbein, W.C. (1941). Measurement and geological significance of shape and roundness of sedimentary particles. *Journal of Sedimentary Petrology*, 11, 64-72.
- Lang, A., Range, P., Fowler, D. and Allen, J-J. (2006). The Prediction of Coarse Aggregate Performance by Micro-Deval and Other Soundness, Strength and Intrinsic Particulate Property Test. *Aggregates Asphalt Concrete, Portland Cement Concrete, bases and Fines, 14th Annual Symposium Proceedings, ICAR, Austin, Texas, April 2006.*
- Larson, L., Mathiowetz, R. and Smith, J. (1971). Modification of the Standard Los Angeles Abrasion Test. *Highway Research Record* n° 353, pp. 15-24.
- Latham, J.P. and Rogers, C. (1998). Canadian experience with the micro-Deval test for aggregates. *Geological Society Engineering Geology Special Publication* n° 13, pp. 139-147.
- Meininger, R. (2004). Micro-Deval vs L.A Abrasion; *rock Products*, Vol. 107, n°4, Primedia Intertec Publishing Corp., p 33.
- Paute, J.-L., Horny, P. and Benaben, J.-P. (1994). Comportement mécanique des graves non traitées. *Bulletin liaison Labo. P. et Ch.* 190, pp. 27-38.
- Pirard E (1993). *Morphométrie Euclidienne des Figures Planes - Application à l'analyse des matériaux granulaires*. Thèse de doctorat. ULg, Faculté des Sciences Appliquées.
- Rangaraju, P.R., Edlinski, J. and Amirkhanian, S. (2005). Evaluation of South Carolina Aggregate Durability Properties. FHWA-SC-05-01, Clemson University/South Carolina Department of Transportation, Columbia.
- Richard, J. and Scarlett, J. (1997). Airport Engineering ATR-024 : a Review and Evaluation of the Micro-Deval Test. Public Work and Government Services of Canada-Report on Project 914222.
- Rogers, C., Lane, B. and Senior, S. (2003). The Micro-Deval Abrasion Test for Coarse and Fine Aggregate in Asphalt Pavement. *International Center for Aggregates Research 11th Annual Symposium, Austin, TX.*
- Senior, S. and Rogers, C. (1991). Laboratory Tests for Predicting Coarse Aggregate Performance in Ontario. *Transportation Research Record* n° 1301, Transport Research Board, Washington D.C.
- Thom N.H., A. Cooper, P. Grafton, C. Walker, H. Wen, R. Sha, A new test for base material characterisation, ISAP 2012 Conference, Nanjing.
- Wu, Y., Parker, J.F. and Khandal, P. (1998). Aggregate toughness/abrasion resistance and durability/soundness tests related to asphalt concrete performance in pavements. *Transportation Research Record* n°1638, National Research Council, Washington D.C, p 85.

Wu, Y., Parker, J.F. and Kandhal, P. (1999). Evaluation of tests for Toughness/Abrasion Resistance and Durability Soundness of Coarse Aggregate. Cement, Concrete and Aggregates, Vol. 21, ASTM 1999, pp. 12-22.

(b) Normes

ASTM C88

Standard Test Method for Soundness of Aggregates by use of sodium sulfate and magnesium sulfate.

ASTM C131

Standard test method for resistance to degradation of small-size coarse aggregate by abrasion and impact in the Los Angeles machine.

AASHTO T327-05

Resistance of Coarse Aggregate to Degradation by Abrasion in the Micro-Deval Apparatus.

EN 13242

Granulats pour matériaux traités aux liants hydrauliques et matériaux non traités utilisés pour les travaux de génie civil et pour la construction des chaussées.

EN 1097-6

Essais pour déterminer les caractéristiques mécaniques et physiques des granulats. Partie 6, détermination de la masse volumique réelle et du coefficient d'absorption d'eau.

NBN EN 1367-1

Essais pour déterminer les propriétés thermiques et l'altérabilité des granulats. Partie 1, détermination de la résistance au gel-dégel.

NBN EN 13286

Graves traitées aux liants hydrauliques et graves non traitées. Partie 7, essai triaxial sous charge cyclique pour mélanges sans liant hydraulique.

(c) Projets de recherche

ALT-MAT (1996-2001)

« Alternative materials in road construction » - Projet européen, Contract n° RO-97-SC.2238.

RECYWALL (Décembre 1996)

Convention relative à l'analyse de la problématique du recyclage des matériaux issus de la démolition et des sous-produits industriels utilisables dans la construction, Rapport final.

RECYWALL (Juillet 1997)

Convention relative à l'analyse de la problématique du recyclage des matériaux issus de la démolition et des sous-produits industriels utilisables dans la construction, Rapport final, deuxième partie.

Convention CC CCN/PN/NBN-807

Etude des performances mécaniques de matériaux granulaires naturels, recyclés et secondaires pour le triaxial cyclique : essais à pression de confinement variable

Convention CC CCN/PN/NBN-857

Etude des performances mécaniques de matériaux granulaires naturels, recyclés et secondaires pour le triaxial cyclique : essais à pression de confinement variable

Annexe I: Formulaire transmis aux centres de traitement

Centre de traitement :

Nom de la personne responsable :

1. Quel est le tonnage annuel de recyclés produits dans votre installation et quelle est la part de recyclés mixtes?

2. Votre installation de recyclage est-elle fixe ou mobile ?

Fixe

Mobile

3. Combien de personnes travaillent dans votre installation de recyclage ?

4. Quelle est l'origine des déchets arrivant dans le centre ?

Tout venant (Parcs à containers)

Entrepreneurs de démolition

Autres :

5. Un tri sélectif est-il opéré à l'entrée ?

Oui

Non

6. Le produit subit-il un pré-scalpage?

Oui

Non

Avec quel tamis ?

7. Quel type(s) de concasseur(s) utilisez-vous ?

Concasseur à mâchoires

Concasseur à percussion

Autre :

8. Procédez-vous à un tri manuel pour écarter la fraction X ?

Oui

Non

9. Avez-vous un dispositif pour récupérer les métaux ferreux et/ou non-ferreux ?

Ferreux

Oui

Non

Non-ferreux

Oui

Non

A quel stade du processus de traitement?

10. Utilisez-vous un dispositif d'élimination des particules légères (soufflerie) ?

Oui

Non

11. Les fines produites durant le concassage sont-elles séparées du produit par criblage ?

Oui

Non

Par quel tamis?

12. Quelles sont les fractions finalement produites ?

13. Parmi celles-ci, quelles sont les fractions les plus difficiles à valoriser commercialement ?

14. Pour quelle(s) application(s) principales les différentes granulométries de recyclés sont-elles vendues ?

Applications routières

Construction / bâtiment

Autres :

Annexe II: Annexe A.2 de la prescription technique PTV 406

Catégorie	Constituant	Description complémentaire
Rc	Béton	(+ granulats avec béton préparé attaché)
	Produits à base de béton	Dalles en béton, pavés en béton, hourdis, ...
	Mortier	Béton préparé
	Eléments de maçonnerie en béton	
Ru	Granulats non-traités	Granulats naturels, gravillons, gravier
		Scories métallurgiques ferreux et non-ferreux
		Grains d'argile étendus non-flottant
		Coquilles
	Pierre naturelle	Ardoises naturelles
	Granulats traités aux liants hydrauliques	Béton maigre, béton rouleau
Ciment au sable		
Gravillon stabilisé		
	Mélange ternaire, ...	
	Chape mortier au ciment	
Rb	Eléments en terre cuite	Brique, tuiles en céramique, tuyaux en grès
		Mortier des joints de maçonnerie
		Produits céramiques (dalles, plinthes, ...)
		Pavés en terre cuite
	Béton avec grains d'argile étendus	
	Eléments en silicate de calcium	Brique de sable calcaire
	Béton cellulaire non-flottant	
Ra	Mélanges hydrocarbonés	Asphalte, asphalte coulé
		Asphalte maigre
		Ciment d'agrégats d'enrobé
Rg	Verre	
X	Autre:	
	Matériaux cohésifs (argile et sol)	
	Divers:	Roofing, bitumes
	Métaux (ferreux et non-ferreux)	
	Non-flottant: bois, plastique, caoutchouc	(papier)
	Plâtre	Plâtre
		Charbon, ardoise contenant du charbon noir, lignite (centre noire), coke, pierre réfractaire, ...
		Mâchefers et scories des incinérateurs
Fl	Matériaux flottants	(Béton cellulaire, argile étendue, plastique, matériaux d'isolation, bois, résidus végétaux, liège, panneau de fibre de bois, ...)
Remarque : Matériaux qui, selon la législation de l'environnement, peuvent requérir une évaluation distincte : ballast ferroviaire, béton cellulaire, cendres volantes et cendres de sol d'incinérateurs, plâtre ou déchets de démolition pollués, scories, scories non-ferreux, céramique, porcelaine, scories d'incinérateurs, autres matériaux pour lesquels selon Vlarema une déclaration de matière première est requise. Ces matériaux ne peuvent dès lors pas être traités, en quantité significative, dans les débris. Uniquement évaluer la présence accidentelle selon la norme NBN EN 933-11.		

Annexe III: Indication et classification des granulats recyclés (Tableau 1 de la prescription technique PTV 406)

Composition NBN EN 933-11	Gravillon de béton		Gravillon asphaltique		Gravillon mixte		Gravillon de maçonnerie		Gravillon mixte et asphaltique		Gravillon de béton et asphaltique	
	Teneur	Catégorie	Teneur	Catégorie	Teneur	Catégorie	Teneur	Catégorie	Teneur	Catégorie	Teneur	Catégorie
Rc	≥ 70	RC70	Non requis	RCNR	Non requis	RCNR	Non requis	RCNR	Non requis	RCNR	Non requis	RCNR
Rcug	≥ 90	Rcug90	≤ 30	Rcug30-	≥ 50	Rcug50	≤ 40	Rcug40-	≥ 30	Rcug30	≥ 70	Rcug70
Rb	≤ 10	Rb10-	≤ 10	Rb10-	≤ 50	Rb50-	≥ 60	Rb60	≤ 50	Rb50-	≤ 10	Rb10-
Ra	≤ 5	Ra5-	≥ 70	Ra70	≤ 5	Ra5-	≤ 5	Ra5-	≤ 30	Ra30-	≤ 30	Ra30-
Rg	≤ 2	Rg2-	≤ 2	Rg2-	≤ 2	Rg2-	≤ 2	Rg2-	≤ 2	Rg2-	≤ 2	Rg2-
X	≤ 1	X1-	≤ 1	X1-	≤ 1	X1-	≤ 1	X1-	≤ 1	X1-	≤ 1	X1-
FL	≤ 5	FL5-	≤ 5	FL5-	≤ 5	FL5-	≤ 5	FL5-	≤ 5	FL5-	≤ 5	FL5-

Les granulats recyclés ne peuvent pas contenir des éléments, en teneurs qui sont interdits par la législation environnementale.

Annexe IV: Description des équipements pour la caractérisation de forme des particules

Two equipments were used for image acquisition:

- Nano500 by Occhio Instrument
- A high resolution scanner EPSON V750PRO.

Nano 500 is a commercially available device for size and shape particle characterization. It operates a camera, the light source, a sample holder and an embedded dispersion device.

The scanner allows to acquire 2D shadow of particles resting on the scanner surface (protected by plastic surface), in dry state. Although the image acquisition is based on the displacement of a linear camera aligned with a light source the overall geometry of the system is similar to the Nano. Resulting images can thus be further processed according to the same protocol (Tableau LXI).

The choice of the equipment was based on the size range of each sub-sample in order to guarantee a suitable resolution for each product. Table below sums up the resolution and device used for each sub-sample.

Tableau LXI : Samples size nomenclature.

Size range	Nomenclature	Equipment	Approx. pixel size (μm)
+ 4 MM	4	Epson scanner	21,2
- 4 +2 MM	2	Epson scanner	21,2
- 2 +1 MM	1	Epson scanner	21,2
- 1 + 0.5 MM	0,5	Nano500	4,4
- 0.5 + 0.25 MM	0,25	Nano500	3,2
- 0.25 + 0.125 MM	0,125	Nano500	2,2
- 0.125 + 0.063 MM	+ 0.063	Nano500	1,4
- 0.063 MM	- 0.063	Nano500	0,9

Image analyzes were done using Callisto.2012 software. Callisto is an ISO 9276-6; 7; 8 compliant software developed and commercialized by Occhio Instruments SA. It is meant to operate Occhio's equipment but can eventually be used in stand-alone when a compatible image acquisition protocol is used.

For each sample and each size range, four increments were tested with minimum 2 duplicates. The table below summarizes the methodology applied (Tableau LXII).

A filtering was applied during image acquisition with the Nano 500 to assure a minimum number of particles for each measurement (thus, discarding dust particles and dirt noise in the analysis).

Tableau LXII : Nano500 equipment settings.

Sample	Number of repetitions for each increment	Minimum of particules for each increment
0.5	2	50
0.25	3	50
0.125	3	100
+ 0.063	3	450
- 0.063	2	8000

Sample	Minimum number of particles	filtering (μm)
0.5	400	> 350
0.25	600	180 - 600
0.125	1200	90 - 380
+ 0.063	5400	35 - 180
- 0.063	64000	< 85

These four increments are not significant considering the whole sample, thus manual quartering was done before the test. Each increment was taken from different part of the pile to maximize the representativeness of each sample (rotary sampler was tested, but the sample generated too much dust making unviable the use of this automated sampling device). Additionally, other probable source of error during sampling is the presence of some particles with electric charged surface that stick to the plastic bag in which the samples were inside.

Particle dispersion was done by a vacuum system, as standard in the equipment. Manual dispersion after vacuuming was applied whenever possible and necessary.

The scanner Epson V750PRO was used for image acquisition on coarse particles since the Nano 500 equipment cannot deal with particle larger than 1 mm.

However, as the scanner is not controlled by any specialized acquisition software, any filtering couldn't be applied during the data acquisition. Therefore, filtering was applied after data acquisition. This feature is not crucial. For 4 mm and 2 mm samples, almost all particles were measured and for 1 mm samples, roughly 30%_{vol} of particles were tested.

The scanner resolution was calibrated through the imaging of an USAF 1951 calibration grid. It was decided to keep the same resolution 1200 dpi or 21.17 μm in all measurements. Particle dispersion was done manually.

Annexe V : Évolution des températures dans la planche d'essais gélivité

La Figure 147 présente l'évolution des températures sur la planche d'essais gélivité entre décembre 2014 et juin 2015. On observe un dysfonctionnement des capteurs enfouis à partir de la fin du mois de mars. Ce problème a par la suite été résolu afin de pouvoir continuer le suivi de la partie de la planche n'ayant pas été démontée durant l'hiver 2015-2016.

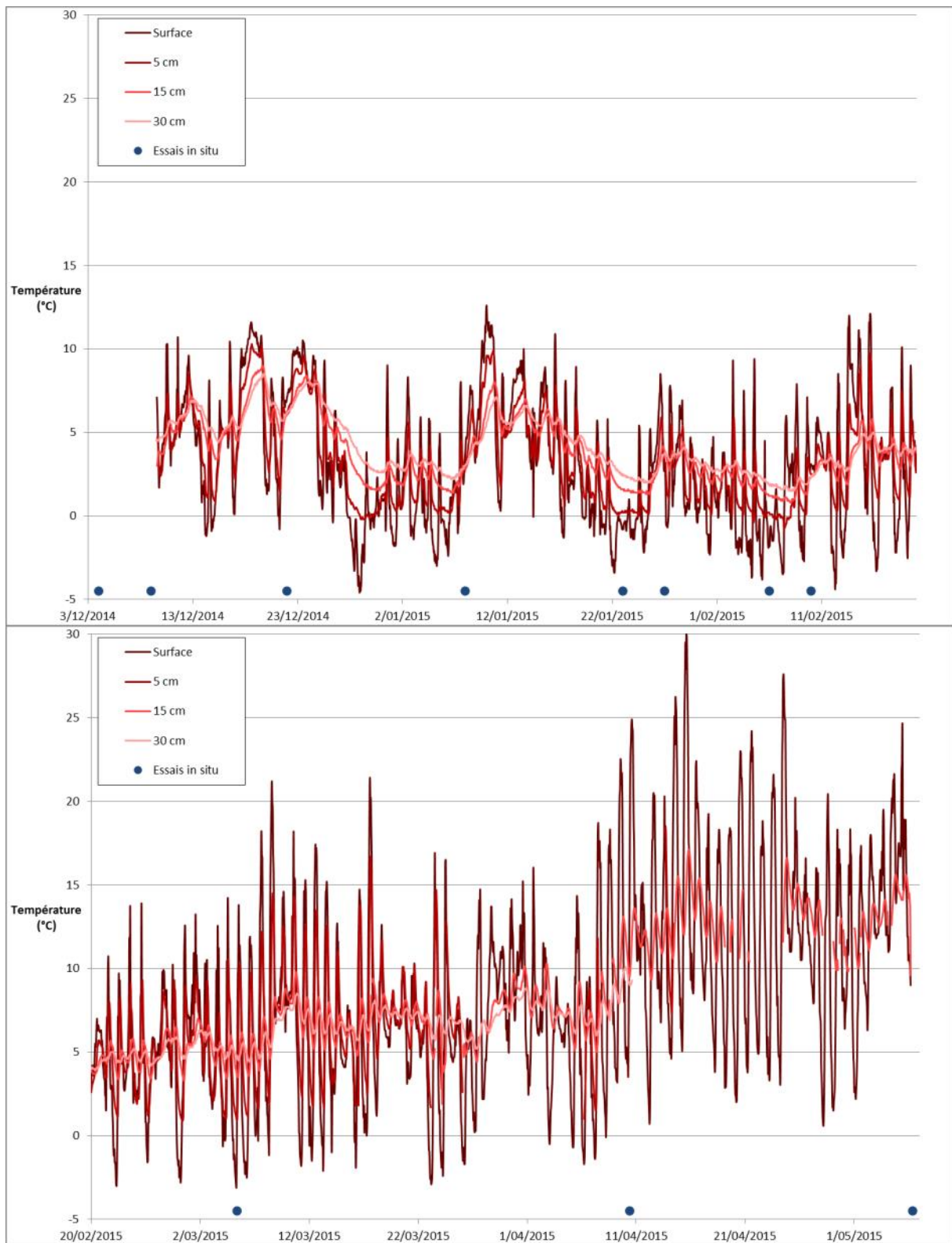


Figure 147 : Evolution des températures mesurées sur la première planche d'essai entre décembre 2014 et mai 2015.

A la suite du démontage de la planche, de nouveaux dysfonctionnements sont apparus dans les capteurs enfouis. Ils ont été temporairement résolus fin juillet 2015. L'évolution des températures mesurées entre juillet 2015 et février 2016 (fin de la convention) est représentée à la Figure 148.

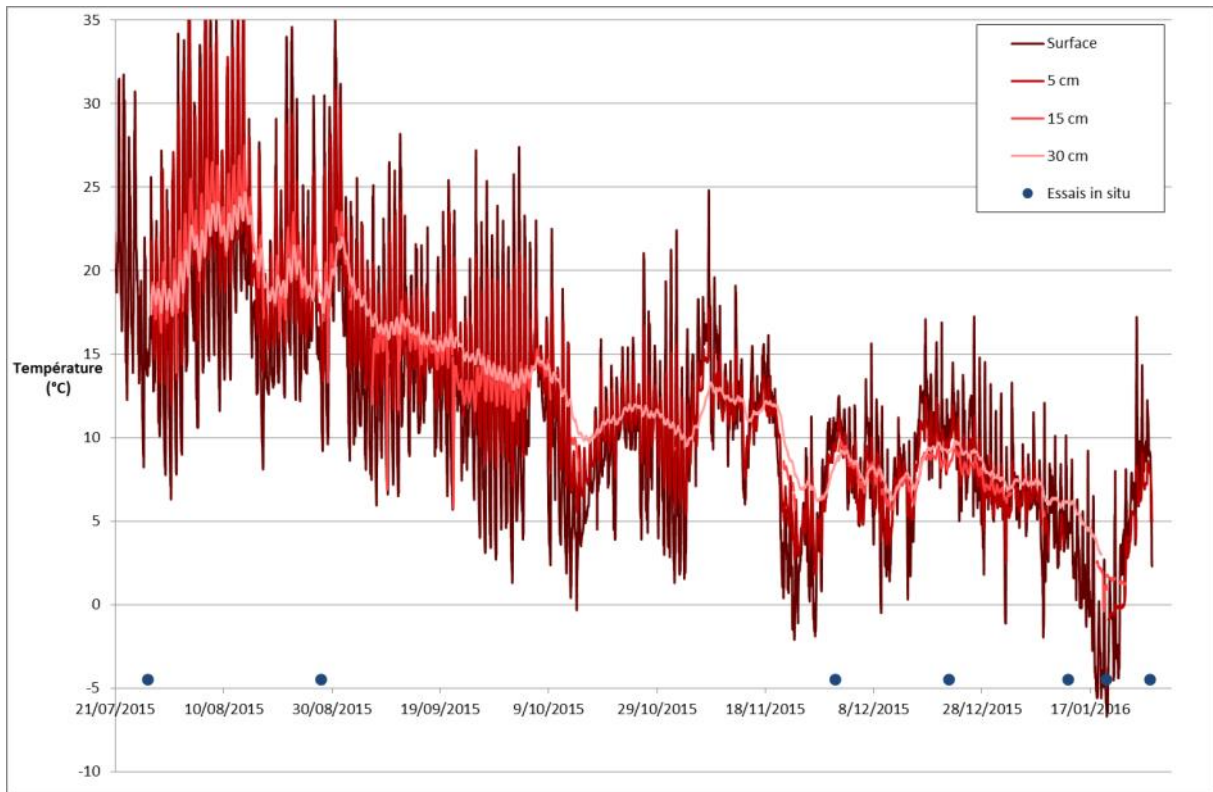


Figure 148 : Evolution des températures mesurées sur la première planche d’essai entre juillet 2015 et février 2016.