



Guide technique pour l'utilisation des granulats recyclés en Wallonie

Version 1.0 du 14 septembre 2022

TABLE DES MATIÈRES

1 PRÉFACE	6
2 AVANT-PROPOS	7
3 DÉFINITIONS ET PRINCIPES FONDAMENTAUX	8
<hr/>	
3.1 Modes de démolition sélective / déconstruction	8
3.2 Déchets inertes	8
3.3 Recyclage et centre de recyclage	9
3.3.1 Centres de recyclage fixes	9
3.3.2 Centres de recyclage mobiles	10
3.4 Evolutions réglementaires	10
3.5 Conformité technique et environnementale	11
3.5.1 Système de management de la qualité	11
3.5.2 Système de management de l'environnement	12
3.6 Utilisation en chantiers publics	12
3.7 Du déchet au granulats recyclé	13
3.8 PTV406 : identification des granulats recyclés sur base normative	14
4 LES DIFFÉRENTES SORTES DE GRANULATS RECYCLÉS	15
<hr/>	
4.1 Granulats de béton	15
4.2 Granulats mixtes et de maçonnerie	16
4.3 Granulats d'hydrocarboné	17
4.3.1 Agrégats d'enrobés bitumineux	18
4.3.2 Présence de goudron dans les hydrocarbonés	19
4.4 Produits de scalpage	20
4.5 Sables de criblage et de concassage	20
4.6 Autres granulats	21
4.6.1 Granulats naturels	21
4.6.2 Granulats artificiels	21
5 ESSAIS SUR LES GRANULATS	22
5.1 Essais d'identification ou de caractérisation	22
5.1.1 Essais d'identification basés sur les caractéristiques géométriques	22
5.1.1.1 Analyse granulométrique	22
5.1.1.2 Etude des fines	24
5.1.1.3 Morphologie des éléments grossiers	26
5.1.1.4 Hétérogénéité des recyclés	29
5.1.2 Essais d'identification basés sur les caractéristiques physiques	31
5.1.2.1 Répartition des différentes phases : masses volumiques	31
5.1.2.2 Caractérisation des vides : coefficient d'absorption d'eau	31
5.1.2.3 Caractérisation de la phase liquide	32
5.1.3 Essais d'identification basés sur les caractéristiques chimiques	33
5.1.3.1 Teneur en composants influençant la prise et le durcissement du ciment	33
5.1.3.2 Teneur en soufre, sulfates et sulfures	34
5.1.3.3 Teneur en chaux	34
5.1.4 Essais d'identification basés sur les caractéristiques de durabilité	34
5.1.4.1 Durabilité mécanique par attrition (usure) : Essai micro-Deval en présence d'eau	35
5.1.4.2 Durabilité mécanique par fragmentation : Essai Los Angeles	36

TABLE DES MATIÈRES

5.1.4.3 Durabilité mécanique par polissage : coefficient de polissage accéléré	37
5.1.4.4 Durabilité climatique liée au cycle gel-dégel : Essai de sensibilité ou de résistance au gel – dégel	38
5.2 Essais de comportement	40
5.2.1 Essais Proctor et courbes IPI et CBR	40
5.2.1.1 Essai Proctor	40
5.2.1.2 Essais IPI et CBR	42
5.2.2 Résistance à la compression	43
5.2.3 Résistance à la traction	44
6 APPLICATIONS ROUTIÈRES	45
<hr/>	
6.1 Introduction : CCT Qualiroutes	45
6.1.1 Terminologies du CCT Qualiroutes	46
6.1.1.2 Dimensionnements types suivant les réseaux routiers	47
6.1.2 Taux de recyclage autorisés dans le CCT Qualiroutes	47
6.1.3 Spécifications du CCT Qualiroutes	
7.1.3.1 Identification des granulats recyclés	48
6.2 Sous-fondations	50
6.2.1 Présentation de l'application	50
6.2.2 Matériaux	52
6.2.3 Spécifications techniques	52
6.2.4 Règles et exécution	53
6.2.5 Contrôle et essais	55
6.2.5.1 Plan d'assurance qualité	55
6.3 Fondations	56
6.3.1 Présentation de l'application	57
6.3.2 Matériaux	57
6.3.2.1 Fondation en empierrement	59
6.3.2.2 Fondation en béton maigre	59
6.3.2.3 Fondation en sable-ciment	60
6.3.2.4 Fondation en béton sec compacté	60
6.3.2.5 Fondation en produits de scalpage traités	60
6.3.2.6 Fondation en grave-bitume	60
6.3.3 Spécifications techniques	60
6.3.3.1 Fondation en empierrement	61
6.3.3.2 Fondation en béton maigre	64
6.3.3.3 Fondation en grave-bitume	66
6.3.4 Règles et exécution	68
6.3.4.1 Fondations en empierrement non lié	68
6.3.4.2 Fondations en empierrement lié et en produits de scalpage liés	69
6.3.4.3 Fondations en béton maigre et béton sec compacté	70
6.3.4.4 Retraitement in situ de voirie existante	71
6.3.4.5 Fondations en grave-bitume	71
6.3.5 Contrôle et essais	72
6.4 Revêtements	73
6.4.1 Présentation de l'application	73

TABLE DES MATIÈRES

6.4.2	Matériaux	73
6.4.2.1	Le revêtement hydrocarboné	73
6.4.2.2	Le revêtement en béton de ciment	73
6.4.2.3	Le revêtement en dalle et pavé	73
6.4.2.4	Le revêtement granulaire	73
6.4.3	Spécifications techniques	74
6.4.4	Règles et exécution	74
6.4.4.1	Revêtement bitumineux	74
6.4.4.2	Revêtement en béton	74
6.5	Remblais	75
6.5.1	Définition et rôle du remblai	75
6.5.2	Types de remblai	75
6.5.3	Spécifications techniques	75
6.6	Matériaux autocompactants réexcavables (MAR)	76
6.6.1	Présentation de l'application	76
6.6.2	Matériaux	77
6.6.3	Spécifications techniques	77
6.6.4	Règles et exécution	77
6.6.5	Contrôles et essais	77
6.7	Applications innovantes dans le secteur routier	77
6.7.1	Fondation drainante	78
6.7.2	Béton sec compacté utilisé en revêtement	79
6.7.3	Béton de revêtement	80
6.7.3.1	Projet RIDIAS	80
6.7.3.2	De circulaire weg	81
6.7.3.3	Chemin bi-bande à la Panne (De Brabandere)	81
6.7.4	Fondations liées au bitume moussant	81
6.7.5	Utilisation de réjuvénants dans les revêtements bitumineux	82
7	APPLICATIONS BÂTIMENTS	84
7.1	Introduction : CCT-Bâtiments	84
7.2	Pistes d'accès de chantier et empièvements de propreté	84
7.2.1	Présentation de l'application	84
7.2.2	Matériaux	85
7.2.3	Spécifications techniques	85
7.2.4	Règles d'exécution	86
7.2.5	Contrôle et essais	87
7.4	Béton Structurel	88
7.4.1	Présentation de l'application	88
7.4.2	Matériaux	88
7.4.3	Spécifications techniques	88
7.4.3.1	Béton prêt à l'emploi	88
7.4.3.2	Béton préfabriqué	90
7.4.4	Règles et exécution	90
7.4.5	Contrôle et essais	91
7.5	Matériaux autocompactants réexcavables (MAR)	92
7.5.1	Présentation de l'application	92

TABLE DES MATIÈRES

7.5.2 Matériaux	92
7.5.3 Spécifications techniques	92
7.5.4 Règles et exécution	92
7.5.5 Contrôles et essais	92
7.6 Applications innovantes dans le secteur du bâtiment	93
7.6.1 Remblais renforcés	93
7.6.2 Murs verts	94
7.6.3 Toitures vertes	94
7.6.4 Colonnes ballastées	96
7.6.5 Autres applications innovantes possibles	97
8 CONCLUSION ET PERSPECTIVES	97
9 ANNEXES	98
<hr/>	
9.1 Granulométrie	98
10 BIBLIOGRAPHIE	104

PRÉFACE

Aujourd'hui, on estime que 6 millions de tonnes de granulats recyclés sont produites annuellement en Wallonie, à partir de déchets issus de travaux de voirie ou de travaux de démolition, construction et rénovation d'ouvrages et de bâtiments. A eux seuls, ils représentent environ 40 % des déchets produits en Wallonie, c'est énorme ! Ces déchets inertes (béton, briques, tuiles, carrelages, tarmac...) présentent pourtant un potentiel très important de valorisation. Les granulats recyclés que l'on produit à partir de ces matériaux peuvent en effet être utilisés dans le cadre de toute une série de chantiers publics ou privés (routes et bâtiments, fondations, empièvements...). On peut dire que c'est l'exemple parfait de l'application de l'économie circulaire.

Cette alternative est rendue possible grâce aux caractéristiques et performances techniques de ces granulats recyclés, leur niveau de qualité physico-chimique (qui permet le strict respect des normes environnementales), ainsi que la possibilité de concasser les déchets de construction et de démolition au plus près des chantiers, ce qui réduit aussi les coûts de ceux-ci. Cette dynamique contribue aussi à une utilisation beaucoup plus rationnelle des ressources (du sous-sol dans ce cas-ci), puisque cela permet de ne pas « gaspiller » des ressources naturelles pour des usages comme la construction de soubassements.

De plus, tout en présentant des performances techniques et une qualité similaire, les granulats recyclés ne sont pas nécessairement plus chers que les granulats d'origine naturelle. Selon une étude toute récente du Centre de Recherches Routières, l'utilisation de matériaux recyclés/artificiels peut induire une baisse des coûts de fourniture des matériaux granulaires comprise entre 5 et 25% suivant les taux de recyclage et les distances de transport.

Vu le potentiel de cette alternative, le Plan-wallon des déchets-ressources (PWDR) intègre plusieurs objectifs de valorisation des granulats recyclés, de même que dans la récente stratégie de déploiement de l'économie circulaire en Wallonie Circular Wallonia : on parle d'intégrer un minimum de 30% de granulats recyclés dans la totalité des granulats utilisés annuellement en travaux publics en Wallonie (sous réserve de faisabilité technique).

Ma volonté est aussi de renforcer et soutenir ces objectifs via de nouvelles dispositions réglementaires. Il est en effet important que les pouvoirs publics montrent l'exemple en matière d'utilisation de matériaux recyclés. Notre objectif est dès lors de transposer, voire de transcender, avec force et ambition, les nouvelles obligations européennes en matière de gestion des déchets de construction et de démolition en Wallonie, qui souhaite figurer parmi les régions les plus ambitieuses en la matière.

Ce guide, qui s'appuie sur des expériences pratiques tout à fait reproductibles, vise à faire le point sur les nouvelles perspectives d'utilisation. Il constitue un élément mobilisateur et jusqu'à présent manquant. Je souhaite qu'il permette de contribuer à l'atteinte des objectifs ambitieux que nous poursuivons pour la Wallonie et de booster la dynamique qui s'est installée.

Je tiens enfin à remercier très chaleureusement et à féliciter l'ensemble des personnes et structures qui ont contribué à l'élaboration de ce guide : la Fédération des Recycleurs de Déchets de construction, le Centre scientifique et Technique de la Construction et le Centre de Recherches Routières.

En chemin ensemble vers des routes et des chantiers circulaires !

Bonne lecture,

Céline Tellier

Ministre de l'Environnement



COMPOSITION DU GROUPE DE TRAVAIL

Membres :

Alain Leuridan (CRR)

Audrey Van der Wielen (CRR)

Eléonore de Roissart (CSTC)

Jeroen Vrijders (CSTC)

Yves Hanoteau (CRR)

Benoit Janssens (JB Conseils Geo-technics)

Julie Piérard (CSTC)

Lara Leclercq (FEREDECO)

Maximilien Van Breusegem (CSTC)

Nicolas Denies (CSTC)

Thibault Mariage (FEREDECO)

AVANT-PROPOS

Ce guide technique a été élaboré dans le cadre de la mission subsidiée de l'asbl Feredeco ayant trait à la mise en œuvre d'un plan de communication relatif aux granulats recyclés. Il reprend l'ensemble des caractéristiques techniques de ces granulats ainsi que des exemples pratiques illustrés de leur application en chantiers publics et privés. Cette publication s'appuie sur l'expérience pratique, sur des essais in situ et en laboratoire ainsi que sur une étude approfondie de la littérature.

La rédaction de ce guide résulte d'une collaboration étroite avec le Centre Scientifique et Technique de la Construction (CSTC) et le Centre de Recherches Routières (CRR). Ces centres de recherche indépendants ont veillé à lui assurer une base scientifique et solide.

Ce guide est une source d'information essentielle sur les diverses applications possibles des granulats recyclés. Il s'adresse tant aux acteurs publics qu'aux entrepreneurs et prescripteurs. Avoir une meilleure connaissance de ces matériaux permettra au public concerné de les mettre en œuvre de manière efficace tout en réduisant l'impact environnemental des matériaux utilisés dans les travaux de construction.

Chaque année, plusieurs millions de tonnes de déchets sont récupérés et recyclés en granulats afin d'être à nouveau utilisables dans les travaux d'entretien et rénovation de bâtiments et de routes.

En participant à « l'urban mining », c'est-à-dire, en collectant les déchets de déconstruction provenant de la ville puis en les revalorisant, les acteurs du secteur de la construction participent à la dynamique de l'économie circulaire. Le présent guide technique leur est dédié.

Cette action est organisée dans le cadre des missions d'intérêt public confiées par la Wallonie à FEREDECO asbl.

3. DÉFINITIONS

3.1 Modes de démolition sélective / déconstruction

Les modes de production de déchets ont évolué en fonction des législations récentes (*voir chapitre 3.4 Evolution réglementaire*) traitants des filières de gestion de ceux-ci. D'une simple démolition, les pratiques ont évolué vers des notions de démolition sélective puis de déconstruction.

La démolition sélective est celle qui offre la meilleure garantie de déchets inertes sans contamination et apte au recyclage. Elle permet la séparation sur chantier des fractions non-inertes (bois, plastique, isolant, métaux, etc.) et des fractions dangereuses (*asbeste-ciment, goudron, etc.*). La déconstruction permet de préserver certains éléments à des fins de réemploi.

3.2 Déchets inertes

La fraction minérale des déchets de construction et de déconstruction est considérée comme déchet inerte. On l'appelle aussi « déchet de classe 3 » dans la législation wallonne. Il semble important de définir cette notion de « déchets inertes ». Au sens du Décret du 27 juin 1996¹, les déchets inertes sont les déchets qui, de par leurs caractéristiques physico-chimiques, ne peuvent à aucun moment altérer les fonctions du sol, de l'air ou des eaux ni porter atteinte à l'environnement ou à la santé de l'homme. Ces déchets proviennent principalement de la déconstruction de voiries et de bâtiments. La composition de ces déchets est évolutive en fonction de l'époque de la construction des ouvrages. En effet, il y a toujours un laps de temps de plusieurs dizaines d'années entre la construction et la déconstruction/rénovation d'un bâtiment ou d'une voirie. Un ouvrage plus récent sera souvent d'une conception plus « composite », ce qui ne sera pas sans conséquences sur les moyens à mettre en oeuvre pour en recycler les éléments.

Les déchets inertes valorisables sont communément séparés en trois grandes sortes :



1 | **Les déchets de béton** proviennent de la démolition de bâtiments ou d'infrastructures de génie civil (bétons ou bétons armés). Le béton est un mélange inerte de sable, gravillon, d'eau et de ciment.



2 | **Les déchets mixtes** proviennent de la déconstruction/rénovation de bâtiments publics ou privés (briques/blocs/tuiles ...). Ces déchets représentent en tonnage la fraction la plus importante produite en Wallonie. Ils sont typiquement constitués d'un mélange de différents déchets de construction (briques, blocs en béton, tuiles, faïences, céramiques, etc.). Ces déchets sont caractéristiques des collectes sélectives réalisées auprès des particuliers/grand public.



3 | **Les déchets hydrocarbonés** proviennent essentiellement de la démolition sélective des voiries et de la déconstruction de parkings et autres surfaces asphaltées. En fonction de la technique utilisée on les trouvera sous forme de plaques ou de fraisât. Ce fraisât est obtenu par raclage mécanique des revêtements.

¹ 27 juin 1996 - Décret relatif aux déchets (M.B. 02.08.1996) / <http://environnement.wallonie.be/legis/dechets/degen019.htm>

3.3 Recyclage et centre de recyclage

A l'heure actuelle, en Wallonie, le recyclage des déchets inertes issus de la construction et de la déconstruction est une obligation². Il existe deux modes principaux de recyclage suivant l'AGW du 28 février 2019³ : le recyclage en centre fixe et le recyclage sur chantier au moyen d'installations mobiles.

3.3.1 Centres de recyclage fixes

La majorité des déchets inertes est prise en charge par des centres de recyclage fixes, c'est-à-dire des installations autorisées au sens du Décret Permis d'environnement. Ces installations se chargent de l'acceptation, du tri, du stockage et du concassage/criblage des déchets et proposent après valorisation une large gamme de granulats recyclés en conformité avec les normes européennes en vigueur. Un centre fixe est défini par son permis qui en localise le périmètre et pas par la nécessaire présence d'une installation fixe. Ainsi, de nombreux centres fixes gèrent leurs productions de granulats recyclés en faisant appel à des engins mobiles.

Les images ci-dessous illustrent des exemples d'installations fixes de traitement.



L'implantation et l'exploitation de tels centres de recyclage sont soumises à autorisation via une demande de permis unique suivant les rubriques :

Numéro de rubrique	Installation ou activité classée	Classe de permis
90.22.01.01.A	Centre de prétraitement et de récupération de déchets : Installation de prétraitement de déchets inertes tels que définis à l'article 2, 6°, du décret du 27 juin 1996 relatif aux déchets d'une capacité de traitement inférieure à 200 000 T/an, dans toutes les zones sauf en zone d'habitat et en zone d'habitat à caractère rural	2
90.22.01.01.B	Centre de prétraitement et de récupération de déchets : Installation de prétraitement de déchets inertes tels que définis à l'article 2, 6°, du décret du 27 juin 1996 relatif aux déchets d'une capacité de traitement inférieure à 100 000 T/an, en zone d'habitat et en zone d'habitat à caractère rural	2

Installation de prétraitement :

Numéro de rubrique	Installation ou activité classée	Classe de permis
90.22.01.02.A	Centre de prétraitement et de récupération de déchets : Installation de prétraitement de déchets inertes tels que définis à l'article 2, 6°, du décret du 27 juin 1996 relatif aux déchets d'une capacité de traitement égale ou	1

² 18 mars 2004 - Arrêté du Gouvernement wallon interdisant la mise en centre d'enfouissement technique de certains déchets Arrêté du Gouvernement wallon interdisant la mise en centre d'enfouissement technique de certains déchets (wallonie.be)

³ 28 février 2019 - Arrêté du Gouvernement wallon portant exécution de la procédure de sortie du statut de déchet prévue à l'article 4ter du décret du 27 juin 1996 relatif aux déchets et modifiant l'arrêté du Gouvernement wallon du 14 juin 2001 favorisant la valorisation de certains déchets (M.B. 05.04.2019) Legislation/procedure du statut dechets (wallonie.be)

	supérieure à 200 000 T/an, dans toutes les zones sauf en zone d'habitat et en zone d'habitat à caractère rural	
90.22.01.02.B	Centre de prétraitement et de récupération de déchets : Installation de prétraitement de déchets inertes tels que définis à l'article 2, 6°, du décret du 27 juin 1996 relatif aux déchets d'une capacité de traitement égale ou supérieure à 100 000 T/an, en zone d'habitat et en zone d'habitat à caractère rural	1

En travaillant dans le respect de leurs conditions d'exploiter, ces centres maîtrisent l'impact potentiel de leurs activités sur leur voisinage.

3.3.2 Centres de recyclage mobiles

Il est également possible de réaliser des activités de recyclage de déchets inertes sur chantier. Cette formule permet de réduire les opérations de transport de déchets et est également soumise à autorisation.

Numéro de rubrique	Installation ou activité classée	Classe de permis
45.91.02	Installations nécessaires à un chantier de construction ou de démolition : cribles et concasseurs sur chantier	3
45.92.01	Installations nécessaires à un chantier de construction ou de démolition : stockage temporaire de déchets. Dans tous les cas, les déchets contenant de l'amiante doivent être séparés des déchets précités	3

Cette circonstance de production des granulats recyclés est prévue à l'article 25 de l'AGW du 28 février 2019. Dans ce cas précis, les granulats recyclés ne sortent pas du statut de déchet.

Ce mode de recyclage est exclusivement réservé au traitement des déchets inertes issus d'un chantier. Cela implique qu'il est impossible d'orienter vers ce chantier des déchets issus d'autres chantiers. Complémentairement, la valorisation des granulats recyclés produits n'est possible que sur ce même chantier. Dans ce cas, les granulats sont tenus de respecter l'annexe 1 de l'AGW du 14/06/2001 (respect du tableau 1 de la PTV 406 et analyse environnementale – test de lixiviation - suivant l'annexe 3 de ce même AGW).

3.4 Législation

En Wallonie, les déchets inertes de construction et de démolition doivent obligatoirement être recyclés. Avant cela, les déchets inertes étaient enfouis en centre d'enfouissement technique de classe 3.

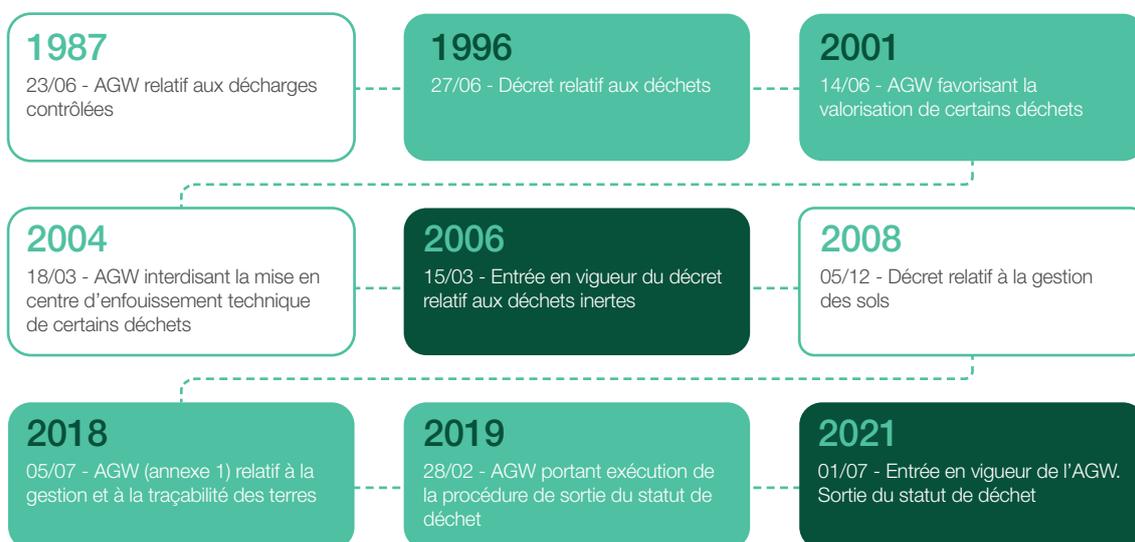


Illustration de l'évolution de la législation en matière de gestion des déchets inertes

⁴ 14 juin 2001 - Arrêté du Gouvernement wallon favorisant la valorisation de certains déchets (M.B. 10.07.2001 - err. 18.07.2001) Législation Déchets/Catégories/Valorisation de certains déchets (wallonie.be)

Depuis 1987, de nombreux décrets et arrêtés gouvernementaux wallons ont permis d'encadrer la gestion des déchets de construction.

D'un contrôle plus accru des décharges de déchets inertes à la mise sur le marché de granulats recyclés en tant que produit, la prise en compte de cette problématique a parcouru un chemin important. Ce qui permet aujourd'hui aux granulats recyclés de répondre aux performances requises dans les différents cahiers des charges régionaux et de pouvoir être mis en œuvre en toute confiance dans les chantiers publics.

3.5 Conformité technique et environnementale

La production des granulats recyclés est encadrée par un système de management de la qualité (FPC) qui atteste de leur conformité aux normes européennes relatives aux produits. Les granulats font en outre l'objet de prélèvements réguliers dans le cadre de la législation relative à la sortie du statut de déchet (SSD) obligatoire depuis le 1^{er} juillet 2021 en Wallonie.

3.5.1 Système de management de la qualité

Le marquage **CE** indique que le produit répond aux exigences européennes en matière de sécurité, de santé et de protection de l'environnement. Tous les granulats naturels ou recyclés mis sur le marché dans des applications couvertes par une norme harmonisée doivent porter ce marquage.

Dans le cadre de la sortie du statut de déchets des granulats recyclés, ces derniers doivent être porteurs du marquage CE2+. Ce sont essentiellement les quatre normes suivantes qui sont concernées dans les chantiers publics de voiries (CCT Qualiroutes) :

- **NBN EN 13242 + A1** : 2008 - Granulats pour matériaux traités aux liants hydrauliques et matériaux non traités utilisés pour les travaux de génie civil et pour la construction des chaussées.
- **NBN EN 12620 + A1** : 2008 - Granulats pour béton.
- **NBN B 15.001** : 2018 Béton - Spécification, performances, production et conformité - Complément national à la NBN EN 206 :2013+A1:2016 [B5].
- **NBN EN 206-1** : 2001 Béton - Partie 1: Spécification, performances, production et conformité [B2].

Il existe plusieurs niveaux de conformité présentant un degré de sécurité décroissant : de 1+ (certification externe) à 4 (autocontrôle), le choix de la Wallonie s'est porté sur le niveau d'attestation CE2+ :

	1+	1	2+	2	3	4
Essais initiaux	OC	OC	F	F	L	F
Essais périodiques	OC	F	F	-	-	-
Contrôle de produit en usine (FPC)	F	F	F	F	F	F
Inspection initiale	OC	OC	OI	OI	-	-
Surveillance permanente	OC	OC	OI	-	-	-
	Certificat de conformité		Déclaration de conformité			

OC : Organisme de certification - **OI** : Organisme d'inspection - **F** : Fabricant – **L** : Laboratoire

La conformité du système de management de la qualité mis en place par les producteurs dans ce cadre est audité annuellement par un organisme accrédité indépendant. auditée annuellement par un organisme accrédité indépendant.

Ce niveau 2+ implique que le fabricant réalise une série d'essais avant toute production ou lors de changement important dans son processus de fabricant (essais initiaux) ainsi que des essais de contrôle en cours de production (essais périodiques). De même, il assure le contrôle de la production en usine (FPC) au moyen d'un système de management de la qualité. Ce système est quant à lui audité au début de la production (Inspection initiale) et annuellement en cours de production (surveillance permanente) par un organisme accrédité indépendant.

Il faut souligner que cet organisme accrédité indépendant ne prélève pas d'échantillons et ne réalise pas des essais complémentaires, comme c'est le cas pour les niveaux 1 et 1+. De ce fait, le marquage CE2+ est considéré comme une déclaration de conformité.

3.5.2 Système de management de l'environnement

En plus des obligations reprises ci-dessus en matière de conformité normative, l'AGW du 28/02/2019⁷ impose non seulement des procédures strictes de contrôle de la conformité des déchets entrants dans un centre de recyclage mais également un contrôle environnemental des différentes sortes de granulats recyclés produits (*voir procédure de détection des hydrocarbonés contenant du goudron au chapitre 4.3.2*). Un test de lixiviation réalisé par un laboratoire agréé est requis par sorte de granulat dès qu'un lot de matière est produit (5000 tonnes de déchets traités ou 4 semaines de production). Les paramètres devant faire l'objet de cette analyse sont repris à l'annexe 2 de l'AGW. Les prélèvements réalisés dans ce cadre doivent être effectués par un préleveur enregistré suivant la procédure. D'autres tests spécifiques peuvent être réalisés dans certains cas particuliers et concernent principalement la présence de goudron dans certains déchets hydrocarbonés et la présence d'amiante dans certains déchets de la construction.

3.6 Utilisation en chantiers publics

Pour utiliser des produits recyclés dans des chantiers publics, l'entrepreneur doit pouvoir présenter à son maître d'ouvrage la preuve de la conformité des granulats à un référentiel européen. Trois documents doivent pouvoir accompagner chaque livraison de granulats :

Le premier document à fournir est le **certificat CE2+** pour l'unité de production des granulats. Ce certificat de contrôle de production en usine avec audits de surveillance est établi par un organisme notifié.

La **fiche technique** du granulat est le deuxième document nécessaire suivant le CCT Qualiroutes pour valoriser des produits recyclés en chantiers publics. C'est un document daté, établi par le producteur par lequel celui-ci s'engage au minimum sur la nature et les caractéristiques spécifiées au chapitre C du Qualiroutes pour l'utilisation envisagée. Il présente la synthèse de l'ensemble des résultats d'essais les plus récents pour toutes ces caractéristiques.

Enfin, le producteur doit fournir la **déclaration de performance du granulat (DoP)**. La DoP doit mentionner l'ensemble des caractéristiques de la norme harmonisée produit EN 13242 pour lesquelles des exigences sont définies dans les documents du marché. Une attestation de conformité aux critères de sortie du statut de déchet au sens de l'Annexe 2 de l'AGW SSD doit être également fourni.



Illustrations de mise en œuvre de granulats recyclés en chantiers publics

⁷ 28 février 2019 - Arrêté du Gouvernement wallon portant exécution de la procédure de sortie du statut de déchet prévue à l'article 4ter du décret du 27 juin 1996 relatif aux déchets et modifiant l'arrêté du Gouvernement wallon du 14 juin 2001 favorisant la valorisation de certains déchets (M.B. 05.04.2019) [Législation/procedure sortie du statut dechets \(wallonie.be\)](http://legislation.procedure sortie du statut dechets (wallonie.be))

3.7 Du déchet au granulat recyclé



Parcours du déchet de construction au granulat recyclé

Le recyclage des déchets inertes est une obligation en Wallonie. Les déchets sont triés directement sur chantier pour être ensuite transportés vers les centres de recyclage autorisés.

Les déchets inertes, triés et stockés selon leur sorte, font généralement l'objet d'un traitement séparé.

Le processus de traitement et tri des indésirables inclut différentes étapes de séparation des indésirables, de pré-scalpage, concassage et criblage.

- Le pré-scalpage est une opération préalable au concassage qui permet de retirer les fines du déchet brut avec un crible. Il est réalisé ou non en fonction de la présence d'argile ou d'éléments terreux dans le déchet brut.
- Le concassage est l'opération qui permet la réduction granulométrique des matériaux, autrement dit la diminution de la taille des éléments qui constituent les matériaux en cours d'élaboration.
- Le criblage est l'opération qui permet la séparation granulométrique des éléments, le crible effectuant donc un tri sur base de la taille des granulats.

Les étapes des déchets indésirables (bois, papier, déchets verts, métaux, etc.) sont retirés via différentes méthodes :



Tables de tri manuel



Souffleries/aspersions



Electro-aimants (métaux ferreux)



Flottation/lavage

En fonction de leurs caractéristiques techniques, les produits recyclés peuvent ensuite être stabilisés au moyen de liants hydrauliques (chaux ou ciment).

La production des granulats recyclés est encadrée par un système de management de la qualité (FPC) qui atteste de leur conformité aux normes européennes produits. Les granulats font l'objet de prélèvements réguliers dans le cadre de leur certification CE2+ (contrôle qualité) et de la législation sortie de statut de déchet (contrôle environnement).

Une fois produits, les granulats recyclés sont stockés par sortes (mixte, béton, hydrocarboné) et par granulométries. Ils sont commercialisés pour des applications effectuant en fonction de leurs caractéristiques techniques, déclarées dans la fiche technique et la déclaration de performance (B4).

3.8 PTV406 : Identification des granulats recyclés sur base normative



PTV 406 (9.0) - Prescriptions techniques pour granulats recyclés | COPRO

Afin de simplifier la classification des granulats recyclés, tels que définis dans les normes harmonisées européennes granulats. La PTV 406 permet de classer les différentes sortes de granulats recyclés en fonction de leur composition. La dénomination de ces sortes de granulats est basée sur les constituants présents dans la fraction granulaire grossière (> 4 mm), suivant la norme NBN EN 933-11 (voir tableau 1 [B7]). Les méthodes d'essais qui permettent cette classification sont décrites dans les annexes de la PTV 406 [C9].

Définition des granulats recyclés : PTV 406 : Test d'identification suivant NBN EN 933-11

Rc	Béton, produits en béton, mortier, éléments en béton
Ru	Granulats non liés, pierre naturelle, granulats traités aux liants hydrauliques
Rb	Éléments en argile cuite (ex. : briques et tuiles), éléments en silicate de calcium, béton cellulaire non flottant
Ra	Matériaux bitumineux / mélanges à base d'hydrocarbures
Rg	Verre
X	Contaminants non flottants : Autres : matériaux cohérents (ex. : argile, sol) Divers : métaux (ferreux et non ferreux), bois, matière plastique et caoutchouc non flottant, plâtre
FL	Contaminants flottants (en volume)



RC



RU



RG



X



RB



RA

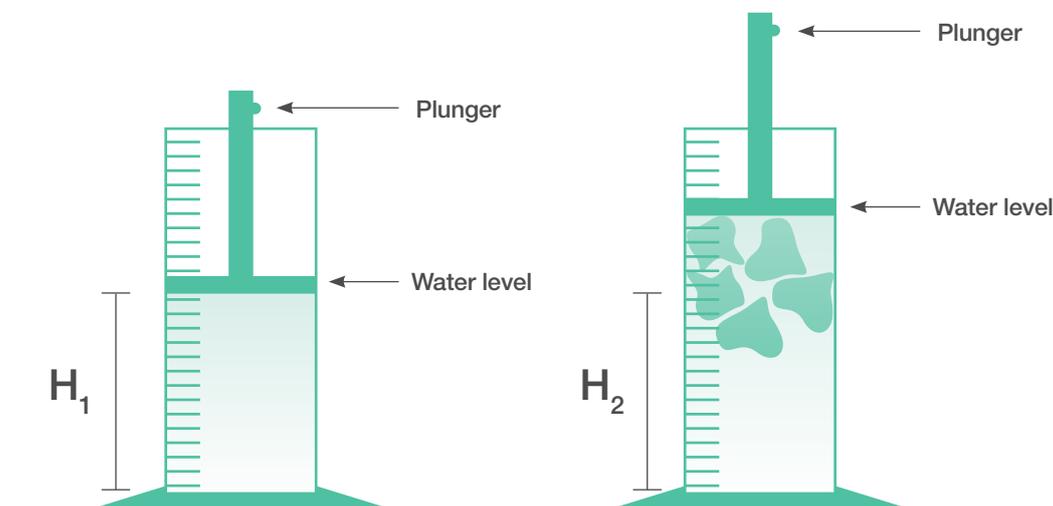


FL



L'analyse permet également de déterminer les contaminants flottants (FL) et non-flottants (X) dans les granulats recyclés.

Le résultat de cette détermination donne une indication de la teneur en masse de volume de contaminants flottants et du pourcentage en masse de contaminants non-flottants. Dans cette procédure le verre (Rg) constitue une fraction spécifique et exprimé en masse %.



Analyse permettant de déterminer les contaminants flottants ou non-flottants

Le volume est exprimé en cm³ à une décimale près. Au cas où les gradations sur le cylindre gradué sont indiquées de façon suffisamment précise en unités de volume, les volumes peuvent être lus directement sur le cylindre gradué.

Selon les applications ou les sortes de granulats recyclés, des valeurs seuils/gammes spécifiques sont définies.

4. LES DIFFÉRENTES SORTES DE GRANULATS RECYCLÉS

4.1 Granulats de béton

Un granulats recyclés de béton est classé en catégorie en fonction de sa composition (pourcentage des différents constituants). Les trois catégories reprises dans le tableau ci-après sont généralement utilisées pour les applications suivant la norme NBN EN 13242.



Granulats de béton (extrait de la PTV 406)

Composition NBN EN 933-11	Gravillon de béton		Gravillon de béton de haute qualité		Gravillon de béton et asphaltique	
	Teneur	Catégorie	Teneur	Catégorie	Teneur	Catégorie
Rc	≥ 70	Rc ₇₀	≥ 90	Rc ₉₀	Non requis	Rc _{NR}
Rcug	≥ 90	Rcug ₉₀	≥ 95	Rcu ₉₅	≥ 70	Rcug ₇₀
Rb	≤ 10	Rb ₁₀₋	Non requis	Rb _{NR}	≤ 10	Rb ₁₀₋
Ra	≤ 5	Ra ₅₋	≤ 1	Ra ₁₋	≤ 30	Ra ₃₀₋
Rg	≤ 2,0	Rg ₂₋	≤ 0,5	XRg _{0,5-}	≤ 2,0	Rg ₂₋
X	≤ 1,0	X ₁₋			≤ 1,0	X ₁₋
FL	≤ 5,0	FL ₅₋	≤ 2,0	FL ₂₋	≤ 5,0	FL ₅₋
	≤ 2,0*	FL _{2-*}			≤ 2,0*	FL _{2-*}

Les granulats recyclés ne peuvent pas contenir des éléments, en teneurs qui sont interdits par la législation environnementale en vigueur.

(*) : Le producteur peut également choisir d'utiliser ces exigences pour déterminer la classification des granulats recyclés

En fonction de son origine, un déchet de béton est susceptible d'être recyclé de différentes manières. Les bétons de structure (poutre en béton armé ; etc.), s'ils sont déconstruits et collectés de manière sélective, peuvent être transformés en granulats de haute qualité et utilisés à nouveau pour la réalisation de nouveaux ouvrages en béton et ce jusqu'à 30% (Norme NBN 500 ou 501 béton).

4.2 Granulats mixtes et de maçonnerie

Un granulats recyclé mixte est défini en fonction de sa composition (pourcentage des différents constituants). Les quatre catégories reprises dans le tableau ci-dessous sont généralement utilisées. A l'instar des granulats recyclés de béton, le CCT Qualiroutes exige la mise en œuvre de granulats mixtes de haute qualité.



Granulats de béton (extrait de la PTV 406)

Composition NBN EN 933-11	Gravillon mixte de haute qualité		Gravillon mixte		Gravillon mixte & asphaltique		Gravillon de maçonnerie	
	Teneur	Catégorie	Teneur	Catégorie	Teneur	Catégorie	Teneur	Catégorie
Rc	≥ 50	Rc ₅₀	Non requis	Rc _{NR}	Non requis	Rc _{NR}	Non requis	RcNR
Rcug	≥ 70	Rcug ₇₀	≥ 50	Rcug ₅₀	≥ 30	Rcug ₃₀	≤ 40	Rcug ₄₀₋
							≤ 30*	Rcug _{30-*}
Rb	≤ 30	Rb ₃₀₋	≥ 50	Rb ₅₀₋	≤ 50	Rb ₅₀₋	≥ 60	Rb ₆₀
							≥ 50*	Rb _{50*}
Ra	≤ 5	Ra ₅₋	≥ 5	Ra ₅₋	≤ 30	Ra ₃₀₋	≤ 5	Ra ₅₋
Rg	≤ 2,0	Rg ₂₋	≥ 2,0	Rg ₂₋	≤ 2,0	Rg ₂₋	≤ 2,0	Rg ₂₋
X	≤ 1,0	X ₁₋	≥ 1,0	X ₁₋	≤ 1,0	X ₁₋	≤ 1,0	X ₁₋
FL	≤ 2,0	FL ₂₋	≥ 5,0	FL ₅₋	≤ 5,0	FL ₅₋	≤ 5,0	FL ₅₋
					≤ 2,0*	FL _{2-*}	≤ 2,0*	FL _{2-*}

Les granulats recyclés ne peuvent pas contenir des éléments, en teneurs qui sont interdits par la législation environnementale en vigueur.

(*) : Le producteur peut également choisir d'utiliser ces exigences pour déterminer la classification des granulats recyclés

L'utilisation des granulats mixtes en technique de construction dépend avant tout du pourcentage de briques (Rb) qu'ils contiennent. Plus faible sera la teneur en élément en brique, au plus il pourra être valorisé dans les applications à haute valeur ajoutée. Ainsi il est possible de distinguer trois grandes catégories de granulats mixtes : mixte de haute qualité avec une teneur en brique inférieure à 30%, granulats mixtes standards avec une teneur en brique inférieure à 50%, le granulats de maçonnerie avec une teneur supérieure à 50%. Cette dernière catégorie de granulats ne permet pas des applications « remblai » en chantiers publics, dès lors les producteurs tendent à lui privilégier le granulats mixte. A noter qu'il existe aussi une variante possible, le mixte asphalte avec une teneur en asphalte ≤ 50 et ≥ 30.

4.3 Granulats d'hydrocarboné



Un granulats recyclé d'hydrocarboné est défini en fonction de sa composition (pourcentage des différents constituants). Les trois catégories reprises dans le tableau ci-dessous sont généralement utilisées mais le Qualiroutes ne préconise la mise en œuvre que de granulats recyclés d'enrobés hydrocarbonés (les mélanges de sortes de granulats ne sont pas explicitement détaillés).

Granulats asphaltiques (extrait de la PTV 406)

Composition NBN EN 933-11	Gravillon asphaltique		Gravillon de béton et asphaltique		Gravillon mixte et asphaltique	
	Teneur	Catégorie	Teneur	Catégorie	Teneur	Catégorie
Rc	Non requis	Rc _{NR}	Non requis	Rc _{NR}	Non requis	Rc _{NR}
Rcug	≤ 30	Rcug ₃₀₋	≥ 70	Rcug ₇₀	≥ 30	Rcug ₃₀
Rb	≤ 10	Rb ₁₀₋	≤ 10	Rb ₁₀₋	≤ 50	Rb ₅₀₋
Ra	≥ 70	Ra ₇₀	≤ 30	Ra ₃₀₋	≤ 30	Ra ₃₀₋
Rg	≤ 2,0	Rg ₂₋	≤ 2,0	Rg ₂₋	≤ 2,0	Rg ₂₋
X	≤ 1,0	X ₁₋	≤ 1,0	X ₁₋	≤ 1,0	X ₁₋
FL	≤ 5,0	FL ₅₋	≤ 5,0	FL ₅₋	≤ 5,0	FL ₅₋
	≤ 2,0*	FL _{2-*}	≤ 2,0*	FL _{2-*}	≤ 2,0*	FL _{2-*}

Les granulats recyclés ne peuvent pas contenir des éléments, en teneurs qui sont interdits par la législation environnementale en vigueur.

(*) : Le producteur peut également choisir d'utiliser ces exigences pour déterminer la classification des granulats recyclés

Le granulat d'hydrocarboné est constitué de minimum 70% d'élément en asphalte (Ra), il existe 2 sous catégories qu'on différencie par la teneur en béton ou en brique (mixte asphaltique). La plupart des opérations de recyclage des hydrocarbonés sont réalisées sur chantier par des engins mobiles par raclage / fraisage des couches de revêtement. Ces fraisats sont orientés ensuite vers la production de nouveaux hydrocarbonés jusqu'à 50% maximum de la composition de ceux-ci. Le solde ainsi que les hydrocarbonés déconstruits sous forme de plaques sont orientés vers les centres de recyclage fixes et retraité pour être commercialisé sous forme de granulats. Ceci en mélange ou non avec d'autres sortes.

4.3.1 Agrégats d'enrobés bitumineux

Les agrégats d'enrobés bitumineux, ou AEB (Qualiroutes : C.5.3.2), sont des granulats recyclés hydrocarbonés dont la qualité est suffisamment élevée pour pouvoir être utilisés en tant que constituants de nouveaux mélanges bitumineux. Ils doivent notamment présenter une catégorie F5, c'est-à-dire contenir moins de 5 % de matériaux étrangers (briques, bétons, métaux) et moins de 0,1 % de matériaux de la catégorie X (voir chapitre 3.8). Chaque lot doit en outre être soigneusement caractérisé, tant au niveau de la granulométrie qu'en ce qui concerne les propriétés du liant.

4.3.2 Présence de goudron dans les hydrocarbonés

Dans le passé, le goudron a été couramment utilisé en mélange avec le bitume (à différentes teneurs) en raison de ses bonnes performances techniques (*adhésivité avec les granulats, résistance à l'orniérage, bonne protection contre les infiltrations d'eau, résistance aux bactéries contenues dans le sol*) comme matériau de revêtement pour des routes ordinaires, parkings, aires de stockage, pistes d'aéroport et nombreuses voies agricoles.

Cependant, le goudron comporte des produits toxiques et cancérigènes (*HAP*) en teneur relativement élevée (*valeur moyenne de 250 à 500 gr/kg pour le goudron brut*) qui rendent son application interdite de nos jours dans toute application. Or, certains recyclés d'enrobés hydrocarbonés contenant du goudron, voire des terres sont encore rencontrés en voirie.

La présence potentielle de goudron dans les hydrocarbonés est susceptible d'exercer une influence néfaste sur leur recyclabilité.

La circulaire du 13/07/2018 définit un traceur benzo(a)pyrène dont l'analyse permet de catégoriser le déchet et l'orienter vers la filière adéquate.

Évaluation de la contenance en goudron du déchet

Benzo(a)pyrène < 8.5 mg/kg MS	Le déchet est considéré comme inerte, il est valorisable à chaud
8.5 < Benzo(a)pyrène < 50 mg/kg MS	Le déchet est non dangereux et peut être valorisé à froid
Benzo(a)pyrène > 50 mg/kg MS	Le déchet n'est pas valorisable et doit être considéré comme un déchet dangereux

⁴ Circulaire de mise en application du rapport final n° 2018-00762 de l'ISSeP relatif à la détermination d'un traceur permettant de mesurer la teneur en goudron d'un déchet en vue d'établir sa possible valorisation comme déchet autre que dangereux ou sa dangerosité.



Déchets d'hydrocarbonés



Test de détection de goudron dans les déchets d'hydrocarbonés

Le déchet inerte (< 8,5 mg/kg MS) rentre alors dans une des trois catégories définies par l'AGW du 14 juin 2001 favorisant la valorisation de certains déchets : 170302, 190305 et 190307.

La détection de la présence de goudron dans les hydrocarbonés se réalise en amont du chantier de déconstruction via l'application de la référence A8. Si une détection en amont n'est pas réalisable (*cas des chantiers privés*), les centres de recyclage autorisés sont tenus d'appliquer, dans le cadre de leur système de management de la qualité une procédure de détection du goudron à l'entrée de chaque site. Cette procédure implique la réalisation du test PAK-MARKER. Le spray est appliqué sur le déchet. En cas de présence de goudron, une couleur jaune apparaît. Ce déchet devra être détourné de la filière de valorisation. En cas de test positif, une analyse du benzo(a)pyrène est effectuée dans un laboratoire agréé.

4.4 Produits de scalpage



Mise en œuvre de produits de scalpage

Le terme produit de scalpage (CCT Qualiroutes) est souvent désigné usuellement par le terme pré-scalpage. Il désigne les graves issues du premier criblage des déchets inertes. Ce terme peut comprendre plusieurs sortes de granulats mais désigne prioritairement la sorte mixte. Leur utilisation en chantiers publics est préconisée dans certaines fondations après traitement (voir CCT Qualiroutes F.4.9.1 Fondation en produits de scalpage traités). Le produit est traité avec un pourcentage de chaux vive et/ou de ciment et/ ou LHR (liant hydraulique routier [S3]) calculé par rapport au poids du matériau sec et déterminé par une étude en laboratoire [S4].

En chantiers privés, les graves de pré-scalpage sont d'utilisation commune en sous-fondations et en remblais techniques. Leur traitement n'est pas obligatoire et dépend de l'application. Dans les cas où la chaux (CaO) est utilisée, c'est généralement un pourcentage de liant de 1,5 % à maximum 3 % qui est incorporé.



Qualiroutes F.4.9.1. CCT QUALIROUTES - Chapitre F (wallonie.be)

4.5 Sable de concassage et de criblage

Un sable recyclé est défini avant tout par sa granulométrie. En fonction de la norme européenne de référence le D varie : NBN EN 13242 : 6,3mm ; NBN EN 12620 : 4mm ; NBN EN 13043 : 2mm. Le CCT Qualiroutes les définit comme suit : sables provenant du recyclage de matériaux inorganiques antérieurement utilisés dans la construction. Une distinction est également réalisée en fonction du processus de recyclage concerné entre les sables de criblage (C.3.3.2) et les sables de concassage (C.3.3.3). Ils doivent tous les deux répondre aux prescriptions suivantes :

Caractéristique	Prescription
Stabilité volumique (%)	≤ 2
Matières organiques	Négatif

Ces dernières années, avec l'évolution technique des installations de lavage dans les process de recyclage (projet SERAMCO¹), on voit l'arrivée sur le marché de sables recyclés lavés d'excellente qualité.



4.6 Autres granulats

4.6.1 granulats naturels

Les granulats naturels peuvent être trouvés directement dans la nature, comme des produits de désagrégation physique de pierres naturelles (sable et gravier naturels). Ils peuvent par ailleurs aussi être obtenus par concassage de la roche. Dans ce cas, on parle de gravillons concassés et de sable de concassage. Généralement, le processus d'extraction de la pierraille naturelle contient les étapes de production suivantes :

- L'enlèvement des terres de couverture ;
- Le forage mécanique pour le placement des explosifs ;
- Le dégagement de la roche au moyen d'explosifs ;
- Le broyage de la roche au moyen de concasseurs ;
- Le tamisage aux dimensions souhaitées.

En Belgique, on utilise essentiellement du gravier et du sable naturels dans les produits en béton, ainsi que du calcaire, du grès ou du porphyre concassé [G1].

4.6.2 Granulats artificiels

Les granulats artificiels sont des granulats d'origine minérale issus d'un processus industriel ayant subi une modification thermique ou autre. En Belgique, les scories (résidus) métallurgiques et l'argile cuite expansée sont les plus connues.

Les scories métallurgiques sont des sous-produits de l'industrie sidérurgique. Il s'agit essentiellement de laitier de haut fourneau. Il existe également des scories provenant de métaux non ferreux comme le plomb et le zinc. En général, les scories fournissent des granulats assez durs.

La masse volumique des particules de ces matériaux est assez élevée (généralement supérieure à 3.000 kg/m³) et il faut en tenir compte dans la composition du béton (voir chapitre 'Béton lourd'). Certains de ces matériaux contiennent encore des substances chimiques qui peuvent être libérées et éventuellement provoquer la corrosion des armatures dans le béton. En outre, si elles ne sont pas suffisamment prétraitées, certaines de ces scories peuvent donner lieu à un gonflement dans le béton qui peut provoquer de la fissuration. Il faut par ailleurs s'assurer que les substances nocives présentes dans les scories, comme des métaux lourds, ne soient pas libérées lors de la démolition de la construction en béton [G1].

¹ SeRaMCo: Secondary Raw Materials for Concrete Precast Products | Interreg NWE (nweurope.eu)

5. ESSAIS SUR LES GRANULATS

Les différents essais ont comme objectif principal de vérifier certaines propriétés des granulats afin de voir si ceux-ci sont conformes à l'application souhaitée. Certains essais comme l'analyse granulométrique et la composition des éléments permettent également de donner un nom au granulat.

Il existe deux grandes familles d'essais :

- Les **essais en laboratoire** regroupent différents essais répartis en deux grandes catégories : les essais d'identification ou de caractérisation et les essais de comportement (réaction du matériau vis-à-vis de certaines sollicitations).
- Les **essais in situ**

Ces essais font l'objet de normes spécifiques ou de méthodes d'essais

5.1 Essais d'identification ou de caractérisation

Les différents paramètres de caractérisation d'un granulat sont divisés en plusieurs familles : géométriques, physiques, chimiques et durabilité.

5.1.1 Essais d'identification basés sur les caractéristiques géométriques

Les différents composants solides d'un granulat jouent chacun un rôle spécifique dans le comportement du granulat.

5.1.1.1 Analyse granulométrique (NBN EN 933-1)

L'analyse granulométrique a pour but de déterminer la distribution granulométrique en poids des grains dans le matériau préalablement préparé (homogénéisé, émietté et éventuellement broyé à sec). Elle consiste à réaliser deux opérations distinctes : le tamisage ($\varnothing > 63 \mu\text{m}$) et la sédimentométrie ($\varnothing < 63 \mu\text{m}$: cas rare dans les granulats).

Le **tamisage** consiste à faire passer l'échantillon à travers une colonne de tamis normalisés dont les mailles sont de plus en plus petites vers le bas et à mesurer la quantité de refus à chaque bac. Un mouvement vibratoire (mécanique suivi éventuellement d'un mouvement manuel) et un courant d'eau sont fournis en simultanée afin de pouvoir séparer une majorité des particules agglutinées. Le tamisage se poursuit jusqu'à l'obtention d'une eau claire (départ de toutes les particules fines passant à travers le dernier tamis).

Le choix des tamis est prescrit dans la norme européenne. La Belgique a adopté la série BS + S2 comme série de référence. Cela signifie que seul ses dimensions de tamis peuvent apparaître dans les documents administratifs.

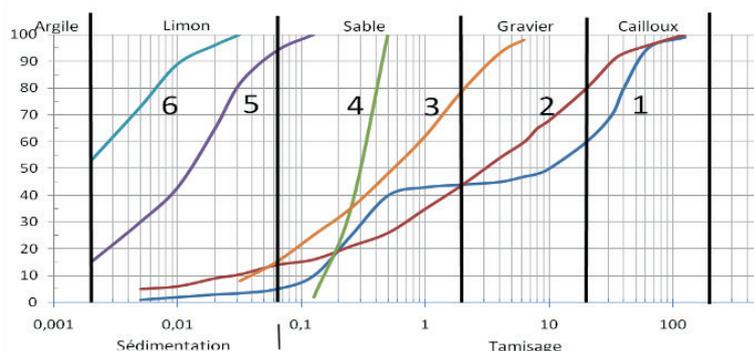
Contenu des différentes séries européennes de tamis.

	1	2	4	5,6 (5)	6,3 (6)	8	10	11,2 (11)	12,5 (12)	14	16	20	22,4 (22)	31,5 (32)	40	45	56	63	80	90
BS	✓	✓	✓			✓					✓			✓				✓		
BS + S1	✓	✓	✓	✓		✓		✓			✓		✓	✓		✓	✓	✓		✓
BS + S2	✓	✓	✓		✓	✓	✓		✓	✓	✓	✓		✓	✓			✓	✓	

REMARQUES : 1. Des dimensions supérieures à 90 mm peuvent être utilisées pour des applications particulières.

2. Les dimensions arrondies mentionnées entre parenthèses peuvent être utilisées comme description simplifiée des classes granulaires.

Les pourcentages cumulés de refus ou de passant sont reportés sur un graphe en fonction de la dimension des grains et donne lieu à une courbe granulométrique dont quelques exemples sont repris ci-dessous.



Exemples de courbes granulométriques obtenues à partir d'analyses de différents sols : **Courbe 1** : Matériau à granulométrie étalée et discontinue (*alluvions de sable et cailloux*), **Courbe 2** : Granulat à granulométrie étalée et continue (*arène granitique*), **Courbe 3** : Sable continu, **Courbe 4** : Sable homogène ou monogranulométrique, **Courbe 5** : Limon argileux et **Courbe 6** : Argile limoneuse. (Source : JB Conseils).

L'analyse de la courbe granulométrique permet de déduire les paramètres suivants concernant les granulats :

Le type et la classe granulaire ou calibre du granulat (d/D) où d et D correspondent aux dimensions respectivement inférieure et supérieure des tamis entre lesquels la majorité des éléments granulaires se trouvent. ($d \neq d_{min}$ et $D \neq D_{max}$). Les valeurs d et D doivent être conformes à la série de tamis utilisée. Le tableau ci-dessous permet de définir le type de granulat selon l'application et la norme considérée ;

Types d'application	lumiq		lumiq		lumiq		lumiq	
	d	D	d	D	d	D	d	D
Granulats pour empierrement de voirie (EN 13242)	0	$\leq 6,3$	0	$> 6,3$	≥ 1	≥ 2	-	-
Granulats pour béton (EN 12620)	0	≤ 4	0	4-45	≥ 2	≥ 4	-	-
Granulats pour revêtement bitumineux (EN 13043)	0	≤ 2	0	> 2				
Enrochement (EN 13383)	-	-	-	-	-	-	32	< 250

Ainsi, sur base de ce tableau, il existe 4 classes principales de granulat :

- Le **sable** est un granulat de faible dimension pouvant contenir une certaine fraction de fines. Il se définit par le symbole $0/D$ avec une valeur de D relativement petite et variable selon le type d'application (revêtement bitumineux, béton ou empierrement de voirie) ;

REMARQUE : Les futures normes européennes devraient uniformiser le diamètre maximal des sables pour toutes les applications. Ainsi, la valeur de 4 mm serait la seule à exister.

- La **grave** est un granulat de grande dimension pouvant contenir une certaine fraction de fines. Elle se définit par l'expression $0/D$ avec une valeur de D relativement grande. La valeur de D doit être supérieure à 2, 4 ou 6,3 mm selon le type d'application (revêtement bitumineux, béton ou empierrement de voirie). Elle ne fait pas l'objet d'un criblage poussé ;
 - Le **gravillon** est un granulat de taille moyenne contenant très peu de fines ($d > 1$). Il s'exprime par le symbole d/D avec une valeur non nulle de d . Il s'agit d'un produit issu d'une unité de traitement (tamisage et criblage) ;
 - L'**empierrement** est un mélange de sable et/ou de gravillons de calibre distinct. Dans le cas où la nature des différents matériaux constituant l'empierrement varie, la notion de **mélange** (M) doit être indiquée dans la fiche technique avec les lithologies impliquées.
 - L'**enrochement** est un matériau grossier dont les principaux grains ont un diamètre compris entre 32 et 250 mm ($D > 90$ mm). Il est constitué de matériau brut d'abattage ou de matériau grossier issu du concasseur primaire de carrière. Il fait l'objet d'une norme séparée.
- La **granularité (GX)** correspond à la forme de la courbe granulométrique et concerne la répartition dimensionnelle des grains au sein du matériau granulaire. Dans le cas de mélange, il importe de vérifier la granularité finale. Elle est déterminée par les valeurs de certains tamis de référence pour chaque classe granulaire :

$$2 D - 1,4 D - D - D/1,4 \text{ ou } D/2 - d/2 \text{ et } \emptyset < 63 \mu\text{m}.$$

REMARQUE : Il faut prêter plus d'attention à la partie basse de la courbe qu'à la partie haute car cette partie est plus influente sur le comportement du matériau, notamment au niveau du compactage.

- Le **fuseau granulométrique, tolérance granulométrique** ou **variabilité de la granularité (G ou GTx – sol et granulat)** est établi en superposant les différents résultats de courbes granulométriques d'un même matériau réalisés à différents moments. L'ensemble des analyses montre un fuseau et non une courbe unique. Cela fournit la variabilité de ce dernier. Cela doit être une valeur déclarée par le fournisseur de granulat afin de garantir la constance de la production de son produit. La forme du fuseau est comparée avec le fuseau spécifique à une application donnée. Les applications strictes du domaine routier (revêtement et fondation) exigent souvent un fuseau étroit et étalée afin de 1) limiter la ségrégation, 2) garantir un taux de compactage élevé et 3) permettre d'obtenir une surface fermée et lisse ;

IMPORTANT : Deux analyses granulométriques réalisées sur un même échantillon ne fournissent pas la même courbe granulométrique.

- Le **diamètre maximal des grains** (D_{max}) fournit une indication sur la taille de l'élément le plus gros. Celui-ci doit être au maximum égal à $2D$;
- La **teneur en fines** (f – sol D et granulat) se définit généralement comme le pourcentage d'**éléments passant à travers le tamis de 63 μm** , soit les particules susceptibles de présenter des effets néfastes sur le comportement du matériaux (si la valeur est trop importante – voir ci-dessous) et des réactions chimiques ;

D'autres paramètres secondaires peuvent être également déduits :

- Le **coefficient d'uniformité** (C_u) fournit certaines informations sur le comportement du matériau. Il équivaut généralement à **$C_u = d_{60}$ ou $80 / d_{10}$** (d_{10} et d_{60} ou 80 : ϕ de la maille pour lequel 10 et 60 ou 80% des constituants passent à travers). Ce coefficient permet de distinguer deux types de matériaux aux propriétés distinctes :
 - **Un matériau uniforme, homométrique, bien classé ou mal gradué** se caractérise par une faible valeur de coefficient d'uniformité, une répartition granulométrique restreinte et donc une courbe granulométrique assez verticale. Ce matériau présente un problème de compactage et de densité mais se caractérise par une forte perméabilité suite au manque de remplissage des interstices par des particules plus fines entre éléments majoritaires ;
 - **Un matériau hétérogène, hétérométrique, mal classé ou bien gradué** se caractérise par une valeur relativement élevée de coefficient d'uniformité ($C_u > 4$ à 6 selon la lithologie considérée), une répartition granulométrique large et donc une courbe granulométrique inclinée. Ce matériau présente de bonnes caractéristiques de compactage, une masse volumique plus élevée mais une plus faible perméabilité suite au remplissage des interstices par des particules fines entre éléments majoritaires.

Dans un certain nombre de cas, une analyse simplifiée réalisée sur 3 tamis (63 μm , 2 mm et 50 mm) permet d'avoir rapidement une identification sommaire du granulat.

5.1.1.2 Etude des fines ($\phi < 63 \mu\text{m}$)

IMPORTANT : Il importe de préciser que les fines ont un diamètre inférieur ou égal à 63 μm alors que les éléments fins ont des diamètres variables (jusqu'à 2 mm) qu'il faut toujours bien préciser.

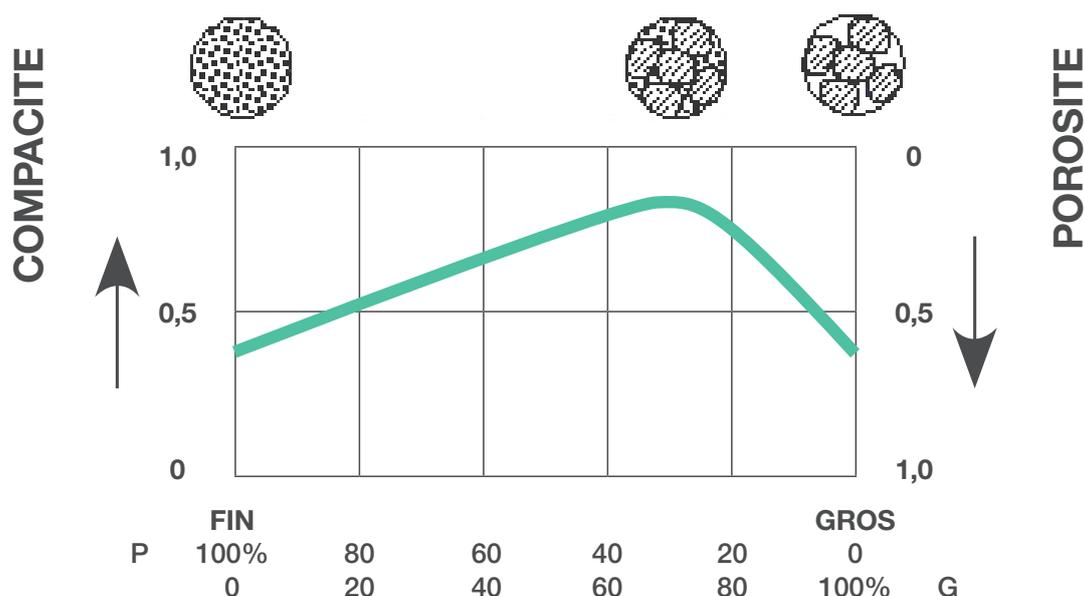
Deux paramètres important concernent les fines : leur teneur et leur nature.

- La **teneur en fines** (f - %) se définit comme le **pourcentage d'éléments passant à travers le tamis de 63 μm** selon les normes européennes. Ce paramètre est déduit de la courbe granulométrique. Elles regroupent les éléments inertes, les fillers, les liants mais surtout les particules argileuses et limoneuses qui peuvent avoir des comportements particuliers en raison de leur surface spécifique élevée et leurs éventuelles propriétés chimiques.

REMARQUE : Dans le cas d'empiècement lié, le liant (ciment, LHR ou chaux) intervient comme des fines.

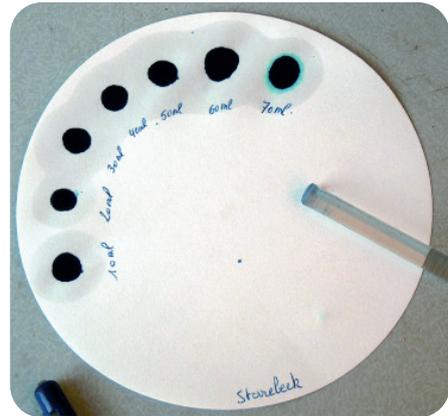
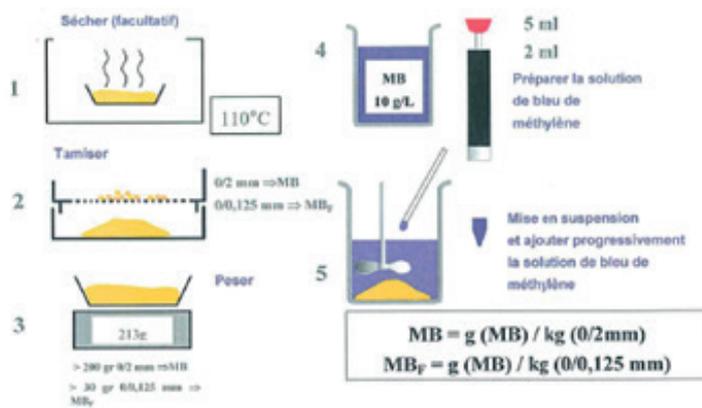
L'excès de fines (quelques dizaines de pourcents) joue plusieurs rôles néfastes sur certains comportements des granulats. Cet excès peut être éliminé par lavage du granulat.

- La **compacité**, la **portance** et les **différentes résistances** du matériau : Une certaine teneur en fines dans les espaces intergranulaires améliore la masse volumique du matériau et donc sa compacité, sa portance et ses résistances. Par contre, à partir d'une certaine valeur (*liée à la porosité initiale du matériau grossier*), l'ajout supplémentaire de fines engendre un phénomène inverse, à savoir une diminution de la densité. Les fines n'occupent plus uniquement les interstices mais elles écartent les gros éléments. C'est la raison pour laquelle les cahiers des charges autorisent une teneur en fines pouvant aller jusqu'à 20 % pour une couche portante telles que la fondation ;



Influence de la répartition granulométrique sur la compacité du mélange (Source : Holz).

- La **sensibilité du matériau au compactage** : Plus un matériau contient de fines, plus sa masse volumique varie avec la teneur en eau et plus le matériau est sensible à la teneur en eau lors des opérations de compactage. La courbe Proctor est plus redressée (voir paragraphe essai Proctor) ;
- La **perméabilité** diminue avec l'ajout de fines (remplissage des interstices). Pour une teneur modérée en fines (de l'ordre de 10 à 15 % liée à la granulométrie du matériau), l'eau continue à circuler dans le granulat. Au-delà, elle a tendance à stagner plutôt qu'à circuler. C'est à partir de ce moment qu'elle pose des problèmes. Sur base de l'expérience, la majorité des cahiers de charges limitent la teneur de fines à 10 % pour une couche à rôle "drainant" (sous-fondation et fondation drainante). Dans le cas de la fondation, il ne faut pas oublier le rôle de portance ;
- La **sensibilité au gel** augmente en cas de stagnation d'eau car l'eau stationnaire gèle plus facilement que l'eau en mouvement. Le passage de l'état liquide à l'état solide provoque, soit un accroissement de volume de 7 à 8 % (gonflement et soulèvement), soit une augmentation des contraintes sur les éléments solides supérieures ou égales à 2,5 MPa (fissuration et production de fines). Le processus de dégradation de la structure est ainsi accéléré ;
- Les **caractéristiques du matériau lié** : Un matériau lié (béton ou enrobé bitumineux) nécessite une certaine teneur en fines pour garantir leur ouvrabilité (rôle de lubrifiant) et leurs résistances élevées. Un manque de fines doit être compensé par un complément d'eau qui se traduit généralement par une perte des performances mécaniques du béton. Un excès de fines réduit l'adhésivité du liant sur les éléments grossiers (absorption du liant sur les fines), absorbe une partie de l'eau nécessaire à l'hydratation totale du ciment et limite l'ouvrabilité du béton frais. L'enrobé bitumineux et le béton perdent de leurs performances mécaniques.
- La **nature** ou **qualité des fines** intervient également dans le comportement des granulats, notamment s'il s'agit de particules argileuses avec leurs processus physico-chimiques (adsorption, plasticité, etc.). Ainsi, en présence d'une certaine teneur en fines, il faut préciser la nature de ces fines (particules inertes ou argileuses). Les principaux problèmes liés à la présence d'argile sont une plus grande sensibilité du matériau à l'eau, un risque de gonflement en cas de présence d'argile gonflante, une perte d'adhésion du liant sur les particules grossières du granulat.
Le principal essai de caractérisation des fines est l'essai au bleu de méthylène (MB – NBN EN 933-9). Cet essai basé sur le phénomène d'adsorption chimique, permet de déterminer la teneur de certaines argiles par mesure de la quantité de bleu de méthylène nécessaire pour saturer l'argile contenue dans l'échantillon. L'essai classique est réalisé sur la fraction 0/2 mm. La méthodologie est reprise dans le schéma ci-dessous.



Principe de l'essai au bleu de méthylène (Source : CRR).

A partir d'une certaine teneur en bleu de méthylène, l'auréole bleu clair persiste plus de 5 minutes. Il y a donc apparition d'un excédent de bleu de méthylène qui ne peut plus être adsorbé. L'échantillon est saturé. La valeur de bleu de méthylène ajoutée à ce moment là la solution est rapportée à la fraction 0/50 par une règle de proportionnalité et reconvertie en gramme de Bleu de méthylène par kilo de masse sèche et fournit la valeur de MB ou MBF. Plus **la valeur est élevée, plus il y a d'argile.**

Les différents cahiers des charges exigent pour un certain nombre d'applications, une valeur seuil de MB comprise entre 0,7 et 3 gr/kg MS (selon le type d'application) au-dessus de laquelle le matériau ne peut être utilisé. L'essai est influencé par certains éléments présents dans l'échantillon comme la nature de l'argile présente, la présence de matière organique, d'hydroxydes de fer et de particules de ciment non hydraté qui absorbent également une partie du bleu de méthylène et ont tendance à augmenter la valeur de MB. De plus, un échantillon prélevé dans un ancien stock peut avoir une valeur MB élevée, suite au passage du charroi à proximité du tas (projection de particules argileuses) et au vent ainsi que le développement de la matière organique.

Dans certains cas particuliers, il importe de déterminer le comportement des argiles, via les limites d'Atterberg (tendance à la plasticité du matériau) ou l'activité des argiles (A – risque de gonflement)

5.1.1.3 Morphologie des éléments grossiers

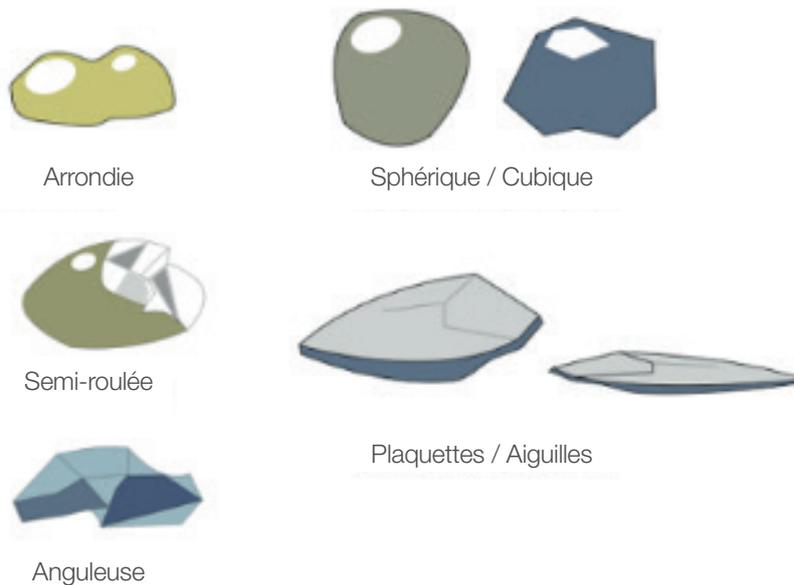
La forme, l'angularité et la texture de surface des grains composant le granulat sont autant de paramètres qui interviennent sur le comportement général du matériau quel que soit son application :

- La forme et l'angularité des grains conditionnent le compactage. Plus les grains sont anguleux, plus il faut une énergie importante pour bien les compacter. Mais une fois compacté, le granulat anguleux offre de belles résistances et portances. A l'inverse, les grains arrondis plus faciles à compacter ont tendance à plus vite se remobiliser ;
- La forme et l'angularité des grains interviennent dans l'aptitude à la mise en place du béton frais (une forme allongée réduit l'ouvrabilité du béton et son aptitude au pompage alors qu'une forme roulée augmente la maniabilité du béton) et dans la résistance du matériau (une forme allongée diminue la résistance en faisant apparaître des plans de glissement préférentiels). Par contre, des arêtes vives risquent de poinçonner la matrice du ciment. La texture de surface joue un rôle dans la rugosité de la couche de roulement (les grains anguleux favorisent l'adhérence). La forme des grains grossiers détermine également la quantité nécessaire de mortier et donc de ciment ;
- L'angularité et la texture de surface des éléments ont une influence importante sur la rhéologie, l'adhérence du liant bitumineux sur le granulat, la rugosité de la couche de roulement et la résistance à la déformation plastique d'un enrobé.

Une majorité de ces paramètres dépendent principalement des opérations de traitement (concassage et criblage). Il importe de bien adapter notamment les concasseurs afin d'avoir les formes les plus isotropes possibles tout en produisant le moins de fines possibles.

Plusieurs essais sont possibles :

- La **forme des éléments** se définit comme l'**aspect général de l'élément granulaire**. Différentes formes existent (*cubique, sphérique, rectangulaire ou aplatie*) selon la nature du matériau et le type de concasseur utilisé.



Diverses formes de granulats (Source : CRR)

La forme des particules a une grande incidence sur le comportement du matériau, l'ouvrabilité et les caractéristiques mécaniques des mélanges. C'est pourquoi il est recommandé d'utiliser les granulats les plus isotropes possibles dans bon nombre d'applications de la construction.

Certains éléments tels que les coquilles ou les débris grossiers de recyclés (*fragments de tuyaux ou de vase*) peuvent, de par leur forme spécifique, modifier le comportement du matériau comme réduire la résistance du béton (*présence de vides*). Ce phénomène est accentué par le caractère poreux de la matière. Un essai particulier a été mis au point pour les coquilles.

Cette caractéristique est déterminée à partir de la détermination du coefficient d'aplatissement (*Flx – EN 933-3*). Cet essai simple et rapide fournit une évaluation de l'aplatissement des granulats par tamisage en voie sèche du granulat à travers des tamis à lames ou à sections allongées.



Exemple de tamis à grilles (à gauche) (Source : Internet)

La valeur du coefficient équivaut au rapport :

$$FI (\%) = \frac{\sum \text{passants de chaque fraction simple} \cdot 100}{\text{Masse échantillon}}$$

Plus la valeur du coefficient est élevée, plus il y a d'éléments aplatis.

Les différents cahiers des charges exigent pour un certain nombre d'applications (fondation et revêtement), une valeur seuil de FI inférieure à 35 %.

- L'**angularité** des grains se définit par la forme des arêtes des grains ou la différence entre les grains concassés (arêtes vives) et les grains arrondis ou roulés. Ce paramètre intervient à différents niveaux comme l'angle de frottement, lors de la mise en œuvre (*compactage et ouvrabilité*) du mélange, la perméabilité, le risque de ségrégation ou encore l'adhérence des roues sur le revêtement routier.

Ce paramètre dépend de la nature des matériaux et des opérations de traitement, et principalement du concassage. Deux essais caractérisent ce paramètre selon la granulométrie :

- Le **pourcentage de surfaces cassées (Cx/y – EN 933-5 : graves et gravillons)** : L'essai consiste à réaliser un triage visuel et manuel en 2 étapes : Un premier tri distingue les grains semi concassés (<50 % surfaces arrondies) des grains semi-roulés (>50 % surfaces arrondies) et un deuxième tri réalisé sur la fraction des grains semi-roulés, distingue les grains totalement roulés (> 90 % surfaces arrondies) des autres grains. La valeur de Cx/y (avec x : % surfaces semi concassées et y : % surfaces totalement arrondies) se détermine en déterminant le pourcentage en masse des grains semi concassés et le pourcentage de grains totalement arrondis.



Différents angularités de granulats : A gauche) granulat roulé (C100/0), au centre) granulat mixte (C50/50) et à droite, granulat concassés (C0/100) (Source : JB Conseils et Internet).

- Le **coefficient d'écoulement (ECS - EN 933-6 : sable)**. Cet essai uniquement appliqué sur du sable pour des applications en revêtement hydrocarboné en Belgique, consiste à mesurer le temps nécessaire pour qu'un volume déterminé de matériau lavé (*absence de fines*) et sec s'écoule à travers l'orifice calibré d'un entonnoir.



Appareil de mesure du coefficient d'écoulement des sables (Source : Internet).

Le coefficient ECS est la valeur du temps exprimé en seconde. Plus la valeur du coefficient d'écoulement est élevée, plus les grains sont anguleux. La valeur généralement acceptée dans le CCT Qualiroutes pour une application en revêtement hydrocarboné est comprise entre 30 et 38 sec. Pour information, un sable roulé a une valeur de 15 à 20 sec.

- La texture de surface du granulat se définit comme l'état de surface des grains ou la présence ou pas d'une microrugosité. Un granulat concassé a généralement une texture rugueuse (forme non érodée des cristaux). Elle exerce une influence sur l'adhésion du liant (hydraulique et bitumineux) sur les granulats. Ce paramètre peut être estimée, soit via une analyse au microscope, soit à partir de l'essai d'écoulement (ECS).

5.1.1.4 Hétérogénéité des recyclés (EN 933-11 ou PTV 4006 – gravillon et grave)

Le granulat recyclé se caractérise par un mélange d'éléments de nature, de forme et de comportement différents qui influence le comportement général du granulat. L'essai consiste à ranger les différents éléments d'un échantillon de + 20 kg de gravillon 4/63 dans des familles de nature distincte.

L'essai débute par la séparation des substances contenant de l'amiante et la matière flottante grossière (*exprimée en cm³/kg, contrairement aux autres familles exprimées en gr ou en %*). Par la suite, sont prélevées dans la fraction restante, un minimum de 1000 pierres qui sont pesées et séparées selon les différentes familles. Chaque famille est enfin pesée et convertie en teneur. Les différentes teneurs permettent ainsi d'établir une classification spécifique aux granulats recyclés pour une application donnée.

Cette classification n'est pas toujours aisée à réaliser et reste subjective pour certains éléments classés.

Catégorie	Constituant
Rc (Concrete béton)	Béton (+ granulats avec béton attaché) Produits à base de béton : Dalles, pavés, hourdis, éléments de maçonnerie, etc. Mortier et béton préparé
Ru (Unbound-non lié)	Granulats non traités : Granulat naturel, scories d'aciérie, grains d'argile étendus non flottant, coquilles Pierre naturelle : Roches, ardoises naturelles Granulats traités au liant hydraulique : Béton maigre, béton sec compacté, empierrément lié, sable stabilisé Chape mortier au ciment
Rb	Éléments en terre cuite et céramique : Briques, tuiles, pavés, dalles, plinthes, tuyaux en grès, mortier de joint de maçonnerie, béton avec grains d'argile expansée Béton cellulaire non flottant Éléments en silicate de calcium : Brique de sable calcaire
Ra (Asphalt)	Mélanges hydrocarbonés : Asphalte, enrobés bitumineux et agrégats d'enrobés
Rg (Glass)	Verre : Vitres, bouteilles, etc.
X (Autres)	Sol cohérent : Argile, limon, silt, craie altérée, etc. Métaux : Ferreux et non-ferreux Non flottant : Bois, plastique, caoutchouc, ... Plâtre Produits carbonés : Charbon, lignite, cendre, coke, etc. Mâchefers d'incinérateur
FI (Flottant)	Matériau de construction léger : Béton cellulaire flottant, argile expansée, laine de verre, ... Bois : Éléments, résidus végétaux, panneaux en fibre, liège

REMARQUE : Cette classification n'est valable que pour un matériau ne présentant aucun risque environnemental.

Les valeurs de teneur des différents composants peuvent être utilisés pour identifier le type de recyclé selon son application.

IMPORTANT : Le type et les valeurs seuils d'une famille de recyclé peuvent varier d'une application à l'autre.



100 % maçonnerie - 0 % béton



90 % maçonnerie - 10 % béton



80 % maçonnerie - 20 % béton



70 % maçonnerie - 30 % béton



50 % maçonnerie - 50 % béton



30 % maçonnerie - 70 % béton



10 % maçonnerie - 90 % béton



0 % maçonnerie - 100 % béton

Fiche d'aide à l'identification visuelle d'un recyclé composé uniquement de débris de béton et de maçonnerie (Source : JB Conseils).

5.1.2 Essais d'identification basés sur les caractéristiques physiques

Un granulat est un milieu triphasique où les trois phases (solide, liquide et gazeuse) jouent un rôle important dans le comportement du matériau ; d'où l'importance de les répartir et de les caractériser.

5.1.2.1 Répartition des différentes phases : masses volumiques (EN 1097-3 et 6)

Il existe plusieurs types de masse volumique dont les plus importantes sont :

- La **masse volumique réelle** (ρ_{rd}) est la **masse par unité de volume du matériau sec en tenant compte uniquement des pores et fissures présents dans les éléments mais pas des vides interstitielles**. Cela se détermine par la mesure du volume du matériau dans un liquide. Cette valeur varie entre 2 500 et 2 650 kg/m³ pour la majorité des granulats. Elle sert dans le calcul de dosage des mélanges (*sol traité, empierrement, béton, etc.*) ;
- La **masse volumique en vrac** est la **masse par unité de volume du matériau stocké sur un stock** ;
- La **masse volumique apparente** (ρ_{app}) est la **masse par unité de volume du matériau en tenant compte de tous les vides (vides interstitielles, pores et fissures) sans réel compactage**. Cette valeur obtenue après remplissage d'un certain volume permet de déterminer le nombre de bennes nécessaires au transport et le coût de transport et intervient également dans certains dosages (*béton*) ;
- La **masse volumique sèche** est la **masse par unité de volume du matériau sec en tenant compte de tous les vides (vides interstitielles, pores et fissures) après compactage**. Elle varie de 1 700 à 2 200 kg/m³ pour les granulats les plus courants. Sa détermination est importante lors des opérations de compactage puisqu'elle détermine la valeur optimale à atteindre. Sa valeur dépend de la teneur en eau ;
- La **masse volumique humide** est la **masse par unité de volume du matériau humide en tenant compte de tous les vides (vides interstitielles, pores et fissures) après compactage**. Elle est également importante lors des opérations de compactage puisqu'elle détermine la valeur optimale à atteindre. Cette valeur plus élevée prend en compte la teneur en eau ;
- La **masse volumique immergée** ou **masse volumique réelle imbibée** est la **masse par unité de volume du matériau immergé dans l'eau durant 24 h** en tenant compte uniquement des pores et fissures présents dans les éléments mais pas des vides interstitielles. Elle fournit une indication sur la porosité ouverte. Elle varie entre 700 et 1 200 kg/m³ ;

Les méthodes d'essais sont basées sur le principe d'Archimède et utilisent, soit un moule (*masses volumiques apparente et en vrac, porosité – norme EN 1097-3*), soit un pycnomètre, soit une éprouvette, soit du papier au treillis (*masses volumiques réelle et absolue*), selon la dimension des grains testés.

5.1.2.2 Caractérisation des vides : coefficient d'absorption d'eau (WA24x - EN 1097-6)

Les matériaux contiennent un certain pourcentage de vides qui peuvent contenir de l'eau ou de l'air et qui se présentent sous différentes formes : **1.** Les vides interstitielles présents entre les grains, **2.** les pores (ouverts et fermés) contenus dans les éléments selon un véritable réseau ou pas et **3.** les fissures.

Tous ces vides influencent un certain nombre de propriétés mécaniques du matériau comme le compactage, la portance, les résistances aux variations gel-dégel, à la fragmentation, à l'attrition, à la résistance à la compression et à la traction. De plus, pour une application granulaire en béton, ils jouent un rôle sur la formulation du mélange, l'ouvrabilité et le rapport E/C au cours de la prise et du durcissement.

La **porosité d'un granulat** (n) équivaut au rapport du volume des vides (V_{vide}) pouvant être remplis d'eau au volume total du matériau (V_{tot}).

$$n = (V_{vide} / V_{total})$$

L'indice des vides (e) est le rapport du volume des vides pouvant être remplis d'eau au volume de solide dans l'échantillon.

$$e = V_{vide} / V_{solide}$$

L'essai de détermination du coefficient d'absorption d'eau (WA24x), le plus représentatif de la porosité ouverte consiste à déterminer la différence de pesée d'un échantillon avant et après immersion dans l'eau durant 24 h à pression atmosphérique.

$$WA24x = \Delta \text{masse} / M_{sèche}$$

Une valeur inférieure à 2 % est généralement le signe d'une roche aux bons comportements géomécaniques et de durabilité (sensibilité aux cycles gel – dégel). La majorité des granulats recyclés ont des valeurs comprises entre 4 et 25 %, suite à la présence d'une matrice cimentaire poreuse.

5.1.2.3 Caractérisation de la phase liquide

Il existe plusieurs types d'eau dans un granulat :

- L'eau interstitielle est l'eau présente dans les espaces libres entre les grains et qui n'adhère pas aux éléments. Elle se présente sous deux formes :
 - L'eau libre circule librement entre les grains. Elle joue un grand rôle dans les comportements physiques et mécaniques du matériau. Lorsque l'eau libre remplit tous les vides, le milieu est saturé ;
 - L'eau capillaire est l'eau retenue entre les grains solides par des forces de capillarité (adhésion). Ce type d'eau est plus difficile à extraire. C'est la dernière forme d'eau interstitielle à être présente dans le matériau en cas de séchage ;
- L'eau adsorbée concerne l'eau qui forme une pellicule d'eau solide attachée à la surface des grains d'argile suite à des phénomènes électrochimiques. Son épaisseur (5 à 10 *micromètres* ou Å) lui permet de jouer le rôle de lubrifiant entre les grains et d'avoir des propriétés d'un matériau semi-solide. Elle est absente autour des grains de sable et de matières inerte. Elle ne peut partir qu'après dessiccation totale et complète du matériau ;
- L'eau de constitution est l'eau présente dans le minéral. Elle n'intervient pas en géotechnique. La teneur en eau d'un granulat est le rapport du poids d'eau (W_{eau}) contenu dans le matériau sur le poids du matériau sec (*Wéchantillon sec*).

$$\% \text{ eau} = \frac{W_{eau}}{W_{\text{échantillon sec}}}$$

La teneur en eau est un facteur important car elle conditionne les opérations de compactage et les différentes résistances des mélanges à base de liant hydraulique et, détermine le risque de gonflement ou de retrait en présence d'argile.

Plusieurs méthodes de détermination de la teneur en eau existent et sont réalisées, soit en laboratoire (*séchage à l'étuve entre 105 et 110°C*), soit sur chantier (*poêle sur flamme, four micro-ondes en l'absence de particules d'aluminium, etc.*) Le principe de ces différentes méthodes est le même : Peser un matériau avant et après séchage jusqu'à "masse constante" (*"état sec"*). La masse est considérée comme constante lorsque deux pesées successives de l'échantillon ne diffèrent pas de plus de 0,1 %.

REMARQUE : Dans le cas de certains granulats finement poreux (*recyclés*), la teneur en eau doit être mesurée un certain temps après l'ajout d'eau afin de laisser le temps à l'eau de s'infiltrer dans les vides ouverts des éléments.



Exemples de méthodes de détermination de la teneur en eau. De gauche à droite, étuve, four à micro-ondes et poêle sur flamme (Sources : CRR, internet et JB Conseils).

Dans certaines applications (structure drainante), la perméabilité, soit la vitesse de circulation de l'eau dans le matériau est demandée.

Classification des structures sur base de leur perméabilité (Source : CRR).

Type de structure	Perméabilité (m/s)	Perméabilité (m/h)
Structure très perméable	$> 10^{-4}$	$> 3,6 \cdot 10^{-2}$
Structure à bonne perméabilité	$10^{-4} - 10^{-6}$	$3,6 \cdot 10^{-2} - 3,6 \cdot 10^{-4}$
Structure à moyenne voire mauvaise perméabilité	$10^{-6} - 10^{-8}$	$3,6 \cdot 10^{-4} - 3,6 \cdot 10^{-6}$
Structure quasiment imperméable	$< 10^{-8}$	$< 3,6 \cdot 10^{-6}$

Il existe différents types de perméamètres pour mesurer ce paramètre.

5.1.3 Essais d'identification basés sur les caractéristiques chimiques

Certains composants chimiques s'ils sont présents en excès, peuvent jouer un rôle néfaste sur le comportement du matériau, notamment s'il est en présence d'un liant. Il importe donc de vérifier leur teneur.

5.1.3.1 Teneur en composants influençant la prise et le durcissement du ciment

La matière organique et d'autres substances (composés solubles de zinc, de plomb et de cadmium) sont susceptibles de perturber considérablement et de retarder l'hydratation du ciment. La détermination des quantités admissibles pour les différents composants est difficile à établir. Ils sont donc considérés dans leur ensemble, via l'essai au mortier.

Plusieurs essais peuvent être réalisés :

- L'**essai au mortier** (EN 1744 -1 §15) consiste à déterminer l'influence du granulat sur la prise en comparant le temps de prise et la résistance à la compression à 28 jours de deux mortiers : un mortier comportant le granulat brut et un mortier comportant le granulat chauffé préalablement à 480°C (*suppression principalement de la matière organiques*). Cet essai ne convient pas pour les recyclés car la température atteinte lors du traitement thermique (480°C) détériore certains composants du matériau.

Un dépassement de 120 minutes et/ou une diminution de Rc de plus de 20 % n'est pas admissible dans certains cas. En cas de dépassement des valeurs-seuils, il importe de déterminer la nature des composants influenceurs et donc de vérifier s'il s'agit de matières organiques ou d'autres éléments.

- La **teneur en matières organiques (MO)** qui se présentent sous différentes formes (*résidus, micro-organismes, acides humiques et fulviques*) peut avoir plusieurs effets néfastes sur le comportement des matériaux : l'augmentation de la plasticité et de la compressibilité, une détérioration de la structure par décomposition des résidus, une absorption d'une partie des liants par les micro-organismes en vue de préserver le pH du milieu initial et le retardement de la prise du ciment par les différents acides.

Si de nombreuses méthodes existent, seule la méthode à l'hydroxyde de sodium (NaOH - EN 1744-1 §15) est la méthode actuellement reconnue par les normes européennes en raison de sa faible réaction avec d'autres composés oxydables (*fer, etc.*). Il s'agit d'une méthode qualitative car elle fournit, non pas une valeur, mais une teinte de solution à comparer à une teinte de référence. Si la teinte se révèle plus claire que la référence, le granulat peut être considéré comme exempt de matières organiques. En cas de couleur plus foncée (positive), il y a lieu d'évaluer la présence d'humus, voire d'acide fulvique, pour déterminer l'importance du risque ;

5.1.3.2 Teneur en soufre, sulfates et sulfures

Le soufre peut se trouver dans la nature sous différentes formes :

- Le **soufre natif** est la forme pure. Elle est peu abondante dans la nature ;
- Les **sulfates** (SO_2) comportent principalement les sulfates de calcium présents souvent sous forme de **gypse** (*sulfate de calcium hydraté* : $CaSO_4 \cdot 2H_2O$), d'**anhydrite** ($CaSO_4$), de semi-hydrates ou encore de sous-produits issus de certains procédés industriels (**phosphogypse**). Toutefois, le gypse est le minéral le plus fréquent. Il est présent naturellement ainsi que dans les recyclés de construction sous forme de plâtre ou dans le ciment des débris de béton. Cette forme est la principale cause de nombreuses déformations et problèmes ;

REMARQUE : Le ciment contient jusqu'à 3 % de sulfate de calcium en vue de retarder sa prise. Ce sulfate forme de l'ettringite primaire ou se transforme en d'autres hydrates au cours de la prise.

- Les **sulfures** présents principalement sous forme de pyrite (FeS) dans certaines roches (*calcaire, schiste, grès, etc.*), peuvent s'oxyder et se transformer en sulfates.

L'excès de soufre principalement sous forme de sulfates est indésirable pour des applications faisant intervenir un liant hydraulique car il peut réagir avec les aluminates hydratés de calcium (*CAH*) pour former des minéraux gonflants (*ettringite secondaire et thaumasite*) qui déstructurent à terme et forment des phénomènes de pop-out ou des taches brune ou de rouille en surface du béton, tout comme la présence de pyrite. Un excès de soufre réduit la résistance du béton à l'eau de mer et aux eaux séléniteuses et peut modifier les effets de certains adjuvants (réducteurs d'eau, etc.) ;

Plusieurs essais existent :

- La **teneur totale en soufre** (*S – EN 1744-1 §11*) s'applique principalement aux granulats secondaires et permet d'estimer la tendance à du matériau à produire des sulfate. Le CCT Qualiroutes exige généralement une valeur de 1 % pour toute application d'un granulats recyclé avec un liant hydraulique ;
- La **teneur en sulfates solubles dans l'eau** (*SSx*) s'applique principalement aux granulats recyclés et permet d'estimer la quantité de sulfates (*gypse et plâtre*) susceptibles de se dissoudre au contact de l'eau (notamment de gâchage). Leur dissolution risque de perturber la prise et de déstructurer à terme le mélange durci. C'est la raison pour laquelle cet essai est exigé pour un granulats recyclé utilisé en application liée (*liant hydraulique*) ;
- La **teneur en sulfates solubles dans l'acide** (*SA – EN 1744-1 §12*) s'applique principalement aux laitiers de haut-fourneau. La valeur généralement reprise dans les cahiers des charges est de 1%.

5.1.3.3 Teneur en chaux (% CaO)

La présence de chaux vive dans certains matériaux (*sol, recyclés de construction, scorie, mâchefers, etc.*) peut occasionner des réactions néfastes. Le principale essai consiste à déterminer la teneur en chaux vive dans le granulats. Les cahiers de charge ne prévoient que des valeurs critères dans certains cas spécifiques.

5.1.4 Essais d'identification basés sur les caractéristiques de durabilité

La **durabilité** d'un granulats utilisé notamment 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.*

Ainsi, un granulats sera jugé dégradable s'il perd à terme ses propriétés et notamment s'il produit dans le temps, une quantité trop importante de fines qui détériore la couche et la structure routier. Il importe de vérifier la tendance qu'à le granulats à produire des fines lors des différentes sollicitations. Il importe d'utiliser les granulats les moins producteurs de fines.

Vu la grande diversité des sollicitations présentes, il n'existe pas un seul essai en laboratoire représentatif mais une série de quelques essais les plus représentatifs des sollicitations en vue de pouvoir comparer leurs résultats avec des critères figurant dans les cahiers des charges. Ces essais sont répartis en deux familles :

- Les **sollicitations mécaniques** concernent les sollicitations qui provoquent des chocs ou des frottements mécaniques entre les grains comme l'usure par attrition (*essai micro-Deval en présence d'eau*), la fragmentation par impact (*essai Los Angeles*), le frottement (*coefficient de polissage accéléré*) ou encore le cisaillement, la compression, le broyage, etc. ;
- Les **sollicitations climatiques** sont liées à l'action de l'eau et/ou la chaleur qui provoquent des cycles d'alternance dans le milieu, dont notamment l'alternance des cycles gel – dégel qui 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 ;

REMARQUE : Ces essais ont été développés pour des granulats primaires. Ils ne sont pas toujours représentatifs pour les granulats secondaires comme les granulats recyclés.

5.1.4.1 Durabilité mécanique par attrition (usure) : Essai micro-Deval en présence d'eau (MDE - EN 1097-1)

Les granulats mis en œuvre en fondation et en sous-fondation sont soumis à des déformations périodiques dues aux passages des véhicules induisant un effet d'attrition entre les granulats suite aux frottements entre les grains. Il n'y a pas d'effet de choc.

L'essai micro-Deval en présence d'eau mesure l'usure du matériau (*frottement intergranulaire et frottement avec les boulets*) en comparant la différence de poids après le passage de l'échantillon 10/14 durant 2 heures dans un cylindre rotatif contenant une certaine quantité de petites billes d'acier et en présence d'eau. L'eau est généralement présente en quasi-permanence dans la structure routière et elle exerce une grande influence.



Dispositif de l'essai Micro-Deval en présence d'eau (Source : CRR).

D'autres classes granulaires peuvent être testées, moyennant quelques adaptations de l'essai (*Annexe c-informative*).

La valeur du coefficient Los Angeles équivaut à : $MDE = \frac{5000 - m}{50}$ m : masse du refus à 1,6 mm

Plus la valeur est faible, meilleure est la résistance du matériau à l'attrition.

Les valeurs généralement reprises dans les normes varient entre 10 et 50.

REMARQUE : Les valeurs choisies et souvent reprises dans les cahiers des charges, sont des multiples de 5 et ont été choisies à l'époque à la suite de tests réalisés sur des matériaux qui étaient couramment utilisés dans les différentes couches de la voirie.

Principales exigences des différents cahiers de charge belges concernant la valeur MDE selon l'application.

Applications	QUALIROUTES	CCT 2011	SB 250
Sous-fondation	< 35 – 50 (selon type de réseau)	Non requis	Non requis
Fondation (empierrement)	ales		Non requis
Couche de roulement béton	< 20 – 25 (selon couche)		< 15 – 25 (selon type de classe)

5.1.4.2 Durabilité mécanique par fragmentation : Essai Los Angeles (LA – EN 1097-2)

Lors des opérations de traitement, de chargement et de mise en œuvre, les granulats sont soumis à de nombreux impacts qui génèrent des fines. La valeur dépend principalement des fissures et pores présents dans les éléments.

L'essai **Los Angeles (LA)** consiste à déterminer l'aptitude du granulat à se fragmenter sous l'impact de grands chocs (chutes de granulats et de boulets d'acier) par la mesure de la teneur en fines produites à partir d'un certain nombre de cycles. Il permet également d'estimer la production de fines lors des alternances de cycles gel-dégel. L'essai réalisé principalement sur la classe granulaire 10/14 consiste à mesurer l'usure du matériau par comparaison de poids avant (+5 kg) et après son passage durant 2 h dans un tambour rotatif muni d'une tablette en saillie et accompagné d'une certaine quantité de billes d'acier.



Principe de l'essai Los Angeles et comparaison d'un échantillon de granulat avant et après réalisation de l'essai (Source : CRR).

D'autres classes granulaires peuvent être testées, moyennant quelques adaptations de l'essai. Ainsi, il est possible de tester la classe granulaire 16/32 pour un granulat recyclé (*Annexe G – informative*).

La valeur du coefficient Los Angeles équivaut à : $LA = \frac{5000 - m}{50}$ m : masse du refus à 1,6 mm

Plus la valeur est faible, meilleure est la résistance du matériau à l'attrition.

Les valeurs généralement reprises dans les normes varient entre 15 et 60.

REMARQUE : Les valeurs choisies et souvent reprises dans les cahiers des charges, sont des multiples de 5 et ont été choisies à l'époque à la suite de tests réalisés sur des matériaux qui étaient couramment utilisés dans les différentes couches de la voirie.

Principales exigences des différents cahiers de charge belges concernant la valeur de Los Angeles (LA) en fonction du domaine d'application.

Applications	QUALIROUTES	CCT 2011	SB 250
Sous-fondation	≤ 40		Non requis
Fondation (empierrement)	≤ 30	≤ 35	≤ 35 – 50 (selon empierrement)
Couche de roulement béton	≤ 25-30 (selon couche)		≤ 15 – 30 (selon type de classe)
Revêtement hydrocarboné	≤ 20-30 (selon couche)		≤ 20 – 25 (selon type de classe)

5.1.4.3 Durabilité mécanique par polissage : coefficient de polissage accéléré (PSV ou CPA)

Cette caractéristique est très importante pour un granulat entrant dans la composition de revêtement routier (béton et enrobés bitumineux). Le gravillon situé à la surface de la chaussée doit présenter des arêtes vives et des faces râpeuses pour lutter contre la glissance. Il est donc nécessaire de maintenir cette capacité de résistance dans le temps.

Cette caractéristique est principalement déterminée par l'essai de polissage accéléré qui mesure l'aptitude du granulat 7,2/10 à ne pas se polir en mesurant la perte de rugosité du matériau après avoir subi des contacts dynamiques avec des matériaux abrasifs (émeri).



Exemples d'appareils et de plaquette utilisés pour un essai CPA (Sources : Internet).

La formule $PSV = S + 52,5 - C$ est ensuite appliquée (avec S = Valeur moyenne pour 4 éprouvettes de matériau testé et C = valeur moyenne pour 4 éprouvettes du matériau de référence).

Plus le coefficient est élevé, mieux le matériau résiste aux actions de polissage.

REMARQUE : Les valeurs choisies et souvent reprises dans les cahiers des charges, ont été choisies à l'époque à la suite de tests réalisés sur des matériaux qui étaient couramment utilisés dans les différentes couches de la voirie.

Principales exigences des différents cahiers de charge belges concernant la valeur de Coefficient de Polissage Accélééré (CPA) en fonction du domaine d'application.

Applications	QUALIROUTES	SB 250
Revêtement hydrocarboné	≥ 50 – 56 (selon mélange et type de réseau)	≥ 50

5.1.4.4 Durabilité climatique liée au cycle gel-dégel : Essai de sensibilité ou de résistance au gel – dégel

En domaine routier, l'alternance de cycles gel – dégel peut notamment occasionner des dégâts selon le mécanisme de gélifraction. Ce processus se produit dans un milieu poreux où l'eau stagnante dans les différents vides (pore, microfissure, ...) délite ou fragmente par augmentation de pression, le matériau qui se déstructure. Cela engendre une production de fines qui favorise la stagnation de l'eau et accélère la dégradation de l'ouvrage. Son impact est principalement déterminé par les essais de résistance ou de sensibilité au gel – dégel ;



Figure xx : Exemples de roche crayeuse en cours de processus de gélifraction (à gauche) ou de recyclés après l'essai de sensibilité au gel (à droite) (Source : Internet et JB Conseils).

Etant donné que les essais de sensibilité ou de résistance au gel – dégel durent généralement longtemps, des essais plus rapides d'estimation de la sensibilité du matériau aux cycles gel – dégel peuvent être faits en estimant la quantité de vides ouverts dans le granulat afin de pouvoir déterminer s'il y a lieu ou pas de réaliser les essais de sensibilité à proprement parlé (principe des normes européennes).

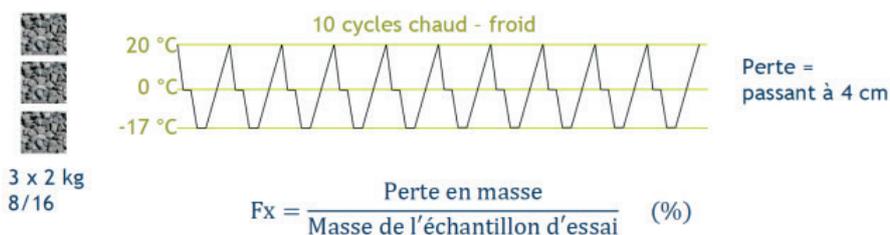
Ces essais d'estimation de la sensibilité au gel – dégel sont :

- Le **coefficient d'absorption d'eau** (W_A - EN 1097-6) fournit une idée de la quantité d'eau pouvant être absorbée par les grains au sein des microfissures et microcavités ouvertes des éléments granulaires. Un granulat est dit non gélif s'il présente une absorption d'eau inférieure ou égale à 1 ou 2 %. Le granulat recyclé présente généralement une valeur plus élevée que les granulats naturels, dû à la présence notamment d'une porosité plus importante. Cet essai est le plus fréquent pour fournir une estimation ;
- L'**essai Los Angeles après plusieurs cycles gel-dégel** : le granulat est considéré comme non gélif si le coefficient LA d'un échantillon soumis à 25 cycles gel-dégel est inférieur ou égal à 25. L'action répétée des cycles sur le granulat saturé d'eau peut provoquer une dégradation de ceux-ci par fragmentation ou microfissuration. Cela est particulièrement vrai pour une roche poreuse ;

L'analyse pétrographique réalisée sur le matériau initial permet déterminer la présence de minéraux susceptible de se désagréger en présence de cycles gel – dégel et d'estimer le type et la valeur de porosité sur base de l'examen des grains. Cette méthode est généralement peu réalisée.

Dans le cas où le granulat est estimé gélif, des essais de sensibilité doivent alors être réalisés afin de fournir une valeur plus précise. Deux types d'essais existent :

- L'**essai européen de sensibilité au gel/dégel** (F_x - EN 1367-1) consiste à réaliser 10 cycles de gel-dégel sur 3 échantillons (boîtes circulaires métalliques avec couvercle) pesés de granulats lavés et saturés à l'eau à pression atmosphérique. Chaque cycle dure 24 h et implique une phase de refroidissement à $-17,5^{\circ}\text{C}$ sous eau et une phase de réchauffement dans un bain d'eau à $+20^{\circ}\text{C}$ avec une certaine période de transition. La détermination de la perte de masse consiste à tamiser les échantillons au tamis de $d/2$, (soit 2, 4, 8 ou 16 cm). Le refus (M_2) est mesuré



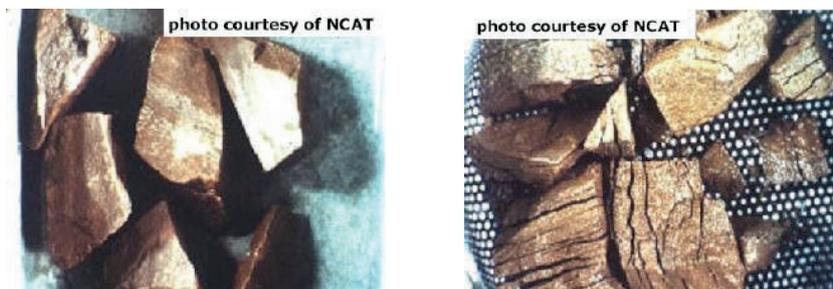
Principe de l'essai de sensibilité au gel-dégel (Source : CRR).

Le coefficient F équivaut à la formule suivante :

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

Plus la valeur est faible, meilleure est la résistance du matériau à l'attrition.

Les principales valeurs-critère de F adoptées dans les différentes normes européennes et autres documents techniques équivalent à 1, 2 et 4. L'**essai de résistance gel-dégel par le sulfate de magnésium** (MZ - EN 1367-2) consiste à immerger deux éprouvettes de fraction 10/14 à cinq reprises dans une solution saturée de sulfate de magnésium et à les sécher à $110 + 5^{\circ}\text{C}$ afin de favoriser la cristallisation relativement destructive du sulfate de magnésium dans les pores du granulat (effet proche de celui de l'eau en train de geler) qui affectent la résistance au gel-dégel du matériau. La valeur est fournie par la différence de poids avant et après les cycles.



Vues d'un échantillon avant (à gauche) et après (à droite) l'essai (Source : NCAT).

Pour l'ensemble des granulats, recyclés, naturels et artificiels l'équivalence (Cfr. NBN EN 13242) entre les tests gel/dégel relevant de la norme NBN EN 1367-1 et NBN EN 1367-2, a été validée dans le CCT-Qualiroutes. Les granulats recyclés sont préférentiellement analysés suivant la NBN EN 1367-2 : Essai au sulfate de magnésium. La valeur de sensibilité au gel et au dégel est déterminée conformément à l'EN 1367-1 ou à l'EN 1367-2. Elle doit être exprimée en utilisant la catégorie correspondante spécifiée dans le Tableau 20 ou le Tableau 21.

Le CCT QUALIROUTES reprend pour ce test des critères de 25 (nord du sillon Sambre-et-Meuse) et 35 % (sud du sillon Sambre-et-Meuse) selon la situation géographique.

REMARQUE : Le CCT Qualiroutes distingue deux zones en Wallonie sur base des climats. La zone située au nord du sillon Sambre-et-Meuse est soumise à un climat atlantique plus doux alors que la zone située

REMARQUE : Le CCT Qualiroutes distingue deux zones en Wallonie sur base des climats. La zone située au nord du sillon Sambre-et-Meuse est soumise à un climat atlantique plus doux alors que la zone située au sud de ce sillon est soumise à un climat continental plus rude et donc plus susceptible d'être affecté par les alternances de gel-dégel. Les critères sont donc plus stricts de ce côté.

5.2 Essais de comportement

5.2.1 Essais Proctor et courbes IPI et CBR (compactage et portance)

Les essais Proctor, IPI et CBR sont les essais les plus représentatifs des processus de compactage et de portance. Ils interviennent principalement dans les travaux routiers et pour l'élaboration de béton.

Outre les caractéristiques intrinsèques du matériau et les conditions de compactage (énergie et mode de compactage), la teneur en eau exerce également une importance non négligeable sur le compactage. Ces essais permettent de tenir compte de cette influence.

5.2.1.1 Essai Proctor

L'essai Proctor consiste à compacter selon la même énergie et mode de compactage, un certain nombre d'éprouvettes (généralement 5) du même matériau mais caractérisées par des teneurs différentes en eau et à mesurer pour chacune, la masse volumique sèche (ρ_d), voire humide.

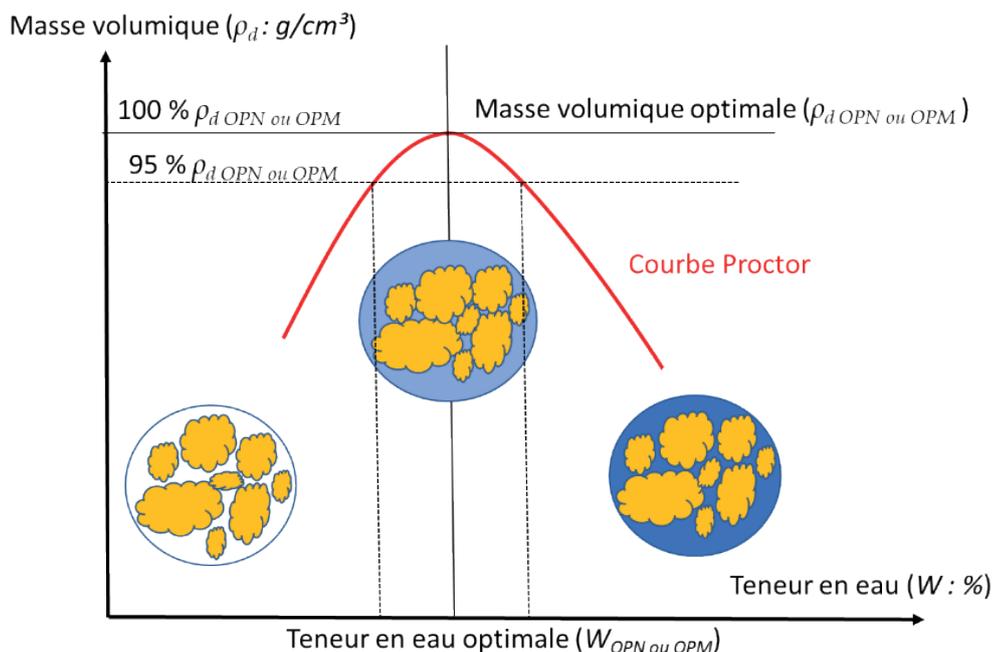
Plusieurs types d'essais existent selon l'énergie de compactage :

- L'**essai Proctor normal (OPN)** développé par Proctor (1933) utilise une énergie de compactage de 592 kJ/m³. Il convient principalement pour les couches de remblai et de sous-fondation ;
- L'**essai Proctor modifié (OPM)** mis au point lors de la Deuxième Guerre mondiale par l'U.S Army Corps of Engineers afin de reproduire le compactage des pistes d'atterrissage pour avions lourds, emploie une énergie de compactage plus importante et égale à 2 695 kJ/m³, soit 4,55 fois plus élevée que l'énergie de compactage de l'essai Proctor normal. Il convient pour les couches routières supérieures (fondation et revêtement).

Ces différents essais peuvent être réalisés dans deux types de moules avec des procédures de compactage différentes permettant d'avoir la même énergie de compactage :

- Le moule PROCTOR est utilisé uniquement pour l'essai Proctor ;
- Le moule CBR est utilisé dans le cas où un essai CBR ou IPI est réalisé par la suite.

L'ensemble des résultats est ensuite reporté sur un graphe $\rho_d - W$ %eau. Les points sont reliés entre eux par une courbe appelée **courbe Proctor** dont la forme générale est celle d'un dôme plus ou moins obtus.

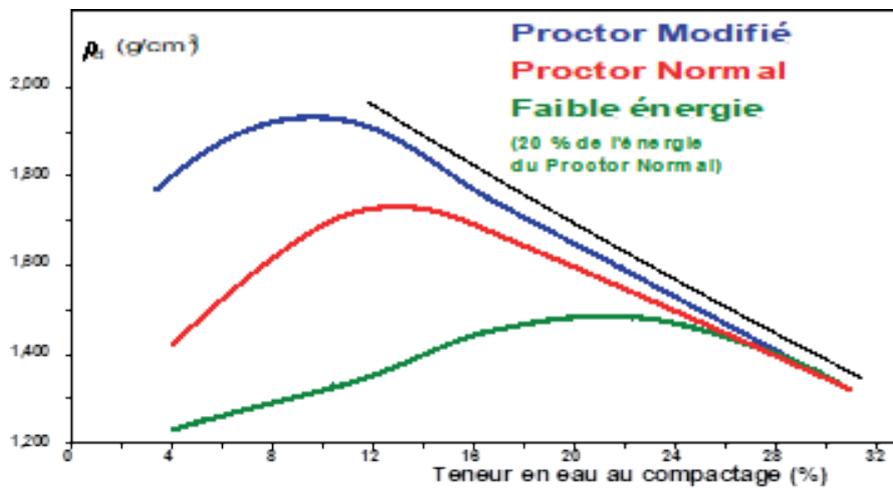


Exemple de courbe PROCTOR (Source : Internet).

Le sommet du dôme est appelé l'**Optimum Proctor**. Il correspond au compactage maximal du matériau, soit à la masse volumique sèche maximale (*pd OPN ou pd OPM*) pour l'énergie de compactage utilisée. Ce dôme se situe à une certaine **teneur en eau dite teneur en eau à l'optimum Proctor** (*WOPN ou WOPM*). Ce dôme sépare deux branches aux comportements distincts : La **branche sèche** (à gauche) et la **branche humide** (à droite).

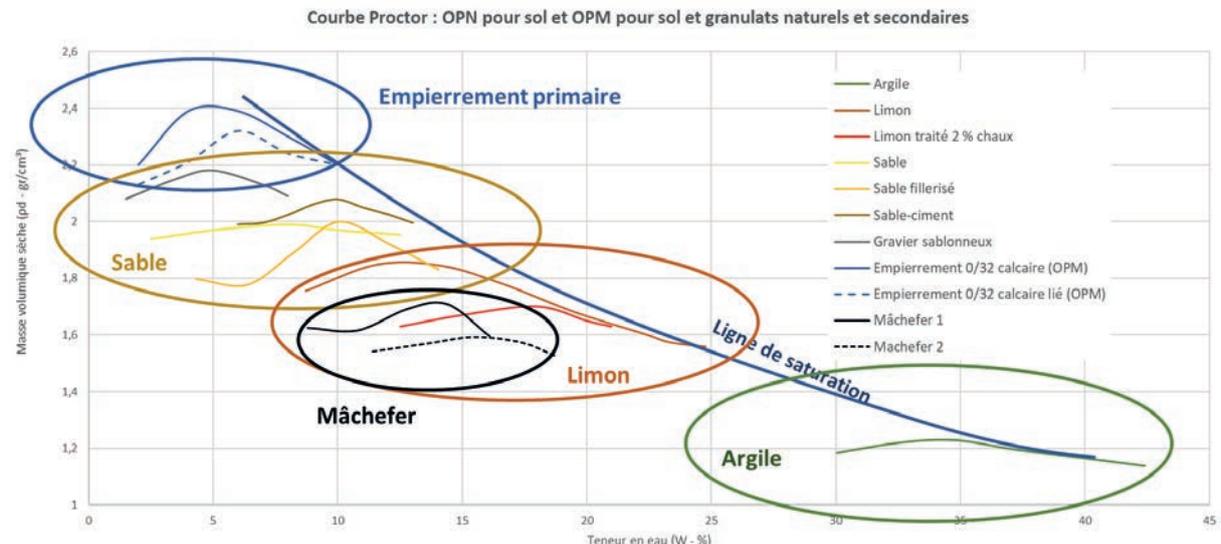
L'opération de compactage consiste à se rapprocher le plus près possible de l'Optimum Proctor, voire à l'atteindre. Toutefois, c'est quasi impossible sur terrain, étant donné les nombreux autres facteurs d'influence présents. C'est la raison pour laquelle les critères de compactage s'expriment souvent en pourcents de la masse volumique sèche à l'Optimum Proctor.

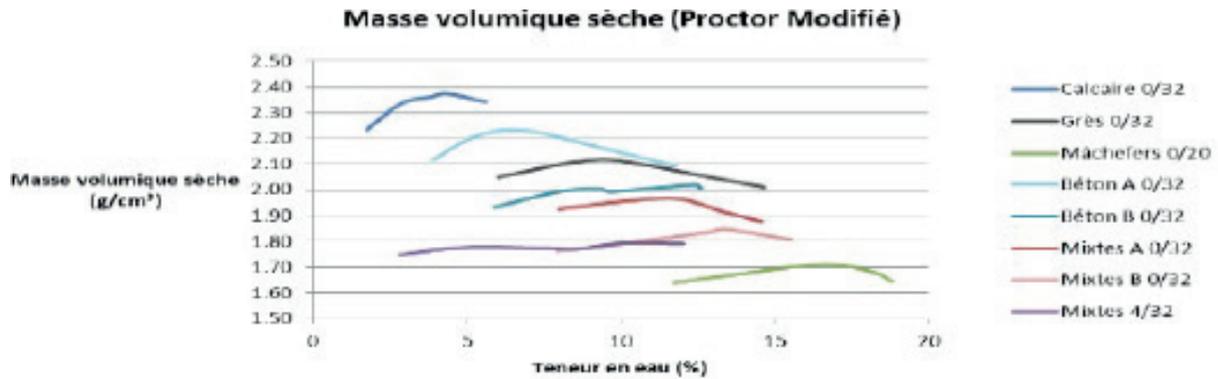
L'amplitude du dôme fournit un renseignement sur la sensibilité du matériau à l'eau lors de l'opération de compactage. Plus le dôme est obtus, plus le domaine de teneur en eau pour atteindre le taux de compactage est limité. Le matériau est dit **sensible à l'eau (lors de l'opération de compactage)**. A l'inverse, un dôme relativement aplati qualifie un matériau non sensible à l'eau. Le sable et les gravillons purs sont des matériaux insensibles à l'eau. L'Optimum Proctor se déplace vers le haut côté gauche à fur et à mesure que l'énergie de compactage augmente. Cela s'explique par le fait que l'augmentation de l'énergie permet de réduire encore plus les vides et ainsi d'augmenter la masse volumique tout en ayant besoin de moins d'eau.



Influence de l'énergie de compactage sur la position de la courbe Proctor (Source : CRR).

Chaque famille de matériaux se caractérise par une position et une forme de dôme spécifiques. Il apparaît que chaque optimum Proctor tend à se mettre le long d'une ligne générale de saturation.





Quelques exemples de courbes Proctor normal et modifié (empierrement) (Sources : JB Conseils et CRR).

La figure ci-dessus permet de constater qu'un granulat (grave, gravillon et sable) riche en particules fines ou contenant du liant est généralement plus sensible à l'eau qu'un granulat pauvre en fines. Il est donc important de déterminer la teneur idéale en eau pour le compactage d'un granulat lié.

5.2.1.2 Essais IPI (Indice Portant Immédiat) et CBR (California Bearing Ratio)

Le principe des essais IPI et CBR est de déterminer la résistance à l'enfoncement d'un poinçon au sein d'un matériau compacté à une certaine teneur en eau afin de s'assurer que cette résistance puisse fournir une portance suffisante pour l'application souhaitée.

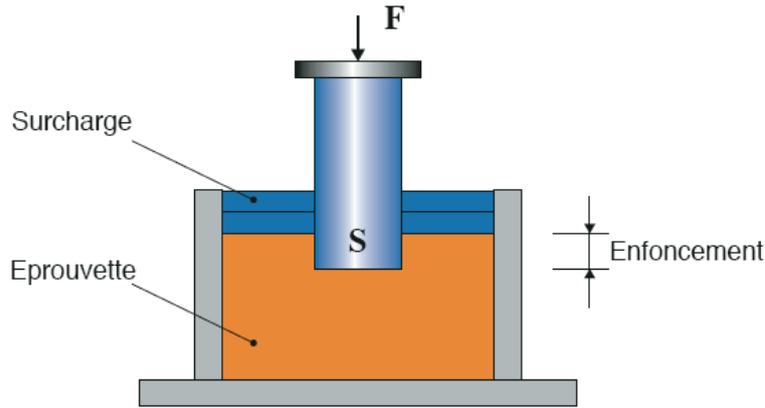
Bien que les deux méthodologies soient similaires, la différence entre les deux essais réside dans le fait d'ajouter ou non une surcharge au sommet de l'éprouvette.

- L'**essai IPI** (*Indice Portant Immédiat*) : L'absence de surcharge lors de l'essai permet le développement d'un certainorniérage de surface tout autour du poinçon (déplacement des éléments vers la partie superficielle) et représente au mieux le comportement immédiat d'un pneu roulant sur le matériau. Il est réalisé pour caractériser un matériau intervenant dans une couche de remblai, un fond de coffre et certaines sous-fondations ;
- L'**essai CBR** (*California Bearing Ratio*) : La présence d'une surcharge de 8 kg au sommet de l'éprouvette empêche le développement d'ornières. L'essai représente la portance d'une couche ayant un poids au-dessus d'elle et s'applique au sous-fondation et fondation. Les valeurs mesurées sont généralement plus importantes. Trois types d'indice CBR (*exprimé en %*) existent :

- L'**indice CBR immédiat (CBR)** correspond au poinçonnement de l'éprouvette immédiatement après sa réalisation ;
- L'**indice CBR après quelques jours (CBR_{xj})** est réalisé après plusieurs jours (3 ou 7 jours) sur des matériaux généralement traité (chaux ou liant hydraulique). Il permet de voir l'évolution du matériau en fonction du temps ;
- L'**indice CBR après immersion dans l'eau (CBR_{4j immersion})** correspond au poinçonnement d'une éprouvette après immersion de l'ensemble (éprouvette + surcharge) dans l'eau durant 4 jours à 20°C. Ceci simule un sol humidifié après son compactage en place et permet de voir son comportement vis-à-vis de l'eau. Certains sols mal compactés peuvent avoir une bonne valeur d'IPI mais offrir une mauvaise portance à long terme. Le gonflement total est mesuré dans l'eau avant de réaliser l'essai CBR.

Le rapport CBR_{4j}/IPI permet de déterminer le maintien à long terme des performances de portance du matériau soumis notamment à des venues d'eau. $CBR_{4j \text{ d'immersion}} / IPI \geq 1$.

La méthode consiste à compacter une éprouvette à l'énergie Proctor normal ou modifié dans un moule CBR et à ensuite mesurer l'énergie nécessaire pour enfoncer à l'aide d'une presse, un poinçon cylindrique de 49,6 mm de diamètre à vitesse constante (1,27 mm/min) sur une profondeur de 2,5 et 5 mm avec ou sans surcharge. La courbe obtenue est ensuite comparée à un matériau de référence (grave concassée de Californie). La teneur en eau est mesurée directement après l'essai.



$$\text{CBR} = \frac{F/S \times 100}{(F/S)_{\text{réf}}} \%$$

Schéma de l'essai CBR (Source : CRR).

Les indices IPI et CBR se calculent à partir des valeurs obtenues à 2 profondeurs distinctes (2,5 et 5 mm) selon les formules ci-dessous :

Effort de pénétration à 2,5 mm d'enfoncement (kN) x 100

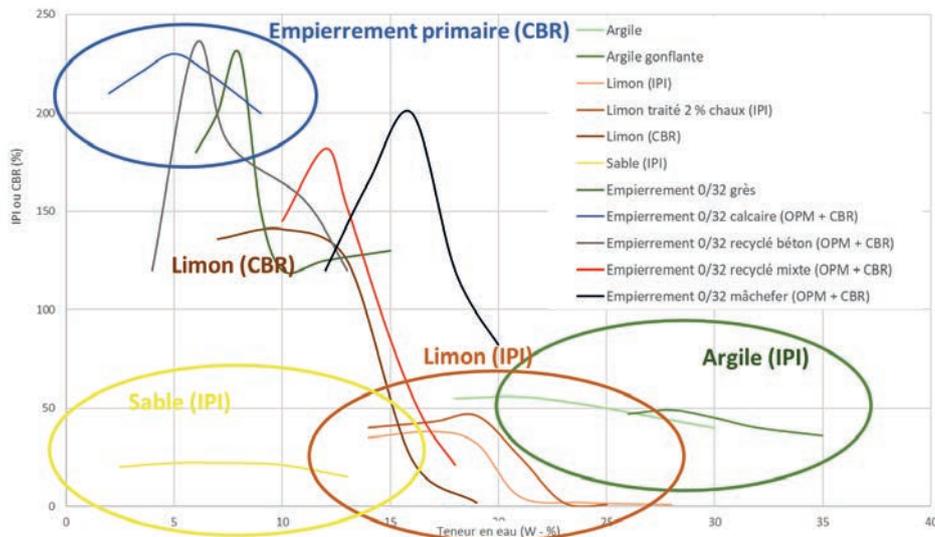
7 (CBR) ou 13,35 (IPI)

Effort de pénétration à 5 mm d'enfoncement (kN) x 100

10,5 (CBR) ou 19,93 (IPI)

La plus grande des 2 valeurs est retenue comme valeur d'indice IPI ou CBR.

En général, toutes les éprouvettes utilisées pour déterminer la courbe Proctor font l'objet d'un essai IPI ou CBR en vue d'établir une courbe qui peut être associée à la courbe Proctor.



Exemple de graphes IPI ou CBR – Teneur en eau pour différents sols et granulats (Source : JB Conseils).

Les courbes IPI et CBR se présentent également sous forme de dôme avec un sommet légèrement décalé par rapport à celui de la courbe Proctor vers une valeur légèrement inférieure de teneur en eau de 1 à 2 % pour la majorité des matériaux. Un granulat riche en particules fines se caractérise généralement par une courbe plus redressée.

5.2.2 Résistance à la compression

La résistance à la compression simple (R_c) consiste à déterminer la contrainte nécessaire pour provoquer une rupture par écrasement d'une éprouvette (*cylindrique ou cubique*) d'un matériau cohérent ou lié en l'absence de toute contrainte latérale.

REMARQUE : L'essai de compression réalisé avec des contraintes latérales est un essai triaxial.

L'essai réalisé sur un certain nombre d'échantillons, consiste à appliquer au moyen d'une presse, une pression verticale croissante sur l'échantillon jusqu'à la rupture.

Dans le cas d'un matériau lié, l'essai est réalisé selon plusieurs délais afin de permettre au liant de faire sa prise et de durcir et de suivre son évolution. Il importe de bien notifier ce délai.

La résistance à la compression R_c est alors calculée selon l'équation suivante :

$$R_c = \frac{F}{A_c} \quad \text{Avec } F : \text{ Force maximale à la rupture (N).}$$

$$A_c : \text{ Section transversale de l'éprouvette (mm}^2\text{)}$$

En général, plusieurs échantillons (*au minimum*) sont testés, les valeurs de **résistance moyenne** et de **résistance minimale** interviennent dans certains critères des cahiers des charges.

La valeur R_c permet notamment d'établir la résistance à la compression des matériaux liés (*chaux ou liant hydraulique*).

Le tableau ci-dessous reprend les principaux critères du CCT QUALIROUTES demandés pour une application en domaine routier.

Tableau Erreur ! Il n'y a pas de texte répondant à ce style dans ce document..I – Principaux critères de résistance à la compression (R_c) présents dans le CCT QUALIROUTES et quelques proposition du CRR.

Applications	QUALIROUTES	SB 250
Empierrement lié (50 – 80 kg/m ³)	-	$R_{c_{90j}}$ moyenne > 6 MPa $R_{c_{90j}}$ individuelle > 5 MPa
Sable-ciment (> 100 kg/m ³) (remplissage de fouille et enrobage de tuyaux)	$R_{c_{7j}}$ moyenne > 2 MPa Sinon $R_{c_{28j}}$ moyenne > 3 MPa	-
Sable-ciment (> 100 kg/m ³) (fondation de route)	$R_{c_{7j}}$ moyenne > 3 MPa Sinon $R_{c_{28j}}$ moyenne > 4,5 MPa	-
Béton maigre (> 100 kg/m ³) (fondation de chaussée et/ou zone immobilisation)	≥ 50 $R_{c_{90j}}$ minimale > 12 MPa	-
Béton maigre (> 100 kg/m ³) (fondation de trottoir, éléments linéaires et localisés)	≥ 50 $R_{c_{90j}}$ minimale > 15 MPa	Si M_1 support < 35 MPa $R_{c_{90j}}$ moyenne > 12 MPa $R_{c_{90j}}$ minimale > 9 MPa
Béton maigre poreux (> 200 kg/m ³)	$R_{c_{90j}}$ minimale > 13 MPa	-
Béton sec compacté (BSC 20 ou 30) (> 200 - 250 kg/m ³)	$R_{c_{90j}}$ minimale > 20 MPa (BSC 20) $R_{c_{90j}}$ minimale > 30 MPa (BSC 30)	-
Retraitement de voirie in situ (> 6 % ciment)	$R_{c_{90j}}$ moyenne > 8 MPa $R_{c_{90j}}$ minimale > 5 MPa	-
Béton de revêtement (> 350 - 400 kg/m ³)	$R_{c_{90j}}$ minimale > 40-60 MPa (selon réseau)	-

5.2.3 Résistance à la traction

L'essai de traction indirecte (R_{t}) ou essai brésilien vise à déterminer la contrainte de rupture d'une éprouvette soumise à un effort de compression appliqué sur deux génératrices opposées. Il s'agit donc d'un essai de traction car les contraintes induites sont en majorité des contraintes de traction.

6. APPLICATIONS ROUTIÈRES



Application de granulats mixtes en sous fondation routière

6.1 Introduction : CCT Qualiroutes

L'utilisation de granulats recyclés pour la construction de voiries publiques est prévue dans le CCT Qualiroutes. Au 1er janvier 2012, ce cahier des charges type a remplacé définitivement le CCT RW99 de 2004 pour tout marché de travaux d'infrastructures routières.

Les différents chapitres du CCT Qualiroutes font l'objet de révisions annuelles. Des modifications plus ou moins importantes peuvent être apportées au fil du temps. Le présent guide technique se réfère à la version du 01/01/2021 [S1]. Les différentes versions sont téléchargeables sur le site internet Qualité & Construction de la Région Wallonne.

Ce cahier des charges type permet d'encadrer l'utilisation de granulats et d'assurer une qualité nécessaire à la construction de routes durables.

Par ailleurs les divers travaux d'impétrants et de gestion de réseaux se réfèrent souvent à ce cahier des charges.

Une version consolidée éditée au 01/01/2021 intégrant l'ensemble des adaptations et mises à jour réalisées depuis 2012 est disponible ici :



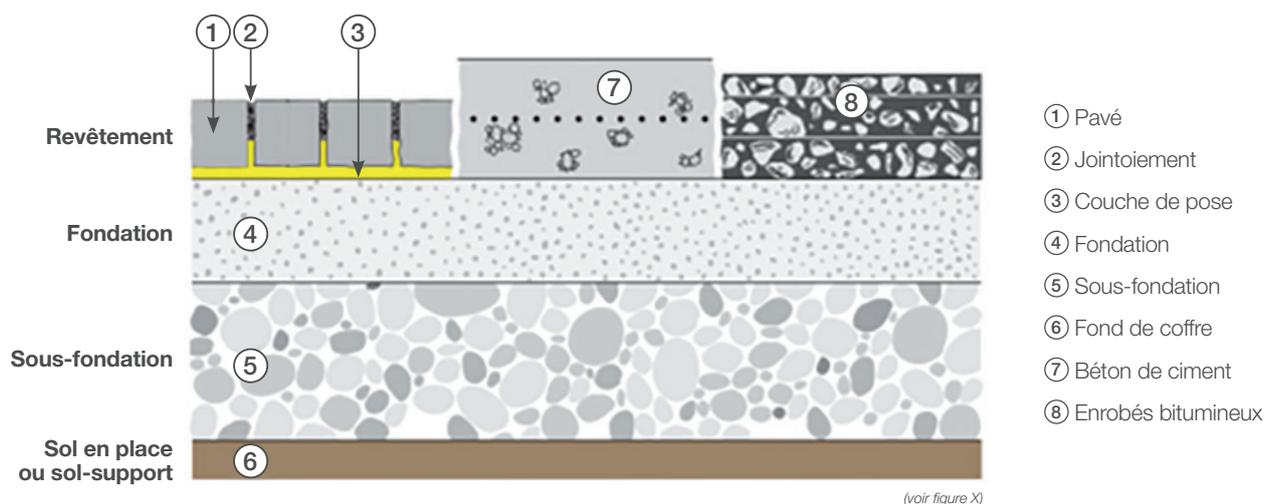
Qualité & Construction - Cahier des Charges-Type Qualiroutes (wallonie.be)

6.1.1 Terminologies du CCT Qualiroutes

Le rôle premier de toute structure routière est, grâce aux caractéristiques des matériaux choisis et à l'épaisseur des couches, de ramener la valeur des charges circulant à la surface de la chaussée à un niveau de contrainte acceptable au niveau du sol en place de telle manière que celui-ci ne se déforme pas.

La chaussée est constituée (voir figure X) de quatre éléments structurels qui sont de bas en haut :

- le sol en place ou sol-support;
- la sous-fondation;
- la fondation;
- le revêtement.



Structure routière

Les performances mécaniques de ces éléments structurels sont en principe croissantes du bas vers le haut. Chacune de ces couches remplit une fonction spécifique qui sera décrite ci-après. Dans certains cas, l'une ou l'autre couche peut être absente. Sa fonction est alors remplie par les autres éléments de la structure.

L'épaisseur des différentes couches est déterminée par un dimensionnement en fonction du trafic, des caractéristiques intrinsèques (notamment les modules d'élasticité ou de rigidité) des matériaux utilisés et de la portance du sol en place.

Les structures décrites dans le présent chapitre doivent être complétées par un système de drainage (fossés, drains, etc.) qui sert d'exutoire aux eaux infiltrées. Ceci est essentiel pour garantir la pérennité de la structure (portance du sol en place, dégâts dus au gel, etc.).

Bien que le présent guide technique soit essentiellement consacré aux granulats recyclés, il paraît utile d'indiquer ici quelques informations destinées à guider le concepteur dans le choix des autres éléments d'une structure de chaussée dans son ensemble.

6.1.1.2 Dimensionnements types suivant les réseaux routiers

Le présent chapitre reprend quelques coupes-types modèles dont les valeurs doivent être précisées lors d'une étude de dimensionnement car les valeurs peuvent varier selon la nature du sol-support, l'influence du gel et des venues d'eau au droit de la voirie.

RESEAU III : FAIBLE TRAFIC

Chaussée souple	Chaussée semi-rigide
AC 14-surf : 4 cm ou enduit/imprégnation	AC 14-surf : 4 cm
AC 20-base : 6 cm	AC 20-base : 6 cm
Fondation : 20 cm	Fondation liée : 20 cm
Sous-fondation : 30 cm	Sous-fondation : 30cm

RESEAUX I ET II : TRAFIC PLUS ÉLEVÉ

Chaussée bitumineuse épaisse	Chaussée rigide en béton
AC 14-surf : 4 à 6 cm	BAC ou dalles : 20 - 25 cm
AC 20-base ou EME : 7 à 20 cm	AC 14 inter : 5 cm
Fondation : 20-25 cm (liée ou non)	Fondation : 20 cm (liée ou non)
Sous-fondation : 30 - 40 cm	Sous-fondation : 30 cm

6.1.2 Taux de recyclage autorisés dans le CCT Qualiroutes

Le Centre de Recherche Routières a réalisé une synthèse des taux de recyclage autorisés dans le CCT Qualiroutes. Contrairement aux idées reçues, il est possible de mettre en œuvre jusqu'à 100% de granulats recyclés (sables, graves, gravillons) dans les couches de sous-fondations et de fondations.

Figure X : Taux de recyclage autorisés dans le CCT Qualiroutes



Centre de recherches routières
Ensemble pour des routes durables

Taux de recyclage autorisés dans le CCT Qualiroutes

Couche de roulement: faible

Agrégats d'enrobés bitumineux (AEB).

Couche de liaison: 10% (à froid) 20% à 50% (à chaud)

Agrégats d'enrobés bitumineux (AEB).

Fondation: 0 - 100%

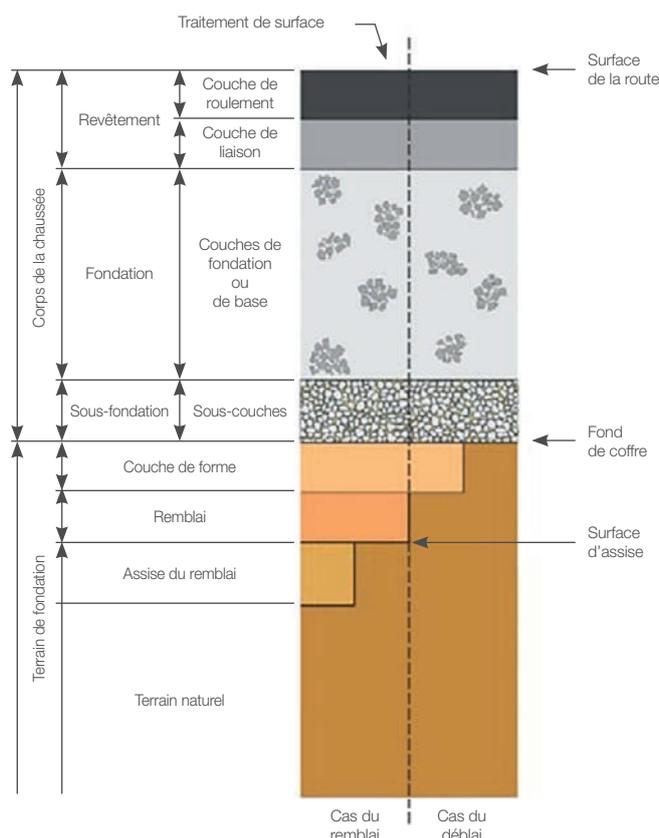
Sables de concassage de granulats recyclés et les gravillons de granulats recyclés (recyclés de béton et recyclés d'enrobés hydrocarbonés).

Sous-fondation: 0 - 100%

Sables de concassage de granulats recyclés, gravillons de granulats recyclés de béton, gravillons de granulats recyclés mixtes, gravillons de granulats recyclés de maçonnerie, gravillons de granulats recyclés d'enrobés hydrocarbonés.

Remblais: 0 - 100%

Sables de criblage de granulats recyclés et/ou de concassage de débris de granulats re-cyclés, débris de béton, de maçonnerie, de matériaux bitumineux, débris mixtes, les débris d'encrochement provenant des fondations et des sous-fondations.



6.1.3 Spécifications du CCT Qualiroutes

Le CCT Qualiroutes propose une définition spécifique des granulats recyclés dans le cadre des applications en voiries publiques.

Le tableau C4.3. présente des spécificités par rapport au tableau 1 de la PTV 406 (*chapitre 3.8 (C9)*). Les principales différences consistent en l'absence de certains types de granulats (*mélanges mixtes/hydrocarbonés et béton/hydrocarbonés*) et des exigences plus élevées sur la composition (*taux de Rb dans les mixtes et FL*). Pour résumer, les caractéristiques demandées dans le CCT Qualiroutes pour un granulat mixte de base sont équivalentes aux caractéristiques demandées pour un granulat mixte de haute qualité dans la PTV 406, il en va de même pour les granulats de béton.

6.1.3.1 Identification des granulats recyclés

Conformité suivant NBN EN 13242

Ce tableau comprend deux parties, la première exprime la composition d'un granulat recyclé suivant la norme NBN EN 13242 [B4] et fait donc référence aux applications de type granulaire.

Composition (NBN EN 13242 + A1)	C. 4.3.5.1.		C. 4.3.6.1.		C. 4.3.7.1.		C. 4.3.8.	
	Gravillons de débris de béton		Gravillons de débris mixtes		Gravillons de débris de maçonnerie		Gravillons de granulats recyclés d'enrobés hydrocarbonés	
	Teneur (%)	Catégorie	Teneur (%)	Catégorie	Teneur (%)	Catégorie	Teneur (%)	Catégorie
Rc	≥ 70	Rc ₇₀	≥ 50	Rc ₅₀	non requis	Rc _{NR}	non requis	Rc _{NR}
Rc + Ru + Rg	≥ 90	Rcug ₉₀	≥ 70	Rcug ₇₀	< 30	Rcug _{Déclarée}	< 50	Rcug _{Déclarée}
Rb	≥ 10	Rb ₁₀₋	≥ 30	Rb ₃₀₋	> 70	Rb _{Déclarée}	≤ 10	Rb ₁₀₋
Ra	≤ 5	Ra ₅₋	≤ 5	Ra ₅₋	≤ 5	Ra ₅₋	≥ 50	Ra ₅₀₋
Rg	≤ 2	Rg ₂₋	≤ 2	Rg ₂₋	≤ 2	Rg ₂₋	≤ 2	Rg ₂₋
X	≤ 1	X ₁₋	≤ 1	X ₁₋	≤ 1	X ₁₋	≤ 1	X ₁₋
FL	≤ 2	FL ₂₋	≤ 2	FL ₂₋	≤ 2	FL ₂₋	≤ 2	FL ₂₋

Rc = béton, produits en béton, mortier, éléments en béton

Ru = granulats non liés, pierre naturelle, granulats traités aux liants hydrauliques

Rb = éléments en argile cuite (ex.: briques et tuiles), éléments en silicate de calcium, béton cellulaire non flottant

Ra = matériaux bitumineux

Rg = verre

X = autres: matériaux cohérents (ex.: argile, sol) / divers: métaux (ferreux et non ferreux), bois, matière plastique et caoutchouc non flottant, plâtre

FL = matériau flottant (en volume)

La seconde partie du tableau C4.3 exprime la composition d'un granulat recyclé suivant la norme NBN EN 12620 et fait donc référence aux applications de type béton (*béton maigre (poreux), béton sec compacté et béton de revêtement*). La différence essentielle porte sur l'expression du pourcentage en débris de verre (Rg). Dans ce second tableau, le Rg est associé à la catégorie X et leur somme doit être inférieure à 1% quelque soit le sorte de gravillon.

Conformité suivant NBN EN 12620)

Composition (NBN EN 12620 + A1)	C. 4.3.5.2.		C. 4.3.6.2.		C. 4.3.7.2.	
	Gravillons de débris de béton		Gravillons de débris mixtes		Gravillons de débris de maçonnerie	
	Teneur (%)	Catégorie	Teneur (%)	Catégorie	Teneur (%)	Catégorie
Rc	≥ 70	Rc ₇₀	non requis	Rc _{NR}	non requis	Rc _{NR}
Rc + Ru	≥ 90	Rcu ₉₀	≥ 50	Rcu ₅₀	< 50	Rcu _{Déclarée}
Rb	≤ 10	Rb ₁₀₋	≤ 50	Rb ₅₀₋	> 50	Rb _{Déclarée}
Ra	≤ 5	Ra ₅₋	≤ 5	Ra ₅₋	≤ 5	Ra ₅₋
X + Rg	≤ 1	XRg ₁₋	≤ 1	XRg ₁₋	≤ 1	XRg ₁₋
FL	≤ 2	FL ₂₋	≤ 2	FL ₂₋	≤ 2	FL ₂₋

Rc = béton, produits en béton, mortier, éléments en béton**Ru** = granulats non liés, pierre naturelle, granulats traités aux liants hydrauliques**Rb** = éléments en argile cuite (ex.: briques et tuiles), éléments en silicate de calcium, béton cellulaire non flottant**Ra** = matériaux bitumineux**Rg** = verre**X** = autres: matériaux cohérents (ex.: argile, sol) / divers: métaux (ferreux et non ferreux), bois, matière plastique et caoutchouc non flottant, plâtre**FL** = matériau flottant (en volume)

6.2 Sous-fondations

Dans le CCT Qualiroutes, les sous-fondations sont définies comme la partie du corps de la chaussée (ou d'une autre partie revêtue) comprise entre le fond de coffre et la fondation, destinée à assurer une ou plusieurs des fonctions suivantes : anti-contaminante, drainante, antigel, anticapillaire et portante.



Mise en œuvre de granulats mixtes en sous-fondation de route

6.2.1 Présentation de l'application

La sous-fondation routière se définit comme la couche de la structure routière comprise entre le fond de coffre et la fondation. Ses rôles à court et long terme sont multiples.

- Assurer le drainage du corps de chaussée et l'évacuation des eaux infiltrées vers les dispositifs latéraux de drainage ;
- Éloigner le front de gel du sol sous-jacent de par son épaisseur ;
- Assurer une répartition adéquate des charges exercées par le trafic sur le sol ;
- Jouer le rôle de base stable et résistante aux engins lourds nécessaires à la mise en œuvre de la fondation et présenter une force de réaction suffisante (rôle d'enclume) lors du compactage des couches supérieures ;
- Protéger le fond de coffre et le remblai des agents atmosphériques dans l'attente de la réalisation de la chaussée ;
- Protéger la fondation contre la remontée capillaire de l'eau et contre la pénétration des particules fines du sol en place (couche anticontamination) ;
- Former une surface portante stable pour la pose de bordures de trottoirs, de caniveaux et d'autres éléments linéaires.

Le CCT Qualiroutes prévoit 4 types distincts de sous-fondation :

- La **sous-fondation de type granulaire de type 1** est constituée d'une grave ou d'un mélange discontinu de graves, de gravillons, de sables et de fines (*particules inférieures à 63 μm*) dont la taille maximale des plus gros éléments ne dépasse pas 63 mm. Il s'agit en réalité d'une adaptation de l'ancienne sous-fondation de type 1 (*valable jusqu'en 2018*) qui comportait une couche de sable surmontée d'une couche de 10 cm d'épaisseur de ce mélange discontinu. La couche de sable a été abandonnée, vu sa faible utilisation en Wallonie ;
- La **sous-fondation de type granulaire de type 2** est constituée d'une grave ou d'un mélange de graves, de gravillons, de sables et de fines (*particules inférieures à 63 μm*) dont la taille maximale des plus gros éléments ne dépasse pas 125 mm ;
- La **sous-fondation de type granulaire de type 4** est constituée d'un mélange de gravillons grossiers d'origine naturelle ou recyclés dont la taille maximale des plus gros éléments ne dépasse pas 125 mm. Cette couche est surmontée par un empierrement discontinu (*couche de finition*) de type E (*empierrement discontinu fin*) qui ferme la couche. Cette sous-fondation très pauvre en éléments fins permet d'obtenir une grande perméabilité et convient aux zones caractérisées par de fortes venues d'eau ou la présence de la nappe phréatique ;
- La **sous-fondation obtenue par traitement du sol en place**. Elle ne concerne pas l'emploi de granulats recyclés.

REMARQUE : Les différentes sous-fondations de type granulaire se distinguent par un chiffre arabe alors que les différentes fondations en empierrement se distinguent par un chiffre romain.



Mise en œuvre de granulats mixtes en sous-fondation

6.2.2 Matériaux

Les principaux granulats recyclés admis en sous-fondations de type granulaire sont :

- Les sables de concassage
- Les gravillons et graves de granulats recyclés de béton
- Les gravillons et graves de granulats recyclés mixtes
- Les gravillons et graves de granulats recyclés de maçonnerie
- Les gravillons et graves de granulats recyclés d'enrobes hydrocarbonés
- Les graves d'agrégats d'enrobés bitumineux (AEB)

Tous ces matériaux sont acceptés pour autant qu'ils répondent aux différentes exigences du CCT Qualiroutes en vigueur sur le chantier concerné. Ces exigences se situent dans les chapitres C.3.4.2 (*sable pour sous-fondation*), C.4.3 (*tableau C.4.3 selon la norme NBN EN 13242 + A1 pour la classification des recyclés*), C.4.4.1 (*gravillons pour sous-fondation*), C.5.3.2 (*agrégats d'enrobés bitumineux*), C.5.4.1 (*graves pour sous-fondation*) et F.3.2.1 (*sous-fondations de type granulaire*).

REMARQUE : Il importe de distinguer les critères repris au chapitre C (Matériaux) qui concernent les matériaux commercialisés par le producteur et/ou fournisseur des critères repris au chapitre F (Sous-fondations et fondations) qui concernent les matériaux devant être réellement mis en œuvre en sous-fondation. Ainsi, des différences entre les deux chapitres peuvent exister comme notamment le critère de teneur en fines (f). Des mélanges sont alors nécessaires.

6.2.3 Spécifications techniques

Les principaux points d'attention concernant les granulats recyclés en sous-fondation sont :

- Le **fuseau granulométrique** final doit correspondre à celui repris pour la sous-fondation donnée, afin de garantir la portance nécessaire, tout en permettant une certaine perméabilité ;
- La **teneur en fines (f)** du matériau mis en œuvre doit être telle qu'elle garantisse le rôle de drainage de la sous-fondation et qu'elle permette un certain compactage de la couche. C'est pourquoi une valeur inférieure ou égale à 7 % est requise au chapitre F.3.2.1 ;
- La **valeur en bleu de méthylène (MB)** doit être inférieure à 2,5 % afin d'éviter tout effet néfaste des argiles sur le comportement du matériau. Il convient de rappeler que cette valeur peut être influencée par la présence de particules de ciment non hydraté et la vieillissement d'un stock ;
- Les **essais Los Angeles (LA) et Micro-Deval (MDE)** doivent respecter les critères requis afin d'empêcher la production d'une quantité trop importante de fines (f) lors de la mise en œuvre de la couche et de la mise en service de la voirie ; ce qui aurait comme conséquence une diminution de la perméabilité et donc du drainage de la couche. A ce sujet, le CCT Qualiroutes exige un critère complémentaire concernant la somme MDE + LA afin d'empêcher l'emploi de granulats ayant des valeurs MDE et LA proches des valeurs limites ;
- La **sensibilité au ge-dégel** traduit le comportement du granulat à se fragmenter sous l'effet du gel et à ainsi produire des fines supplémentaires. Le CCT Qualiroutes distingue deux zones en Wallonie sur base des climats. La zone située au nord du sillon Sambre-et-Meuse est soumise à un climat atlantique plus doux alors que la zone située au sud de ce sillon est soumise à un climat continental plus rude et donc plus susceptible d'être affecté par les alternances de gel – dégel. Les critères sont donc plus stricts de ce côté ;
- La **teneur en sulfates solubles dans l'eau** doit être limitée afin d'éviter tout phénomène de gonflement par formation de l'ettringite secondaire ;
- La **stabilité volumique** doit être contrôlée afin de limiter tout risque de gonflement ultérieur.

Caractéristique	Prescription	Catégorie minimale	Commentaires
Teneur en fines (%)	≤ 4	f ₄	-
Résistance à l'usure (<i>Micro-Deval</i>)			-
• réseaux I et IIa	≤ 35	M _{DE} 35	
• réseaux I et IIa	≤ 50	M _{DE} 50	
Résistance à la fragmentation (<i>Los Angeles</i>)	≤ 40	LA ₄₀	-
Sensibilité au gel-dégel			Les granulats ayant une absorption d'eau ≤ 1,0% ou un coefficient Los Angeles ≤ 25 sont réputés conformes.
• tous réseaux (sauf IIIb) au sud du sillon Sambre & Meuse	≤ 2 ou ≤ 25	f ₂	Pour granulats naturels, recyclés et artificiels
• tous réseaux (sauf IIIb) au nord du sillon Sambre & Meuse et granulats pour sous-fondations de type 4	≤ 4 ou ≤ 10 ou ≤ 35	F ₄ ou F ₁₀ ou MS ₃₅	Application du critère F10: voir commentaire ⁽²⁾ Pour granulats naturels, recyclés et artificiels
• réseau IIIb		NR	
Stabilité volumique (%)	≤ 2	-	Pour C.4.3.4
Autres caractéristiques mentionnées à la NBN EN 13242 ⁽¹⁾	-	NR	-

(1) Les documents du marché précisent les catégories minimales auxquelles doivent répondre ces caractéristiques pour des applications spéciales.

(2) La catégorie F10 est acceptée selon la NBN EN 1367-1 pour autant qu'un essai complémentaire gel-dégel selon CME 01.24 démontre qu'il y a moins de 2 % de fines (fraction < 0,063 mm) produites au cours de cet essai ET que la somme de fines (fraction < 0,063 mm) produites au cours de cet essai et des fines présentes dans le granulat avant cycles de gel-dégel est inférieure à 5%.

6.2.4 Règles et exécution

La mise en œuvre d'une sous-fondation de type granulaire comprend les opérations suivantes :

- La **rédaction éventuelle d'un Plan d'Assurance Qualité (PAQ)** tel que défini dans les documents de référence QUALIROUTES-A-1 "Mise en place d'un système de gestion de la qualité lors de l'exécution des marchés de travaux" et A-1/6 "Complément au document de référence QUALIROUTES-A-1 pour sous fondation de type granulaire". Ce PAQ s'applique à tout chantier soumis au CCT Qualiroutes dont la surface de mise en œuvre dépasse 1 000 m². Il est facultatif pour les plus petits chantiers soumis au CCT Qualiroutes, moyennant prescriptions du cahier spécial des charges. Ce PAQ rédigé avant le démarrage des travaux doit contenir la démarche de réception à suivre selon la présence ou pas d'un marquage CE2+, ainsi que tous les moyens et actions mis en œuvre par l'entrepreneur et le pouvoir adjudicateur pour garantir et contrôler la qualité de la sous-fondation. Les contrôles comprennent le contrôle de la portance du sol-support, le contrôle régulier du matériau mis en œuvre via des examens organoleptiques (*examen visuel*), des prises d'échantillon bien spécifiques et des analyses dimensionnelles (*analyse granulométrique*) toutes les 1 000 tonnes qui doivent être réalisés par un laboratoire accrédité, ainsi que le contrôle des bons de livraison et de la portance de la sous-fondation. Ce document peut être révisé en cours de chantier ;

- La **réception technique préalable** du matériau consiste à vérifier que le matériau est conforme aux exigences du cahier des charges ;

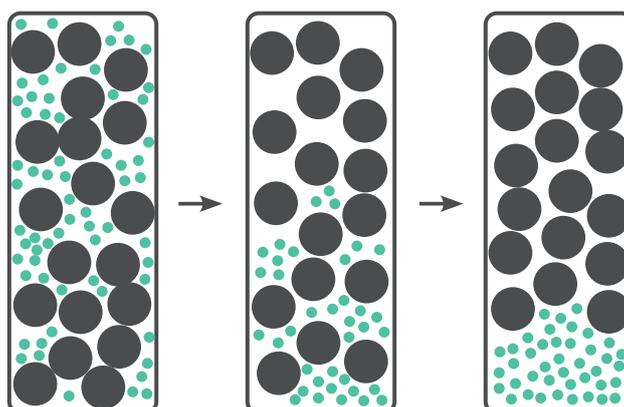
- La **mise en œuvre de la sous-fondation par temps de gel** est interdite ;

- La **vérification du fond de coffre** consiste à s'assurer de l'absence de toute trace d'eau stagnante, de matériaux indésirables (éléments grossiers, branches, corps étrangers, etc.) et de toute irrégularité de surface et protégé par un géotextile anti-contaminant ;



- L'**épandage des matériaux par couche élémentaires** dont l'épaisseur maximale ne dépasse pas 30 cm. L'épaisseur minimale ne peut être inférieure à 1,5 fois la dimension maximale des plus gros éléments de la couche. Ces épaisseurs minimales et maximales des couches élémentaires sont mentionnées dans le tableau F.3.1.1 du CCT Qualiroutes ;

- En cas de mélange, il importe d'**éviter tout phénomène de ségrégation** après livraison sur chantier et mise en œuvre qui se traduit par la présence de zones riches en fines. Celles-ci sont plus difficilement compactables et moins drainantes. En cas de ségrégation observée, le matériau doit être remélangé ;



- Il importe de **travailler à la teneur en eau optimale et homogène** afin de garantir un bon compactage de la couche. Cette teneur doit être la plus proche de l'Optimum Proctor pour garantir les meilleures performances du produit. Des opérations éventuelles d'arrosage peuvent avoir lieu. Dans le cas des recyclés qui sont des matériaux relativement poreux, il importe de laisser un certain délai de temps entre l'arrosage et le compactage afin de permettre à une partie de l'eau de s'infiltrer dans les différentes particules constituant le granulat ;

- L'**opération de compactage** doit être réalisée avec des compacteurs suffisamment puissants que pour vaincre le frottement anguleux et la texture plus rêche des différents éléments mais pas trop puissants au risque de fragmenter les éléments fragiles que sont les céramiques, les briques et ainsi de produire de nombreuses fines, rendant l'opération de compactage plus difficiles et le matériau moins drainant. Ainsi, il est recommandé d'utiliser un compacteur à cylindre vibrant de type V3 à V4 (*selon la classification française*) ou un compacteur à pneus.

- Le **nombre de passes** (*à adapter en fonction du compacteur utilisé*) doit être suffisant afin de garantir la bonne densité du matériau. D'autre part, il faut éviter tout phénomène de surcompactage vibrant. De même, un nombre important de passes au rouleau vibrant peut faire remonter l'eau souterraine. Cela se traduit par une saturation de la couche-support et une dégradation de la structure en termes de portance ;

- Procéder à des **contrôles réguliers de la portance** au moyen d'essais à la plaque statique ou dynamique pour s'assurer du compactage correct des matériaux ;

- Le **sommet de la sous-fondation** doit être libre de toute trace stagnante, de matériaux indésirables (*éléments grossiers, branches, corps étrangers, etc.*) et de toute irrégularité de surface.

6.2.5 Contrôle et essais

Les principaux contrôles pour une sous-fondation en empierrement sont :

- La **réception technique préalable** consiste à vérifier la conformité du produit ;
- Le **contrôle de la qualité tout au long de la production**. Le CCT Qualiroutes prévoit la fréquence d'essai pour un grand nombre d'essais ;
- Le **contrôle des documents techniques** (*fiche technique, bons de livraison, etc.*) ;
- Le **contrôle du niveau de surface** par rapport aux profils en long et en travers prescrits au moyen d'appareils topographiques. Des tolérances locales de 2 cm sont généralement admises ;
- Le **contrôle des irrégularités de la surface** au moyen de la règle de 3 m et d'appareils topographiques. Des tolérances locales de 2 cm sont généralement admises ;
- Le **contrôle de l'épaisseur de la couche** au moyen de sondage. Des tolérances de 10 % sont généralement demandées ;
- Le **contrôle de la portance** : Comme pour toutes les couches de la structure routière, l'essai de référence permettant de contrôler la portance de la sous-fondation est l'essai à la plaque (voir chapitre 5.3.1). Pour la couche de sous-fondation, l'essai est réalisé avec la grande plaque et le coefficient de compressibilité M1 ainsi mesuré doit être égal ou supérieur à 35 MPa.

6.2.5.1 Plan d'assurance qualité (Qualiroutes - A - 1/6)

Avant le chantier, les matériaux doivent faire l'objet d'une réception technique préalable, comprenant au minimum un contrôle documentaire ainsi qu'un contrôle organoleptique et dimensionnel chez le producteur.

Ensuite, quelques jours avant les travaux, les matériaux doivent faire l'objet d'une réception, consistant en une série d'essais préalables de conformité (*identification et granulométrie*), réalisés sur le contenu d'un seul camion. La procédure de prélèvement des matériaux est décrite dans le CME 01.24.

Finalement, pendant les travaux, un certain nombre d'essais doivent être réalisés par le producteur, si ceux-ci ne sont pas réalisés dans le cadre de la certification CE2+. Les essais concernés et leur fréquence sont précisés dans le tableau suivant (*F. 3.4.1.2.*). Pour tous les matériaux recyclés, le PAQ prévoit néanmoins un essai granulométrique et un essai d'identification toutes les 1000 tonnes.

Caractéristiques et fréquence d'essai

Caractéristique	Fréquence d'essai	Commentaires
Granularité et teneur en fines	1/1000 t avec au moins 1/chantier	-
Qualité des fines (MB)	1/1000 t avec au moins 1/chantier	-
Résistance à l'usure (micro-Deval)	1/chantier	-
Résistance à la fragmentation (Los Angeles)	1/chantier	-
Sensibilité au gel-dégel	1/chantier	-
Sulfate soluble dans l'eau	1/chantier	Uniquement pour les matériaux recyclés en contact avec une couche contenant un liant hydraulique
Stabilité volumique	1/chantier	Pour les graves et gravillons recyclée et artificiel ^o
Autres caractéristiques spécifiques (C. 4.3.1., C. 4.3.4., C. 4.3.5., C. 4.3.8., C. 4.3.13. et C. 4.3.15)	1/1000 t avec au moins 1/chantier	-

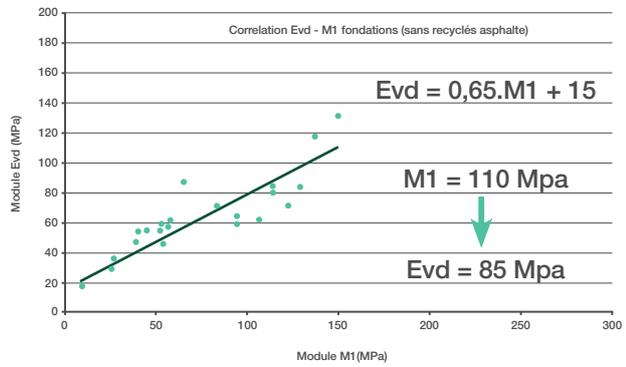
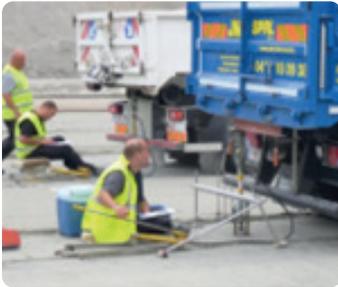
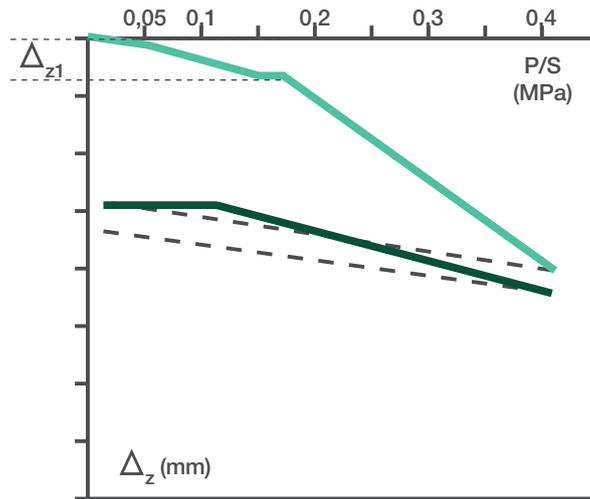
Contractuel

$$M_{E1} = 2a \frac{\Delta(P/S)}{\Delta_z}$$

Informatif

$$M_{E1} = 2a \frac{\Delta(P/S)}{\Delta_z}$$

$$M = \frac{M_{E2}}{M_{E1}}$$



6.3 Fondations



Mise en œuvre d'une fondation de voirie en granulats recyclés

Dans le CCT Qualiroutes, les fondations sont définies comme la partie du corps de la chaussée (ou d'une autre partie revêtue) comprise entre la sous-fondation (à défaut le fond de coffre) et le revêtement, et composée d'une ou plusieurs couches. La couche de fondation en contact avec la sous-fondation est parfois appelée couche de base (B. 2.8.2. FONDATION, CCT Qualiroutes (S2)).

6.3.1 Présentation de l'application

La fondation est mise en œuvre sur la sous-fondation ou éventuellement sur le fond de coffre si aucune sous-fondation n'est nécessaire. Son rôle est de constituer un support indéformable pour le revêtement et de répartir les efforts induits par le trafic jusqu'à un niveau acceptable pour la sous-fondation.

Le choix entre les divers types de fondation peut influencer l'économie globale du projet. En effet, pour un projet déterminé, les épaisseurs respectives de la fondation et du revêtement peuvent dépendre du matériau choisi pour la fondation.



Mise en oeuvre d'une fondation en empierrement recyclé

6.3.2 Matériaux

Les principaux granulats recyclés admis en fondations de type granulaire sont :

- Les sables de concassage
- Les gravillons et graves de granulats recyclés de béton
- Les gravillons et graves de granulats recyclés mixtes
- Les gravillons et graves de granulats recyclés d'enrobes hydrocarbonés
- Les graves d'agrégats d'enrobés bitumineux (AEB)

Tous ces matériaux sont acceptés pour autant qu'ils répondent aux différentes exigences du CCT Qualiroutes en vigueur sur le chantier concerné. Ces exigences se situent dans les chapitres C.3.4.2 (*sable pour sous-fondation*), C.4.3 (*tableau C.4.3 selon la norme NBN EN 13242 + A1 pour la classification des recyclés*), C.4.4.1 (*gravillons pour sous-fondation*), C.5.3.2 (*agrégats d'enrobés bitumineux*), C.5.4.1 (*graves pour sous-fondation*) et F.3.2.1 (*sous-fondations de type granulaire*).

REMARQUE : Il importe de distinguer les critères repris au chapitre C (*Matériaux*) qui concernent les matériaux commercialisés par le producteur et/ou fournisseur des critères repris au chapitre F (*Sous-fondations et fondations*) qui concernent les matériaux devant être réellement mis en œuvre en sous-fondation. Ainsi, des différences entre les critères de teneur en fines (f) existent entre les deux chapitres. Des mélanges sont alors nécessaires.

Familles	Types	Commentaires	
Empierrement non traité	Empierrement continu 0/20 ou 0/32 Types I et II (selon Qualiroutes)	ATTENTION : Nomenclature inversée entre la Wallonie et la Flandre	Souple
	Empierrement discontinu 20/63 ou 31,5/63 + couche supérieure Type III	Matériau à utiliser en cas de problème de venue d'eau Faible venue d'eau Difficile à bien compacter	
	Empierrement spécial pour parking drainant (0/20) Type IV	Pauvres en fines ($\leq 3\%$) Difficile à bien compacter	
Empierrement traité au "liant noir"	Grave - Bitume	Convient pour tout type de trafic	
Empierrement traité au "liant blanc"	Ciment Types IA et IIA	50 – 80 kg ciment/ m ³ Composition granulométrique et teneur en eau strictes Compactage très énergétique → Chantiers de grande ampleur	↓
	Laitier granulé + chaux Types IC et II C	17 – 25 % laitier granulé + 1 – 2 % chaux	
	Retraitement in situ des chaussées existantes	Permet de prolonger la durée de vie d'un empierrement non traité en voirie rural	
	Produit de scalpage traité au ciment	Uniquement pour voie rurale ou forestière, piste cyclable, plateforme de travail ou piste cavalière	
Sable (+ gravillons) traité au "liant blanc"	Sable – ciment ("sable stabilisé")	≥ 100 kg ciment Voire à trafic léger ou couche de pose d'éléments linéaires ou de pavé	↓
	Sable - laitier granulé	15 – 20 % laitier granulé + 0,5 – 2 % chaux	
Béton maigre	Béton maigre	Convient pour trafic modéré à important Effet dalle convient pour les sols peu portants Contrebutage des différents accessoires de voirie	
	Béton maigre poreux	Convient pour une structure drainante	
Béton sec compacté	Type BSC 20	200 kg ciment/m ³	
		Supporte directement le trafic circulant à sa surface Convient pour zones urbaines ou la fondation est mis en œuvre par petits tronçons successifs	
	Type BSC 30	250 kg ciment/m ³	

6.3.2.1 Fondation en empierrement



Mise en œuvre de fondation en empierrement recyclé

- Les **fondations en empierrement à granularité continue non lié de type I (0/20) ou II (0/32)** est composée d'une grave ou d'un mélange de graves, de gravillons, de sable et d'eau ;
- La **fondation en empierrement à granularité discontinue non lié de type III** est composée d'une à plusieurs couches inférieures et d'une couche de finition (couche supérieure permettant de permettant la fondation). Les couches inférieures sont formées d'un mélange de gravillons concassés, de sable et d'eau. La couche de finition peut être composée d'une empierrement continu fin (III), d'un empierrement lié au ciment (III F) ou d'un mélange de gravillon et de liant bitumineux (III G) ;
- Les **fondations en empierrement à granularité continue lié de type IA (0/20) ou IIA (0/32)** est composée d'une grave ou d'un mélange de graves, de gravillons, de sable, d'eau et de ciment dont le dosage varie entre 50 et 80 kg/m³ de ciment ;

6.3.2.2 Fondation en béton maigre



Mise en œuvre d'une fondation en béton maigre recyclé

- La **fondation en béton maigre de type I** est composée d'un mélange de gravillons et/ou graves naturels, ou gravillons de granulats recyclés de béton et/ou gravillons de granulats recyclés hydrocarbonés, de sable, de ciment (à haute résistance en sulfates (HSR) et à teneur limitée en alcalis (LA) en cas d'utilisation de concassés de débris de béton, d'eau et éventuellement de cendres volantes ou de filler et des adjuvants ;
- La **fondation en béton maigre de type II** est composée d'un mélange de laitier granulé, de ciment et d'eau. Elle ne fait pas intervenir de granulats recyclés ;
- La **fondation en béton maigre poreux** est composée d'un mélange de gravillons, de ciment et d'eau. L'absence de la fraction sableuse permet un écoulement de l'eau à travers sa structure vers un système de drainage ;

6.3.2.3 Fondation en sable-ciment

- La **fondation en sable – ciment de type I** est composée d'un mélange homogène de sable, de ciment ($> 100 \text{ kg/m}^3$), d'eau et éventuellement de cendres volantes ;
- La **fondation en sable – ciment de type II** est composée d'un mélange homogène de sable de concassage, de gravillons, de ciment ($> 100 \text{ kg/m}^3$), d'eau et éventuellement de cendres volantes. La quantité de sable est de minimum 65 % de la masse totale sable + gravillons ;
- La **fondation en sable – laitier** est composée d'un mélange 0/4 homogène de sable de concassage, de gravillons concassés, de laitier granulé (15-20 %), d'eau et de chaux vive (0,5 – 2 %, agit comme activant du laitier granulé) ;

6.3.2.4 Fondation en béton sec compacté (BSC)

Les **fondations en béton sec compacté** (BSC) est en réalité un béton maigre de type I dont la teneur en ciment est plus élevée ($> 200 \text{ kg/m}^3$ pour un BSC 20 et $> 250 \text{ kg/m}^3$ pour un BSC 30) et D_{max} du granulat $< 20 \text{ mm}$. Cette fondation est mise en œuvre à la niveleuse et au rouleau. Elle peut également servir de revêtement dans certains cas.

6.3.2.5 Fondation en produits de scalpage traités

La **fondation en produits de scalpage traités** est composé d'un mélange de graves de précriblage (roche massive ou déchets inertes de la construction). Son utilisation est prévue pour des routes de faible trafic (réseau IIIb) et quelques travaux localisés sur les réseaux I et II.

6.3.2.6 Fondation en produits de scalpage traités

La **fondation en grave-bitume** est composée soit d'un mélange à chaud de gravillons, de sables, de filler et de bitume, soit d'un mélange à chaud de grave et de bitume.

6.3.3 Spécifications techniques

Les principaux points d'attention concernant les granulats recyclés en sous-fondation sont :

- Le **fuseau granulométrique** final doit correspondre à celui repris pour la sous-fondation donnée, afin de garantir la portance nécessaire, tout en permettant une certaine perméabilité ;
- La **teneur en fines** (f) du matériau mis en œuvre doit être telle qu'elle garantisse le rôle de drainage de la sous-fondation et qu'elle permette un certain compactage de la couche. C'est pourquoi une valeur inférieure ou égale 7 % est requise au chapitre F.3.2.1 ;
- La **valeur en bleu de méthylène** (MB) qui traduit l'argilosité des fines doit être inférieure à 2,5 % afin d'éviter tout effet néfaste des argiles sur le comportement du matériau. Il convient de rappeler que cette valeur peut être influencée par la présence de particules de ciment non hydraté et la vieillissement d'un stock ;

- Les **essais Los Angeles (LA) et Micro-Deval (MDE)** doivent respecter les critères requis afin d'empêcher la production d'une quantité trop importante de fines (f) lors de la mise en œuvre de la couche et de la mise en service de la voirie ; ce qui aurait comme conséquence une diminution de la perméabilité et donc du drainage de la couche. A ce sujet, le CCT Qualiroutes exige un critère complémentaire concernant la somme MDE + LA afin d'empêcher l'emploi de granulats ayant des valeurs MDE et LA proches des valeurs limites ;
- La **sensibilité au gel – dégel** traduit le comportement du granulat à se fragmenter sous l'effet du gel et à ainsi produire des fines supplémentaires. Le CCT Qualiroutes distingue deux zones en Wallonie sur base des climats. La zone située au nord du sillon Sambre-et-Meuse est soumise à un climat atlantique plus doux alors que la zone située au sud de ce sillon est soumise à un climat continental plus rude et donc plus susceptible d'être affecté par les alternances de gel – dégel. Les critères sont donc plus stricts de ce côté ;
- La **teneur en sulfates solubles dans l'eau** doit être limitée afin d'éviter tout phénomène de gonflement par formation de l'ettringite secondaire ;
- La **stabilité volumique** doit être contrôlée afin de limiter tout risque de gonflement ultérieur.

6.3.3.1 Fondation en empierrement



Mise en œuvre d'une fondation en béton maigre recyclé

I. Gravillons pour fondation en empierrement

La granularité des différentes fractions répond aux prescriptions du tableau C. 4.4.2.2.1.a ou du tableau C.4.4.2.2.1.b

Prescriptions des gravillons pour fondation en empierrement.

Caractéristique	Prescription	Catégorie minimale	Commentaires
Teneur en fines (%)	≤ 4	f ₄	-
Coefficient d'aplatissement	≤ 50	F ₅₀	D ≤ 8
	≤ 35	F ₃₅	D W 8
Pourcentage en masse de grains semi-concassés ou entièrement concassés	90-100	C _{90/3}	-
Pourcentage en masse de grains entièrement roulés	0 à 3		
Résistance à l'usure (<i>Micro-Deval</i>)	≤ 25	M _{DE} 25	-
Résistance à la fragmentation (<i>Los Angeles</i>)	≤ 30	LA ₃₀	-
Stabilité volumique (%)	≤ 3	-	Pour C. 4.3.4 et C. 4.3.15
Sensibilité au gel-dégel	≤ 4 ou ≤ 10 ou ≤ 35	F ₄ ou F ₁₀ ou MS ₃₅	Les granulats ayant une absorption d'eau ≤ 1,0% ou un coefficient Los Angeles ≤ 25 sont réputés conformes Application du critère F10: voir commentaire ⁽²⁾ Pour granulats naturels et recyclés. ⁽³⁾
Soufre total (%)	≤ 1	S ₁	Gravillons artificiels et recyclés
Autres caractéristiques mentionnées à la NBN EN 13242 ⁽¹⁾	-	NR	-

⁽¹⁾ Les documents du marché précisent les catégories minimales auxquelles doivent répondre ces caractéristiques pour des applications spéciales.

⁽²⁾ La catégorie F10 est acceptée selon la NBN EN 1367-1 pour autant qu'un essai complémentaire gel-dégel selon CME 01.24 démontre qu'il y a moins de 2 % de fines (fraction < 0,063 mm) produites au cours de cet essai ET que la somme de fines (fraction < 0,063 mm) produites au cours de cet essai et des fines présentes dans le granulat avant cycles de gel-dégel est inférieure à 5%.

⁽³⁾ Les granulats artificiels peuvent également être acceptés pour les fondations non liées (voir Annexe II AGW du 28/02/2019 modifiant l'AGW du 14/06/2001)

- Teneur en matières organiques (suivant NBN EN 1744-1) : négatif.
- La stabilité volumique est de 5 % pour les gravillons recyclés (C. 4.3.5. et C. 4 3.8.)
- Les sulfates solubles dans l'eau (suivant NBN EN 1744-1 § 10) sont de 0,7 % dans le cas de gravillons recyclés.

Graves pour fondation en empierrement

Prescriptions des grave pour fondation en empierrement

Prescriptions techniques :

Caractéristique	Prescription	Catégorie minimale	Commentaires
Teneur en fines (%)	≤ 9	f_9	-
Qualité des fines (MB) (g/kg)	$\leq 2,5$	-	-
Coefficient d'aplatissement	≤ 50	Fl_{50}	$D \leq 8$
	≤ 35	Fl_{35}	$D > 8$
Pourcentage en masse de grains semi-concassés ou entièrement concassés	90-100	$C_{90/3}$	-
Pourcentage en masse de grains entièrement roulés	0 à 3		
Résistance à l'usure (<i>Micro-Deval</i>)	≤ 25	M_{DE25}	-
Résistance à la fragmentation (<i>Los Angeles</i>)	≤ 30	LA_{30}	-
Stabilité volumique (%)	≤ 3	-	Pour C. 4.3.4. et C. 4.3.15.
Sensibilité au gel-dégel	≤ 2	F_2	Les granulats ayant une absorption d'eau $\leq 1,0\%$ ou un coefficient Los Angeles ≤ 25 sont réputés conformes
Soufre total (%)	≤ 1	S_1	Graves artificielles et recyclées
Autres caractéristiques mentionnées à la NBN EN 13242 ⁽¹⁾	-	NR	-

⁽¹⁾ Les documents du marché précisent les catégories minimales auxquelles doivent répondre ces caractéristiques pour des applications spéciales.

Teneur en matières organiques (suivant NBN EN 1744-1): négatif.

La stabilité volumique est de 5 % pour les graves constituées de gravillons recyclés (C. 4.3.5. et C. 4.3.8.)

6.3.3.2 Fondation en béton maigre

I. Gravillons pour BM, BSC et BM Poreux

Prescriptions des gravillons BM, BSC et BM poreux

Prescriptions techniques :

Caractéristique	Prescription	Catégorie minimale	Commentaires
Résistance à l'usure (<i>Micro-Deval</i>)	≤ 25	M _{DE} 25	-
Résistance à la fragmentation (<i>Los Angeles</i>)	≤ 30	LA ₃₀	-
Coefficient d'aplatissement	≤ 50	FI ₅₀	D \leq 8
	≤ 35	FI ₃₅	D > 8
Teneur en fines	≤ 4	f ₄	-
Masse volumique réelle (Mg/m ³)	$\geq 2,00$	-	-
Sensibilité au gel-dégel	≤ 2	F ₂	Les granulats ayant une absorption d'eau $\leq 1,0\%$ ou un coefficient Los Angeles ≤ 25 sont réputés conformes
Constituants augmentant le temps de prise (min.) et réduisant la résistance du béton (%)	≤ 120 ≤ 20	Valeur de seuil	-
Sulfates solubles dans l'acide (%)	$\leq 0,8$	AS _{0,8}	Gravillons recyclés
Soufre total (%)	≤ 1	S ₁	Gravillons artificiels et recyclés
Autres caractéristiques mentionnées à la NBN EN 12620 ⁽¹⁾	-	NR	-

⁽¹⁾ Les documents du marché précisent les catégories minimales auxquelles doivent répondre ces caractéristiques pour des applications spéciales.

La stabilité volumique est de 5 % pour les gravillons recyclés (C. 4.3.5 et C. 4.3.8).

A titre d'information, les gravillons conformes à la catégorie minimale Cc IV f4 NG selon PTV 411 sont censés répondre aux prescriptions ci-dessus.

II. Graves pour béton maigre

Prescriptions des graves pour béton maigre

Prescriptions techniques :

Caractéristique	Prescription	Catégorie minimale	Commentaires
Teneur en fines (%)	≤ 11	f ₁₁	-
Qualité des fines (MB) (g/kg)	≤ 1,5	-	-
Coefficient d'aplatissement	≤ 50	FI ₅₀	D ≤ 8
	≤ 35	FI ₃₅	D > 8
Masse volumique réelle (Mg/m ³)	≥ 2,00	-	-
Résistance à l'usure (<i>Micro-Deval</i>)	≤ 25	M _{DE} 25	-
Résistance à la fragmentation (<i>Los Angeles</i>)	≤ 30	LA ₃₀	-
Sensibilité au gel-dégel	≤ 2	F ₂	Les granulats ayant une absorption d'eau ≤ 1,0% ou un coefficient Los Angeles ≤ 25 sont réputés conformes
Constituants augmentant le temps de prise (min.) et réduisant la résistance du béton (%)	≤ 120 ≤ 20	Valeur de seuil	-
Sulfates solubles dans l'eau (%)	≤ 0,2	SS _{0,2}	Grave recyclée
Soufre total (%)	≤ 1	S ₁	Grave artificielle et recyclée
Stabilité volumique (%)	≤ 3	-	Pour C. 4.3.15.
Autres caractéristiques mentionnées à la NBN EN 12620 (1)	-	NR	-

⁽¹⁾ Les documents du marché précisent les catégories minimales auxquelles doivent répondre ces caractéristiques pour des applications spéciales.

La stabilité volumique est ≤ 5 % pour les graves constituées de gravillons recyclés (C. 4.3.5 et C. 4.3.8) et pour les mâchefers traités (C. 4.3.13).

Taux de concassage

Taux de concassage :

Pourcentage de grains entièrement concassés, en masse	Pourcentage de grains entièrement concassés ou semi concassés, en masse	Pourcentage de grains entièrement roulés, en masse	Catégorie C
90-100	100	0	C100/0
30-100	90-100	0-3	C90/3

Les catégories C100/0 et C90/3 sont définies à la NBN EN 13043.

6.3.3.3 Fondation en grave-bitume

I. Gravillons pour mélanges bitumineux et asphalte coulé

La granularité des différentes fractions répond aux prescriptions du tableau C. 4.4.5.2.1.a ou du tableau C. 4.4.5.2.1.b. du CCT Qualiroutes.

Prescriptions des gravillons pour mélanges bitumineux et asphalte coulé

Spécifications techniques :

Caractéristique	Prescription	Catégorie	Commentaires
Teneur en fines (%)	≤ 2	f_2	-
Coefficient d'aplatissement	≤ 20	FI_{20}	Couches de roulement avec $8 < D \leq 16$ Couches de liaison et de reprofilage et graves-bitumes avec $D > 16$
	≤ 25	FI_{25}	Couches de roulement avec $D \leq 8$ Couches de liaison et de reprofilage et graves-bitumes avec $8 < D \leq 16$
	≤ 30	FI_{30}	Couches de liaison et de reprofilage et graves-bitumes avec $D \leq 8$
Pourcentage de grains entièrement concassés, en masse	90 à 100	$C_{100/0}$	Enrobés à squelette pierreux
	30 à 100	$C_{90/1}$	Enrobés à squelette pierreux
Pourcentage de grains entièrement concassés ou semi-concassés, en masse	100	$C_{100/0}$	Enrobés à squelette pierreux
	90 à 100	$C_{90/1}$	Enrobés à squelette pierreux
Pourcentage de grains entièrement roulés, en masse	0	$C_{100/0}$	Enrobés à squelette pierreux
	0 à 1	$C_{90/1}$	Enrobés à squelette pierreux
Résistance à la fragmentation (<i>Los Angeles</i>)	≤ 20	LA_{25}	Enrobés à squelette pierreux - réseaux I et II _a
	≤ 25	LA_{25}	Enrobés à squelette pierreux - réseaux II _b et III et enrobés à squelette sableux pour couches de roulement
	≤ 30	LA_{30}	Enrobés à squelette sableux pour couches de liaison et de reprofilage et graves-bitumes
Résistance à l'usure (<i>Micro-Deval</i>)	≤ 15	MDE_{15}	Enrobés à squelette pierreux - réseaux I et II _a
	≤ 20	MDE_{20}	Enrobés à squelette pierreux - réseaux II _b et III et enrobés à squelette sableux pour couches de roulement
	≤ 25	MDE_{25}	Enrobés à squelette sableux pour couches de liaison et de reprofilage et graves-bitumes
Masse volumique	-	Valeur déclarée	-
Coefficient de polissage accéléré (PSV)	≥ 50	PSV_{50}	Couches de roulement tous réseaux
	≥ 56	PSV_{56}	Couches de roulement sur zones accidentogènes (échangeurs, ronds-points, zones d'approche, ...) sur réseaux I et II _a
	-	PSV_{NR}	Couches de liaison et de reprofilage et graves-bitumes
Basalte "coup de soleil"	≤ 8	SB_{LA}	-
Stabilité dimensionnelle des scories d'aciéries	≤ 3,5	$V_{3,5}$	-
Autres caractéristiques mentionnées à la NBN EN 13043 ⁽¹⁾	-	-	-

⁽¹⁾ Les documents du marché précisent les catégories minimales auxquelles doivent répondre ces caractéristiques pour des applications spéciales.

II. Grave pour grave-bitume

Prescriptions de graves pour grave-bitume

Spécifications techniques :

Caractéristique	Prescription	Catégorie minimale	Commentaires
Qualité des fines (MBF)	≤ 10	MB _F 10	-
	-	MB _F NT	Si la teneur en fines est ≤ 3
Résistance à la fragmentation (<i>Los Angeles</i>)	≤ 30	LA ₃₀	-
Résistance à l'usure (Micro-Deval)	≤ 20	M _{DE} 20	D > 16
	≤ 25	M _{DE} 25	8 < D ≤ 16
Coefficient d'aplatissement	≤ 20	FI ₂₀	D > 16
	≤ 25	FI ₂₅	8 < D ≤ 16
Stabilité dimensionnelle des scories d'aciéries	$\leq 3,5$	V _{3,5}	-
Autres caractéristiques mentionnées à la NBN EN 13043 ⁽¹⁾	-	NR	-

⁽¹⁾ Les documents du marché précisent les catégories minimales auxquelles doivent répondre ces caractéristiques pour des applications spéciales.



Fondation en grave bitume

Tout comme les couches inférieures de revêtements en enrobé bitumineux, les fondations en grave-bitume peuvent contenir une teneur importante en agrégats d'enrobés bitumineux (AEB). Le taux de recyclage, défini comme la masse des agrégats d'enrobés bitumineux par rapport à la masse totale du produit, peut atteindre des valeurs maximales 10 à 50% (F. 4.10.2.2.). Les conditions déterminant la teneur maximale en recyclés sont identiques à celles qui ont été définies pour les couches de liaison.

6.3.4 Règles et exécution

Les modalités de mise en œuvre d'une fondation dépendent du type de fondation appliquée. Le présent chapitre distingue ainsi 5 familles de fondation :

- Les fondations en empierement non lié
- Les fondations en empierement lié (grave et sable) et en produits de scalpage traités
- Les fondations en béton maigre (poreux) et béton sec compacté (BSC)
- Le retraitement in situ de voirie existante
- La fondation en grave-bitume

6.3.4.1 Fondations en empierement non lié

Cette famille regroupe les fondations de type I, II, III et IV.

Les modalités sont similaires à celles d'une sous-fondation, à quelques exceptions près :

- La **mise en œuvre de la fondation par temps de gel ou en présence de fortes précipitations** est interdite ;
- La **vérification de la sous-fondation** consiste à s'assurer de l'absence de toute trace d'eau stagnante, de matériaux indésirables (éléments grossiers, branches, corps étrangers, etc.) et de toute irrégularité de surface et à vérifier sa portance ($M1 > 35 \text{ MPa}$) ;
- L'**épandage mécanique des matériaux par couche élémentaires** dont l'épaisseur varie entre 8 et 15 cm. L'épaisseur minimale ne peut être inférieure à 1,5 fois la dimension maximale des plus gros éléments de la couche. L'épandage de la dernière couche peut se faire au moyen d'un finisseur ;
- En cas de mélange, il importe d'**éviter tout phénomène de ségrégation** après livraison sur chantier et mise en œuvre qui se traduit par la présence de zones riches en fines. Celles-ci sont plus difficilement compactables et moins drainantes. En cas de ségrégation observée, le matériau doit être remélangé ;
- Il importe de **travailler à la teneur en eau optimale et homogène** afin de garantir un bon compactage de la couche. Cette teneur doit être la plus proche de l'Optimum Proctor pour garantir les meilleures performances du produit. Des opérations éventuelles d'arrosage peuvent avoir lieu. Dans le cas des recyclés qui sont des matériaux relativement poreux, il importe de laisser un certain délai de temps entre l'arrosage et le compactage afin de permettre à une partie de l'eau de s'infiltrer dans les différentes particules constituant le granulat ;
- L'**opération de compactage** doit être réalisée avec des compacteurs suffisamment puissants que pour vaincre le frottement anguleux et la texture plus rêche des différents éléments mais pas trop puissants au risque de fragmenter les éléments fragiles que sont les céramiques, les briques et ainsi de produire de nombreuses fines, rendant l'opération de compactage plus difficiles. Ainsi, il est recommandé d'utiliser un compacteur à cylindre vibrant de type V3 à V4 (selon la classification française) et/ou un compacteur à pneus.
- Le **nombre de passes** (à adapter en fonction du compacteur utilisé) doit être suffisant afin de garantir la bonne densité du matériau. D'autre part, il faut éviter tout phénomène de surcompactage vibrant. De même, un nombre important de passes au rouleau vibrant peut faire remonter l'eau souterraine. Cela se traduit par une saturation de la couche-support et une dégradation de la structure en termes de portance ;
- Procéder à des **contrôles réguliers de la portance** au moyen d'essais à la plaque statique ou dynamique pour s'assurer du compactage correct des matériaux ;
- Le **sommet de la fondation** doit être libre de toute trace stagnante, de matériaux indésirables (éléments grossiers, branches, corps étrangers, etc.) et de toute irrégularité de surface ;
- Dans le cas d'une **fondation en empierement à granularité discontinue non lié de type III**, la fermeture de la couche supérieure passe, soit par la mise en œuvre d'une couche de finition dont l'épaisseur est de 8 cm, soit par un mélange en centrale du complexe (cas de la fondation III E).

6.3.4.2 Fondations en empierrement lié et en produits de scalpage liés

Cette famille regroupe les fondations de type IA, IIA, les fondation en sable lié (ciment ou laitier) et la fondation en produits de scalpage traité.

Les principales modalités de mise en œuvre sont les suivantes :

- La **réception technique préalable** du mélange consiste à vérifier que le mélange est conforme aux exigences du cahier des charges. Il importe de s'assurer de la teneur en fines qui comprend également la teneur en ciment et de la bonne continuité de la granulométrie ;
- La **mise en œuvre de la fondation par temps hivernales ou pluvieux** est interdite ;
- La **vérification de la sous-fondation** consiste à s'assurer de l'absence de toute trace d'eau stagnante, de matériaux indésirables (*éléments grossiers, branches, corps étrangers, etc.*) et de toute irrégularité de surface et à vérifier sa portance ($M1 > 35 \text{ MPa}$) ;
- Les **mélanges sont effectués en centrale** et leur **transport s'effectue par camions bâchés** ;
- Les **mélanges frais doivent être mis en œuvre, compactés, contrôlés et éventuellement modifiés endéans les 4 heures** après le mélange du ciment avec l'eau car au-delà de ce délai, le ciment commence à cristalliser (prise du ciment). Lors de la période de prise qui dure entre 1 et 7 jours, les éventuelles vibrations liées à la circulation d'engins peuvent arrêter la prise et réduire ainsi fortement les résistances du mélange ;
- L'**épandage mécanique des matériaux par couche élémentaires** dont l'épaisseur varie entre 8 et 15 cm pour un empierrement et 8 et 20 cm pour un sable-ciment. L'épaisseur minimale ne peut être inférieure à 1,5 fois la dimension maximale des plus gros éléments de la couche. L'épandage de la dernière couche peut se faire au moyen d'un finisseur ;
- En cas de mélange, il importe d'**éviter tout phénomène de ségrégation** après livraison sur chantier et mise en œuvre qui se traduit par la présence de zones riches en fines. Celles-ci sont plus difficilement compactables. En cas de ségrégation observée, le matériau doit être remélangé ;
- Il importe de **travailler à la teneur en eau optimale et homogène** afin de garantir un bon compactage de la couche. Bien que non exigée dans le CCT Qualiroutes, le CRR prescrit d'avoir une courbe Proctor du mélange au début du chantier. Cette teneur doit être la plus proche de l'Optimum Proctor pour garantir les meilleures performances du produit. Il est généralement conseillé de travailler avec une teneur en eau comprise entre -1,0 et + 1,0% de l'Optimum Proctor modifié (OPM). Des opérations éventuelles d'arrosage peuvent avoir lieu. Dans le cas des recyclés qui sont des matériaux relativement poreux, il importe de laisser un certain délai de temps entre l'arrosage et le compactage afin de permettre à une partie de l'eau de s'infiltrer dans les différentes particules constituant le granulat ;
- L'**opération de compactage** doit être réalisée avec des compacteurs suffisamment puissants que pour vaincre le frottement anguleux et la texture plus rêche des différents éléments mais pas trop puissants au risque de fragmenter les éléments fragiles que sont les céramiques, les briques et ainsi de produire de nombreuses fines, rendant l'opération de compactage plus difficiles et le matériau moins drainant. Ainsi, il est recommandé d'utiliser un compacteur à cylindre vibrant de minimum 14 tonnes (type V3 à V4 selon la classification française) et un compacteur à pneus avec une charge minimum de 20 tonnes. Le compactage consiste à passer d'abord le compacteur à rouleau afin de compacter la partie inférieure de la couche et ensuite le compacteur à pneus pour le compactage de la couche supérieure ;



- Le **nombre de passes** (à adapter en fonction du compacteur utilisé) doit être suffisant afin de garantir la bonne densité du matériau. D'autre part, il faut éviter tout phénomène de surcompactage vibrant. De même, un nombre important de passes au rouleau vibrant peut faire remonter l'eau souterraine. Cela se traduit par une saturation de la couche-support et une dégradation de la structure en termes de portance ;
- Procéder à des **contrôles réguliers de la portance** au moyen d'essais à la plaque statique ou dynamique pour s'assurer du compactage correct des matériaux frais. Par la suite, des essais de résistance à la compression simple peuvent être exigés ;
- Le **sommet de la fondation** doit être libre de toute trace stagnante, de matériaux indésirables (*éléments grossiers, branches, corps étrangers, etc.*) et de toute irrégularité de surface ;
- Une **couche de protection contre la dessiccation du matériau** doit être mise en œuvre le plus rapidement possible après la mise en place de la fondation ;
- Des **joints de préfissuration** peuvent être requis dans le cas d'une fondation en sable-ciment de type II ;
- Toute **circulation est interdite sur le sable stabilisé au ciment** pendant une période de 7 jours qui suit la mise en œuvre.

6.3.4.3 Fondations en béton maigre (poreux) et béton sec compacté (BSC)

Cette famille regroupe les fondations en béton maigre, béton maigre poreux et béton sec compacté.

Les principales modalités de mise en œuvre sont les suivantes :

- La **réception technique préalable** du mélange consiste à vérifier que le mélange est conforme aux exigences du cahier des charges ;
- Une **étude de formulation** est généralement exigée avant de démarrer les travaux. Elle comprend la nature et le dosage des différents composants, la consistance du béton frais, la masse volumique du béton à l'état sec et l'emplacement de la centrale à béton ;
- La **mise en œuvre de la fondation par temps hivernales ou pluvieux** est interdite ;
- La **vérification de la sous-fondation** consiste à s'assurer de l'absence de toute trace d'eau stagnante, de matériaux indésirables (*éléments grossiers, branches, corps étrangers, etc.*) et de toute irrégularité de surface et à vérifier sa portance ($M1 > 35 \text{ MPa}$) ;
- Les **mélanges sont effectués en centrale** et leur transport s'effectue par camions bâchés, voire par camion malaxeur avec l'accord du fonctionnaire dirigeant ;
- La **mise en œuvre du béton est faite mécaniquement en une seule couche**. Dans le cas de fondation sous éléments linéaires préfabriqués et de trottoir, l'épandage du béton peut être exécuté manuellement. Le béton sec compacté est mis en œuvre à la niveleuse et au rouleau ;
- Une **couche de protection contre la dessiccation du matériau** doit être mise en œuvre le plus rapidement possible après la mise en place de la fondation ;
- Le **béton doit être mis en œuvre, compacté et protégé contre la dessiccation endéans les 2 heures qui suivent sa fabrication** car au-delà de ce délai, le ciment commence à cristalliser (*prise du ciment*) ;
- Le **sommet de la fondation** doit être libre de toute trace stagnante, de matériaux indésirables (*éléments grossiers, branches, corps étrangers, etc.*) et de toute irrégularité de surface ;
- Des **joints de préfissuration** sont requis et précisés dans le cahier spécial des charges ;
- Toute **circulation est interdite sur le béton** pendant une période de 7 jours qui suit la mise en œuvre.

6.3.4.4 Retraitement in situ de voirie existante

Cette famille regroupe la fondation retraitée in situ.

Les principales modalités d'exécution sont les suivantes :

- Un **diagnostic de la structure existante** permet de vérifier qu'il n'y pas de matériau lié ;
- Une **étude de formulation** doit permettre notamment d'obtenir une courbe granulométrique spécifique du mélange final (*courbe de Talbot*) à partir de la granulométrie du matériau en place broyé. Un apport éventuel en granulat (naturel ou recyclé) peut être envisagé si une fraction granulaire manque (*matériau d'apport*) ou si l'épaisseur n'est pas garantie. Cette étude fixe également la courbe Proctor et le dosage en ciment nécessaire pour respecter les critères de résistance à la compression ($R_{c_{8jours}} \geq 8 \text{ MPa}$) ;
- La **mise en œuvre de la fondation par temps hivernales ou pluvieux** est interdite ;
- Les **principales opérations de retraitement** concernent le nettoyage de la surface à traiter, le fraisage éventuel du revêtement hydrocarboné et des éléments grossiers, la mise en place des matériaux d'apport, l'épandage du liant, l'arrosage éventuel, le malaxage des différentes couches, le compactage, la finition et la protection contre la dessiccation ainsi que la réalisation des joints de préfissuration ;
- Le **sommet de la fondation** doit être libre de toute trace stagnante, de matériaux indésirables (*éléments grossiers, branches, corps étrangers, etc.*) et de toute irrégularité de surface ;
- La **circulation des engins légers** ($\leq 3,5 \text{ t}$) est admise 4 heures après la mise en œuvre de la protection. Le trafic normal n'est admis qu'après la pose du revêtement ou de la couche de surface.

6.3.4.5 Fondations en grave-bitume (GB)

Cette famille comporte la fondation en grave-bitume.

Il s'agit d'un mélange à chaud de graves et de bitume. Il est possible d'incorporer entre 10 et 20 % d'agrégats d'enrobés bitumineux selon la température du mélange et le réseau.

Deux types existent : le GB 20-1 est à base d'une grave 0/20 et le GB 14-1 est à base d'une grave 0/14.

Les principales modalités de mise en œuvre sont liées dans le CCT Qualiroutes à la mise en œuvre d'un revêtement de type AC-20 base3-1 et sont les suivantes :

- La **réception technique préalable** du mélange consiste à vérifier que le mélange est conforme aux exigences du cahier des charges. Il faut veiller à respecter le fuseau granulométrique ;
- Une **étude de formulation** est généralement exigée avant de démarrer les travaux. Elle comprend la nature et le dosage des différents composants ainsi que les caractéristiques physiques et mécaniques du mélange ;
- La **mise en œuvre de la fondation par temps hivernales ou pluvieux** est interdite ;
- La **vérification de la sous-fondation** consiste à s'assurer de l'absence de toute trace d'eau stagnante, de matériaux indésirables (*éléments grossiers, branches, corps étrangers, etc.*) et de toute irrégularité de surface ;
- La réalisation d'**essais à la plaque statique belge** sur le support permet de distinguer deux situations : 1) Le cas où $M1 \geq 35 \text{ MPa}$ et 2) Le cas où $M1 > 70 \text{ MPa}$ (*voir paragraphe 6.3.5*) ;
- Le **nettoyage sous pression** (*min. 5 MPa*) du support suivi d'un fraisage éventuel permet de garantir une bonne adhésion de la grave-bitume sur le support ;
- La **pose d'une couche de collage** (*émulsion de bitume*) doit être réalisée sauf si le support est un empierrement non lié et être suivie par une protection au lait de chaux afin d'éviter l'arrachement de la couche de collage par les roues des camions ;

- Les **mélanges sont effectués en centrale** et leur **transport s'effectue par camions bâchés à benne basculante**. Le versage doit se faire directement dans le finisseur ou dans une zone tampon ;
- La **mise en œuvre du mélange grave – bitume** doit s'opérer dans un domaine de température compris entre 140 et 170°C au moyen d'un finisseur muni de dispositifs d'épandage, de répartition, de précompactage et de réglage. L'approvisionnement doit être régulier. Tout arrêt provisoire doit faire l'objet d'un joint spécifique ;
- Le **compactage** doit être réalisé par un compacteur à rouleau vibrant de masse linéaire supérieure ou égale à 2500 kg/ m et un compacteur à pneus. Le compactage se termine par le passage du compacteur à rouleau non vibrant. Après le compactage, la température doit être supérieure à 100 °C ;
- Des **joints** sont requis et précisés dans le cahier spécial des charges ;
- Le **sommet de la fondation** doit être libre de toute trace stagnante, de matériaux indésirables (*éléments grossiers, branches, corps étrangers, etc.*) et de toute irrégularité de surface ;

6.3.5 Contrôle et essais

Contrôle de la portance par l'essai à la plaque :

La portance de la fondation est déterminée par l'essai à la plaque belge (*petite plaque - 200 cm² - voir chapitre 5.3.1*). Un coefficient de compressibilité M1 supérieur ou égal à 110 MPa est requis.

La seule exception concerne les fondations en produits de scalpage traités, autorisées uniquement pour le réseau IIIb, et pour lesquelles le coefficient de compressibilité minimal à atteindre est de 80 MPa.

Résistance en compression des fondations liées :

Le contrôle de performance des fondations liées au ciment (*fondations en sable-ciment, béton maigre, béton maigre poreux ou béton sec compacté*) porte sur une mesure de la résistance en compression simple. Cette mesure est réalisée sur carottes de 100 cm² à au moins 90 jours d'âge et prélevées au minimum 8 jours après la pose de la fondation.

Les résistances individuelles R'bi ainsi mesurées doivent être supérieures ou égales à

- 12 MPa pour les fondations en béton maigre
- 13 MPa pour les fondations en béton maigre poreux
- 20 ou 30 MPa pour les fondations en BSC20 ou BSC30
- 12 MPa pour les fondations en sable-ciment de type II

Pour les fondations en sable-ciment de type I, la vérification porte sur la résistance moyenne à la compression R'bm à 7 jours d'âge sur trois éprouvettes, qui doit être supérieure à 3 MPa à 7 jours ou supérieure à 4.5 Mpa à 28 jours.

Pour les fondations en sable-ciment de type I et de type II, la portance de 110 MPa à la plaque doit également être atteinte avant la prise du liant.

Les principaux contrôles pour une fondation sont :

- La **réception technique préalable** consiste à vérifier la conformité du produit ou du mélange ;
- Le **contrôle de la qualité tout au long de la production**. Le CCT Qualiroutes prévoit la fréquence d'essais pour un grand nombre d'essais ;
- Le **contrôle des documents techniques** (*fiche technique, bons de livraison, etc.*) ;
- Le **contrôle du niveau de surface** par rapport aux profils en long et en travers prescrits au moyen d'appareils topographiques. Des tolérances locales de 2 cm sont généralement admises ;
- Le **contrôle des irrégularités de la surface** au moyen de la règle de 3 m et d'appareils topographiques. Des tolérances locales de 2 cm sont généralement admises ;
- Le **contrôle de l'épaisseur de la couche** au moyen de sondage ou d'éprouvettes prélevées. Des tolérances de 10 % sont généralement demandées ;

- Le **contrôle de la portance** concerne les fondations en empierrement lié ou non et se fait principalement au moyen de l'essai à la plaque statique belge, comme l'exige le CCT Qualiroutes. Le coefficient de compressibilité M1 doit être égal ou supérieur à 110 MPa ($M1 > 110 \text{ MPa}$). Des valeurs plus faibles de M1 peuvent être demandées dans certains cas (*terre-plein ou zones de parking en dehors de la chaussée*) si l'épaisseur de la couche est inférieure à 20 cm. Dans certains cas (*espace confiné, etc.*), des essais à la plaque dynamique allemande peuvent être réalisés. Bien que non reconnu par le CCT Qualiroutes mais bien par le cahier des charges de la Région Flamande, une valeur Evd de 85 MPa peut être adoptée selon une étude menée par le CRR.
- Le **contrôle de la résistance à la compression simple** sur des carottes prélevées dans la fondation est exigé pour une majorité de fondation lié au ciment (*sable-ciment, béton maigre (poreux), béton sec compacté, produit de scalpage traité, retraitement in situ*). Les principales valeurs de critères sont reprises dans le tableau ci-dessus ;
- Le **contrôle d'une fondation en grave-bitume** requiert la mesure du pourcentage de vides mesurés sur carottes et de la compacité relative afin de s'assurer que le mélange a bien été compacté. Dans le cas où la portance du support n'atteint pas 70 MPa, les prescriptions liés au contrôle ne sont mesurées que sur les 6 cm supérieurs de la couche de grave-bitume.

6.4 Revêtements

6.4.1 Présentation de l'application

Le revêtement est la couche superficielle de la structure routière en contact direct avec les différents véhicules. Ses principaux rôles sont les suivants :

- Garantir la sécurité et le confort des usagers ;
- Résister aux différents agents extérieurs de dégradation (trafic et conditions climatiques) ;
- Disperser au maximum les contraintes superficielles.

Le revêtement doit donc posséder des caractéristiques intrinsèques d'indéformabilité, de non-fissurabilité, de cohésion et, le cas échéant, d'imperméabilité, de telle manière qu'il puisse résister aux effets directs et indirects (niveau des contraintes) des diverses actions extérieures, et ce le plus durablement possible de manière à assurer aux usagers et à l'environnement un niveau de sécurité et de confort compatible avec les sollicitations envisagées.

6.4.2 Matériaux

Le CCT Qualiroutes prévoit différents types de revêtement :

6.4.2.1 Le revêtement hydrocarboné

Le **revêtement hydrocarboné** est un mélange de sable, de gravillons, de graves et de filler lié par un liant bitumineux. Il existe une grande diversité de revêtement hydrocarboné. Ce type de revêtement est aisément recyclable ;

6.4.2.2 Le revêtement en béton de ciment

Le **revêtement en béton** de ciment est un mélange de sable et de gravillons lié au ciment. Il comprend principalement le béton (armé ou non) continu et les dalles de béton. Les granulats recyclés ne sont pas acceptés dans le CCT Qualiroutes pour ce type de revêtement. Il est aisément recyclable à l'exception du béton armé ;

6.4.2.3 Le revêtement en dalle et pavé

Le **revêtement en dalle et pavé** est composé d'un ensemble de dalles et de pavés de différentes nature (béton, pierre, terre cuite) reposant sur un lit de pose. Les granulats recyclés ne sont pas acceptés dans le CCT Qualiroutes pour ce type de revêtement ;

6.4.2.4 Le revêtement granulaire

Le **revêtement granulaire** est composé d'un mélange de gravillons ou de graves naturels (dolomie et schiste rouge) lié ou non. Une application avec des granulats recyclés concerne les pistes provisoires de chantier.

6.4.3 Spécifications techniques

Les seuls granulats recyclés admis actuellement en revêtement par le CCT Qualiroutes sont les graves d'agrégats d'enrobés bitumineux (AEB)

Ces matériaux sont acceptés pour autant qu'ils répondent aux différentes exigences du CCT Qualiroutes en vigueur sur le chantier concerné. Ces exigences se situent dans les chapitres C.4.4.5 (*gravillons pour mélange bitumineux et asphalte coulé*) C.5.3.2 (*agrégats d'enrobés bitumineux*), C.5.4.6 (*graves pour enrobé bitumineux*) et G (*tous types de revêtement*).

Les principaux points d'attention concernant les granulats recyclés en fondation sont :

- Le **fuseau granulométrique** final doit correspondre à celui repris pour le revêtement donné ;
- La **teneur en fines** (f) du matériau mis en œuvre doit être telle qu'elle garantisse un certain compactage de la couche, une bonne adhésion du liant sur les éléments grossiers ainsi qu'une bonne ouvrabilité du béton ;
- La **valeur en bleu de méthylène** (MB) doit être inférieure à 1,5 % pour un revêtement en béton afin d'éviter tout effet néfaste des argiles sur le comportement du matériau. Dans le cas d'une application en revêtement hydrocarboné, c'est la valeur en bleu de méthylène sur fines (MBF) qui importe. Il convient de rappeler que cette valeur peut être influencée par la présence de particules de ciment non hydraté et la vieillissement d'un stock ;
- L'**angularité du sable** (Ecs) et le **coefficient de polissage accéléré** (PSV) doivent être contrôlés afin de s'assurer que la forme des éléments sableux (Cx/y) permette un compactage optimal de la couche, une certaine rugosité de surface et une bonne résistance à l'usure ;
- La **masse volumique réelle** des graves et gravillons doit être déclarée.

6.4.4 Règles et exécution

Les modalités de mise en œuvre d'un revêtement dépendent du type de revêtement appliquée. Le présent chapitre distingue ainsi 2 familles de revêtement : le revêtement hydrocarboné et le revêtement en béton.

6.4.4.1 Revêtement bitumineux

Dans le cas de revêtements en enrobés, l'utilisation des agrégats d'enrobés bitumineux (AEB) est permise dans le CCT Qualiroutes pour les couches inférieures du revêtement : couches de liaison et de reprofilage (AC-base) ou enrobés à module élevé (EME). Le taux maximum de recyclage (proportion de liant provenant du recyclé) est de 10% dans le cas d'un recyclage à froid et 20% dans le cas d'un recyclage à chaud. Cette dernière valeur peut même être augmentée à 50% si les agrégats recyclés utilisés sont déjà stockés et identifiés sur le site de production, ou s'ils sont directement issus du chantier concerné (G. 2.2.2.1.4).

6.4.4.2 Revêtement en béton

Dans le revêtement en béton proprement dit, Qualiroutes n'autorise actuellement pas l'incorporation de cycles de béton. En Flandre, le SB250 autorise la substitution de granulats de béton de qualité supérieure (hoogwaardige betongranulaat) dans les structures cyclables (bouwklasse BF) ainsi que dans la couche inférieure des revêtements placés en deux couches, avec un taux maximum de substitution égal à 20% de la fraction pierreuse.

Les agrégats d'enrobés bitumineux (AEB) peuvent être intégrés dans la couche sandwich en enrobé (AC-inter), avec une proportion pouvant s'élever jusqu'à 10 à 50%, sous les mêmes conditions que pour les couches de liaison en enrobé.

6.5 Remblais

En région wallonne, le domaine routier public est essentiellement conditionné au respect du CCT Qualiroutes. Cependant, il existe de nombreux espaces propices à l'initiative technique dans ces matières. Le centre de recherche routière ainsi que le SPW MI sont eux-mêmes souvent porteur de projets innovants aux côtés des initiatives privées. Les nécessaires besoins de durabilité en matière de voiries publiques entraînent des délais évidents avant l'intégration des innovations prometteuses au sein du cahier des charges type. Néanmoins, la dynamique actuelle se révèle positive et le rythme de révision du Qualiroutes rend possible son adaptation à l'innovation. Les points ci-dessous reprennent de manière non-exhaustive les principales applications routières innovantes impliquant des matériaux recyclés développées ces dernières années.

6.5.1 Définition et rôle du remblai

Le remblai se définit comme le résultat d'un apport de matériaux meubles suite à une opération de terrassement. Son principal rôle est de fournir un certain volume et garantir une certaine portance afin de pouvoir être circulaire et éventuellement y établir la structure routière.

6.5.2 Types de remblai

Il existe différents types de remblai :

- Le **remblai général** est généralement recouvert par l'ensemble de la voirie. Il permet notamment d'élever la structure routière par rapport au niveau topographique de départ ;
- Le **remblai de tranchée** concerne une partie de la voirie. Il recouvre généralement des impétrants ;
- Le **remblai technique** est un remblai situé à proximité d'un ouvrage d'art (*pont, bâtiment, etc.*). Ses propriétés doivent permettre de passer progressivement des caractéristiques élevées de l'ouvrage d'art à celles plus faibles du massif avoisinant afin d'éviter un point dur, source de nombreuses dégradations (*fissures, tassement, etc.*) ;
- Le **remblai topographique** est un remblai ne devant pas supporter de structure routière mais dont l'objectif principal est de niveler les pentes topographiques. Il requiert de très faibles exigencesLe remblai en Matériau Auto-compactant Réexcavable (MAR) (*voir chapitre 6.6*) est un remblai particulier composé d'un mélange lié pouvant se mettre en place sans moyen traditionnel de compactage et qui peut être réexcavé avec des moyens légers. Ses applications sont nombreuses. Ces matériaux ont également fait l'objet d'un guide de bonnes pratiques rédigé par Feredeco, le CSTC, le CRR et la Région Wallonne et sont téléchargeables sur internet.
- Le **remblai en Matériau Autocompactant Réexcavable (MAR)** (*voir chapitre 6.6*) est un remblai particulier composé d'un mélange lié pouvant se mettre en place sans moyen traditionnel de compactage et qui peut être réexcavé avec des moyens légers. Ses applications sont nombreuses. Ces matériaux ont également fait l'objet d'un guide de bonnes pratiques rédigé par Feredeco, le CSTC, le CRR et la Région Wallonne et sont téléchargeables sur internet.

6.5.3 Spécifications techniques

Ce type d'application fait intervenir des matériaux à très faible valeur ajoutée mais nécessite d'importants volumes de matériaux.

Les principaux granulats recyclés admis en remblai généraux et autres sont :

- Les sables de criblage et les sables de concassage de débris de granulats recyclés
- Les gravillons et graves de granulats recyclés de béton
- Les gravillons et graves de granulats recyclés mixtes
- Les gravillons et graves de granulats recyclés de maçonnerie
- Les gravillons et graves de granulats recyclés d'enrobes hydrocarbonés
- Les débris d'enrochement provenant des fondations et des sous-fondation
- Les matériaux acceptables en fondation et sous-fondation

Tous ces matériaux sont acceptés pour autant qu'ils répondent aux différentes exigences du CCT Qualiroutes en vigueur sur le chantier concerné. Ces exigences se situent dans les chapitres C.2.2 (*sols pour remblai*), E.3.3 (*remblais généraux*), E.3.7 (*Matériaux autocompactants réexcavables – MAR*) et E.5.2 (*remblai de tranchée*).

Les principaux points d'attention concernant les granulats recyclés en remblai sont :

- La **dimension maximale des éléments** ne doit pas dépasser 2/3 de l'épaisseur de la couche après compactage ;
- Il ne peut y avoir plus de 10 % d'**éléments dont la dimension dépasse 1/3 de l'épaisseur de la couche** après compactage ;
- La **teneur conventionnelle en matière organique** (*attaque à l'eau oxygénée*) doit être inférieure ou égale à 1 % afin d'éviter des modifications de structure suite à l'évolution de la matière organique ;

Le **gonflement** doit être inférieur ou égal à 5 %.

6.6 Matériaux autocompactants réexcavables (MAR)

6.6.1 Présentation de l'application

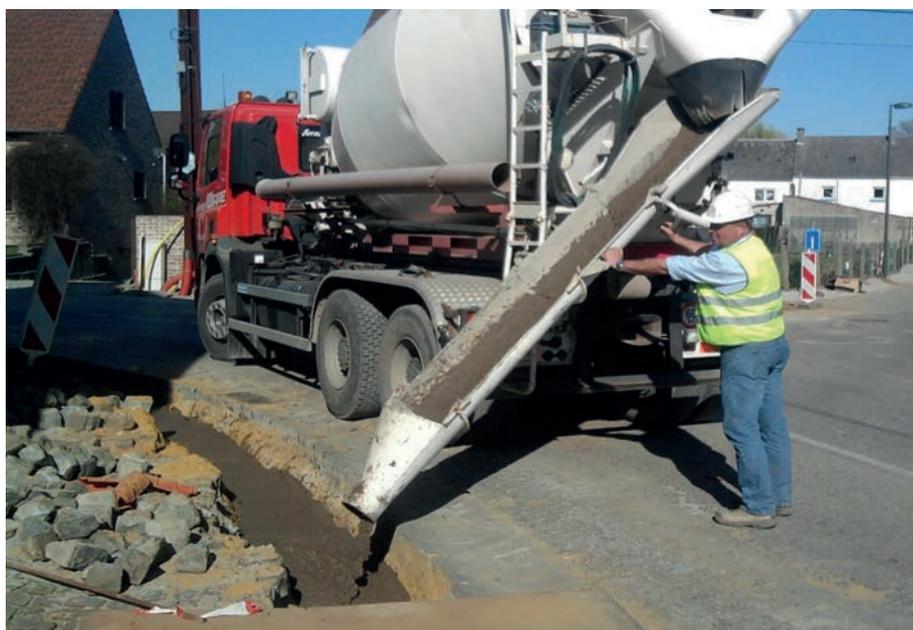
Les matériaux autocompactants réexcavables (MAR) sont définis au chapitre E.3.7 du Qualiroutes. Un guide de bonnes pratiques a été édité et est téléchargeable ici :



[MAR - Guide de bonnes pratiques - 25-04-2014 - Version finale.pdf](#)

Ces matériaux sont utilisés pour la mise en œuvre de remblais dans des situations difficiles en assurant des performances optimales : remblais de tranchées étroites, d'accès difficiles ou inaccessibles, sans blindage, présence de parois irrégulière, présence de nombreux impétrants (*câbles, tuyaux, etc.*).

Classe	MAR-1	MAR-2	MAR-3
Excavabilité	Facile	Moyennement facile	Difficile
Exécution	Manuelle	Manuelle ou légèrement mécanisée	Mécanisée



6.6.2 Matériaux

Les sables, graves et gravillons utilisés pour la confection d'un MAR peuvent être entièrement d'origine recyclée. Un MAR peut être un mélange de l'ensemble des composants suivants :

Eau – sol – sable: – gravillons – grave – granulats d'argile expansée – cendres volantes – ciment – chaux– L.H.R – filler – adjuvant – bentonite

6.6.3 Spécifications techniques

Il existe deux types de produits à choisir suivant la perméabilité du milieu environnant :

- essorable (drainage naturel du milieu)
- non essorable (terrain imperméable – non drainant).

Formulation

Une note justificative doit être transmise préalablement à l'utilisation du MAR avant le début des travaux, cette note reprend les informations listées au point E.3.7.1.2 du Qualiroutes.

6.6.4 Règles et exécution

Le mélange doit être homogène. Le transport éventuel se fait par camion malaxeur. Certains additifs peuvent être introduits sur site avant mise en œuvre.

Il faut veiller à assurer un blocage des canalisations afin d'empêcher celles-ci de subir des déplacements verticaux. Lors du versage direct du MAR, des mesures sont prises pour éviter toute ségrégation du produit.

La mise en œuvre est interdite lorsque la température de l'air mesurée sous abri, à 1,5 m au-dessus du sol, est \leq à 5 °C à 8 h du matin.

6.6.5 Contrôles et essais

Le matériau utilisé reste excavable, suivant sa classe, après sa mise en œuvre, tant à court terme qu'à long terme. Il répond aux caractéristiques suivantes selon le type choisi :

Classe	MAR-1	MAR-2	MAR-3
R'c28j	<0,7 MPa	De 0,7 à 2,0 MPa	> 2MPa

Le contrôle est effectué sur cube de 15 cm de côté. Ceux-ci sont réalisés sur chantier pendant la mise en œuvre. Ils sont conservés sur chantier pendant un minimum de 72 h.

Les caractéristiques géométriques sont vérifiées pendant et après exécution par mesurage topographique des niveaux de remblayage atteints. Au final, ils doivent correspondre au E. 3.3.3.2. du CCT Qualiroutes. La compacité sur chantier peut être mesurée directement sur le remblai. Ce contrôle de compactage est exécuté au moyen d'un pénétromètre à énergie variable de façon à obtenir les performances du E. 3.3.3.

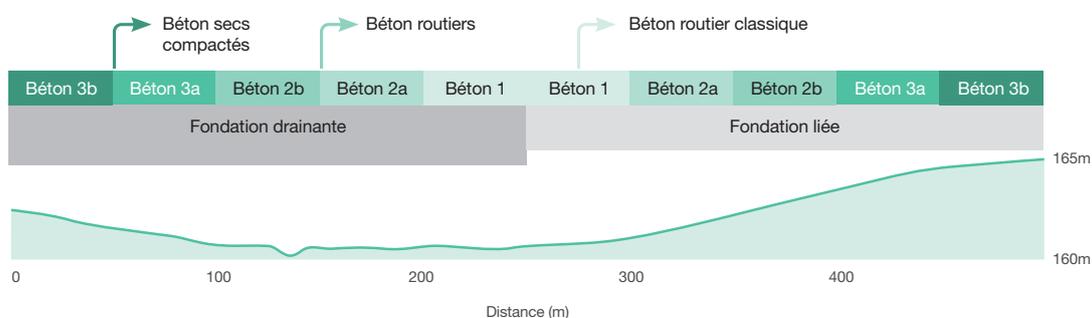
La classe de résistance à 28 jours est vérifiée et doit correspondre au E. 3.7.2. en fonction du type du MAR.

6.7 Applications innovantes dans le secteur routier

En Wallonie, le domaine routier public est essentiellement conditionné au respect du CCT Qualiroutes. Cependant, il existe de nombreux espaces propices à l'initiative technique dans ces matières. Le centre de recherche routière ainsi que le SPW MI sont eux-mêmes souvent porteurs de projets innovants aux côtés des initiatives privées. Les nécessaires besoins de durabilité en matière de voiries publiques entraînent des délais évidents avant l'intégration des innovations prometteuses au sein du cahier des charges type. Néanmoins, la dynamique actuelle se révèle positive et le rythme de révision du CCT Qualiroutes rend possible son adaptation à l'innovation. Les points ci-dessous reprennent de manière non-exhaustive les principales applications routières innovantes impliquant des matériaux recyclés développées ces dernières années.

6.7.1 Fondation drainante

L'utilisation de matériaux recyclés dans les fondations drainantes n'est actuellement pas autorisée par le CCT Qualiroutes. Néanmoins, une telle solution a été implémentée de façon satisfaisante dans le cadre du projet RIDIAS. Ce projet a été réalisé en 2019 par Tradecowall et le CRR, avec le soutien de la DGO6. Il a consisté à profiter de la réfection du chemin du Ridias à Gembloux, long de 500 m, pour mettre en œuvre différentes solutions routières innovantes (2 fondations et 4 revêtements) incorporant des teneurs importantes en recyclés mixtes.



Utilisation de granulats recyclés dans les fondations drainantes (projet RIDIAS)

Outre une fondation en produit de scalpage traité, décrite au chapitre 3.4, une fondation drainante a été mise en œuvre. Un tel type de revêtement était nécessaire car la première partie du chantier présentait un point bas, fréquemment inondé en hiver. La fondation a été réalisée en mélangeant 60 % (en volume) de recyclés mixtes (0/32 mm) et 40 % de granulats calcaires (32/63 mm). Ces proportions permettaient de maintenir la teneur en fines sous le seuil des 7%. Des essais de perméabilité, menés en laboratoire sur des matériaux compactés dans des colonnes de PVC, ont montré que le coefficient de perméabilité de ce mélange était beaucoup plus important (avec un ordre de grandeur) que celui du mixte seul.



Mise en œuvre d'une fondation drainante en granulats recyclés (projet RIDIAS)

6.7.2 Béton sec compacté utilisé en revêtement

Les revêtements des quatre sous-sections extérieures de la section d'essai du projet RIDIAS ont été réalisés en béton sec compacté au rouleau. Dans le CCT Qualiroutes, ce type de mélange est actuellement uniquement prévu pour une utilisation en fondation mais, moyennant une protection de surface apportée par une émulsion de bitume et un simple gravillonnage, son utilisation en revêtement pour les chemins à faible trafic est également possible.

Dans le projet RIDIAS, deux compositions, utilisant des dimensions d'agrégats maximales de 20 et 32 mm ont été développées en laboratoire (figure 9). Les mélanges contiennent respectivement 65 et 70 % en volume de granulats recyclés mixtes (sur la totalité du squelette inerte), ce qui s'approche de 90% des granulats pierreux, le sable étant un sable calcaire concassé lavé.



Aspect des deux BSC après mise en œuvre à la finisseuse



Compactage du BSC puis protection par épandage d'une émulsion de bitume et aspect final après simple gravillonnage

Les différentes sections ont été compactées avec un compacteur à pneus ainsi qu'un compacteur à rouleau, recouvertes d'une émulsion de bitume et d'un simple gravillonnage (figure 10) et sciées à 24 h tous les 4 m. Afin d'éviter tout risque d'affaissement des bords latéraux, ceux-ci ont été soigneusement contrebutés avec un produit terreux traité à la chaux (Teracalco).

D'après les résultats des essais de compression menés sur des carottes prélevées du revêtement après 90 jours ainsi que sur des éprouvettes Proctor réalisées sur chantier, il apparaît que les résistances sont globalement conformes à l'objectif de 30 MPa.

L'utilisation du BSC en tant que revêtement est particulièrement économique car elle permet d'utiliser des taux de substitution élevés (80 à 90 % des agrégats pierreux sont remplacés par des recyclés) et elle ne requiert pas de mise en œuvre par slipform.

6.7.3 Béton de revêtement

6.7.3.1 Projet RIDIAS

Le revêtement de la partie centrale du chemin du Ridias a été réalisé en dalles de béton non goujonnées mises en œuvre au slipform. Parmi les trois mélanges placés, l'un est un béton routier classique, formulé sur base de granulats de grès, alors que les deux autres contiennent respectivement 25 et 50 % en volume (de la fraction pierreuse > 4 mm) de granulats recyclés mixtes 4/32 mm. Tous les mélanges ont été réalisés avec 350 kg/m³ de ciment (CEM III A 42,5 LA), un rapport E/C effectif de 0,48 et du sable naturel.

Tant à l'état frais qu'à l'état durci, aucune différence ne peut être observée entre les bétons classiques et les bétons avec recyclés (*voir photos ci-dessous*).



Mise en œuvre du béton riche et aspect après durcissement

Les résistances en compression à 90 jours des bétons avec 25 et 50 % de recyclés s'élèvent respectivement à 55 et 53 MPa et sont donc satisfaisantes. La résistance en compression du béton de grès est contre toute attente inférieure à ces valeurs à la suite d'un excès d'eau dans le mélange. Les résistances au gel-dégel en présence de sels de déverglaçage sont en revanche insuffisantes (pertes au slab test supérieures à 7 kg/m² à 28 jours) pour tous les mélanges. Cela ne posera pas de problème dans le cas du chemin du Ridias, qui ne sera pas épandu, mais dans le cas contraire il faudrait veiller à améliorer le mélange (par exemple en y intégrant de l'entraineur d'air).



Projet RIDIAS

6.7.3.2 De circulaire weg

« De circulaire Weg » est un projet mené par De Brabandere en 2018. L'objectif du projet était de réaliser une nouvelle voirie en béton en réutilisant au maximum les matériaux issus de l'ancienne voirie.

Le béton de revêtement a été démolé de façon sélective et traité dans un centre à proximité afin d'obtenir un granulats de béton de haute qualité 8/20, ainsi qu'un sable de béton 0/6.3.

La nouvelle fondation a été réalisée avec 100 % de matériaux recyclés en mélangeant l'ancienne fondation 0/40 avec du sable de béton et des granulats de bétons recyclés.

Le nouveau béton de revêtement a été formulé avec un taux de substitution de 47% des de granulats de béton 8/20. Les essais menés sur les carottes prélevées ont montré que le béton présentait à la fois de très bonnes performances mécaniques et une bonne résistance au gel/dégel.

Au total, 85,4% des matériaux issus de l'ancienne chaussée ont ainsi pu être réutilisés dans le nouveau projet.



La voirie circulaire - COPRO



Circulair beon in de wegenbouw - Congrès belge de la Route

6.7.3.3 Chemin bi-bande à la Panne (De Brabandere)

Il y a déjà plusieurs années, un chemin bi-bande en béton recyclé a été réalisé par De Brabandere à la Panne en tant que route de liaison destinée aux vélos, piétons, cavaliers et véhicules agricoles.

Le béton a été réalisé en opérant une substitution à 100 % des gros granulats (8/20) par des granulats de béton recyclé de haute qualité. Le béton a été réalisé en utilisant un dosage en ciment de 400 kg/m³ et un rapport E/C de 0,45. La mise en œuvre par coffrage glissant a été réalisée de façon tout à fait classique.

Les essais ont montré que le béton présentait une bonne résistance en compression. La résistance au gel-dégel a été déterminée par des slab-tests sur un mélange d'essai et s'est avérée satisfaisante malgré une absorption d'eau légèrement trop élevée.



Sentier à deux voies, Adinkerke - Catalohus van secundaire en gerecycleerde granulaten

6.7.4 Fondations liées au bitume moussant



Installation de bitume moussant

Le projet FOAM a été lancé en 2020 en vue d'étudier la possibilité de réutiliser dans les fondations de nos routes les agrégats d'enrobés bitumineux stabilisés au bitume-mousse. Ce projet est un projet Tetra VLAIO mené par l'UA, avec le CRR et Odyssee Hogeschool comme partenaires principaux.

Cette fondation en bitume-mousse pourrait être utilisée principalement en remplacement d'une fondation en empierrement traitée au ciment. Pour les routes à faible trafic, elle pourrait également remplacer la sous-couche en enrobés. Pour la mise en œuvre d'une telle fondation en bitume-mousse (Bitumen Stabilised Material, BMS), une ou plusieurs couches d'enrobés, éventuellement avec une partie de la fondation existante, sont fraisées, réduites et mélangées à du ciment et à un mélange bitume-eau. L'eau est injectée dans le matériau fraisé en même temps que du bitume chaud (2,3 à 3%), ce qui provoque un effet moussant suite à l'évaporation soudaine de l'eau.

Lorsque les bulles de mousse entrent en contact avec les granulats, elles éclatent et forment de petites boules de bitume qui maintiennent les granulats ensemble. Parallèlement, du ciment est ajouté en faible quantité (généralement environ 1 %). Le ciment fournit suffisamment de fines particules de «poussière» et assure une réaction immédiate avec l'humidité présente dans la fondation existante (d'environ 6 %). Il permet donc d'obtenir un processus de durcissement rapide.

Ce matériau présente l'avantage de réduire fortement le risque de fissuration sous l'influence de variations de température dans la fondation et d'offrir une meilleure résistance à la fatigue.

En outre, les exigences relatives à la granulométrie des agrégats d'enrobés bitumineux à recycler ne sont pas aussi élevées que pour une utilisation dans une fondation liée au ciment, ce qui constitue un avantage supplémentaire. Pour finir, il devrait permettre une diminution des émissions totales de CO₂, grâce aux faibles quantités ajoutées de ciment et de bitume, ainsi qu'à la diminution des volumes de fraisats à évacuer.



Fondations durables grâce au recyclage in situ à l'aide de la technique du bitume-mousse - CRR

6.7.5 Utilisation de réjувénants dans les revêtements bitumineux



Projet Re-RACE: Rejuvenation of Reclaimed Asphalt in a Circular Economy - CRR



Mise en œuvre de réjувénants dans les revêtements bitumineux

Le recyclage des agrégats d'enrobés bitumineux (AEB) dans les revêtements en enrobés est maintenant une pratique courante en Wallonie, avec des taux de substitution pouvant atteindre les 50% pour les couches de liaison. Afin de pouvoir envisager des taux de substitution plus élevés, de pouvoir étendre l'utilisation des AEB aux couches de roulement ou de contrer le problème de la réutilisation répétée des AEB, il faut pouvoir compenser le vieillissement oxydatif subi par le liant bitumineux au cours de son cycle de vie, qui réduit certaines de ses propriétés performancielles, notamment en augmentant sa rigidité et sa fragilité.

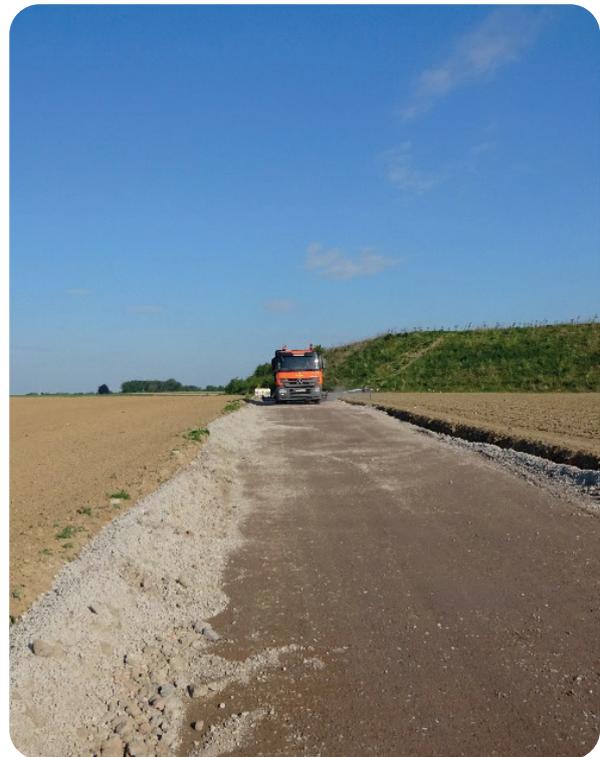
Ce vieillissement limite une réutilisation durable des AEB et peut inciter à utiliser comme additifs des produits régénérants, aussi appelés réjувénants. Un réjувénant est un terme générique désignant un additif qui, lorsqu'il

est ajouté à un liant vieilli, est capable de régénérer les caractéristiques de ce vieux liant, et de retrouver en grande partie ses performances initiales.

Au cours des dernières années, le CRR a mené des recherches approfondies au sujet des réjuvénants dans le cadre du projet prénormatif Re-RACE (Rejuvenation of Reclaimed Asphalt in a Circular Economy).

Les premières expériences avec l'utilisation d'un réjuvénant en Belgique ont été acquises grâce à une étude de terrain menée en étroite collaboration avec Kraton Chemical (fournisseur de régénérants biosourcés) et Stadsbader. Les planches d'essai posées en 2017 sur le site de production de Stadsbader à Vaulx ont permis de réaliser le suivi de six variantes de couches de liaison et de couches de roulement à fort taux de réutilisation d'AEB, en combinaison ou non avec un réjuvénant

Cette étude de terrain a permis de confirmer l'impact positif du réjuvénant sur les caractéristiques empiriques (pénétrabilité à l'aiguille et température de ramollissement A&B) des liants récupérés. Cet effet a été confirmé par des mesures rhéologiques. L'effet du réjuvénant a également été démontré par les valeurs inférieures de la rigidité des enrobés bitumineux pour lesquels cet additif a été utilisé (CRR, 2022).



Exemple de fondation en produit de scalpage traité (recyclés mixtes 0/20 et 6% de ciment) mise en œuvre dans le cadre du projet RIDIAS (voir chapitre 6.5 Applications innovantes dans le secteur routier) et présentant une résistance en compression moyenne à 90 jours de 22.5 MPa.

7. APPLICATIONS BÂTIMENTS

7.1 Introduction : CCT-Bâtiments

Dans ce cahier des charges type qui encadre les travaux publics de bâtiments, les granulats recyclés peuvent être utilisés pour diverses applications, le plus souvent, pour les fondations et sous-fondations.

Le cahier des charges type bâtiments 2022 - en abrégé « CCTB » est disponible via le lien suivant **Téléchargement CCT-Bâtiments**.

Cependant, dans de nombreux chantiers privés, des utilisations bien plus étendues peuvent être mises en évidence, le présent chapitre en donne une liste non exhaustive.

7.2 Pistes d'accès de chantier et empièvements de propreté

Bien que le CCT Qualiroutes introduise une distinction claire entre granulats recyclés, artificiels et naturels, la définition d'une grave suivant le chapitre C 5.3.1 précise que : Ces graves comprennent également les graves issues d'un mélange d'au moins deux des composants suivants : granulats artificiels, granulats recyclés et granulats naturels.

Il est donc reconnu que des mélanges des différents types de granulats sont possibles. Ceux-ci sont même recommandés pour permettre aux mélanges de satisfaire à certains critères techniques spécifiques (caractéristiques intrinsèques).



Mise en œuvre de granulats recyclés en plateformes de travail temporaire

7.2.1 Présentation de l'application

Dans le cadre de sa future NIT sur les plateformes de travail temporaires pour machines de fondation, le CSTC mettra prochainement en évidence la possibilité d'utiliser des granulats recyclés comme matériau de remplissage de la plateforme de travail.

Une plateforme de travail temporaire est un matelas de granulats d'une certaine épaisseur, éventuellement renforcé à sa base au moyen d'un géosynthétique de type renforcement.

La mise en place de cette plateforme de travail temporaire sur le sol d'origine a pour but d'assurer la stabilité des engins de chantier lourds devant se déplacer sur le site de construction et également d'assurer la praticabilité de celui-ci. En effet, le sol en place ne présente pas toujours une capacité portante suffisante que pour assurer la stabilité des engins de chantier.

Les plateformes de travail temporaire sont habituellement réalisées au moyen de granulats primaires. Néanmoins, dans un but de circularité et d'économie, le CSTC soulignera, dans le cadre de sa future NIT, la possibilité d'utiliser des granulats recyclés.

7.2.2 Matériaux

Le matériau granulaire doit maintenir ses performances pendant la durée de vie de la plateforme de travail et également en cas d'utilisation prolongée. Le gravier naturel, les roches concassées, les déchets de carrière, les granulats de béton recyclé sont bien adaptés à la construction d'une plateforme de travail. Les granulats mixtes recyclés seront autorisés, mais pas les granulats constitués uniquement de débris de maçonnerie et briques.

7.2.3 Spécifications techniques

Les exigences fondamentales que devront remplir les granulats sont décrites ci-après.

Les granulats de la plateforme de travail temporaire devront être sélectionnés, placés et compactés dans des conditions contrôlées afin que la portance minimale de celle-ci puisse être assurée. Les matériaux granulaires tels que le sable, le gravier et la roche se caractérisent généralement par une résistance élevée au cisaillement, surtout lorsqu'ils sont fortement compactés. L'angle de frottement interne des granulats est le paramètre gouvernant la résistance au cisaillement du matelas granulaire.

Un matériau granulaire dont la valeur caractéristique de l'angle de frottement est inférieure à 35° n'est pas susceptible de fournir une plateforme de travail suffisamment stable et viable d'un point de vue économique. En effet, un angle de frottement trop faible impliquera la mise en place d'une épaisseur de matelas granulaire exagérément élevée et des coûts en matériaux trop importants.

Les granulats ne doivent pas contenir d'humus, de matière organique, de bois, de terre et d'armatures en acier. On utilisera donc un matériau propre. Une attention particulière sera apportée en cas de réutilisation du matériau granulaire sur un autre site.

La granulométrie (*calibre en mm*) du matériau granulaire de la plateforme de travail est définie selon la norme NBN EN 13242. La granulométrie maximale D sera de 32 mm.

Le matériau granulaire de la plateforme de travail est un granulat grossier (2-32 soit $d/D = 2-32$) dont la distribution des grains, selon la norme NBN EN 13242, est déterminée comme suit : Gc85/15. L'utilisation d'un mélange de granulats (*c'est-à-dire avec une distribution granulométrique de 0-XX mm*) n'est pas autorisée (B4).

Le matériau granulaire ne doit pas contenir plus de 4 % (*pourcentage en poids cumulé dans le graphique de la répartition granulométrique cumulée du matériau*) de particules fines (granulométrie inférieure à 0,063 mm). Le passage à travers le tamis de 0,063 mm (*c'est-à-dire la détermination du contenu en fines*) répond à la catégorie f4 de la NBN EN 13242 afin d'assurer la fonction drainante du matelas granulaire (B4).

Dans la plupart des cas, un matériau de granulométrie étendue ou hétérogène ("*well graded*"), c'est-à-dire avec un coefficient d'uniformité $D_{60} / D_{10} > 6$, fournira une meilleure plateforme de travail (*le diamètre D_x est la taille des grains où x% des grains sont plus petits que D_x*). Un matériau présentant une distribution granulométrique hétérogène peut être compacté, résiste au poinçonnement et aux dommages causés par le déplacement d'une machine de fondation lourde sur des chenilles et est plus résistant à la pénétration de particules fines qu'un matériau uniforme.

Les grains doivent être de forme angulaire (« *angular* ») ou sub-angulaire (*sub-angular* »).

Les résistances du granulat à l'écrasement et à l'éclatement doivent être contrôlée au moyen d'essais pour la détermination de la résistance à l'abrasion (*micro-Deval*) conformément à la NBN EN 1097-1 et d'essais pour la détermination de la résistance à l'éclatement (Los Angeles) conformément à la NBN EN 1097-2 (B8 & B9). Pour le matériau granulaire de la plateforme de travail temporaire, le coefficient de Los Angeles (LA) et le coefficient de micro-Deval (MDE) correspondront respectivement aux catégories LA40 et MDE35 selon la norme NBN EN 13242 (B4).

En Belgique, le matelas granulaire de la plateforme de travail temporaire sera construit avec des granulats conformes à la norme NBN EN 13242 (B4). Ces granulats doivent être conformes à toutes les réglementations existantes, tant en termes de réglementation des produits (*marquage CE*) que de réglementation environnementale (*en cas d'utilisation de granulats recyclés*).

En Flandre, l'utilisation de granulats recyclés (*granulats de béton, granulats mixtes*) est régie par les règles générales du VLAREMA (*utilisation comme matériau de construction*) et les dispositions imposées par l'OVAM aux unités de production (*concasseurs, trieurs*) via les règlements unitaires et la qualité des granulats recyclés (absence de contamination physique et chimique). En principe, la qualité environnementale des granulats recyclés est couverte par le certificat COPRO ou QUAREA.

À Bruxelles, lors de l'utilisation de granulats recyclés, il convient de suivre le Code de bonne pratique pour l'utilisation des sols et des granulats recyclés (<https://environnement.brussels/thematiques/sols/pollution-du-sol/informations-specifiques-pour-les-professionnels/codes-de-bonnes-pratiques>). Cela signifie, d'une part, que les granulats doivent présenter une qualité environnementale suffisamment élevée (*les normes d'intervention pour les sols sont d'application*) et d'autre part que les autorisations correctes doivent être demandées (*également pour l'application proprement dite*). Un nouveau cadre est en cours d'élaboration, qui permettra d'obtenir différentes qualités de granulats recyclés dans différents domaines d'application.

En Belgique, l'utilisation de granulats certifiés est recommandée pour la construction de plateformes de travail temporaires. Ces granulats doivent être certifiés selon le règlement TRA 411 de BE-CERT et les granulats recyclés selon le règlement TRA 10/11 de COPRO ou le règlement de contrôle de CertiPro.

Enfin, les granulats doivent également être conformes aux règlements techniques PTV 411 de BE-CERT pour les granulats naturels et PTV 406 de COPRO pour les granulats recyclés.

L'utilisation de granulats recyclés pour la construction de plateformes de travail temporaire doit être considérée comme une pratique normale étant donné qu'il s'agit d'une solution à la fois économique et conforme aux principes de l'économie circulaire.

Lorsque le matériau granulaire de la plateforme de travail temporaire est en bon état après le chantier et si cela s'avère économiquement intéressant, ce matériau peut être réutilisé sur un autre chantier pour la construction d'une autre plateforme de travail temporaire.

7.2.4 Règles d'exécution

Le granulat de la plateforme de travail temporaire sera installé conformément à la NBN EN 16907-3 sur le géotextile (de type séparation) obligatoire qui aura préalablement été installé sur place.

Une attention particulière doit être portée à la mise en place des géosynthétiques (géotextiles de type séparation et éventuelles géogrilles de renforcement) afin d'éviter qu'ils ne soient endommagés lors de l'installation de la plateforme de travail temporaire et lors du compactage du matériau granulaire de la plateforme de travail.

Les géosynthétiques doivent être posés à plat, sans bosses, plis ou autres irrégularités. Une première fine couche de sable (0-2mm) peut être utilisée pour obtenir une surface plane et propre. Les rouleaux de géosynthétiques sont ensuite installés sur cette couche protectrice. En ce qui concerne l'installation des géosynthétiques, la PTV829 de COPRO donne les valeurs minimales pour le recouvrement dans les directions transversale et longitudinale.

Le matériau granulaire n'est pas déversé directement sur les géosynthétiques. Il est placé au moyen d'une pelleuse ou engin de chantier de type grue, avec une épaisseur minimale de 30 cm, en le poussant vers l'avant sur le matériau géosynthétique ; cette méthode permet de rouler sur le matériau granulaire déjà placé et assure une protection immédiate du géosynthétique.

S'il n'est pas possible de procéder de cette manière, le matériau granulaire est déversé verticalement sur les géosynthétiques, en limitant au maximum la hauteur de chute. Les granulats sont ensuite déplacés au moyen d'une pelleuse et mis en place sur une épaisseur minimale de 30 cm.

Afin d'éviter d'éventuels dommages aux géosynthétiques, toute circulation sur ceux-ci est interdite avant l'application de ces 30 cm de granulats. Les géosynthétiques doivent être recouverts par le matériau granulaire dans les délais prescrits par le fournisseur et conformément aux indications du tableau B1 de la NBN EN 13249 (notamment pour éviter les dommages causés par les rayons UV). Les rouleaux livrés sur le chantier doivent être emballés dans un film plastique de protection, qui seront retirés juste avant la mise en place (B4).

Après la mise en place, le matériau granulaire doit être compacté à l'aide d'un rouleau ou d'un rouleau vibrant (pas de plaque vibrante, pas de rouleaux pied de mouton).

La mise en place et le compactage doivent être contrôlés selon les indications de la NBN EN 16907-5 (B11) :

- Pour la mise en place : inspection visuelle et l'enregistrement manuel des informations relatives à la réception du matériau de remblai, le nombre de passages, l'épaisseur de la couche, la référence de la pelle de chargement ou de la grue utilisée pour mettre en place le matériau granulaire, etc,

- Pour le compactage : inspection visuelle et l'enregistrement manuel du type et du poids du rouleau (vibrant), de la vitesse du rouleau et de la fréquence des vibrations (le cas échéant),
- Le contrôle et l'enregistrement du volume compacté et de la surface totale compactée,
- Le contrôle et l'enregistrement du nombre de passages, de l'épaisseur de la couche et de la vitesse du rouleau (vibrant) à l'aide d'un rouleau équipé d'un système de navigation et d'enregistrement GNSS (systèmes GPS, Galileo...).

7.2.5 Contrôle et essais

En Belgique, des essais statiques sur plaque (plaque d'une surface de 750 cm²) sont utilisés pour vérifier le compactage de la plateforme de travail temporaire.

Le compactage de la plateforme de travail temporaire sera vérifié au moyen de 2 cycles d'essais à la plaque « belge ». Afin d'obtenir la profondeur d'influence la plus grande possible, on utilisera une plaque d'une surface de 750 cm². Pour les machines de fondation sur chenilles dont le poids est supérieur à 30 tonnes, une valeur de compressibilité minimale M1 de 35 MPa doit être obtenue. Le rapport des valeurs M2/M1 doit toujours être inférieur à 3 (-). Si ce rapport n'est pas atteint, la plateforme de travail temporaire doit être compactée davantage.

Les exigences relatives à la fréquence des essais statiques sur plaque pour vérifier la plateforme de travail temporaire sont les suivantes :

- Au moins trois essais statiques à la plaque par zone représentative de la plateforme de travail (c'est-à-dire avec les mêmes paramètres de conception : matériau de remblai, hauteur...);
- Avec en plus, au moins un essai statique à la plaque par 500 m² pour une surface représentative allant jusqu'à 3000 m² ;
- Et au moins un essai supplémentaire à la plaque statique par 1000 m² pour les surfaces représentatives supérieures à 3000 m².

L'emplacement des essais à la plaque statique est déterminé de manière à couvrir une zone aussi vaste que possible.

L'emplacement des essais à la plaque statique doit être suffisamment éloigné du bord de la plateforme de travail, avec une distance d'au moins une fois et demie la hauteur de la plateforme de travail.



Essai statique à la plaque

7.4 Béton Structurel

7.4.1 Présentation de l'application

Les granulats recyclés issus des déchets inertes de construction et de démolition de bâtiments (en particulier, les granulats de béton) peuvent être utilisés dans le béton structurel. Cela permet d'envisager un 'recyclage en boucle' qui consiste à employer le matériau recyclé pour fabriquer le même produit ou un produit similaire au matériau dont il provient. Tous les éléments en béton constitutifs du gros œuvre d'un bâtiment sont concernés : dallages, voiles, poutres, colonnes, ...

Davantage d'informations peuvent être trouvées dans la monographie du CSTC et du CRR



Utilisation de granulats de béton recyclés dans le béton

7.4.2 Matériaux

Un cadre normatif fixant les exigences relatives aux granulats de béton est en place aux niveaux belge et européen. La norme NBN EN 12620 applicable aux granulats pour béton définit notamment différentes classes et catégories de propriétés, lesquelles permettent à l'utilisateur de spécifier la qualité de granulats souhaitée. De plus, les normes dédiées au béton (NBN EN 206 et son annexe nationale belge NBN B 15-001) établissent un certain nombre de dispositions concernant les granulats utilisables dans le béton. L'intérêt croissant pour le recyclage 'de haute qualité' se traduit également sur le plan normatif : les normes belges et européennes sont progressivement élargies afin d'intégrer les granulats recyclés.

Les granulats recyclés pouvant être utilisés en Belgique pour la confection de béton de structure sont :

- Les granulats de béton de type A+ constitués exclusivement de débris de béton ;
- Les granulats mixtes de type B+ qui comportent également une fraction limitée (maximum 30 % en masse) de débris de maçonnerie.

Les types de granulats sont définis dans la NBN B 15-001 et leurs spécifications techniques sont détaillées au chapitre 7.4.3

7.4.3 Spécifications techniques

7.4.3.1 Béton prêt à l'emploi

L'utilisation de granulats recyclés dans le béton est prévue dans les normes en Belgique pour certaines classes d'environnement et d'exposition et dans des pourcentages de remplacement maximaux de la fraction grossière de granulats, à condition qu'ils respectent certaines exigences. Les granulats recyclés doivent en effet présenter une qualité suffisante et posséder certaines caractéristiques en termes de granularité, de propriétés mécaniques et physiques, ... Il va de soi que pour une application dans le béton, on doit idéalement disposer de granulats purs, dépourvus de plastique, de bois, de plâtre et autres. Dans le cas de certains ouvrages (sols ou éléments préfabriqués horizontaux), il importe aussi d'accorder une attention particulière aux particules flottantes (FL).

La norme NBN B 15-001 définit tout d'abord les propriétés des **granulats de béton (de type A+)** utilisables dans certains ouvrages en béton. Ces granulats répondent à la norme NBN EN 12620 et aux exigences complémentaires suivantes :

- $d \geq 4$ mm et $D \geq 10$ mm
- répondent au moins aux catégories de composition $Rc_{90}/Rcu_{95}/Ra_1-/XRg_{0,5}/FL_2-$ de la NBN EN 12620 ;
- répondent au moins aux catégories $Fl_{20}, f_{1,5}, LA_{35}, SS_{0,2}, A_{40}$ de la NBN EN 12620 ;
- présentent une masse volumique (P_{rd}) d'au moins 2.200 kg/m³.
- ont une absorption d'eau de maximum 10 %, avec une variation de maximum ± 2 %, en regard de la valeur déclarée.

Pour une application particulière où une finition de surface de très haute qualité est exigée, la catégorie FL est limitée à FL0,2-. Pour les sols intérieurs en béton, cette exigence n'est toutefois pas suffisamment sévère : les particules flottent à la surface après leur mise en œuvre et peuvent causer localement des problèmes (petits cratères, décollement), pendant et après la finition de surface.

La norme NBN B 15-001 (B5) définit également les propriétés des granulats mixtes (de type B+). Ces granulats répondent à la norme NBN EN 12620 (B3) et aux exigences complémentaires suivantes :

- $d \geq 4$ mm et $D \geq 10$ mm ;
- répondent au moins aux catégories de composition Rc_{50} / Rcu_{70} / Rb_{30} - / Ra_5 - / XRg_2 - / FL_2 - de la NBN EN 12620 ;
- répondent au moins aux catégories Fl_{50} , LA_{50} , $SS_{0,2}$, A_{40} de la NBN EN 12620 ;
- présentent une masse volumique (ρ_{rd}) d'au moins 1.700 kg/m³ ;
- présentent une absorption d'eau d'au plus 15 %, avec une variation de maximum ± 2 %, en regard de la valeur déclarée.

La norme exclut l'emploi de **granulats de type B+** dans les ouvrages requérant une finition de surface de haute qualité.

Bien qu'elles ne soient pas explicitement reprises parmi les critères de qualité applicables aux granulats, les propriétés suivantes constituent des exigences de base et doivent donc être prises en considération :

- la granularité doit être déterminée ;
- la teneur en chlorures doit être évaluée si l'on prévoit une mise en œuvre dans du béton armé.

Pour les deux types de granulats (A+ et B+), le **domaine d'application** est fixé dans la norme selon les tableaux ci-dessous. Le pourcentage de remplacement maximum y est exprimé en pourcentage du volume de la fraction grossière (> 4 mm). La classe de résistance en compression est limitée à C30/37 pour les granulats de type A+ et à C20/25 pour les granulats de type B+.

La norme autorise également l'utilisation de granulats recyclés dans d'autres classes d'environnement ou de résistance, l'application de pourcentages de remplacement supérieurs, ou l'ajout de ces granulats à des bétons pré-contraints, pourvu que l'aptitude à l'emploi pour ces applications spécifiques ait été démontrée. La récente norme belge NBN B 15-105 (B6) reprend les méthodes d'essai et les critères applicables à cet effet.

Classes d'environnement selon la NBN B 15-001 pour le béton non armé

Béton non armé						
Type de granulats	Classes d'environnement selon la NBN B 15-001					
	EI	EE1	EE2	EE3, EA1	ES1, ES2, ES3	EE4, ES4, EA2, EA3
Granulats de bétons de type A+	20%	50%	20%	20%	20%	0%
Granulats mixtes de type B+	20%	0%	0%	0%	0%	0%

Domaine d'application des granulats de type A+ et B+ dans du béton non armé

Classes d'environnement selon la NBN B 15-001 pour le béton non armé

Béton armé						
Type de granulats	Classes d'environnement selon la NBN B 15-001					
	EI	EE1	EE2	EE3, EA1	ES1, ES2, ES3	EE4, ES4, EA2, EA3
Granulats de bétons de type A+	30%	30%	20%	20%	0%	0%
Granulats mixtes de type B+	20%	0%	0%	0%	0%	0%

Domaine d'application des granulats de type A+ et B+ dans du béton armé

7.4.3.2 Béton préfabriqué

Des dispositions complémentaires s'appliquent quant à l'usage de granulats recyclés dans les produits préfabriqués en béton. Celles-ci sont reprises dans une annexe informative Q de la norme européenne **NBN EN 13369**, norme définissant les règles communes pour l'ensemble des éléments préfabriqués en béton.

En règle générale, on peut utiliser jusqu'à 5% en masse de granulats recyclés, quelle que soit leur origine, sans vérifier d'autre propriété que la résistance à la compression du béton.

Ce taux de substitution monte à 10% dans le cas de **granulats recyclés produits en interne** (provenant de la même entreprise). Ce taux de substitution peut même monter jusqu'à 20%, voire au-delà (jusqu'à 100%), si l'ensemble des conditions suivantes sont respectées :

- les granulats sont composés uniquement de béton préfabriqué produit dans la même usine ;
- les propriétés du béton durci sont déterminées par des essais en laboratoire ;
- la résistance mécanique du produit préfabriqué est vérifiée par des essais en vraie grandeur.

Si la **source des granulats recyclés n'est pas connue**, ces derniers doivent être composés d'au moins 90% de béton ($R_{c_{90}}$ selon la norme NBN EN 933-11). Le taux de substitution maximum autorisé équivaut alors à 50%.

7.4.4 Règles et exécution

De manière générale, les règles de mise en œuvre (coulage, serrage, cure, ...) d'un béton ordinaire restent d'application pour un béton à base de granulats recyclés.

Au vu de la porosité plus élevée des granulats recyclés, il se peut que l'ouvrabilité et l'aptitude au pompage du béton diminuent plus vite que d'ordinaire. Lorsque le taux de substitution est limité, **l'ouvrabilité du béton** contenant des granulats recyclés ne diffère, en général, pas de celle du béton ordinaire. Si besoin, la consistance peut être ajustée par l'ajout d'un plastifiant ou d'un superplastifiant.

Dans le cas de taux de substitution plus élevés, on constate parfois une baisse de la consistance au fil du temps, selon le processus de production (préhumidification, malaxage, ...). Des modifications de la cinétique de prise et de durcissement peuvent aussi apparaître. Il importe de bien évaluer ces phénomènes au préalable, de façon à pouvoir en tenir compte sur chantier.

La norme NBN B 15-001 reprend d'autres dispositions relatives à l'utilisation des granulats recyclés dans le béton de structure :

- l'absorption d'eau des granulats recyclés considérée dans le calcul du rapport eau/ciment doit correspondre à la valeur mesurée à 24 heures selon la méthode décrite à l'annexe C de la norme NBN EN 1097-6 ;
- si l'on emploie des granulats dont l'absorption d'eau est supérieure à 3,0 % dans des classes d'environnement autres que E0 et E1 ou dans des classes d'exposition autres que X0 et XC1, le rapport eau/ciment prévu à l'annexe F de la norme doit être réduit comme suit :
 - si la proportion volumique des granulats recyclés ou artificiels par rapport aux gros granulats est inférieure à 20 %, le rapport E/C doit être diminué de 0,01 ;
 - si la proportion volumique des granulats recyclés ou artificiels par rapport aux gros granulats est supérieure ou égale à 20 %, le rapport E/C doit être diminué de 0,02.

Le bon de livraison doit en outre mentionner que le béton contient des granulats recyclés et reprendre une indication du pourcentage volumique maximal ainsi qu'une référence aux propriétés des granulats recyclés.



Projet ZIN à Bruxelles : granulats de béton issus de la démolition des anciennes tours WTC

7.4.5 Contrôle et essais

Tout comme pour le béton ordinaire, divers tests doivent être effectués en vue de démontrer que le béton possède les caractéristiques spécifiées. Ces essais sont, de préférence, opérés sur différents lots de béton, et portent, au minimum, sur les propriétés suivantes :

- Pour le béton frais : masse volumique, consistance, teneur en air, contrôle du rapport eau efficace/ciment par brûlage ;
- Pour le béton durci : masse volumique, absorption d'eau par immersion, résistance à la compression après 28 jours.

Pour un usage dans certains environnements, et en particulier pour des taux de substitution élevés, il y a lieu de contrôler aussi la durabilité du béton (résistance à la carbonatation, au gel-dégel, ...). Une méthodologie est proposée à cet effet dans la récente norme NBN B 15-105 (B6).

Dans le cas de taux de substitution élevés (> 30 %), il convient aussi d'être particulièrement attentif à l'évolution de la consistance dans le temps.

Il importe en outre de veiller à ce que les essais et les prélèvements d'échantillons ne soient pas réalisés uniquement en centrale, mais aussi sur chantier.



Mesure de la consistance du béton à base de granulats recyclés (monographie CSTC-CRR)

7.5 Matériaux autocompactants réexcavables (MAR)

7.5.1 Présentation de l'application

Les matériaux autocompactants réexcavables (MAR) sont également de grande utilité en chantiers de bâtiments. Pour leur définition on se reportera au chapitre 7.5.1 du présent guide. Un guide de bonnes pratiques a été édité et est téléchargeable ici :



MAR – Guide de bonnes pratiques

Outre les utilisations en tranchées décrites au chapitre 7.5, les MAR sont utilisés en grandes quantités pour remblayer des espaces difficilement accessibles. Par exemple, d'anciennes citernes, fosses et pertuis situés sous des bâtiments. Par ailleurs, leur utilisation facilite grandement le remblai autour des nouvelles citernes et/ou chambres de visite. Récemment, des expériences très positives ont été développées dans l'utilisation de MAR pour remblayer autour de piscines préfabriquées.



Projet ZIN à Bruxelles : granulats de béton issus de la démolition des anciennes tours WTC

7.5.2 Matériaux

Voir chapitre 7.5.2 du présent guide.

7.5.3 Spécifications techniques

Voir points 2.2 et 2.3 du guide de bonnes pratiques MAR [F1].

7.5.4 Règles et exécution

Voir points 5 et 6 du guide de bonnes pratiques MAR [F1].

7.5.5 Contrôles et essais

Voir point 7 du guide de bonnes pratiques MAR [F1].

7.6 Applications innovantes dans le secteur du bâtiment

Outre les applications connues des granulats recyclés, il existe également d'autres processus et produits de construction dans lesquels les granulats recyclés peuvent être utilisés. Les exigences relatives aux matériaux de base sont généralement fonction du produit en question et varient donc en fonction de l'application. Il faut aussi remarquer que plusieurs des applications sont encore en développement, et donc pas toujours disponible sur le marché aujourd'hui.

Le nombre d'applications « innovantes » de granulats recyclés dans les bâtiments est en constante augmentation. En effet, les possibilités de développement sont nombreuses, qu'il s'agisse de nouveaux produits à base de granulats recyclés, ou de produits existants dans lesquels les granulats recyclés sont substitués aux granulats naturels ou à d'autres matériaux inertes.

Dans les paragraphes suivants, quelques applications innovantes des granulats recyclés sont décrites comme source d'inspiration

7.6.1 Remblais renforcés

Perspectives d'utilisation à étudier :

Introduite dans les années soixante, la technique des remblais renforcés est aujourd'hui de plus en plus utilisée comme solution de soutènement. Dans les remblais renforcés, des couches horizontales de renforcement sont installées au sein d'un matériau de remplissage (sable et gravier) afin de créer une masse de sol renforcée qui résistera aux forces de poussée des terres se développant derrière celle-ci (voir Figure ci-après).



Principes de construction d'un remblai renforcé : succession de couches de matériau de remplissage compacté et de renforcements (dans le cas présent : des géogrilles) – source : HUESKER

Les renforcements peuvent être en acier (barres, filets, échelles...) ou en géosynthétique (géogrilles, géotextiles tissés et bandes). A l'avant du remblai, la stabilité locale du matériau de remplissage est assurée en attachant les renforcements à des éléments de recouvrement de formes diverses (en polymère, bois, béton, gabions métalliques...) ce qui est très intéressant au niveau urbanistique ou esthétique. Le recouvrement peut être vertical ou incliné.

Habituellement construit avec du sable et des graviers naturels, une tendance internationale semble petit-à-petit se dessiner avec l'utilisation de matériau de remplissage alternatif de type sols cohésifs trouvés sur place pendant les travaux de terrassement ou boue de dragage éventuellement stabilisés à la chaux ou au ciment.

Une autre piste que le CSTC étudiera prochainement consiste à utiliser des granulats recyclés (béton ou mixte) comme matériau de remplissage alternatifs. Il faudra alors vérifier que ces granulats recyclés répondent aux exigences constructives et environnementales des différentes régions en Belgique. Ce projet de recherche démarrera en septembre 2022 avec le soutien du SPF Economie et du NBN.

Plus d'information sur le site internet du CSTC :



Une approche belge de la conception des remblais renforcés - SOLRENF (cstc.be)

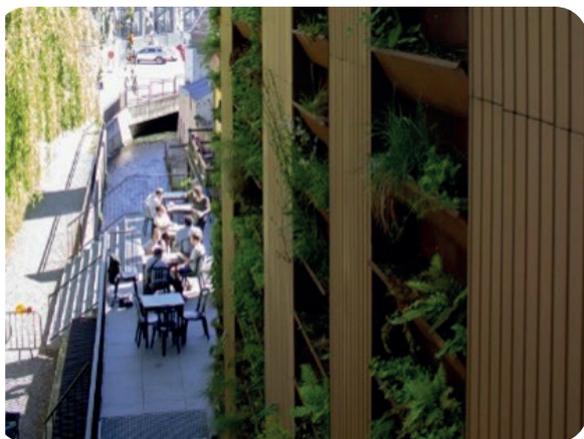
7.6.2 Murs verts

Les murs végétaux sont une solution pour verduriser les villes. Leur déploiement permet de diminuer l'effet d'îlot de chaleur en ville et d'améliorer la qualité de vie des habitants. A l'échelle d'un bâtiment, ils peuvent améliorer l'isolation acoustique et l'isolation thermique, surtout en été avec le rôle de climatiseur naturel.

La plupart des murs végétaux proposés dans les commerces sont actuellement des solutions sans ou avec très peu de substrat, ce qui implique une irrigation et fertilisation intenses pour une courte durée de vie. Leur succès est mitigé et nécessite souvent un entretien important pour un résultat plutôt décevant.

En Belgique, une équipe de Gembloux Agro-Bio Tech développe actuellement une solution de mur végétalisé modulaire incluant un véritable substrat pour le développement de végétaux choisis selon les conditions du lieu qui les accueillera. Créer des murs végétaux durables à partir de substrat recyclé., c'est l'objectif du projet MURVERT financé dans le cadre du programme First Spin-Off de la Région Wallonne.

Ce véritable substrat de croissance est composé en majorité de granulats d'inertes recyclés afin de valoriser des matériaux qui sont issus de la ville. En plus de l'intérêt en termes d'économie circulaire, l'ajout de ce type de matériaux en quantité précise est bénéfique pour les végétaux en termes d'aération du substrat et de circulation de l'eau. Il est intégré dans des caissons ou des bacs dans lesquels les plantes indigènes sont intégrées. Le développement de substrats contenant des granulats d'inertes recyclés continu d'être optimisé notamment en termes de cycle de l'eau.



Les murs végétaux démonstrateurs de a) l'Atrium et b) du Campus de Gembloux-Agro Bio Tech ©Liège Université, MURVERT

7.6.3 Toitures vertes

Les toitures vertes sont considérées comme une alternative durable aux toitures classiques et leur demande est en augmentation. Le substrat employé couramment dans ce type de toitures se compose en grande partie de roche à haute porosité, souvent de la pouzzolane issue de carrières en Allemagne.

Le secteur recherche des alternatives à ce matériau, qui n'est pas extrait localement et est donc plus cher, et dont la disponibilité est limitée. Il existe donc une demande de matériaux locaux alternatifs à utiliser dans les substrats de toits verts, pour laquelle les granulats inertes recyclés se positionnent comme une alternative durable.

Les caractéristiques techniques des substrats doivent être adéquates. On pourra se référer aux **lignes directrices FLL (allemand)**. Quelques points d'attention technique sont à considérer pour le substrat composé de granulats recyclés :

- Densité : on évitera un substrat trop lourd pour minimiser les charges mortes tout en empêchant le soulèvement (densité 750-1100 kg/m³). Cela limite l'emploi de granulats lourds tels que le de béton et peut nécessiter la combinaison de granulats recyclés (mixte, maçonnerie, autres matériaux inertes) à des matériaux plus légers (ex. verre cellulaire).
- Porosité et capacité en eau : le volume des pores doit être élevé, avec des pores si possibles connectées, ce qui est rarement le cas pour les granulats recyclés. On veillera donc à les combiner à un matériau poreux (ex. verre cellulaire).

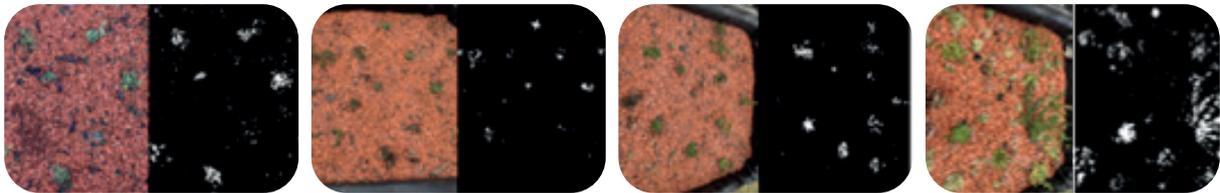
- Granulométrie : on évitera des granulométrie trop importantes (limiter $d > 4\text{mm}$ à 50% en poids) et trop fines (limiter $d < 0.063\text{mm}$ à 15% en poids) et on favorisera un substrat à granulométrie variable pour favoriser la croissance des racines et la biodiversité
- Lixiviation de substances : en vertu du « end-of waste » en Wallonie, les granulats recyclés commercialisés doivent être conformes aux paramètres environnementaux en vigueur. On veillera à vérifier que les substances qui ne sont pas couvertes par la réglementation environnementale en vigueur (ex. sulfates) ne risquent pas de porter préjudice au bon fonctionnement du toit et à la qualité de l'eau qui en découle.

On notera que le substrat doit être constitué d'environ 90% de matière minérale et 10% de matière organique (*compost, etc.*). Les propriétés telles que le pH, la MO et les minéraux nécessaires à la croissance des plantes sont plus influencées par la fraction organique que minérale. Ces paramètres sont donc peu déterminants pour la sélection de la matière minérale.

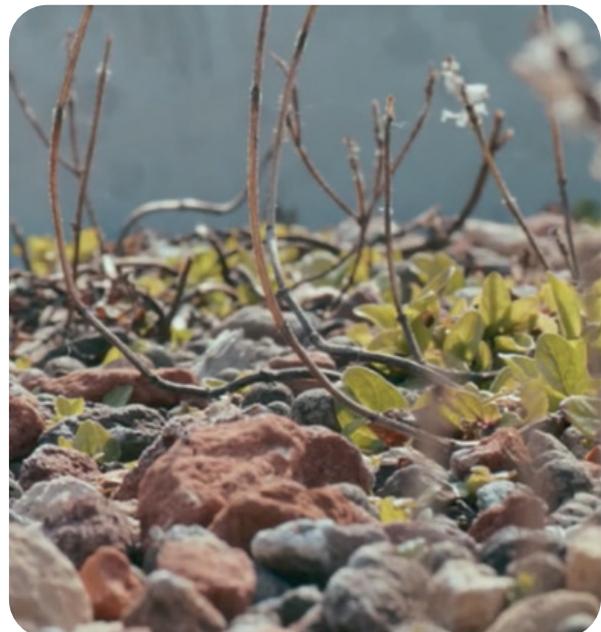
Des substrats alternatifs contenant des matériaux inertes recyclés sont testés dans le cadre de plusieurs projets, notamment le projet TETRA **Green Roofs Up !**



Essai de toitures vertes avec substrat contenant des granulats recyclés © Projet TETRA Green Roofs Up ! Hogeschool PXL, 2022



Suivi du développement de la couverture végétale sur les essais de toitures vertes avec substrat recyclé, app Cancepo © Projet TETRA Green Roofs Up ! Hogeschool PXL, 2022



Essai de toitures vertes avec substrat contenant des granulats recyclés, Campus de Gembloux-Agro Bio Tech © « Des Plantes et des Villes », Transition, 2022

7.6.4 Colonnes ballastées

Les colonnes ballastées sont des colonnes de granulats installées dans le sol.

Elles sont utilisées pour améliorer le sol en place afin :

- d'améliorer sa portance,
- de réduire les tassements,
- de permettre un drainage plus rapide de celui-ci,
- et d'homogénéiser ses caractéristiques mécaniques.

En général, une colonne ballastée est réalisée selon le procédé suivant. Un profilé rectangulaire creux est introduit dans le sol jusqu'à la profondeur déterminée. Lors de la remontée du profilé, le matériau granulaire est introduit à l'intérieur de celui-ci. Tout au long de la remontée du profilé, le matériau granulaire est vibré afin de le compacter.

On utilise généralement des graves comme matériau de remplissage. Des granulats recyclés de type béton peuvent être utilisés pour la construction de colonnes ballastées. Cette application doit néanmoins encore faire l'objet de plus d'investigation.

Des informations supplémentaires concernant les caractéristiques techniques des granulats à utiliser pour les colonnes ballastées seront disponibles dans une prochaine version du guide.



7.6.4 Autres applications innovantes possibles

De nombreuses autres applications pourraient être développées. Bien entendu, les granulats doivent être suffisamment purs et les produits finaux doivent répondre aux exigences techniques qui leur sont appliquées.

Les granulats de maçonnerie par exemple, peuvent être utilisés comme matière première dans des produits céramiques, tels que pour la construction de courts de tennis, ou dans la production de nouvelles briques. Un fabricant belge a d'ailleurs indiqué la production d'un certain nombre de lots d'essai de briques à partir de granulats de maçonnerie recyclés.

Les granulats recyclés peuvent également être employés dans l'ingénierie et les infrastructures hydrauliques. **Le cahier des charges standard 260** pour les ouvrages artificiels et les aménagements hydrauliques existe depuis 2012, et a reçu une nouvelle version révisée en 2018. On y trouve un certain nombre d'applications intéressantes pour les granulats recyclés et secondaires, en particulier les gravats qui peuvent être utilisés pour la protection de berges (HS 13 - 10.7) et les gabions (HS 13 - 10.8).

Les granulats recyclés peuvent également être employés pour la production de ciment. En effet, le calcaire et l'argile, les matières premières pour la production de clinker de Portland, peuvent être partiellement remplacées par des granulats recyclés. En fonction de la composition des matières premières primaires, des gravats et du type de ciment produit, jusqu'à 20 % des matières premières pourraient être remplacées.

En outre, un traitement de carbonatation peut être effectué sur les granulats de béton recyclés afin de réduire leur coefficient d'absorption d'eau, et donc d'améliorer leur qualité technique. En outre, la carbonatation permet de fixer du CO₂ dans le béton, limitant ainsi davantage l'impact carbone des granulats recyclés

Comme inspiration, la liste suivante regroupe divers produits de construction à haute teneur (30-100 % en poids) en matériaux de construction recyclés :

- Ciment Eco-Hybride produit par la combinaison de ciment CSA et de ciment mélangé avec 30% en poids de divers déchets de démolition (brique, béton, verre et gypse) ;
- Éléments de béton structurel incorporant >75% en poids de granulats de béton recyclés et de ciment éco-hybride ;
- Éléments de mur non structurels ultra-légers et panneaux en béton et copeaux de bois contenant 100 % en poids de béton recyclé et de fibres de bois recyclées ;
- Systèmes démontables à base de blocs préfabriqués produits par carbonatation rapide d'au moins 60 % en poids de fractions fines de béton recyclé, permettant une réduction d'au moins 100 kg de CO₂ par tonne de produit.

8. CONCLUSION ET PERSPECTIVES

Le flux annuel de déchets inertes issus des activités du secteur de la déconstruction/construction est le flux de déchets le plus important en tonnage en Wallonie. Néanmoins, notre région est souvent citée en exemple européen en matière de taux de recyclage des déchets inertes. Les défis qui attendent le secteur de la construction sont cependant considérables. La généralisation du concept d'économie circulaire ainsi que l'arrêt programmé de l'expansion de l'urbanisation (« stop béton ») vont devoir être combinés à d'importants travaux de rénovation du bâti pour des raisons d'économie d'énergie. Cette situation devrait générer à brève échéance d'importantes quantités de déchets de construction que le secteur se devra de transformer qualitativement en ressources utilisables. Parallèlement, la nécessaire gestion parcimonieuse des ressources naturelles de notre sous-sol entraînera la généralisation du recours aux matériaux recyclés.

Le présent guide technique donne d'ores et déjà de nombreuses pistes d'utilisation de ces matériaux en chantiers publics mais également privés. Quelle que soit l'application, l'accent y est porté sur les nécessaires performances techniques des matériaux et sur l'importance de leur conformité aux référentiels européens et régionaux.

Cependant, il est illusoire de prétendre que les matériaux recyclés vont à terme remplacer complètement les matériaux d'origine naturelle. La demande totale en matériaux de construction est à ce jour bien plus importante que la quantité de déchets à recycler. Néanmoins, l'introduction progressive d'un certain pourcentage de granulats recyclés à chaque étape d'un chantier, à chaque niveau d'un ouvrage, permettra aux bâtisseurs de demain d'ouvrir la voie vers une construction circulaire.

9. ANNEXES

9.1 Granulométrie

Gravillon pour fondation en empierrement

Tableau C. 4.4.2.2.1.a.

Tamis	2/4	2/6,3	4/6,3	6,3/10	6,3/14	6,3/20	10/14	14/20	20/31,5	31,5/63	20/63
125	-	-	-	-	-	-	-	-	-	100	100
90	-	-	-	-	-	-	-	-	-	98-100	98-100
63	-	-	-	-	-	-	-	-	100	80-99	80-99
45	-	-	-	-	-	-	-	-	98-100	20-70 ⁽¹⁾	20-70 ⁽¹⁾
40	-	-	-	-	-	100	-	100	-	-	-
31,5	-	-	-	-	-	-	-	-	80-99	0-20	-
28	-	-	-	-	100	98-100	100	98-100	-	-	-
20	-	-	-	100	98-100	80-99	98-100	80-99	0-20	-	0-20
16	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5	-
14	-	-	-	98-100	80-99	20-70 ⁽¹⁾	80-99	0-20	-	-	-
12,5	-	100	100	-	-	-	-	-	-	-	-
11,2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
10	-	-	-	80-99	20-70 ⁽¹⁾	-	0-20	-	0-5	-	0-5
9	-	98-100	98-100	-	-	-	-	-	-	-	-
8	100	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
7,1	-	-	-	-	-	-	-	0-5	-	-	-
6,3	-	80-99	80-99	0-20	0-20	0-20	-	-	-	-	-
5,6	98-100	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
5	-	-	-	-	-	-	0-5	-	-	-	-
4,5	-	20-70 ⁽¹⁾	-	-	-	-	-	-	-	-	-
4	80-99	-	0-20	-	-	-	-	-	-	-	-
3,15	-	-	-	0-5	0-5	0-5	-	-	-	-	-
2,8	20-70 ⁽¹⁾	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2	0-20	0-20	0-5	-	-	-	-	-	-	-	-
1	0-5	0-5	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Catégorie	G ₀ 80/20	-G ₀ 80/20	G ₀ 80/20	G ₀ 80/20	G ₀ 80/20	-G ₀ 80/20					
Tolérance	GT _c 20/15										

⁽¹⁾ La tolérance sur la granularité type déclarée par le fournisseur est de +/- 15 (catégorie de tolérance GT_c20/15)

Gravillon pour fondation en empierrement

Tableau C. 4.4.2.2.1.b.

Tamis	2/4	2/8	4/8	8/14	8/20	14/20	20/31,5	31,5/63	20/63
125	-	-	-	-	-	-	-	100	100
90	-	-	-	-	-	-	-	98-100	98-100
63	-	-	-	-	-	-	100	80-99	80-99
45	-	-	-	-	-	-	98-100	20-70 ⁽¹⁾	20-70 ⁽¹⁾
40	-	-	-	-	100	100	-	-	-
31,5	-	-	-	-	-	-	80-99	0-20	-
28	-	-	-	100	98-100	98-100	-	-	-
20	-	-	-	98-100	80-99	80-99	0-20	-	0-20
16	-	100	100	-	-	-	-	0-5	-
14	-	-	-	80-99	20-70 ⁽¹⁾	0-20	-	-	-
12,5	-	-	-	-	-	-	-	-	-
11,2	-	98-100	98-100	-	-	-	-	-	-
10	-	-	-	-	-	-	0-5	-	0-5
9	-	-	-	-	-	-	-	-	-
8	100	80-99	80-99	0-20	0-20	-	-	-	-
7,1	-	-	-	-	-	0-5	-	-	-
6,3	-	-	-	-	-	-	-	-	-
5,6	98-100	-	20-70 ⁽¹⁾	-	-	-	-	-	-
5	-	-	-	-	-	-	-	-	-
4,5	-	-	-	-	-	-	-	-	-
4	80-99	20-70 ⁽¹⁾	0-20	0-5	0-5	-	-	-	-
3,15	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2,8	20-70 ⁽¹⁾	-	-	-	-	-	-	-	-
2	0-20	0-20	0-5	-	-	-	-	-	-
1	0-5	0-5	-	-	-	-	-	-	-
Catégorie	G ₀ 80/20								
Tolérance	GT _c 20/15								

⁽¹⁾ La tolérance sur la granularité type déclarée par le fournisseur est de +/- 15 (catégorie de tolérance GT_c20/15) ou de +/- 17,5 (catégorie de tolérance GT_c20/15)

Gravillon pour fondation empierrement

Tableau C. 4.2.2.

Tamis	0/8	0/10	0/14	0/20	0/31,5	0/40
80	-	-	-	-	-	100
63	-	-	-	-	100	98-100
40	-	-	-	100	98-100	80-99
31,5	-	-	-	-	80-99	-
28	-	-	100	98-100	-	-
20	-	100	98-100	80-99	-	-
16	100	-	-	-	-	-
14	-	98-100	80-99	-	-	-
10	98-100	80-99	-	-	-	-
8	80-99	-	-	-	-	-
Catégorie	G _A 80					

Fondation en béton maigre

Tableau C. 38

Tamis	2/4	2/6,3	4/6,3	6,3/10	6,3/14	6,3/20	10/14	10/20	14/20	20/31,5
63	-	-	-	-	-	-	-	-	-	100
45	-	-	-	-	-	-	-	-	-	98-100
40	-	-	-	-	-	100	-	100	100	-
31,5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	85-99
28	-	-	-	-	100	98-100	100	98-100	98-100	-
20	-	-	-	100	98-100	90-99	98-100	85-99	85-99	0-20
16	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
14	-	-	-	98-100	90-99	25-70 ⁽¹⁾	85-99	-	0-20	-
12,5	-	100	100	-	-	-	-	-	-	-
11,2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
10	-	-	-	85-99	25-70 ⁽¹⁾	-	0-20	0-20	-	0-5
9	-	98-100	98-100	-	-	-	-	-	-	-
8	100	-	-	-	-	-	-	-	-	-
7,1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
6,3	-	85-99	85-99	0-20	0-15	0-15	-	-	-	-
5,6	98-100	-	-	-	-	-	-	-	-	-
5	-	-	-	-	-	-	0-5	0-5	-	-
4,5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
4	85-99	-	0-20	-	-	-	-	-	-	-
3,15	-	-	-	0-5	0-5	0-5	-	-	-	-
2,8	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2	0-20	0-20	-	-	-	-	-	-	-	-
1	0-5	0-5	0-5	-	-	-	-	-	-	-
Catégorie	G _c 85/20	G _c 85/20	G _c 85/20	G _c 85/20	G _c 90/15	G _c 85/20				
Tolérance	-	-	-	-	G _T 15	G _T 15	-	-	-	-

Fondation en béton maigre

Tableau C. 4.4.3.2.1.b.

Tamis	2/4	2/8	4/8	8/14	8/20	14/20	20/31,5
63	-	-	-	-	-	-	100
45	-	-	-	-	-	-	98-100
40	-	-	-	-	100	100	-
31,5	-	-	-	-	-	-	85-99
28	-	-	-	100	98-100	98-100	-
20	-	-	-	98-100	90-99	85-99	0-20
16	-	100	100	-	-	-	-
14	-	-	-	85-99	25-70 ⁽¹⁾	0-20	-
12,5	-	-	-	-	-	-	-
11,2	-	98-100	98-100	-	-	-	-
10	-	-	-	-	-	-	0-5
9	-	-	-	-	-	-	-
8	100	85-99	85-99	0-20	0-15	-	-
7,1	-	-	-	-	-	0-5	-
6,3	-	-	-	-	-	-	-
5,6	98-100	-	-	-	-	-	-
5	-	-	-	-	-	-	-
4,5	-	-	-	-	-	-	-
4	85-99	-	0-20	0-5	0-5	-	-
3,15	-	-	-	-	-	-	-
2,8	-	-	-	-	-	-	-
2	0-20	0-20	0-5	-	-	-	-
1	0-5	0-5	-	-	-	-	-
Catégorie	G _c 85/20	G _c 85/20	G _c 85/20	G _c 85/20	G _c 90/15	G _c 85/20	G _c 85/20
Tolérance	-	-	-	-	G _r 15	-	-

Grave pour béton maigre

Tamis	0/8	0/10	0/14	0/20	0/31,5
63	-	-	-	-	100
40	-	-	-	100	98-100
31,5	-	-	-	-	90-99
28	-	-	100	98-100	-
20	-	100	98-100	90-99	-
16	100	-	-	-	70 ± 20
14	-	98-100	90-99	-	-
10	98-100	90-99	-	70 ± 20	-
8	90-99	-	70 ± 20	-	-
4	70 ± 20	70 ± 20	-	-	40 ± 20
2	-	-	40 ± 20	40 ± 20	-
1	40 ± 20	40 ± 20	-	-	-
Catégorie	C _A 90				

Fondation en grave bitume

Tableau C. 4.4.5.2.1.a.

Tamis	2/4	2/6,3	4/6,3	6,3/10	6,3/14	6,3/20	10/14	14/20	20/31,5
63	-	-	-	-	-	-	-	-	100
45	-	-	-	-	-	-	-	-	98-100
40	-	-	-	-	-	100	-	100	-
31,5	-	-	-	-	-	-	-	-	85-99
28	-	-	-	-	100	98-100	100	98-100	-
20	-	-	-	100	98-100	85-99	98-100	85-99	0-20
16	-	-	-	-	-	-	-	-	-
14	-	-	-	98-100	85-99	20-70 25-80 ⁽¹⁾	85-99	0-20	-
12,5	-	100	100	-	-	-	-	-	-
11,2	-	-	-	-	-	-	-	-	-
10	-	-	-	85-99	20-70 25-80 ⁽¹⁾	-	0-20	-	0-5
9	-	98-100	98-100	-	-	-	-	-	-
8	100	-	-	-	-	-	-	-	-
7,1	-	-	-	-	-	-	-	0-5	-
6,3	-	85-99	85-99	0-20	0-20	0-20	-	-	-
5,6	98-100	-	-	-	-	-	-	-	-
5	-	-	-	-	-	-	0-5	-	-
4,5	-	20-70 25-80 ⁽¹⁾	-	-	-	-	-	-	-
4	85-99	-	0-20	-	-	-	-	-	-
3,15	-	-	-	0-5	0-5	0-5	-	-	-
2,8	20-70 25-80 ⁽¹⁾	-	-	-	-	-	-	-	-
2	0-20	0-20	-	-	-	-	-	-	-
1	0-5	0-5	0-5	-	-	-	-	-	-
Catégorie	G _c 85/20	G _c 85/20	G _c 85/20	G _c 85/20	G _c 85/20	G _c 85/20	G _c 85/20	G _c 85/20	G _c 85/20
Tolérance	G _{20/15} G _{25/15} ⁽¹⁾	G _{20/15} G _{25/15} ⁽¹⁾	-	-	G _{20/15} G _{25/15} ⁽¹⁾	G _{20/15} G _{25/15} ⁽¹⁾	-	-	-

⁽¹⁾ Les catégories de tolérances G_{20/15} et G_{25/15} au tamis intermédiaire sont toutes deux autorisées.
La tolérance sur la granularité déclarée par le fournisseur est de +/- 15.

Fondation en grave bitume

Tableau C. 4.4.5.2.1.b.

Tamis	2/4	2/8	4/8	8/14	8/20	14/20	20/31,5
63	-	-	-	-	-	-	100
45	-	-	-	-	-	-	98-100
40	-	-	-	-	100	100	-
31,5	-	-	-	-	-	-	85-99
28	-	-	-	100	98-100	98-100	-
20	-	-	-	98-100	85-99	85-99	0-20
16	-	100	100	-	-	-	-
14	-	-	-	85-99	20-70 25-80 ⁽¹⁾	0-20	-
12,5	-	-	-	-	-	-	-
11,2	-	98-100	98-100	-	-	-	-
10	-	-	-	-	-	-	0-5
9	-	-	-	-	-	-	-
8	100	85-99	85-99	0-20	0-20	-	-
7,1	-	-	-	-	-	0-5	-
6,3	-	-	-	-	-	-	-
5,6	98-100	-	20-70 25-80 ⁽¹⁾	-	-	-	-
5	-	-	-	-	-	-	-
4,5	-	-	-	-	-	-	-
4	85-99	20-70 ⁽¹⁾	0-20	0-5	0-5	-	-
3,15	-	-	-	-	-	-	-
2,8	20-70 25-80 ⁽¹⁾	-	-	-	-	-	-
2	0-20	0-20	0-5	-	-	-	-
1	0-5	0-5	-	-	-	-	-
Catégorie	G _c 85/20	G _c 85/20	G _c 85/20	G _c 85/20	G _c 85/20	G _c 85/20	G _c 85/20
Tolérance	G _{20/15} G _{25/15} ⁽¹⁾	G _{20/17,5} ⁽²⁾	G _{20/15} G _{25/15} ⁽¹⁾	-	G _{20/15} G _{25/15} ⁽¹⁾	-	-

Graves pour grave-bitume

Tamis	Pourcentage en masse de passant	
	0/20	0/14
40	100	-
28	98-100	100
20	85-99	98-100
14	-	85-99
10	55-85	-
8	-	55-85
4	35-65	35-65
2	22-50	22-50
1	15-40	15-40
0,5	10-35	10-35
0,063	0-10	0-10

10. BIBLIOGRAPHIE

B

Bureau de Normalisation

- **B1** « NBN B 15-001 : 2018 Béton - Spécification, performances, production et conformité - Complément national à la NBN EN 206 :2013+A1 :2016 », s. d.
- **B2** « NBN EN 206-1 : 2001 Béton - Partie 1 : Spécification, performances, production et conformité », s. d.
- **B3** « NBN EN 12620 + A1 : 2008 - Granulats pour béton. », s. d.
- **B4** « NBN EN 13242 + A1 : 2008 Granulats pour matériaux traités aux liants hydrauliques et matériaux non traités utilisés pour les travaux de génie civil et pour la construction des chaussées », s. d.
- **B5** « Norme NBN B 15-001 : 2022 Béton - Spécification, performances, production et conformité - Complément national à la NBN EN 206 :2013+A2 :2021 », s. d.
- **B6** « Norme NBN B 15-105 : 2022 Béton - Méthodologie pour l'évaluation et l'attestation de l'aptitude à l'emploi de matières premières inertes destinées au béton », s. d.
- **B7** « Norme NBN EN 933-11 : 2009 Essais pour déterminer les caractéristiques géométriques des granulats - Partie 11 : Essai de classification des constituants de gravillons recyclés », s. d.
- **B8** « Norme NBN EN 1097-1 : 2011 Essais pour déterminer les caractéristiques mécaniques et physiques des granulats - Partie 1 : Détermination de la résistance à l'usure (micro-Deval) », s. d.
- **B9** « Norme NBN EN 1097-2 : 2020 Essais pour déterminer les caractéristiques mécaniques et physiques des granulats - Partie 2 : Méthodes pour la détermination de la résistance à la fragmentation », s. d.
- **B10** « Norme NBN EN 13369 : 2013 Règles communes pour les produits préfabriqués en béton », s. d.
- **B11** « Norme NBN EN 16907-5 : 2019 Terrassements - Partie 5 : Contrôle qualité et surveillance », s. d.
- **B12** « Standard NBN EN 16907-3: 2019 Earthworks - Part 3: Construction procedures », s. d.

C

Centre de Recherches Routières

- **C1** « Bulletin CRR », Vol. 124, 2020.
- **C2** « Fondations durables grâce au recyclage in situ à l'aide de la technique du bitume-mousse », s. d. <https://brrc.be/fr/expertise/expertise-aperçu/fondations-durables-grâce-au-recyclage-situ-laide-technique-du-bitume>.
- **C3** « Re-RACE (Rejuvenation of Reclaimed Asphalt in a Circular Economy) ». Centre de recherches routières, 2022. https://brrc.be/fr/expertise/expertise-aperçu/re-race-rejuvenation-reclaimed-asphalt-circular-economy?utm_source=flexmail&utm_medium=e-mail&utm_campaign=20220329newsletter051087firstnamedcouvrezla20220329t090045294z&utm_content=rerace350x400pxcopyjpg.
- **C4** « Revêtements modulaires en pierre naturelle », 2018. https://brrc.be/sites/default/files/2019-09/r95_0.pdf.

Centre Scientifique et Technique de la Construction

- **C6** « NIT 267 Sols intérieurs en béton », février 2019. file:///C:/Users/lle/Downloads/NIT%20267.pdf.

Centre Scientifique et Technique de la Construction, et Centre de Recherches Routières

- **C7** « Monographie n°32 Utilisation de granulats de béton recyclés dans le béton », juillet 2019. file:///C:/Users/lle/Downloads/GranulatsRecycl%C3%A9sB%C3%A9ton_CSTC.pdf.

COPRO

- **C8** « La voirie circulaire ». COPRO (blog), 30 avril 2019. <https://www.copro.eu/fr/news/la-voirie-circulaire>.
- **C9** « PTV 406 (9.0) - Prescriptions techniques pour granulats recyclés », 10 mars 2020. <https://www.copro.eu/fr/ptv-406>.

D

De Brabandere, Pieter

- **D1** « Circulaire beton in de wegenbouw ». Leuven, 4 avril 2022. <https://abr-bwv.be/documents/2.02.4PPT-NLCirculairebetonindewegenbouw679.pdf>.

F

FEREDECO asbl

- **F1** « Guide de bonnes pratiques - MAR ». 2014, s. d.

G

Groupe Belge du Béton

- **G1** « Granulats ». In Technologie du béton. Chapitre II, s. d.

I

ISSEP

- **I1** « P-29 Méthode de prélèvement de granulats recyclés », 24 février 2022. https://www.issep.be/wp-content/uploads/P29_Methode-de-prelevements-des-granulats_V1_Publi-CWEA-Final.pdf.

S

Service Public de Wallonie

- **S1** « Cahier des Charges Type Qualiroutes (version 2021) », s. d. <http://qc.spw.wallonie.be/fr/qualiroutes/index.html>.
- **S2** « Chapitre B : Terminologie », 1 janvier 2021. <http://qc.spw.wallonie.be/fr/qualiroutes/doc/Qualiroutes/Chapitre%20B.pdf>.
- **S3** « Chapitre C : Matériaux et produits de construction », 1 janvier 2022. <http://qc.spw.wallonie.be/fr/qualiroutes/doc/Qualiroutes/Chapitre%20C.pdf>.
- **S4** « Chapitre F : Sous-fondations et fondations », 1 janvier 2022. <http://qc.spw.wallonie.be/fr/qualiroutes/doc/Qualiroutes/Chapitre%20F.pdf>.
- **S5** « Circulaire du 13/07/2018 », 13 juillet 2018.
- **S6** « Complément au document de référence QUALIROUTES-A-1 pour sous-fondation de type granulaire », 1 janvier 2019. <http://qc.spw.wallonie.be/fr/qualiroutes/doc/QR-A-1-6.pdf>.
- **S7** « Mise en place d'un système de gestion de la qualité lors de l'exécution des marchés de travaux », 20 juillet 2011. Document de référence QUALIROUTES – A – 1. <http://qc.spw.wallonie.be/fr/qualiroutes/doc/QR-A-1.pdf>.
- **S8** « Permis-on-web environnement : Outil de recherche des rubriques ». 90 - Assainissement, voirie et gestion des déchets, s. d. http://environnement.wallonie.be/cgi/dgrne/aerw/pe/__drup/liste_inter.idc?where=90.22.
- **S9** « Permis-on-web environnement : Outil de recherche des rubriques ». 45 - Construction, s. d. http://environnement.wallonie.be/cgi/dgrne/aerw/pe/__drup/chx_rub_liste.idc.
- **S10** « Sous-fondations et fondations ». In Cahier des charges type Qualiroutes, F:42, 2011. <http://qc.spw.wallonie.be/fr/qualiroutes/doc/Qualiroutes/Chapitre%20F.pdf>.

SETRA ; LCPC

- **S11** « Réalisation des remblais et des couches de forme (GTR) - Fascicule 1 - principes généraux », 1 septembre 1992. <https://www.cerema.fr/fr/centre-ressources/boutique/realisation-remblais-couches-forme-gtr-fascicule-1-principes>.
-

V

Vrijders, Jeroen

- **V1** « Sentier à deux voies, Adinkerke ». Catalogus van secundaire en gerecycleerde granulaten, 31 janvier 2019. <https://bouw.grondstoffencatalogus.be/voorbeeldprojecten/automatische-concepten/>.