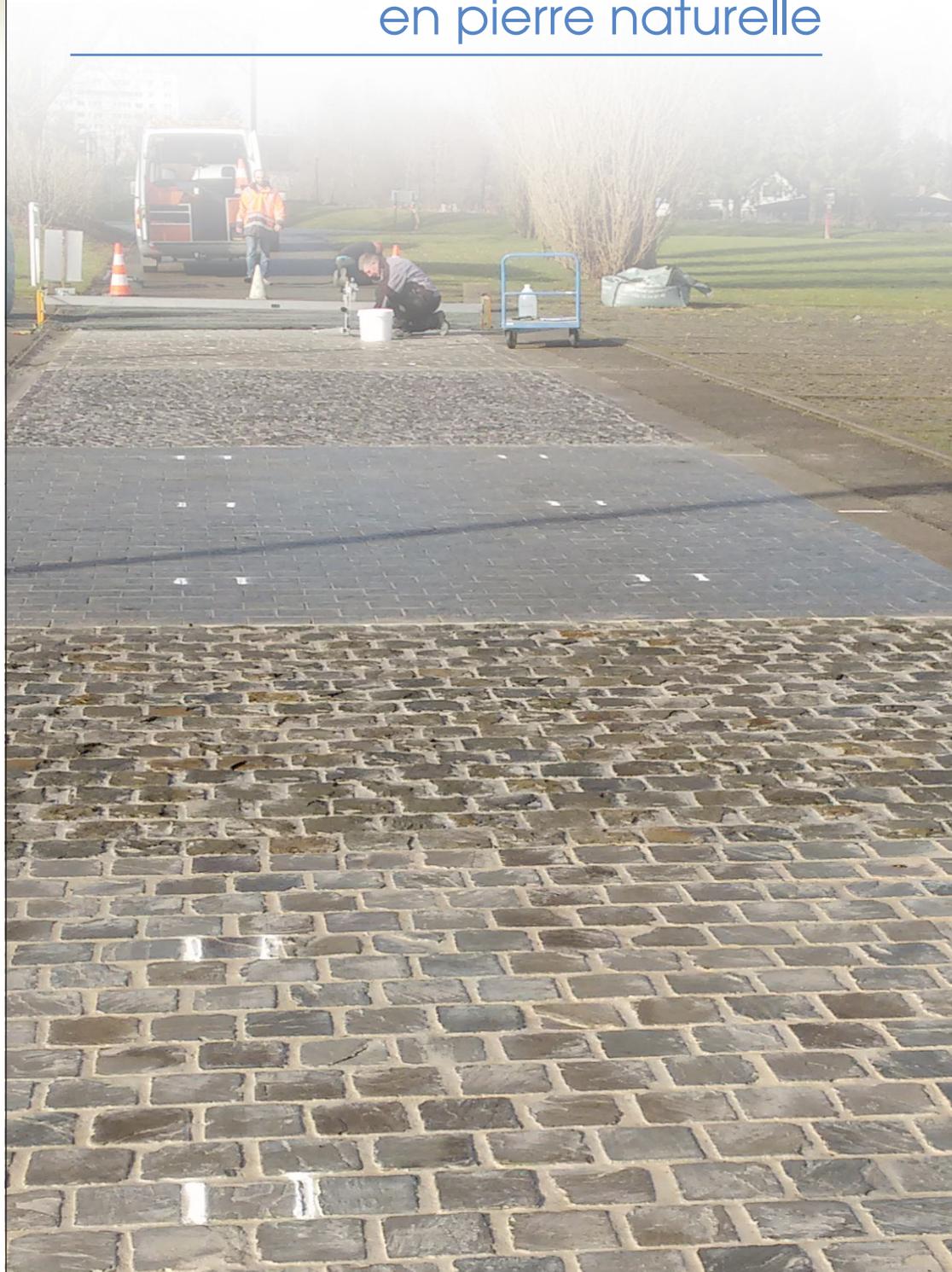




Centre de recherches routières
Votre partenaire pour des routes durables

Revêtements modulaires en pierre naturelle



Recommandations

R 95

Le Centre de recherches routières (CRR) est un institut de recherche privé impartial fondé en 1952. Il exerce son activité au bénéfice de tous les partenaires du secteur routier belge. Le développement durable par l'innovation est le fil conducteur de toutes les activités du CRR. Le CRR partage ses connaissances avec les professionnels du secteur routier entre autres par le biais de ses publications (codes de bonne pratique, synthèses, comptes rendus de recherche, méthodes de mesure, fiches d'information, Bulletins CRR et Dossiers, rapports d'activités). Nos publications sont largement diffusées en Belgique et à l'étranger auprès de centres de recherche scientifique, d'universités, d'institutions publiques et d'instituts internationaux. Plus d'informations sur nos publications et activités: www.crr.be

Recommandations R 95

Revêtements modulaires
en pierre naturelle

Centre de recherches routières

Etablissement reconnu par application de l'arrêté-loi du 30 janvier 1947

Bruxelles

2018

Composition du groupe de travail rédactionnel

Président

Y. Hanoteau (CRR)

Secrétaires

E. Boonen (CRR), O. De Myttenaere (CRR), B. Janssens (CRR), M. Lybaert (CRR), S. Smets (CRR)

Membres

O. Auly (Fédération Pierre bleue de Belgique), D. Baerts (Service public de Wallonie - SPW), A. Beeldens (CRR), A. Bonsang (Carrières du Bois d'Anthisnes), A. Dath (SECO), G. De Baerdemaeker (P.T.B.-Compaktuna®), J. de Geest (bvba J.G.S. Europe), H. Deferm (H. Deferm sprl), M. Demunter (Service public régional de Bruxelles - SPRB), P. De Paep (SWECO BELGIUM), P. De Smet (bvba Cochuyt-De Smet), Th. Deremince (asbl Atingo, anciennement Gamah - Groupe d'Action pour une Meilleure Accessibilité des personnes Handicapées), P. Dethier (Carrière du Bois d'Anthines), P. De Vos (nv BOUW TECHNIEK COMPAKTA), P. Elsen (Service public de Wallonie - SPW), M. Flament (Carrières du Hainaut), J. Floren (bvba A.B.W.), K. Hofman (Hofman), F. Jonkers (Carrières du Hainaut), K. Laeremans (Maris Natuursteen), G. Legein (Fédération Benelux des grossistes en pierre naturelles - FEBENAT), O. Lepot (Ville de Liège), J. Maeck (CRR), P. Maris (Maris Natuursteen), V. Mathieu (Service public de Wallonie - SPW), D. Nicaise (Centre Scientifique et Technique de la Construction - CSTC), J. Nomerange (Consultant), C. Pane (Shell), O. Pilate (Sagrex), V. Platiaux (Service public de Wallonie - SPW), K. Poncelet (Shell), P. Rommel (Beltrami), Ph. Sequaris (Carrières du Hainaut SCA), D. Stove (SWECO BELGIUM), J.P. Tasiaux (Inasep), F. Thewissen (Service public de Wallonie - SPW), F. Tourneur (Pierres et Marbres de Wallonie), G. Van Camp (bvba Stonetech), J. Van Damme (Stad Antwerpen), N. Van Den Berg (KOAC - NPC), K. Vandenneucker (COPRO), J. Vanhollebeke (nv Stone Consulting).

Remerciements

Nous remercions Marleen De Ceukelaire (Institut royal des Sciences naturelles de Belgique) pour son aide enthousiaste dans la relecture de la version néerlandophone du chapitre 1 et Patrick Baton (formateur) pour les informations techniques pertinentes qu'il nous a livrées.

Avis au lecteur

Bien que les recommandations formulées dans le présent code de bonne pratique aient été établies avec le plus grand soin, des imperfections ne sont pas à exclure. Ni le CRR, ni ceux qui ont collaboré à la présente publication ne peuvent être tenus pour responsables des informations compilées et fournies, qui le sont à titre purement documentaire et non contractuel.

Revêtements modulaires en pierre naturelle / Centre de recherches routières. – Bruxelles : CRR, 2018. 140 pp. – (Recommandations, 1376-9340 ; R 95).

Dépôt légal: D/2018/0690/5

© CRR Tous droits réservés

Table des matières

Avant-propos

1	Introduction	13
1.1	Notion de géologie	13
1.1.1	Définitions	13
1.1.2	Cycle des roches	13
1.1.3	Classifications des roches	14
1.1.3.1	Classification scientifique	14
1.1.3.2	Dénomination commerciale	16
1.1.4	Aperçu de la géologie de Belgique	16
1.1.4.1	Paléozoïque inférieur (540 – 408 Ma: Cambrien, Ordovicien, Silurien)	18
1.1.4.2	Dévonien (408 – 355 Ma)	18
1.1.4.3	Carbonifère (355 – 295 Ma)	18
1.1.4.4	Jurassique (203 – 135 Ma)	19
1.1.4.5	Paléogène (65 – 23 Ma)	19
1.1.5	Description des principales roches exploitées en Belgique	19
1.1.5.1	Roches sédimentaires carbonatées ou calcaires	19
1.1.5.2	Roches sédimentaires détritiques	20
1.1.5.3	Roches porphyriques	21
1.1.6	Description des pierres étrangères	21
1.1.6.1	Roches sédimentaires	21
1.1.6.2	Roches magmatiques	22
1.1.6.3	Roches métamorphiques	23
1.2	Contexte historique	23
1.2.1	Histoire du revêtements modulaires et structures en pavés	23
1.2.2	Histoire de l'extraction des pavés en Belgique	25
1.2.3	Histoire de l'extraction des dalles en Belgique	26
1.3	Extraction et fabrication des produits en pierre naturelle	27
1.3.1	Extraction des matériaux	27
1.3.2	Fabrication	28
1.3.2.1	Filière traditionnelle	28
1.3.2.2	Filière mécanisée	29
2	Caractérisation et certification des matériaux	31
2.1	Caractérisation des éléments de voirie en pierre naturelle et essais	31
2.1.1	Documents de référence	31
2.1.2	Définitions sur base de la forme et des dimensions de l'élément	32
2.1.2.1	Dalles	33
2.1.2.2	Pavés	33
2.1.2.3	Bordures	34
2.1.3	Essais liés à l'utilisation de la pierre naturelle en voirie	34
2.1.3.1	Identification et caractérisation intrinsèque de la pierre naturelle	35
2.1.3.2	Les essais déterminant la performance à l'usage	36
2.1.3.3	Essais de durabilité	38
2.1.4	Critères de sélection des éléments en pierre naturelle	39
2.1.5	Quelques exemples de pathologies connues de la pierre naturelle	41
2.2	Certification des matériaux	45
2.2.1	Introduction	45
2.2.2	Marquage CE	45
2.2.3	Certification ATG/BENOR	47
2.2.3.1	Filière 1 – Fabrication en atelier – Déclarations de qualité	47

2.2.3.2	Filière 2 – Production en série – Certification ATG/BENOR	48
2.3	Materiaux de la couche de pose	48
2.3.1	Généralités	48
2.3.2	Matériaux non liés	49
2.3.2.1	Couche de pose en sable ou en gravillons	49
2.3.3	Matériaux liés	49
2.3.3.1	Sable-ciment	49
2.3.3.2	Mortier de ciment	50
2.4	Materiaux de jointoiment	51
2.4.1	Généralités	51
2.4.2	Matériaux non liés	51
2.4.3	Matériaux liés	52
2.4.3.1	Mortier de ciment modifié ou non	53
2.4.3.2	Sable-ciment	53
2.4.3.3	Mortiers bitumineux	54
2.4.3.4	Mortiers de jointoiment liés à la résine	54
2.4.3.5	Sable polymère	55
2.4.4	Couche d'adhérence/pont d'adhérence	56
3	Conception et dimensionnement	57
3.1	Description et rôle des éléments de la structure routière	57
3.1.1	Structure de chaussée (route et voirie assimilée)	57
3.1.2	Sol en place et fond de coffre	58
3.1.3	Sous-fondation	59
3.1.4	Fondation	61
3.1.4.1	Fondation non liée	62
3.1.4.2	Fondation liée	62
3.1.5	Revêtement	64
3.1.6	Revêtements en éléments modulaires de pierre naturelle	64
3.2	Principes généraux de conception et de dimensionnement	65
3.2.1	Règles générales pour le dimensionnement	65
3.2.2	Drainage et évacuation de l'eau dans la conception	65
3.3	Règles de conception spécifiques aux revêtements modulaires en pierre naturelle	66
3.3.1	Méthodologie	66
3.3.2	Prise en compte du trafic	66
3.3.2.1	Référentiel pour revêtements modulaires en pierre naturelle circulés par des véhicules	66
3.3.2.2	Référentiel pour revêtements modulaires en pierre naturelle circulés par des piétons et des véhicules	67
3.3.2.3	Domaines d'utilisation des pavés en pierre naturelle	67
3.3.3	Règles de dimensionnement des couches	69
3.3.4	Principes de conception spécifiques aux structures en revêtements de pavés en pierre naturelle façonnés de manière traditionnelle	70
3.3.4.1	Effet de voûte dans le plan vertical	70
3.3.4.2	Effet d'arc dans le plan horizontal (pavés mosaïques)	70
3.3.4.3	Effet de compactage et de stabilisation dû au démaigrissement des pavés	71
3.3.5	Choix de l'élément en pierre naturelle	72
3.3.6	Choix de l'appareillage des éléments modulaires en pierre naturelle	72
3.3.6.1	Appareillages droits	73
3.3.6.2	Appareillages courbes (uniquement pavés)	73
3.3.7	Principes de conception de l'appareillage spécifiques aux pavés en pierre naturelle	75
3.3.8	Les raccords de pavage	77
3.3.9	Choix du type de pose d'éléments modulaires en pierre naturelle	77

3.3.10	Recommandations complémentaires relatives aux joints et à la couche de pose pour les revêtements en pavés	81
3.3.10.1	Dimensions et qualité des joints	81
3.3.10.2	Couche de pose	81
3.3.10.3	Recommandations relatives à la conception d'une couche de pose rigide en sable-ciment	83
3.3.11	Exigences pour les pavages en pierre naturelle en suivant le domaine d'utilisation	84
3.3.12	Joints spéciaux	85
3.3.12.1	Joints de dilatation	85
3.3.12.2	Joints d'isolation	86
3.3.13	Conception et dimensionnement du contrebutage	87
3.3.14	Conception et dimensionnement des dispositifs d'évacuation des eaux	88
3.3.15	Prise en compte des besoins spécifiques des piétons et des cyclistes	89
3.3.16	Prise en compte de l'aspect environnemental	93
3.4	Etude d'ouvrage particulier	93
3.4.1	Structures pavées en pente	93
3.4.2	Revêtement en dalles	94
3.4.3	Exigences spécifiques pour les éléments linéaires	94
4	Exécution	95
4.1	Introduction	95
4.2	Réception et contrôle des matériaux	95
4.2.1	Généralités	95
4.2.2	Procédures d'approbation et de réception	96
4.2.2.1	Procédure appliquée en Wallonie et en Région de Bruxelles-Capitale	96
4.2.2.2	Procédure appliquée en Flandre	97
4.2.3	Cas particulier des matériaux de réemploi ou de recyclage	97
4.2.4	Réception des produits en cohérence avec l'appareillage de pose pres crit	97
4.3	Conditions météorologiques générales	98
4.4	Travaux préalables au revêtement	98
4.4.1	Préparation du fond de coffre	98
4.4.2	Mise en place du dispositif de drainage	99
4.4.3	Mise en œuvre de la sous-fondation	99
4.4.4	Mise en œuvre du contrebutage et finition des bords	99
4.4.5	Réalisation de la fondation	100
4.5	Travaux de réalisation du revêtement en pavés	101
4.5.1	Mise en œuvre de la couche de pose	101
4.5.2	Pose des pavés	102
4.5.2.1	Généralités	102
4.5.2.2	Appareillages droits	104
4.5.2.3	Appareillages mosaïques	105
4.5.3	Compactage par vibration du pavage et remplissage des joints	105
4.5.4	Joints de dilatation dans le pavage	109
4.6	Opérations de contrôle	110
4.6.1	La fondation	110
4.6.2	La couche de pose	110
4.6.3	La surface finie	111
4.6.4	Les joints	111
4.6.5	Caractéristiques de surface	111
4.7	Spécificités des travaux de pose de bordure	112
4.8	Spécificités des travaux de pose de dalle	113

5	Entretien et réparation des revêtements modulaires en pierre naturelle	115
5.1	Généralités	115
5.2	Principales dégradations et causes	116
5.2.1	Dégradation d'un élément	116
5.2.2	Perte de cohésion structurelle	117
5.2.3	Fissures ou fentes dans des joints liés (au ciment)	118
5.2.4	Déformation du revêtement	119
5.2.4.1	Défaut d'uni transversal	119
5.2.4.2	Défaut d'uni longitudinal	120
5.2.4.3	Déformations locales	121
5.2.5	Mauvaise évacuation des eaux et/ou mauvais drainage	122
5.3	Nettoyage	122
5.4	Maîtrise des mauvaises herbes	123
5.4.1	Les mauvaises herbes sur les revêtements modulaires en pierre naturelle	123
5.4.2	Points importants lors de la conception	124
5.4.3	Choix du jointolement et de la couche de pose	125
5.4.4	Désherbage non chimique	126
5.5	Entretien préventif	127
5.5.1	Entretien des joints	127
5.5.1.1	Joints non liés	128
5.5.1.2	Matériaux liés	128
5.5.2	Remplacement d'éléments en pierre naturelle	128
5.5.3	Traitement de surface in situ	129
5.6	Entretien curatif	129
5.7	Reconstruction ou rénovation	130
B	Bibliographie	133

Liste des figures

Figure 1.1	Schéma simplifié du cycle des roches (Source: CSTC NIT 228 [1])	13
Figure 1.2	Pierre bleue polie (Photo: ©PierresEtMarbresDeWallonie)	19
Figure 1.3	Grès du Condroz (Photo: ©PierresEtMarbresDeWallonie)	20
Figure 1.4	Porphyre	21
Figure 1.5	Revêtements d'époque (Photo: ©PierresEtMarbresDeWallonie)	24
Figure 1.6	Sites d'exploitation de porphyre (Photos: ©PierresEtMarbresDeWallonie)	25
Figure 1.7	Fendage d'un bloc de grès	28
Figure 1.8	Clivage en blocs aux dimensions du produit fini	28
Figure 1.9	Taille et épincage des blocs de grès	28
Figure 1.10	Différents types de finition (Photos: ©PierresEtMarbresDeWallonie)	30
Figure 2.1	Pavés mosaïques (Source: Febenat)	33
Figure 2.2	Pavés oblongs	33
Figure 2.3	Pavés platines	34
Figure 2.4	Observation au microscope optique polarisant (Photo: CSTC)	35
Figure 2.5	Essais de compression et de flexion	37
Figure 2.6	Pendule SRT pour la mesure de la glissance	37
Figure 2.7	Exemple de marquage CE et déclaration de performance de pavés	46
Figure 2.8	Couche de pose en sable-ciment	50
Figure 2.9	Principe de transfert de charge entre les pierres d'un revêtement au moyen de joints complètement remplis. La force qui agit sur une pierre sous l'influence du trafic, est partiellement transférée à la pierre adjacente par le matériau de jointolement et la couche de pose	51
Figure 2.10	Jointolement au porphyre concassé 2/4	52
Figure 2.11	Mise en œuvre de mortier modifié	53
Figure 2.12	Mise en œuvre de mortier bitumineux	54
Figure 2.13	Principe du sable polymère	55
Figure 2.14	Pose d'une couche d'adhérence	56
Figure 3.1	Structure d'une chaussée (schéma de principe) [33, p. 3]	57
Figure 3.2	Pose d'un géotextile anticontaminant sous la sous-fondation	58
Figure 3.3	Essais géotechniques réalisés avant et en cours de projet (essai à la plaque et essai PANDA)	59
Figure 3.4	Structure globale d'un revêtement en pavés	64
Figure 3.5	Coupe transversale type d'un pavage en pierre naturelle [42, p. 56]	70
Figure 3.6	Pavages en appareillage courbe – Effet de voûte dans le plan horizontal: orientation des contraintes en zone d'accélération (à gauche) et orientation des contraintes en zone de freinage (à droite)	71
Figure 3.7	Nichage des pavés dans la couche de pose	71
Figure 3.8	Exemples d'appareillage droit (Photos: Febenat)	73
Figure 3.9	Exemples d'appareillage à cercles non concentriques (Photos: ©PierresEtMarbresDeWallonie)	74
Figure 3.10	Exemples d'appareillages à cercles concentriques (Photos: ©PierresEtMarbresDeWallonie)	74
Figure 3.11	Orientation d'un appareillage mosaïque en fonction de la pente longitudinale de la chaussée	76
Figure 3.12	Changement d'orientation d'un appareillage mosaïque à l'axe longitudinal de la chaussée, en fonction du sens de circulation des véhicules	76
Figure 3.13	Changement d'orientation d'un appareillage mosaïque au point haut du profil longitudinal de la chaussée (as de carreau)	77
Figure 3.14	Changement d'orientation d'un appareillage mosaïque au point bas du profil longitudinal de la chaussée (œil de bœuf)	77
Figure 3.15	Exemple d'appareillage en lignes – Traitement d'une courbe par réalisation d'une crémaillère	77

Figure 3.16	Exemples d'appareillage en lignes (croix de chevalier) – Traitement d'un carrefour	77
Figure 3.17	Exemple d'incompatibilité entre le matériau de jointolement et la couche de pose: combinaison d'une couche de pose rigide en sable-ciment et des joints de sable flexibles, perméables où l'eau, le gel et le trafic provoquent le déchaussement des pavés	78
Figure 3.18	Vérification de la stabilité de filtre entre la couche de pose non liée et la fondation [43, p. 36]	82
Figure 3.19	Exemples de structure de joints de dilatation dans un pavage en pierre naturelle lié (coïncidant éventuellement avec joint de dilatation dans fondation liée)	86
Figure 3.20	Joint d'isolation séparant le mur d'habitation du trottoir	86
Figure 3.21	Contrebutage entre le trottoir et la chaussée avec un pavage en pierre naturelle	87
Figure 3.22	Bordure à la transition entre un revêtement bitumineux et un pavage en pierre naturelle	87
Figure 3.23	Types de coupes longitudinales d'une transition entre différents types de revêtement	87
Figure 3.24	Type de contrebutage pour les catégories de trafic I, II et III (gauche) et IV (droite)	88
Figure 3.25	Exemple d'un bon jointolement avant l'ouverture au trafic	88
Figure 3.26	Evacuation de l'eau via l'avaloir dans le cas d'un revêtement imperméable (côté gauche) et évacuation de l'eau qui a pénétré dans la fondation via un tuyau de drainage dans le cas d'un revêtement perméable sur une fondation imperméable (côté droit)	89
Figure 3.27	Pavés en pierre naturelle peu confortables vu les multiples défauts d'uni	90
Figure 3.28	Pavés sciés utilisés lors du réaménagement d'une place en Région de Bruxelles-Capitale	90
Figure 3.29	Revêtement alternant de la pierre naturelle polie et brute. Au regard des surfaces polies existantes, le risque de glissance reste présent	91
Figure 3.30	Bande de confort en pavés sciés sur une chaussée en pavés classiques	92
Figure 3.31	Aménagements confortables pour les cyclistes (pavés sciés en voirie), mais pas pour les piétons (pavés platines en trottoir)	92
Figure 3.32	Pose de pavés sur une pente (coupe suivant axe longitudinal)	93
Figure 3.33	Formule permettant de calculer la charge de rupture suivant le document PTV 841 [9] (version 1.0 du 28/02/2005 – formule en cours de révision)	94
Figure 4.1	Exemple de protection du pavage en cas de conditions météorologiques défavorables	98
Figure 4.2	Pose des éléments de contrebutage avant la fondation et la couche de pose	99
Figure 4.3	Exemple de contrebutage dans une rue en pente	100
Figure 4.4	Importance d'une bonne planéité et d'un profilage de la fondation	100
Figure 4.5	Nichage des pavés dans la couche de pose, suivi du compactage	102
Figure 4.6	Pose de pavés avec contrôle visuel de la linéarité des joints	103
Figure 4.7	Pose d'une assise de panneresses	104
Figure 4.8	Différences de couleur	104
Figure 4.9	Orientation des joints continus perpendiculairement à la direction du trafic	104
Figure 4.10	Exemple de pose autour de points singuliers	105
Figure 4.11	Compactage adéquat du pavage, également sur les bords	106
Figure 4.12	Compactage des pavés humidifiés, suivi du remplissage des joints	106
Figure 4.13	Remplissage des joints au mortier modifié	107
Figure 4.14	Nettoyage des pavés après remplissage des joints	107
Figure 4.15	Remplissage des joints au mortier bitumineux	108
Figure 4.16	Remplissage des joints à la résine epoxy	108
Figure 4.17	Mise en œuvre de joints de dilatation	109
Figure 4.18	A gauche: application d'une couche d'adhérence (<i>Haftbrücke</i>) entre la couche de sable-ciment et la pierre naturelle au droit des joints de dilatation, telle qu'appliquée en Allemagne. A droite: exemple de l'humidification des pavés au droit du joint de dilatation	110
Figure 4.19	Mesure de l'adhérence au pendule SRT	111
Figure 4.20	Pose de bordure et joint d'isolation (droite) entre bordure et pavés	112

Figure 4.21	Appareil ultrason sur roulettes	113
Figure 4.22	Profilage et égalisation du lit de mortier pour dalles en pierre naturelle	113
Figure 4.23	Mise en œuvre de pavés en pierre naturelle sciés avec application d'une couche d'adhérence entre la couche de pose et le pavé	114
Figure 5.1	Exemple d'éclatement ou de désintégration de certains types de pierre naturelle en raison des conditions climatiques et/ou de la charge de trafic	116
Figure 5.2	Exemple d'éléments en pierre naturelle tambourinés, qui ont été vieillis volontairement et ne peuvent donc pas être considérés comme des dégradés!	117
Figure 5.3	Exemple de cassure ou d'effritement aux bords des pavés, à cause de joints trop étroits	117
Figure 5.4	Exemples de perte de cohésion structurelle du revêtement due à des joints trop larges, à un appareillage inadapté, à l'absence de contrebutage et/ou à une finition non soignée aux bords et autour des points singuliers	118
Figure 5.5	Des fissures dans des joints liés au ciment sont une dégradation fréquente dont les causes peuvent être multiples	119
Figure 5.6	Exemples d'orniérage et «effets de pompage» dans un revêtement en pierre naturelle	120
Figure 5.7	Exemples de défaut d'uni longitudinal et de dégradation, à imputer aux mouvements thermiques et/ou au raccord à d'autres revêtements	120
Figure 5.8	Exemples de déformations locales dues à une exécution peu soignée et/ou à des défauts de conception	121
Figure 5.9	Réparation plus difficile lors de l'exécution selon le mode de pose rigide	121
Figure 5.10	Exemples de dégradation due à une mauvaise évacuation des eaux du revêtement en pierre naturelle	122
Figure 5.11	Nettoyage de pierre naturelle	122
Figure 5.12	Mauvaises herbes	123
Figure 5.13	Influence de l'intensité d'utilisation sur la croissance des mauvaises herbes (à gauche) et gestion des mauvaises herbes adaptée (à droite)	124
Figure 5.14	Attention dès la conception pour un entretien mécanique ultérieur: distance suffisante entre les obstacles ou obstacles amovibles, passage aisé entre la chaussée et la piste cyclable ou le trottoir, filet d'eau entre le parking et la chaussée, etc.	125
Figure 5.15	Influence du matériau de couche de pose sur l'apparition des mauvaises herbes dans un jointolement de calcaire pollué 0/6,3 – A gauche: couche de pose ouverte de porphyre 2/6,3; à droite: couche de pose fermée de calcaire 0/6,3)	126
Figure 5.16	Différentes techniques de désherbage non chimiques	126
Figure 5.17	Dégradation locale aux joints dans un revêtement modulaire en pierre naturelle (Photo: Febenat)	127
Figure 5.18	Réparer à temps les dégradations locales des revêtements modulaires en pierre naturelle en remplaçant des éléments détériorés (Photos: Febenat)	128
Figure 5.19	En cas de travaux aux impétrants, les règles de base pour les revêtements en pierre naturelle doivent être également respectées	129
Figure 5.20	Réutilisation d'anciens pavés en cas de reconstruction complète d'un pavage en pierre naturelle	130
Figure 5.21	Pavage en pierre naturelle avant, pendant et après rénovation avec réutilisation de pavés en granit suédois	131

Liste des tableaux

Tableau 1.1	Classification des roches (selon PTV 844 [2])	14-15
Tableau 1.2	Echelle stratigraphique et niveaux exploités en Belgique	17
Tableau 1.3	Types de tailles et finitions courantes (selon les NIT 220 [5] et 228 [1])	29
Tableau 2.1	Définitions relatives aux éléments de voirie en pierre naturelle	32
Tableau 2.2	Classes d'utilisation et résistances à la compression minimales attendues correspondantes pour les pavages en pierre naturelle, telles que reprises dans le document PTV 842 [10, en cours de révision]	40
Tableau 2.3	Classes d'utilisation et charge de rupture minimale exigée correspondante pour les dalles en pierre naturelle et pour les bordures en pierre naturelle, telles que reprises dans les normes NBN EN 1341 (annexe A) [6] et NBN EN 1343 (annexe A) [8] et les PTV 841 [9] et PTV 843 [11]	40
Tableau 2.4	Cas les plus fréquents de pathologies de pierres naturelles (Photos: CSTC et CRR)	42-44
Tableau 3.1	Indice de gel et profondeur Z de pénétration du gel en différents lieux	61
Tableau 3.2	Catégories de trafic pour pavages en pierre naturelle	67
Tableau 3.3	Domaines d'utilisation et catégories de trafic correspondantes	68
Tableau 3.4	Dimensionnement des couches en fonction des catégories de trafic pour un revêtement en pavés	69
Tableau 3.5	Liste des principales combinaisons «fondation–lit de pose–type de joint»	79-80
Tableau 3.6	Dimension des joints et hauteur de remplissage	81
Tableau 3.7	Caractéristiques du matériau en fonction de la catégorie de trafic dans le cas d'une couche de pose non liée (la catégorie I n'est pas recommandée dans ce cas)	83
Tableau 3.8	Synthèse des exigences pour la conception des revêtements en pavés de pierre naturelle selon le domaine d'utilisation	84

Avant-propos

Dans un projet d'aménagement de l'espace public, la pierre naturelle est généralement choisie en raison de son caractère historique ou esthétique. On la retrouve en tant que revêtement sous forme de dalles, de pavés et de bordures, car elle permet aussi bien de souligner l'aspect patrimonial d'un site que de composer un agencement résolument moderne, dans un lieu culturel par exemple.

Au cours des dernières décennies, les possibilités d'aménagement urbain dans un style créatif et contemporain se sont multipliées grâce aux nouvelles techniques de fabrication des pavés et par la mise sur le marché d'éléments modulaires extrêmement diversifiés. L'interaction des matières, des formes, des finitions et des appareillages permet la concrétisation de projets innovants.

Les techniques de pose associées à ces revêtements contemporains se sont modifiées et ne sont plus du tout comparables à celles associées aux pavages dits «traditionnels», fondées sur la production de pavés encore clivés ou taillés à la main. Le présent code de bonne pratique constitue une opportunité de faire le point sur ces techniques et ces matériaux plus modernes.

D'autre part, force est de constater que durant une certaine période, les pavés ont été délaissés au profit de revêtements réputés plus performants et modernes. Il s'est par la suite avéré que les revêtements en pierre naturelle ont encore tout à fait leur place, notamment dans les aménagements de sites à caractère historique. Suite à cette mise à l'écart temporaire de nos pavés, on constate une certaine méconnaissance des règles de l'art propres à ce type de revêtement.

Le présent code de bonne pratique pour les revêtements en pierre naturelle se veut un document technique de base pour toute personne impliquée dans un projet d'aménagement en pierre naturelle. Il s'adresse aux concepteurs, architectes, entrepreneurs, gestionnaires publics ou privés, ou fournisseurs de matériaux. Ce document constitue un ouvrage de référence pour la sélection des matériaux (tant des éléments en pierre naturelle, que des matériaux de jointoiement et de couche de pose), la conception et le dimensionnement de projets, la mise en œuvre et l'entretien des voiries en pierre naturelle. La fabrication d'un élément en pierre naturelle trouvant tout d'abord son origine dans des processus qui datent parfois de plusieurs centaines de millions d'années, une introduction du document consacrée à la géologie trouve tout son sens, d'autant plus que l'aspect et les caractéristiques de la pierre y sont fortement liés.



Chapitre 1

Introduction

1.1 Notion de géologie

1.1.1 Définitions

Il importe avant toute chose de définir un certain nombre de termes.

La géologie est la science de la Terre qui comprend l'étude des parties directement accessibles à l'observation.

Un minéral se définit comme un solide dont la composition chimique et la structure atomique sont parfaitement définis. Les principaux paramètres d'identification des minéraux sont la densité, la dureté (échelle de Mohs), l'éclat (propriété à réfléchir la lumière), le clivage ou la cassure, l'effervescence éventuelle sous l'acide chlorhydrique, la couleur et les structures particulières (macles). À ces caractéristiques générales, il convient d'ajouter certaines particularités telles que la radioactivité, le magnétisme et la fluorescence.

La minéralogie est la science qui étudie les minéraux. Elle est étroitement liée à la cristallographie et à la pétrologie.

Une roche se définit comme une agglomération de minéraux se trouvant sous une forme soit meuble (sol, sable, argile, etc.), soit solide (pierre) et en perpétuel mouvement dans le cycle des roches. La roche est généralement formée de minéraux de nature différente.

La pétrographie est la science qui étudie la description, la classification des roches ainsi que l'interprétation de leur genèse. Elle permet de déchiffrer les conditions qui ont conduit à leur genèse et donc de mieux comprendre l'histoire de la Terre.

1.1.2 Cycle des roches

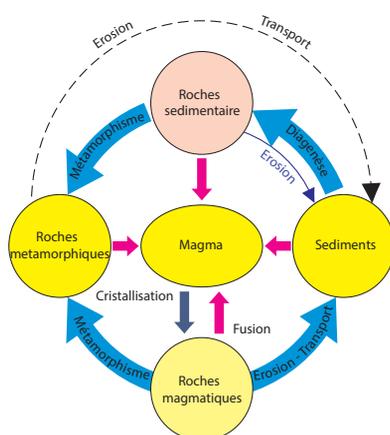


Figure 1.1 – Schéma simplifié du cycle des roches (Source: CSTC NIT 228 [1])

Une roche n'est pas inerte comme on pourrait le croire. Elle évolue sans cesse mais à une vitesse généralement excessivement lente. Le schéma décrit en figure 1.1 présente les 3 grandes familles de roches et les processus qui conduisent à leur formation. Ainsi présenté, il véhicule l'idée de la cyclicité des processus.

Le **magma** est l'élément majeur du manteau supérieur de la terre et constitue le point de départ du cycle des roches dont la durée moyenne est de 100 millions d'années.

La remontée du magma à travers des fissures de l'écorce terrestre suivie de sa cristallisation donne naissance aux **roches magmatiques**, anciennement appelées **roches ignées**.

Ces roches subissent des phénomènes d'érosion et d'altération dont le résultat majeur est le départ de la majorité des composants sous diverses formes. Une partie est entraînée vers des bassins de dépôt où elles s'accumulent en strates donnant lieu à des sédiments.

Au fil du temps, les sédiments s'enfoncent, subissent des phénomènes de lapidification (*compactage avec expulsion de l'eau et cimentation des grains*) et engendrent une **roche sédimentaire détritique**. Dans certains cas, s'ajoute une composante biologique qui donne naissance à une roche sédimentaire biogène telle que les *roches carbonatées*, les *roches carbonées* (*charbon, tourbe, lignite*) et les *hydrocarbures*.

Par la suite, les roches sédimentaires et magmatiques peuvent subir des mouvements tectoniques qui s'accompagnent de variations de température et de pression transformant les roches à l'état solide en *roches métamorphiques* ou à l'état liquide (*magma*), ce qui nous ramène au point de départ du cycle.

La durée des différentes phases du cycle est très variable. Une roche en contact avec un magma peut se métamorphiser en quelques jours. Une roche sédimentaire peut mettre des millions d'années à se former ou à s'éroder.

1.1.3 Classifications des roches

Les pierres naturelles peuvent être classées selon une classification scientifique ou une dénomination commerciale.

1.1.3.1 Classification scientifique

Le tableau 1.1 issu de la PTV 844 [2], présente les caractéristiques majeures des familles.

Niveau 1	Niveau 2	Niveau 3	Niveau 4
1. Roches magmatiques	1.1 Roches plutoniques	1.1.1 Acides	1.1.1.1 Syénite 1.1.1.2 Granite 1.1.1.3 Granodiorite
		1.1.2 Neutres	1.1.2.1 Diorite 1.1.2.2 Monzonite
		1.1.3 Basiques	1.1.3.1 Gabbro
		1.1.4 Ultrabasiques	1.1.4.1 Péridotite 1.1.4.2 Dunite
		1.1.5 Foïdolites	
	1.2 Roches volcaniques	1.2.1 Acides	1.2.1.1 Trachyte 1.2.1.2 Rhyolite 1.2.1.3 Dacite
		1.2.2 Neutres	1.2.2.1 Andésite 1.2.2.2 Latite
		1.2.3 Basiques	1.2.3.1 Basalte
		1.2.4 Ultrabasiques	1.2.4.1 Téphrite
		1.2.5 Pyroclastiques	1.2.5.1 Tuf volcanique

Niveau 1	Niveau 2	Niveau 3	Niveau 4
	1.3 Roches filoniennes (subvolcaniques)	1.3.1 Acides	1.3.1.1 Pegmatite 1.3.1.2 Microsyénite 1.3.1.3 Aplite
		1.3.2 Neutres	1.3.2.1 Microdiorite
		1.3.3 Basiques	1.3.3.1 Microgabbro/dolérite 1.3.3.2 Dolérite
2. Roches sédimentaires	2.1 Roches siliceuses	2.1.1 Grès	2.1.1.1 Quartzarénite 2.1.1.2 Litharénite 2.1.1.3 Arkose et subarkose 2.1.1.4 Wacke 2.1.1.5 Grès calcarifères 2.1.1.6 Grès ferrugineux
		2.1.2 Grès schisteux	
		2.1.3 Argilite et «shale»	
		2.1.4 Marne	
		2.1.5 Silex et roches silicifiés	
		2.1.6 Conglomérat, poudingue, brèche	
	2.2 Roches carbonatées	2.2.1 Roches calcaires	2.2.1.1 Calcaire micritique 2.2.1.2 Calcaire fossilifère 2.2.1.3 Calcaire oolithique 2.2.1.4 Tuf calcaire et travertin 2.2.1.5 Calcaire bréchiforme
		2.2.2 Dolomie calcaire	
		2.2.3 Dolomie	
		2.2.4 Calcaire détritique	
		2.2.5 Calcaire clastique	
3. Roches métamorphiques	3.1 Roches foliées	3.1.1 Ardoises	
		3.1.2 Phyllades et quartzophyllades	
		3.1.3 Micaschiste	
		3.1.4 Gneiss	
		3.1.5 Amphibolite et écloğites	
		3.1.6 Mylonite	
	3.2 Roches non foliées	3.2.1 Marbre	3.2.1.1 Marbre calcitique 3.2.1.2 Marbre dolomitique
		3.2.2 Quartzite	
		3.2.3 Migmatite	
		3.2.4 Roche hornfelsique	
		3.2.5 Granulite	
		3.2.6 Serpentinite	
Remarque: le terme «porphyre» désigne toute roche magmatique (surtout volcanique) montrant des gros cristaux (p.ex. feldspaths) sur un fond finement grenu (microlithique).			

Tableau 1.1 – Classification des roches (selon PTV 844 [2])

Cette classification présente l'inconvénient qu'elle n'est pratiquement compréhensible que pour les géologues mais elle fournit par contre, une indication des propriétés et de la composition de la pierre naturelle.

1.1.3.2 Dénomination commerciale

A côté de son nom scientifique, une pierre naturelle possède également une dénomination commerciale qui n'est pas nécessairement liée à la nature de la pierre. Cette dénomination peut désigner un ensemble de roches.

Ainsi, certaines dénominations commerciales telles que les marbres (*roches sédimentaires et métamorphiques qui peuvent être polies*) et granites (*roches magmatiques et métamorphiques qui peuvent être polies*) ne correspondent pas à l'appellation scientifique de marbre (*type de roche métamorphique*) et de granite (*type de roche magmatique*).

Ces dénominations peuvent également faire intervenir des termes impropres, tels que «petit granit», terme consacré par l'usage mais qui désigne en fait une variété de calcaire.

La norme européenne NBN EN 12440 [3] recense par pays les noms commerciaux officiels et les noms scientifiques d'un grand nombre de pierres naturelles. Les dénominations commerciales des pierres non européennes ne sont pas reprises. Selon cette norme, tout nouveau nom commercial doit faire clairement référence à la nature géologique de la pierre, la couleur et la région d'extraction.

1.1.4 Aperçu de la géologie de Belgique

Le sous-sol belge est essentiellement composé de roches d'origine sédimentaire auxquelles s'ajoutent quelques rares roches d'origine magmatique. La grande variété des premières résulte des nombreux changements climatiques et des niveaux marins auxquels le pays fut soumis au cours des temps géologiques, ainsi que l'action de deux déformations tectoniques majeures: l'orogénèse calédonienne et l'orogénèse varisque (ou *hercynienne*).

Les différents terrains géologiques s'ordonnent en unités structurales qui résultent également des deux orogénèses anciennes ainsi que de l'évolution postérieure du pays (voir tableau 1.2).

Temps écoulé (Ma)	Ere	Système	Période	Série	Niveaux de pierre exploités ⁽¹⁾	
1,7	CENOZOÏQUE	QUATERNAIRE	Pléistogène	Holocène		
				Pléistocène		
65		TERTIAIRE	Néogène		Pliocène	
					Miocène	
			Paléogène		Oligocène	
					Eocène	Calcaire gréseux
					Paléocène	<i>Grès quartzitique</i>
245		MESOZOÏQUE	SECONDAIRE	Crétacé	Supérieur	<i>Silex</i>
					Inférieur	
				Jurassique	Supérieur (Malm)	
	Moyen (Dogger)					
	Inférieur (Lias)				Calcaire gréseux	
	Trias					
	590			PALEOZOÏQUE	PRIMAIRE	Permien
Carbo-nifère		Silésien ⁽²⁾	Stephanien ⁽²⁾			
			Westphalien ⁽²⁾			
		Dinantien ⁽²⁾	Namurien ⁽²⁾			<i>Grès</i>
			Viséen ⁽²⁾			Calcaire
			Tournaisien ⁽²⁾			Calcaire et dolomie
Dévonien			Supérieur			Grès et calcaire
			Moyen			<i>Calcaire</i>
			Inférieur			Grès, quartzite et arkose
Silurien			Supérieur			
			Inférieur			<i>Porphyre et quartzite</i>
Ordovicien			Supérieur			
			Moyen			
			Inférieur			
Cambrien			Supérieur			
			Moyen			
			Inférieur			<i>Quartzite</i>
PRECAMBRIEN						
⁽¹⁾ Niveaux actuellement exploités en éléments modulaires indiqués en caractère gras – Niveaux anciennement exploités en éléments modulaires indiqués en <i>italique</i> . ⁽²⁾ Ces noms ne sont plus repris dans la dernière version du tableau stratigraphique international (www.stratigraphy.org/index.php/ics-chart-timescale [4]). Ils sont tout de même mentionnés dans ce tableau car largement utilisés en Belgique en général.						

Tableau 1.2 – Echelle stratigraphique et niveaux exploités en Belgique

Comme le montre le tableau 1.2, les principaux niveaux exploités pour la fabrication d'éléments modulaires datent du Paléozoïque ou Primaire, du Jurassique et du Paléogène, qui peuvent être divisés en plusieurs périodes décrites ci-dessous.

1.1.4.1 Paléozoïque inférieur (540-408 Ma: Cambrien, Ordovicien, Silurien)

Les roches les plus anciennes connues en Belgique datent du Paléozoïque inférieur et se présentent sous la forme de roches sédimentaires détritiques (*schiste, phyllade, ardoise, siltite, quartzo-phyllade, grès et quartzite*) dans lesquelles sont présentes des roches magmatiques intrusives (*porphyre*).

Ces roches affleurent dans les vallées du Massif du Brabant (*non exploitées à l'exception des porphyres*), dans la «Bande de Sambre-et-Meuse» entre Presles et Hermalle-sous-Huy (*non exploitées*) et dans certains massifs ardennais tels que le Massif de Stavelot (*exploitées comme granulats et pierre ornementale*).

1.1.4.2 Dévonien (408-355 Ma)

Le Dévonien inférieur se caractérise par la présence de roches sédimentaires détritiques (*grès, quartzite, etc.*) exploitées localement en Ardenne comme granulats et pierres ornementales.

Le Dévonien moyen se caractérise par une alternance de roches sédimentaires détritiques et de roches calcaires (*édifices coralliens du Givétien*) qui sont exploitées au nord de l'Ardenne comme granulats et pour des usages industriels.

Le Dévonien supérieur se caractérise par une partie inférieure (Frasnien) constituée principalement de calcaires et une partie supérieure (*Famennien*) composée de roches sédimentaires détritiques riches en micas (*grès famennien, psammites du Condroz, etc.*). Les deux parties sont exploitées comme granulats et pierres ornementales.

1.1.4.3 Carbonifère (355-295 Ma)

Le Carbonifère comprend deux subdivisions majeures:

- le **Dinantien** (*Carbonifère inférieur*) est caractérisé par des roches essentiellement carbonatées comme les calcaires et dolomies du Tournaisien et les calcaires du Viséen. Ces niveaux sont principalement exploités pour les revêtements modulaires, les pierres ornementales, les usages industriels et les granulats dans le Tournaisis, la région de Soignies, les vallées de la Sambre, de la Meuse et de leurs affluents, le Condroz et le bassin de la Vesdre;
- le **Silésien** (*Carbonifère supérieur*) est caractérisé par des roches sédimentaires détritiques (*schistes, grès*) anciennement exploitées pour les charbons (*Namurien et Westphalien*) et les minerais (*alumine, sulfure de fer*), ainsi que pour les grès de la formation d'Andenne, qui furent utilisés pour la fabrication de pavés et de moellons, et sont actuellement exploités pour la fabrication de granulats ou comme source de silice pour la sidérurgie (*Gives, Villerot*).

1.1.4.4 Jurassique (203-135 Ma)

Le Jurassique est caractérisé par des dépôts de conglomérats, puis des niveaux sableux, calcaro-gréseux ou marneux exploités en Lorraine comme pierre ornementale ou granulats.

1.1.4.5 Paléogène (65-23 Ma)

Le Paléogène est constitué principalement de terrains meubles au sein desquels peuvent être présents des horizons indurés exploités localement comme les niveaux de grès du Landénien et les calcaires gréseux du Bruxellien.

1.1.5 Description des principales roches exploitées en Belgique

Les principales roches exploitées en Belgique pour la fabrication des éléments modulaires sont les suivantes.

1.1.5.1 Roches sédimentaires carbonatées ou calcaires

Les roches sédimentaires carbonatées sont des roches sédimentaires composées de carbonate de calcium (CaCO_3) auxquels peuvent s'ajouter des quantités variables de silice (SiO_2) et d'argile. Ils résultent souvent d'accumulation, sous formes de débris ou par construction (*calcaire bioconstruit des récifs*) de squelettes ou de coquilles calcaires d'animaux ou d'algues et dans une moindre mesure, de précipitations chimiques ou biochimiques.

La nomenclature traditionnelle en usage en Belgique distingue deux types de calcaires:

- **les pierres bleues** dont le nom provient de leur couleur. Il s'agit généralement de calcaires compacts et très denses. Plusieurs variétés existent, dont les principales sont les suivantes:
 - *la pierre bleue dite «petit granit»* est un calcaire très riche en crinoïdes, à cassure fraîche sombre et patine d'un gris bleu plus ou moins accentué. Elle est issue des terrains d'âge stratigraphique Tournaisien moyen et supérieur (Dinantien). Ses caractéristiques en font un matériau fréquemment utilisé, notamment pour les sols extérieurs;
 - *la pierre bleue du Viséen* (Dinantien) présente généralement un grain plus fin et une teneur en chaux plus élevée que le «petit granit», ce qui leur confère une patine d'un gris plus clair;
 - *la pierre de Tournai* (Dinantien) a des caractères plus variables, quelque peu siliceuse, avec une patine marquée d'une légère nuance de beige;

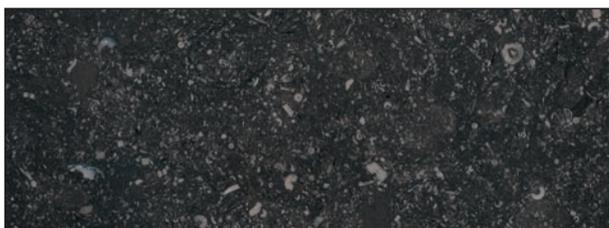


Figure 1.2 – Pierre bleue polie
(Photo: ©PierresEtMarbresDeWallonie)

- **les pierres blanches** sont des calcaires plus poreux, de couleur claire (blanc cassé, beige et jaune), extraits des couches du Secondaire et du Tertiaire. Elles sont rarement mises en œuvre en sols extérieurs;

1.1.5.2 Roches sédimentaires détritiques

Les principales roches sédimentaires détritiques exploitées en Belgique sont les suivantes:

- **le grès famennien** (*Dévonien supérieur*): il s'agit d'une roche constituée d'une proportion importante de petits grains de quartz (*diamètre des grains généralement compris entre 0,05 et 0,15 mm*) liés par un ciment de nature variable, siliceux, silicaté, voire un peu calcaire, avec quelques minéraux accessoires dont des micas en fines paillettes. La présence de ce dernier minéral justifie l'appellation traditionnelle de «psammites». Il présente une gamme de teintes très variées, vives (*jaune, vert, rouge, brun rouille*) ou sourdes (*gris, gris vert, gris bleu, lie de vin*) qui permet d'obtenir des surfaces à grande variation de couleur. Les grès contenant des horizons schisteux ou grossiers (grès très grenus et poudingues) et des inclusions de matières étrangères sont rebutés;
- **le grès du Landénien supérieur** (*Paléogène*) présente des gisements d'un type inhabituel. Des blocs gréseux de toutes dimensions se détachent de séries sableuses épaisses. Ces blocs à l'enveloppe extérieure d'aspect mamelonné peuvent atteindre une taille considérable, sans présenter de réelle stratification. La trame de grains de quartz y est liée par un ciment siliceux, ce qui confère une nature quasi quartzitique à ces matériaux et leur donne une très grande résistance. De teinte claire en cassure fraîche, dans une gamme de blanc cassé à beige, ils prennent en pavés au sol une patine rousse très caractéristique, liée sans doute à la présence d'un peu de sels métalliques dans la pierre;
- **les grès calcaires et les calcaires gréseux** sont des roches intermédiaires constituées d'une trame de grains de quartz unis par un ciment calcaire. Ils sont exploités dans les terrains sableux d'âge secondaire (*Sinémurien*) ou tertiaire (*Bruxellien*) avec une proportion variable entre les éléments siliceux et calcaires. Leur couleur varie entre le beige et le gris jaune voire ocré. Certains éléments présentent des altérations argileuses ou d'importantes cavités;
- **le quartzite du Dévonien Inférieur** est constitué de grains relativement grossiers de quartz unis par un ciment siliceux, ce qui en fait une roche extrêmement compacte, de couleur blanc crème très légèrement rosée. Il possède une cassure conchoïdale, contrairement au grès dont la cassure est plus irrégulière et d'un aspect plus grenu. Certaines surfaces sont de couleur brun rouille. En réalité, beaucoup de pierres commercialisées sous le nom de grès sont des quartzites;
- **l'arkose du Dévonien inférieur** (*Gedinnien*) est une pierre homogène de teinte beige crème à jaunâtre (*parfois très légèrement verdâtre*) et composée de grains grossiers de quartz et de feldspath. La structure est peu compacte et peut présenter localement de petites cavités d'un demi-centimètre de diamètre, parfois remplies d'argile de même couleur. Certaines surfaces peuvent prendre localement une teinte brun rouille;
- **le silex** se présente sous forme de concrétions très dures dans les craies du Maastrichtien (*Crétacé, Secondaire*). Ces nodules siliceux de couleur grise à gris bleu peuvent être façonnés en pavés décoratifs ou en moellons plus ou moins réguliers.



Figure 1.3 – Grès du Condroz (Photo: ©PierresEtMarbresDeWallonie)

1.1.5.3 Roches porphyriques

Les porphyres sont des roches magmatiques intrusives composées principalement de SiO_2 (+ 65 %), d' Al_2O_3 (+ 16 %) et de Fe_2O_3 (+ 7 %). Il s'agit d'une pierre à pâte fine et foncée, gris bleu, gris vert ou lie-de-vin, ponctuée de très nombreux petits cristaux clairs de feldspaths. Ses caractéristiques en font une des meilleures roches à granulats de Belgique, ce qui lui permet d'être principalement utilisée comme ballast de voies ferrées, comme composant de revêtement routier et comme intervenant dans des bétons à haute résistance ou de très bonne qualité. La fabrication de pavés en porphyre est arrêtée de nos jours mais il est fréquent de réutiliser les anciens pavés.

Ces roches n'ont été exploitées que dans les gisements porphyriques du Brabant et du Hainaut.

Les couleurs en sont très variées, essentiellement selon le type de feldspaths (*blanc, gris, rose voire rouge*), avec les ponctuations des micas (*blanc ou noir*). Ces deux silicates, feldspaths et micas, peuvent être dès l'abord altérés (*état marqué en général par des teintes brunâtres*), ce qui est cause de mauvaise tenue du matériau. Il faut aussi prendre garde aux microfracturations qui peuvent fragiliser la pierre.



Figure 1.4 – Porphyre

1.1.6 Description des pierres étrangères

Outre les pierres d'origine belge, il existe une grande variété de pierres provenant de l'étranger qui sont également utilisées en Belgique comme matériaux de pavage, de dallage et pour des bordures.

Le présent chapitre reprend les principales pierres étrangères utilisées à ce jour dans notre pays. Ceci ne constitue pas cependant une liste exhaustive car de nouvelles variétés arrivent régulièrement sur le marché.

1.1.6.1 Roches sédimentaires

Parmi les roches sédimentaires les plus fréquemment utilisées en Belgique, il convient de citer deux grandes familles:

- **la famille des calcaires**, dont les principaux représentants sont:
 - *la pierre bleue d'Irlande* est un calcaire crinoïdique compact de couleur gris bleu, d'âge viséen (*Carbonifère, Primaire*) contenant localement des fossiles coquilliers et coralliens;
 - *le calcaire dolomitique ou dolomie calcaire du Shandong (NE. Chine)* également appelé «*calcaire de Quinglong*» ou «*calcaire de Jining*», est un calcaire oolithique à pisolithique d'âge cambrien, partiellement dolomitisé (10 – 20 %), peu poreux et présentant des structures lenticulaires et plus ou

moins chargés en sels métalliques. Il est pauvre en fossiles. Sa patine d'un gris nuancé de beige peut osciller vers les teintes plus brunâtres;

- *les calcaires vietnamiens (N. Vietnam)* sont des roches présentant une très grande variabilité de structures et de textures, de contenus en fossiles et de teintes (de gris clair à gris anthracite en passant par gris bleuté). Aspects, patines et comportements présentent la même variabilité, jusqu'à des roches métamorphiques de type marbre;
 - *le calcaire argileux de type Kotah (Rajasthan – N. Inde)* est une roche offrant des teintes plus ou moins soutenues (beige, verdâtres ou grisâtres) mais présentant une aptitude au polissage peu compatible avec le caractère antidérapant attendu d'un revêtement modulaire. C'est la raison pour laquelle il n'est plus trop utilisé de nos jours sauf dans le cas de pavés réutilisés;
- **la famille des grès**, dont les principaux représentants sont:
- *le grès de type Kandla (Rajasthan – N. Inde)* est un grès très riche en quartz et disponible en deux variétés, l'une de nuance grise uniforme, l'autre en éventail de couleurs plus soutenues (*gris beige, brunâtre à brun, rose-rouge*). Cette pierre présente un litage plus ou moins marqué;
 - *le grès de type Dong Fong (NE. Chine)* est un grès arkosique de texture grenue devenant parfois de véritables poudingues et présentant des teintes globalement pastel (*gris, rose, vert pâle, beige*).

1.1.6.2 Roches magmatiques

Etant donné l'arrêt de production de ce type de roche en Belgique, cette famille de roches fait actuellement l'objet d'une grande importation.

Parmi les roches magmatiques les plus fréquemment utilisées en Belgique, il convient de citer les grandes familles suivantes:

- **la famille des granites** principalement utilisés en Belgique pour leur granulométrie grossière, leurs couleurs inhabituelles et leur aptitude à conserver le poli en extérieur (contrairement aux roches marbrières qui se ternissent aux intempéries), ainsi qu'en revêtement modulaire. Bien qu'il existe de nombreuses sources européennes d'exploitation (*Vosges, Bretagne, Tarn, Ecosse, Sardaigne, etc.*), les principaux représentants actuels sont les suivants:
- *les granites chinois* présentent une grande variété de textures, de couleurs et de qualités. Ils sont généralement accompagnés d'un numéro accompagnant la lettre G. Les chiffres 300 correspondent au Nord de la Chine et les numéros 600 désignent les granites provenant du Sud. Ils sont parfois désignés par un nom à consonance méditerranéenne;
 - *les granites portugais* sont également désignés par une lettre suivie d'un chiffre;
 - *le granite rouge de Suède* a été utilisé dans le passé pour des revêtements modulaires de grande ampleur, notamment à Anvers et à Bruxelles (*Place des Palais*). Les pavés en granite rouge sont fréquemment réutilisés.

Remarque: il convient de noter que sous l'appellation générique de «granites» sont commercialisées un grand nombre de roches magmatiques grenues et des roches métamorphiques telles que des gneiss, caractérisées par une foliation nette et des niveaux concentrés en micas (*ce qui induit dans le matériau une nette orientation, par rapport aux granites vrais, quasi isotropes*);

- **la famille des basaltes** se caractérise par des roches à grains fins de couleur sombre à noire. Les principaux représentants sont:
- *les basaltes chinois de Funding (S. Chine – G 684)* se caractérisent par leur couleur gris-noir avec des taches plus sombres; leur dénomination commerciale est «*twilight*» (il existe cependant de nombreuses autres dénominations);

- *les basaltes chinois de type «Hainan Black Basalt»* avec différentes variantes telles que le «Basaltlava» (roche très poreuse), le «Cave Hole of Micro Holes» (roche moyennement poreuse) et le «Minute Hole» (roche peu poreuse);
 - *le basalte vietnamien* de teinte sombre avec de très petits minéraux beige; leur dénomination commerciale est «Vinabasalt»;
 - *le basalte de l'Eifel* (Allemagne) est une roche à grains fins de teinte noire exploitée depuis l'Antiquité pour la fabrication de pavés et de meules pour moulins, les pavés sombres étant utilisés chez nous en marquages, en contraste avec les matériaux locaux.
- **la famille des porphyres** de nombreuses variétés issues de différents pays (Italie, Chine, Argentine) se caractérisent par leurs couleurs et leurs textures. Par exemple, le porphyre italien (Trentin – N.Italie) se distingue aisément du porphyre belge par sa texture (avec des grands cristaux clairs plus différenciés de la gangue) et surtout par ses teintes plus vives, oscillant entre un ocre roussâtre et un lie-de-vin soutenu.

Remarque: le terme «porphyre» regroupe différents types de roche. Ainsi, le porphyre belge (exploité dans les régions de Quenast et de Lessines) est en réalité une microdiorite quartzitique à structure porphyrique alors que le porphyre italien correspond à une quartzodiorite.

1.1.6.3 Roches métamorphiques

Le sous-sol belge est quasi dépourvu de roches nettement métamorphiques. La principale famille de roches métamorphiques utilisée en voirie est le marbre cristallin.

Il convient de souligner que ce type de matériaux n'est guère adapté à des applications de voirie fortement sollicitées sous nos climats. Il est principalement utilisé pour souligner certaines zones d'usages telles que passages pour piétons, bandes de circulation ou emplacements de stationnement, par contraste visuel avec les roches régionales, globalement plutôt sombres.

Parmi les marbres les plus utilisés en Belgique, il convient de citer:

- *le marbre de Carrare* exploité en Italie (Toscane);
- *le marbre Afyon Silver de Mugla* exploité en Turquie.

1.2 Contexte historique

Les revêtements en matériaux pierreux bénéficient en nos régions de traditions plusieurs fois millénaires. Non seulement les ressources du sous-sol y sont d'une grande richesse et d'une large variété, mais les techniques d'extraction et de façonnage, et en aval, les procédés de mise en œuvre y ont connu un fort beau développement, au point de faire autrefois l'objet d'une large exportation, tant pour les matériaux que pour la main d'œuvre qualifiée.

1.2.1 Histoire du revêtements modulaires et structures en pavés

Sans remonter jusqu'aux mythiques chaussées romaines qui ont eu parfois en nos régions, recours aux empierements, le souci d'aménager correctement les voiries avec des pierres est apparu fort tôt et s'est particulièrement bien développé dès le Moyen Âge. Il s'agit d'une part, de voiries urbaines devant respecter des impératifs de confort, d'hygiène, voire dans certains cas, de prestige et d'autre part, de chaussées entre les villes. Ces dernières ont toujours été d'une importance cruciale, à la fois pour faciliter le commerce et le transport de marchandises et pour accélérer les mouvements de troupes militaires.

Aussi, la production de pavés en vue de l'exportation était-elle étroitement surveillée par les pouvoirs politiques, notamment à l'époque de la domination autrichienne, pour ne pas favoriser trop les contrées voisines, adversaires potentielles, tout en sauvegardant les intérêts économiques.

En ce qui concerne les techniques de pavage de l'époque, les gestes des paveurs se sont perpétués, quasi inchangés, au fil des générations, jusqu'au XXe siècle. Ces métiers du pavage ont donné lieu à de véritables dynasties d'ouvriers spécialisés (*p.ex. Waterloo*) qui ont parfois essaimé à l'étranger, suivant tout naturellement les flux de produits lors de leur exportation, pour apporter aux clients lointains la main-d'œuvre aguerrie nécessaire à la bonne mise en œuvre de leurs fournitures.

Dès cette époque, des projets ou des modèles de pavages aux tracés parfois très élaborés ont été adaptés parfaitement aux cadres et aux lieux. Les modèles urbains courants ont évolué nettement au fil des temps.

On notera qu'autrefois, pour des raisons de confort acoustique, certaines portions de voies circulées étaient pavées en bois sur chant, pour assourdir les frappements des sabots et les roulements des voitures (château de Versailles).

En parallèle, les matériaux et les produits étaient strictement hiérarchisés, pour des impératifs techniques de durabilité et pour des raisons de confort et d'esthétique. La partie circulée, lourdement sollicitée, ne pouvait recevoir que des matériaux d'une haute résistance, comme les porphyres et les grès. Cependant, l'emploi de porphyre était exclu des rues en pente en raison de sa glissance, notamment sous les sabots des chevaux.

Pour les cours d'écuries, on préconisait même des grès quelque peu friables (*comme ceux de la région d'Attre et de Brugelette*), plus confortables aux chevaux. Les trottoirs, nettement moins sollicités, n'étaient jamais couverts de porphyre mais bien de grès, façonné en éléments carrés de type platine, disposés le plus souvent sur pointe, ou de dallages de différents formats en pierres bleues.

Cette distribution très raisonnée des matières et des produits a guidé l'aménagement urbain pendant longtemps, marquant profondément l'image de nos villes.



Figure 1.5 – Revêtements d'époque
(Photo: ©PierresEtMarbresDeWallonie)

Mais les modes de circulation ont changé rapidement, l'automobile a remplacé les voitures à chevaux, les sollicitations sont devenues plus fortes en certains endroits et les exigences de confort ont évolué.

Aussi, après la seconde guerre mondiale, les revêtements de pierre ont-ils largement régressé, au profit des bétons et des hydrocarbonés. De nombreuses carrières ont fermé leurs portes ou simplement cessé la production de pavés pour se consacrer aux moellons, les gisements de porphyre se sont orientés exclusivement vers le concassage, pour des granulats très appréciés par leurs performances.

Il a fallu attendre les années 1980, le retour en force des matériaux naturels, la régionalisation et la volonté politique affirmée de revaloriser les ressources du sous-sol, pour voir revenir le pavé, d'abord au cours des chantiers de revitalisation urbaine en centres anciens protégés, plus largement ensuite. Mais l'offre régionale avait diminué et la porte s'est ouverte aux importations, d'autres pays européens d'abord (*surtout des granites*), plus lointains ensuite, au point que le marché est aujourd'hui dominé par des importateurs de produits asiatiques (*Chine, Inde et dans une moindre part Vietnam*). Ces matériaux mis en place depuis plus d'une quinzaine d'années ont déjà subi les épreuves de nos climats rigoureux, avec des bonheurs manifestement très inégaux.

1.2.2 Histoire de l'extraction des pavés en Belgique

Toutes ces ressources lithiques possibles en Belgique et majoritairement en Wallonie ont donné lieu, à un moment ou à un autre, à une exploitation plus ou moins organisée, et dans la majeure partie des cas, à la fabrication de pavés. Mais ces productions locales situées à proximité immédiate des lieux d'extraction, n'ont jamais fait l'objet d'un commerce structuré.

- Les quelques **gisements de porphyre** (*roches magmatiques*) dont l'intérêt pour la fabrication de pavés date du XVI^e siècle, voire plus anciennement. Les régions de Lessines, Quenast et plus accessoirement Bierghes ont fait l'objet d'une exploitation intensive bien que d'autres pointements aient été explorés de-ci de-là. Dès 1705, la route Mons-Bruxelles est pavée en porphyre. L'extension limitée de ces gisements de porphyre a contraint à les exploiter dans des carrières de plus en plus profondes et, au début du XX^e siècle, celles-ci comptaient parmi les plus grandes carrières au monde. Cette nécessité de profondeur a engendré la mise au point de systèmes ingénieux pour descendre les hommes et remonter les matériaux comme les descendeurs (*grandes installations métalliques jouant le rôle d'ascenseur*), les chaînes sans fin, les wagons et wagonnets tractés sur de véritables chemins de fer, etc. De plus, la sécurisation de ces installations avec leurs falaises vertigineuses était un réel souci.

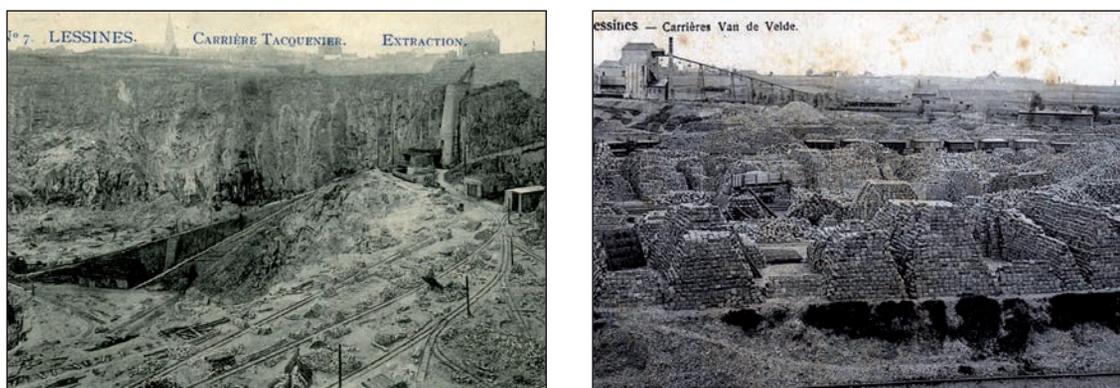


Figure 1.6 – Sites d'exploitation de porphyre (Photos: ©PierresEtMarbresDeWallonie)

Le travail d'extraction restait pénible, de même que le façonnage à la main des différents types de pavés.

D'immenses quantités de pavés étaient produites, transportées par chemin de fer et livrées pour une part importante à une large exportation par voie maritime. La réputation de ces pavés inusables était réellement universelle. En 1846, la carrière de Quenast fournit 1 200 000 pavés à la ville de Paris. En 1900, les pavés en porphyre belge étaient présents en Amérique et en Australie. Après la seconde guerre mondiale, le recours massif aux revêtements hydrocarbonés a obligé les carrières à réorienter leur activité vers la production exclusive de granulats.

Aux côtés de ce porphyre dominant, de nombreuses autres variétés de roches ont été exploitées pour la production de pavés.

■ Les gisements de grès

- *Les traditionnels «Grès du Condroz»* ont connu certainement le plus beau développement. Les gisements classiques comportent un grand nombre de bancs dont les plus compacts, dans la gamme des gris, étaient privilégiés pour la confection des pavés, les autres étant destinés en général aux moellons. Dans les régions d'exploitation comme la rive droite de l'Ourthe à hauteur de Poulseur, des paysages industriels très impressionnants se sont développés avec des fronts d'extraction s'étirant sur plusieurs kilomètres en quasi continu. Un autre gisement proche des vallées des affluents nord de la Sambre et de la Meuse, livrait des variétés moins résistantes mais plus colorées. Pour ces roches, le façonnage manuel sous de rudimentaires abris restait une tâche difficile, exigeant force physique et connaissance du matériau, que seule la longue pratique permettait d'acquérir. Ce type de production se poursuit de nos jours selon des procédés plus contemporains, avec une capacité limitée.
- *Les grès du Landénien supérieur* présentent deux régions principales de production connues depuis le Moyen Âge: le gisement de Bray (près de Binche) et le gisement de Tirlemont mieux connu sous l'appellation de «*Tiens Kwartsiet*». Ici aussi, la production se répartissait entre pavés et moellons. La nature très particulière des gisements empêchait toute mécanisation et l'exploitation en a cessé avant la première guerre mondiale.
- *Les grès quartzitiques à quartzites du Cambrien* également d'une très grande dureté, ont été exploités surtout dans la région de Dongelberg et d'Opprebais, et à échelle plus réduite dans l'Est de la Wallonie. L'activité a également cessé au début du XXe siècle.

Ces deux derniers types de grès ont connu une diffusion beaucoup plus limitée que le porphyre et le grès du Condroz.

- **Les gisements de galets de cours d'eau:** Les galets ont été autrefois ramassés dans certaines parties des cours de l'Amblève et de la Vesdre pour être utilisés soit posés sur chants, soit comme revêtement de sols. Mais on n'a jamais développé dans nos régions de véritable tradition de sols en galets. Il n'en reste pas moins que ces usages locaux de matériaux spécifiques donnent une saveur certaine de terroir à ces réalisations isolées, dès lors intéressantes à conserver voire à restaurer..

Il ressort de ce tableau géologique que la nécessité d'importer des matériaux ne s'est pas fait ressentir pendant très longtemps, les ressources régionales de haute qualité suffisant amplement à l'approvisionnement des chantiers.

1.2.3 Histoire de l'extraction des dalles en Belgique

La pratique des dallages bénéficie d'une histoire forte différente. Les dalles sont en effet des pierres de taille destinées à être posées en appareil régulier, avec les joints les plus étroits possibles, afin d'assurer une bonne tenue au revêtement.

Les matériaux utilisés doivent donc présenter une bonne aptitude à la taille, pour être façonnés de manière précise, dans un premier temps avec les gestes traditionnels de la pointe (ou broche) et du ciseau, frappé par un maillet, avant que ne se perfectionnent les méthodes de sciage. Celui-ci, pratiqué autrefois avec une lame métallique sans dent, arrosée d'eau et de sable (*abrasif aujourd'hui remplacé par le diamant*), est employé depuis l'Antiquité, mais il faut attendre le milieu du XVIIIe siècle pour que se développent en nos régions de grandes scieries, mues d'abord par l'énergie hydraulique, ensuite par la machine à vapeur, enfin par l'électricité à partir de la fin du XIXe siècle. On a pu alors débiter les blocs directement en séries de tranches minces, où la découpe de carreaux réguliers ne posait guère de difficulté.

Ces procédés étaient bien au point au milieu du XIXe siècle, à l'époque où s'installe l'habitude de séparer nettement les trottoirs des voiries circulées. Car les dallages ne sont pas utilisés en nos régions pour les espaces de circulation. De la même façon ont été développés les éléments linéaires de type bordures, la plupart du temps en pierre de taille – les matériaux gréseux clivés et retouchés ne permettent que la confection de bordures rustiques, aux contours irréguliers.

Ces habitudes traditionnelles ont été considérablement bousculées par les progrès techniques, notamment dans la maîtrise des outils diamantés, autre spécialité belge, qui permet aujourd'hui de découper précisément toute matière.

1.3 Extraction et fabrication des produits en pierre naturelle

L'obtention d'un pavé, d'une dalle ou une bordure en pierre naturelle passe généralement par plusieurs étapes dont celle de l'extraction du matériau au gisement, celle de la fabrication à proprement parlé du produit et celle éventuelle du traitement de surface (*principalement pour les dalles et bordures*).

1.3.1 Extraction des matériaux

L'obtention d'un pavé, d'une dalle ou une bordure en pierre naturelle passe généralement par plusieurs étapes dont celle de l'extraction du matériau au gisement, celle de la fabrication à proprement parlé du produit et celle éventuelle du traitement de surface (*principalement pour les dalles et bordures*):

- **l'exploitation à l'explosif** consiste à remplir d'explosifs des trous de forage dont l'implantation et la profondeur dépendent des conditions du site et de la nature de l'explosif. Les trous sont raccordés entre eux par des cordons qui permettent de réaliser un tir multi séquentiel. La quantité d'explosif et la séquence de tir sont adaptées afin de désolidariser le bloc sans trop l'abimer. Les explosifs utilisés sont des explosifs déflagrants permettant aux gaz et aux ondes de chocs développés par ce dernier de fracturer très légèrement le massif rocheux. La poudre noire est encore parfois utilisée mais est actuellement souvent remplacée par d'autres explosifs comme le Cisalex, Cisalite, etc. Ces explosifs sont souvent utilisés dans la découpe nette et orientée de massif rocheux. Cette technique est utilisée principalement pour l'exploitation des grès;
- **le sciage au câble diamanté** permet une découpe par usure de la roche au moyen d'un câble en acier muni de diamants séparés les uns des autres par des entretoises et des ressorts et de l'eau. Cette technique permet de limiter les pertes de matière. Cette technique est principalement utilisée pour des roches calcaires;
- **la coupe à la haveuse** consiste à découper la roche au moyen d'une sorte de tronçonneuse dont la chaîne est munie de dents en carbure de tungstène ou de pastilles diamantées. Cette technique permet également de limiter les pertes de matière. Cette technique est principalement utilisée pour des roches calcaires et des exploitations souterraines.

1.3.2 Fabrication

Cette technique consiste à réaliser un produit fini dont l'aspect et la précision géométrique dépendent d'une des deux filières de fabrication suivantes, la première étant généralement utilisée pour les matières siliceuses, la seconde pour les autres roches.

1.3.2.1 Filière traditionnelle

Cette technique consiste à débiter manuellement la pierre en profitant au maximum de son aptitude plus ou moins marquée à se fendre au moins dans une direction. L'opération consiste à réaliser les opérations suivantes:

1. **la découpe brute du bloc ou le fendage du bloc:** dans la carrière, un ouvrier découpe grossièrement les blocs en parallélépipèdes au moyen de coins métalliques ou bien d'un écarteur hydraulique (DARDA). Les blocs sont chargés dans une benne qui est amenée à une installation de traitement. Ces blocs parallélépipèdes sont ramenés à des dimensions de plaque (*dalle brute de max. 20 cm d'épaisseur et manipulable manuellement*);
2. **le clivage du bloc ou des plaques** est réalisé à l'aide d'une fendeuse mécanique (*cliveuse*) permettant d'obtenir des blocs dont les dimensions sont similaires à celles du produit fini;
3. **la finalisation du produit (taille – épincage)** consiste à éliminer les reliefs au moyen d'un burin et d'un marteau ou d'une épincette. L'épincage consiste à dimensionner les matériaux en rectifiant les arêtes et faces.



Figure 1.7 – Fendage d'un bloc de grès



Figure 1.8 – Clivage en blocs aux dimensions du produit fini



Figure 1.9 – Taille et épincage des blocs de grès

1.3.2.2 Filière mécanisée

Cette filière consiste à découper la roche au moyen d'outils diamantés. Elle tient également compte des caractéristiques de la roche. C'est la méthode la plus utilisée de nos jours car elle offre un meilleur rendement et un aspect plus précis et constant:

1. **le sciage** découpe le bloc issu de la carrière en tranches dont l'épaisseur varie traditionnellement entre 2 et 12 cm. Les outils les plus fréquents sont les disques, les câbles ou les lames diamantés;
2. **le débitage de la tranche** permet d'obtenir les bonnes dimensions du produit fini au moyen de débiteuses à disque diamanté;
3. les surfaces brutes de sciage peuvent être utilisées telles quelles ou bien être soumises à un **surfaçage ou un traitement spécifiques**. Les finitions sont reprises ci-après.

Il existe une grande diversité de finitions selon la taille (mécanique ou manuelle) et l'application souhaitées. Le tableau ci-dessous reprend les principaux types de tailles et de finitions.

Finition lisse	Taille fine	Taille grossière
Scié ou brut de sciage	Givré	Eclaté-Clivé
Meulé-Ecuré-Égrisé	Taille ancienne	Piqueté
Adouci	Ciselé 20 coups (ou plus)	Ciselé 12 à 15 coups
Poli	Sbattu fin	Sbattu gros
	Bouchardé fin	Bouchardé gros
	Grenailé	Gradiné
		Sclypé
		Flammé
		Strié

Tableau 1.3 – Types de tailles et finitions courantes (selon les NIT 220 [5] et 228 [1])

Les principales finitions pouvant être appliquées sur les éléments de voirie sont les suivantes:

- **la finition sciée (ou brut de sciage)** est le résultat de l'opération de sciage aux outils diamantés. Le sciage laisse de légères traces qui apparaissent sur les surfaces sous forme de petites ondulations ou de décrochements parallèles de quelques dixièmes de millimètres de profondeur maximum qui peuvent être, soit linéaires suivant la direction du sciage des armures ou du fil, soit d'allure circonferentielle lors du sciage au disque (*fréquent pour les petites surfaces*);
- **la finition meulée-écurée-égrisée** permet d'éliminer toute trace de sciage tout en conservant de fines rayures circulaires résultant du passage de meuleuses mécaniques;
- **la finition bouchardée** consiste à frapper la surface au moyen de marteaux manuels ou mécaniques (ou bouchardes) dont les pointes percutent la pierre, la rendant rugueuse. Cette technique éclaire et uniformise généralement la teinte de la roche;
- **la finition piquetée** est un bouchardage mécanique réalisé au moyen d'un plateau circulaire sur de grandes surfaces. Les parties en relief étant acérées, contrairement à celles du bouchardé qui sont arrondies;
- **la finition grenailée** s'obtient par projection de microbilles métalliques sur la surface de la pierre (grenailage). Cette technique éclaire et uniformise également la teinte de la roche;
- **la finition sablée** consiste à projeter des grains d'abrasifs sur la surface de la pierre;
- **la finition flammée** consiste à provoquer un choc thermique à la surface du matériau par le passage d'un jet de flamme d'environ 1 700°C sur une tranche de pierre sciée; ce qui provoque l'éclatement de petites écailles de pierre lui conférant ainsi une texture rugueuse. Ce traitement peut modifier la couleur de la pierre.

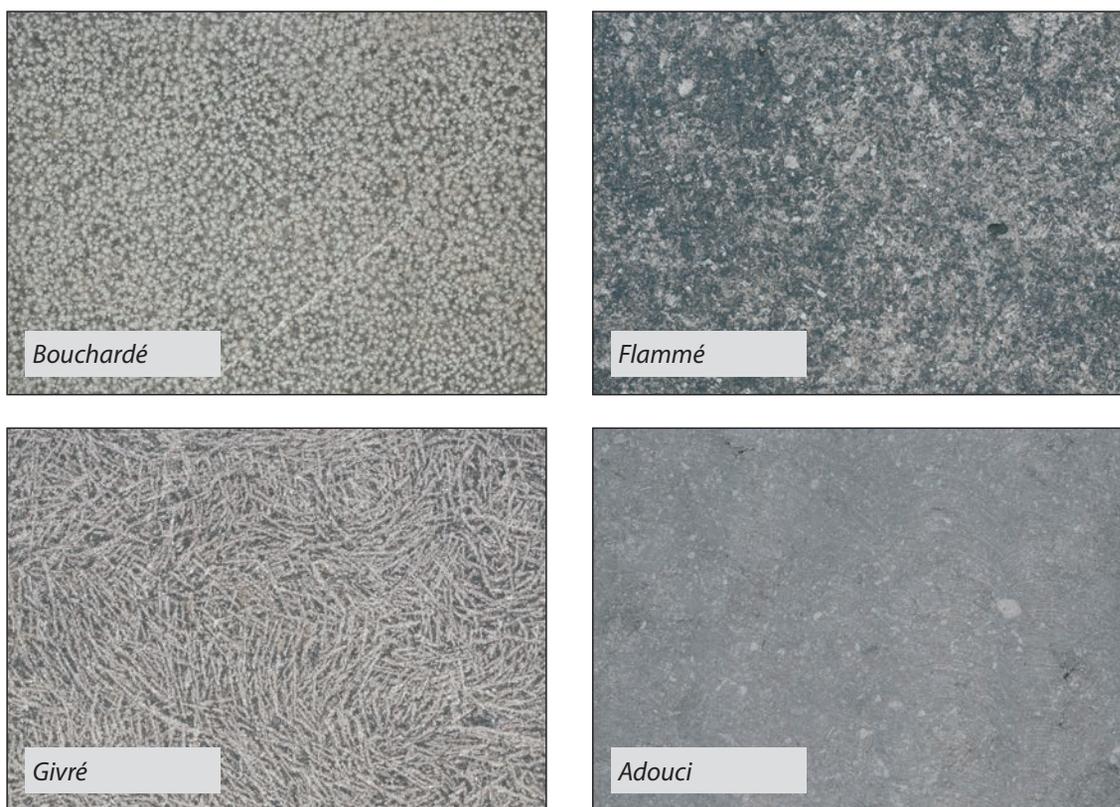


Figure 1.10 – Différents types de finition (Photos: ©PierresEtMarbresDeWallonie)

Il existe actuellement une large gamme de produits vieilliss artificiellement (tambourinés, etc.) présentant un aspect ou une patine à l'imitation de matériaux anciens.

Les finitions adouci et polie sont des finitions réalisées par des meuleuses abrasives en présence d'eau. Le niveau de brillance dépendra de la finesse des grains d'abrasif utilisés.

Elles sont peu utilisées en application de voirie, vu leur faible résistance au glissement, notamment par temps de pluie. Elles peuvent être employées en domaine piétonnier intérieur mais il convient de bien vérifier la glissance au préalable.

La finition influence largement l'aspect final de la pierre et notamment sa teinte. Ainsi, par exemple, une surface polie rendra généralement les coloris plus intenses et plus sombres qu'une finition flammée qui atténuera le plus souvent la palette des couleurs.

Dans certains cas, la finition de surface peut également affecter les performances de la matière. De plus, certaines finitions sont plus ou moins adaptées à certaines familles de roches. Il est donc important de toujours réaliser des essais pertinents par rapport à l'usage qui sera fait de la pierre. Dans tous les cas, il est essentiel de privilégier la sécurité et le confort des usagers de la voirie.

Chapitre 2

Caractérisation et certification des matériaux

Le présent chapitre concerne la caractérisation et la certification des éléments de voirie en pierre naturelle et des matériaux associés à ces produits, à savoir, le matériau de la couche de pose et le matériau de jointoiement.

2.1 Caractérisation des éléments de voirie en pierre naturelle et essais

2.1.1 Documents de référence

Plusieurs documents régissent l'utilisation de la pierre naturelle dans une application en voirie, entre autres, les normes européennes transcrites en normes belges qui régissent l'utilisation de la pierre en sols extérieurs, dont les NBN EN 1341 [6], 1342 [7] et 1343 [8].

Les Prescriptions Techniques (PTV), publiées par l'organisme de certification COPRO, sont elles aussi incontournables. A l'heure où nous écrivons ces lignes, les prescriptions techniques pour les dalles (PTV 841 [9]), les pavés (PTV 842 [10]) et les bordures (PTV 843 [11])¹ de pierre naturelle sont en cours de révision.

Afin d'être le plus à jour possible, nous avons décidé de nous référer aux versions en cours de révisions. Lorsqu'il n'était pas possible de nous référer à ces versions, (modification encore en discussion) nous nous sommes référés aux versions actuelles; dans ce cas, nous en faisons mention dans le présent document.

Le Centre Scientifique et Technique de la Construction (CSTC) a quant à lui publié une note d'information technique (NIT 228) intitulée «Pierres naturelles»².

Enfin, bien entendu, il faut tenir compte des règles établies par les cahiers des charges types régionaux, le SB 250 [12], le CCT Qualiroutes [13] et le CCT 2015 de la Région de Bruxelles-Capitale [14].

¹ Les PTV dans leur version 1.0, c'est-à-dire non révisée, sont consultables sur le site de COPRO (www.copro.eu).

² Cette note est interactive et évolutive; elle est consultable en ligne sur le site du CSTC:
<http://www.cstc.be/homepage/index.cfm?cat=publications&sub=tv-nit&pag=228&lang=fr>

2.1.2 Définitions sur base de la forme et des dimensions de l'élément

Les éléments en pierre naturelle pour revêtement modulaire extérieur sont répartis en trois types sur base de la forme et des dimensions: les dalles, les pavés et les bordures. Pour chaque type, une norme européenne distincte a été rédigée dans laquelle les exigences performantielles et les méthodes d'essai sont décrites.

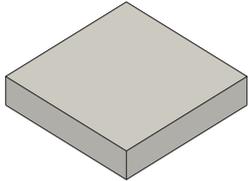
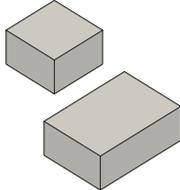
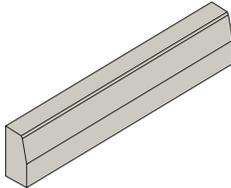
	Dalles	Pavés	Bordures
Définition	Tout élément en pierre naturelle, obtenu par clivage ou découpe, utilisé comme matériau de revêtement extérieur dont la largeur nominale est égale à au moins deux fois l'épaisseur.	Petit élément en pierre naturelle, obtenu par clivage ou découpe, dont aucune dimension en plan ne dépasse deux fois l'épaisseur, et dont la longueur ne dépasse pas deux fois la largeur. L'épaisseur nominale minimale est de 40 mm.	Élément en pierre naturelle dont la longueur est supérieure à 300 mm, généralement utilisé comme bord d'une route ou d'un sentier.
			
Norme	NBN EN 1341 [6]	NBN EN 1342 [7]	NBN EN 1343 [8]
PTV	PTV 841 [9]	PTV 842 [10]	PTV 843 [11]

Tableau 2.1 – Définitions relatives aux éléments de voirie en pierre naturelle

Une différence substantielle distingue un revêtement en dalles d'un revêtement en pavés. La distinction entre les dalles et les pavés se fait sur base de leur rapport largeur/épaisseur selon la NBN EN 1341 [6] et la NBN EN 1342 [7] (voir tableau 2.1). Dans le cas des pavés, le rapport maximal de la longueur sur l'épaisseur est donc égal à 4.

Le choix de la forme détermine aussi l'application; les dalles sont utilisées sur des trottoirs, éventuellement des pistes cyclables ou des places soumises très exceptionnellement au trafic automobile (catégorie de trafic la moins chargée), alors que les pavés sont appliqués sur des routes avec trafic.

2.1.2.1 Dalles

Les dalles commercialisées en Belgique sont habituellement des éléments rectangulaires ou carrés de dimensions comprises entre 15 cm x 15 cm et 60 cm x 30 cm. Leur épaisseur varie généralement entre 5 et 8 cm.

Il existe aussi des dalles tout-venant nommées «cassons», cependant très peu utilisées en revêtements de sols publics.

2.1.2.2 Pavés

Trois types de pavés en pierre naturelle sont commercialisés en Belgique:

- **le pavé mosaïque** traditionnel de forme grossièrement cubique est un produit issu du clivage. Les formats usuels les plus courants des pavés mosaïques sont les suivants: 5-7 cm, 8-10 cm et 9-11 cm;



Figure 2.1 – Pavés mosaïques (Photo: Febenat)

- **le pavé oblong** présente une face visible rectangulaire. Sa géométrie impose une mise en œuvre en ligne à joints alternés. Les épaisseurs usuels les plus courantes des pavés oblongs sont les suivantes: 7-10 cm, 10-13 cm et 12-15 cm;



Figure 2.2 – Pavés oblongs

- **le pavé platine** a une forme carrée et une épaisseur réduite. Il est principalement utilisé en zones piétonnes.



Figure 2.3 – Pavés platines

Remarque: les formats mentionnés pour les pavés correspondent généralement à des valeurs minimum et maximum pour tenir compte des tolérances dimensionnelles applicables.

2.1.2.3 Bordures

Les bordures, éléments permettant de séparer l'espace piétonnier de la voirie circulée et de maintenir les pavés en place, sont des produits rectilignes ou courbes. Il existe par ailleurs des bordures irrégulières dites rustiques aux faces clivées et retouchées, utilisées essentiellement en aménagement d'espaces verts et non en voirie publique.

2.1.3 Essais liés à l'utilisation de la pierre naturelle en voirie

Les pierres naturelles utilisées en voirie doivent répondre à des exigences minimales de base, qu'elles soient circulées par des véhicules ou empruntées par les piétons. De plus, en fonction des conditions climatiques, de l'environnement et de l'utilisation du revêtement en pierre naturelle, il sera éventuellement nécessaire de renforcer ces exigences. Le choix de la pierre va donc se faire aussi bien sur base de son aspect esthétique, que sur base de l'évaluation de l'aptitude à l'emploi de la pierre, compte tenu de l'application visée et des contraintes climatiques. Les essais permettant de vérifier l'aptitude à l'emploi sont décrits dans le présent paragraphe.

Les critères esthétiques et techniques à atteindre étant intrinsèquement liés à la provenance géologique de la pierre, il est impératif d'en faire une identification exhaustive au préalable.

Un soin particulier devra être accordé à l'échantillonnage de la pierre et au façonnage éventuel des éprouvettes, les essais devant être réalisés sur des échantillons aussi représentatifs que possible. Pour chaque essai repris dans ce paragraphe, les règles relatives au nombre et à la forme des éprouvettes à tester sont reprises dans les normes de référence pertinentes. La NIT 228 [1] reprend ces règles de manière systématique dans le paragraphe consacré au descriptif des essais.

2.1.3.1 Identification et caractérisation intrinsèque de la pierre naturelle

L'identification de la roche se fait sur base d'une identification géologique de la roche et d'essais de caractérisation de la pierre liés à ses caractéristiques intrinsèques, indépendamment de l'usage qui en sera fait.

■ Identification géographique et géologique de la roche

Cette identification est primordiale car les pierres à mettre en œuvre dans un même ouvrage ou dans une même partie d'ouvrage doivent provenir d'une même entité géologique et si possible du même gisement afin d'assurer une bonne homogénéité des caractéristiques.

Ainsi, le lieu d'extraction de la roche doit être localisé de manière précise et la formation ou l'horizon stratigraphique dont la roche est issue doit être clairement défini.

■ La description lithologique de la roche est établie sur base d'une description macroscopique complétée par une analyse pétrographique. A l'issue de cette description, la roche est classifiée sur base de la PTV 844 [2] «Classification des roches».

- *La description macroscopique* est réalisée sur base de l'observation macroscopique des minéraux et/ou fossiles présents dans la roche. La couleur de la roche entre en ligne de compte, en tenant compte d'une variabilité plus ou moins marquée. L'aspect de la roche doit également être pris en considération car des paramètres tels que porosité, microfissuration et rugosité de surface auront une implication éventuelle sur l'entretien du revêtement. Les défauts et particularités d'aspect doivent en outre être décrits.

- *L'analyse pétrographique* permet de déterminer la composition minéralogique de la pierre naturelle. Cette analyse consiste à fabriquer une ou plusieurs lames minces extraites de la roche. Un examen au microscope optique polarisant permet de caractériser le type de roche de manière détaillée. La norme de référence pour l'analyse pétrographique est la NBN EN 12670 [15]. Une identification pétrographique correcte de la roche revêt une importance considérable et permet d'éviter l'utilisation d'appellations abusives. L'analyse pétrographique permet également d'obtenir des informations très utiles concernant les possibles altérations d'une pierre.

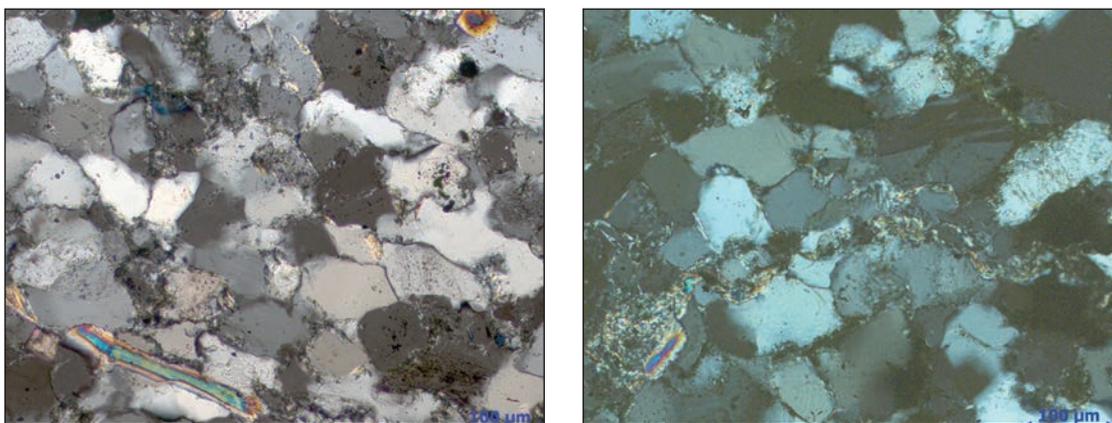


Figure 2.4 – Observation au microscope optique polarisant (Photo: CSTC)

■ La masse volumique apparente (selon la norme d'essai NBN EN 1936 [16]) reflète le degré de compacité du matériau et permet d'évaluer la masse pour un volume donné. Elle s'exprime en kg/m^3 et varie approximativement entre $1\,500\ \text{kg/m}^3$ et $3\,000\ \text{kg/m}^3$.

Cette caractéristique s'exprime parfois sous une autre forme: la densité apparente qui correspond à la masse volumique apparente du matériau divisée par la masse volumique de l'eau (soit $1\,000\text{ kg/m}^3$). Il s'agit donc d'une caractéristique ne possédant pas d'unité.

- **La porosité ouverte** (selon la norme d'essai NBN EN 1936 [16]) est déterminée par la proportion de vides (pores) dans la pierre, reliés entre eux et donc accessibles à l'eau, par rapport au volume total de la pierre. Ce paramètre est mesuré par imprégnation d'eau sous vide total. Généralement exprimé par un pourcentage en volume (vol %), il représente le volume des pores ouverts par rapport au volume total de la pierre. Il varie d'une valeur presque nulle (*granites très compacts*) à une valeur proche de 50 % (*calcaire tendre*).
- **L'absorption d'eau** reflète la capacité de la pierre à capter l'eau dans son réseau de pores par effet de capillarité. Ce paramètre est important pour les applications en voirie puisque les éléments en pierre naturelle sont susceptibles d'entrer en contact avec l'eau. Cependant, il convient de ne pas établir systématiquement de lien entre l'absorption d'eau et la durabilité. A titre d'exemple, la résistance au gel d'une pierre n'est pas directement liée à la valeur de son absorption d'eau.

Il existe différentes méthodes d'essai liées à l'absorption d'eau: mesure par imprégnation sous vide (dans le cadre de la détermination de la porosité), mesure par immersion complète à pression atmosphérique (NBN EN 13755 [17]) ou mesure par capillarité par immersion d'une face dans une tranche de 3 cm d'eau (NBN EN 1925 [18]). Il convient donc d'être prudent dans l'interprétation du résultat et de bien se renseigner sur la méthode appliquée.

En particulier, la mesure de l'absorption d'eau par imprégnation sous vide ne doit pas être confondue avec la porosité. Par exemple, une pierre présentant une absorption d'eau sous vide de 20 % et une masse volumique apparente de 2000 kg/m^3 est caractérisée par une porosité ouverte de 40 % vol.

- **Le coefficient de dilatation thermique** (selon la norme d'essai NBN EN 14581 [19]): comme tout matériau, la pierre naturelle est sujette à des variations dimensionnelles sous l'effet de la température et de l'ensoleillement. Le coefficient de dilatation thermique caractérise cette déformation et s'exprime en millimètres par mètre et par kelvin (*mm/mK*). La valeur de ce coefficient varie généralement entre 1.10^{-3} et 16.10^{-3} mm/mK selon le type de pierre.

Le coefficient de dilatation devra être pris en considération pour le dimensionnement des joints de dilatation (largeur et espacement).

Ceci est d'autant plus important lorsque différents matériaux (béton, acier, verre, asphalte, etc.) ou différents types de pierre sont associés.

2.1.3.2 Les essais déterminant la performance à l'usage

Ces essais permettent d'évaluer les performances dans les conditions d'utilisation prévues. Les essais de détermination de la résistance mécanique (compression et flexion) ont été repris dans le présent paragraphe bien que ceux-ci entrent également en ligne de compte pour l'identification du matériau.

- **La résistance à la compression** (selon la norme d'essai NBN EN 1926 [20]), exprimée en MPa, permet de déterminer le niveau de sollicitation admissible en compression pour les pavés en revêtement routier.

La résistance à la compression d'un élément en pierre naturelle est déclarée en termes de «résistance à la compression minimum attendue» calculée suivant la norme NBN EN 1926 [20].

Au moins 10 cubes de 7 cm ou 5 cm de côté ou 10 cylindres de même diamètre sont placés sur une presse d'essai et soumises à une charge de compression jusqu'au point de rupture.

Par ailleurs, ce paramètre est utilisé comme caractéristique d'identification d'une pierre et peut être indicateur d'une altération après vieillissement (*essai de résistance au gel*) en comparaison avec les valeurs de référence.

- **La résistance à la flexion** (*selon la norme d'essai NBN EN 12372 [21]*), également exprimée en MPa, permet de déterminer le niveau de sollicitation admissible en flexion pour les dalles et bordures. L'éprouvette est placée sur deux rouleaux d'appui et la charge est appliquée suivant un axe central parallèle aux deux rouleaux (*essai de flexion 3 points*). Au moins dix éprouvettes sont testées pour cet essai. La résistance à la flexion d'un élément en pierre naturelle est déclarée en termes de «résistance à la flexion minimum attendue» calculée suivant la norme NBN EN 12372 [21].

Tout comme la résistance à la compression, ce paramètre est également utilisé comme caractéristique d'identification d'une pierre ou en comparaison avec les valeurs de référence, comme indicatrice d'une altération après vieillissement (*essai de résistance au gel*) ou d'une dégradation microstructurale.



Figure 2.5 – Essai de flexion (Photo: CSTC)

- **La résistance au glissement** (*selon la norme d'essai NBN EN 14231 [22], slip resistance*) influe directement sur le confort et la sécurité des usagers, en particulier par temps de pluie. La résistance au glissement est mesurée au moyen du pendule SRT. Un patin en caoutchouc rigide est fixé au pendule pour simuler le glissement d'une semelle de chaussure; des critères de qualité du caoutchouc sont mentionnés dans la norme, ceux-ci ayant une grande influence sur le résultat final. La friction du patin sur l'éprouvette préalablement humidifiée est mesurée.



Figure 2.6 – Pendule SRT pour la mesure de la glissance

La résistance au glissement est étroitement liée à la rugosité du revêtement, mais aussi à l'espacement entre joints ainsi qu'à l'usure progressive et à l'entretien du matériau. En effet, en fonction de la résistance à l'abrasion d'un revêtement en pierre naturelle et de son intensité d'utilisation, la résistance au glissement peut diminuer de manière plus ou moins importante au fil du temps. Ce sujet est à l'étude au sein du comité de normalisation européen CEN/TC 246.

Indépendamment des paramètres d'usure et d'entretien, la résistance au glissement dépend de la texture du revêtement. La notion de texture se décompose en «microtexture», qui concerne les irrégularités de surface de moins de 0,2 mm de hauteur et espacées de moins de 0,5 mm mesurées en plan, et en «macrotecture», qui concerne les irrégularités de 0,2 à 10 mm de hauteurs et espacées de 0,5 mm à 50 mm mesurées en plan.

La microtexture est liée au type de roche, tandis que la macrotecture dépendra plutôt de la finition appliquée.

Pour des surfaces présentant une rugosité de surface supérieure à 1 mm, l'essai n'est pas nécessaire, la surface étant d'office considérée comme non glissante.

Il est également possible d'évaluer le risque de glissement de véhicules (*skid resistance*) en utilisant un patin avec un caoutchouc plus souple. Cette exigence n'est cependant pas obligatoire, ni au niveau du marquage CE, ni au niveau des trois PTV's [9,10,11]. Seule la résistance au glissement des piétons est exigée.

2.1.3.3 Essais de durabilité

Les essais de durabilité permettent d'évaluer la résistance du matériau à différents facteurs d'agressivité; ces essais permettent de s'assurer que les propriétés intrinsèques et performantielles initiales vont perdurer au fil du temps.

- **La résistance au gel-dégel** (selon la norme d'essai NBN EN 12371 [23]): en hiver, l'eau contenue dans les vides de la pierre peut geler et exercer de fortes contraintes sur les parois des éléments par augmentation de volume. Il peut en résulter l'apparition de microfissures qui se développent avec l'alternance de cycles de gel-dégel et donnent lieu à des éclats, des pertes de matière, des écaillages et des affaiblissements des caractéristiques. Cela conduit souvent à la destruction complète du produit. La résistance au gel est l'une des caractéristiques de durabilité les plus importantes pour les applications extérieures. Le choix d'un type de pavé qui n'est pas résistant aux cycles de gel-dégel entraînera une altération rapide de ce type de pavé, avec toutes les conséquences que cela entraîne.

L'essai de détermination de résistance aux cycles de gel-dégel consiste à soumettre des éprouvettes de pierre à une succession de 56 cycles de gel dans l'air et de dégel dans l'eau (conformément à la méthode d'essai EN 12371 [23] – essai A (*essai technologique*) [23]). Après l'essai, la résistance à la flexion ou la résistance à la compression ne peut pas être modifiée de plus 20 %.

La norme d'essai NBN EN 12371 [23] décrit un autre type d'essai (essai d'identification B) pour lequel les mêmes cycles sont appliqués jusqu'à rupture des éprouvettes. Dans ce cas, la rupture de l'éprouvette correspond à une diminution du module d'élasticité dynamique de 30 % de la valeur initiale. Cet essai est demandé dans certains cahiers des charges associant notamment des bâtiments.

Cet essai ne tient pas compte de l'influence des sels de déverglaçage dont l'agressivité est plutôt liée aux chocs thermiques imposés au revêtement après épandage. Une méthode d'essai est à l'étude au niveau du comité de normalisation européen CEN/TC 246. Ce même groupe de travail étudie

également la problématique de la résistance au délitement d'une roche soumise aux cycles de gel-dégel et réfléchit à la mise au point d'un essai permettant d'identifier les roches à risque.

- **La résistance à l'usure** (selon la norme d'essai NBN EN 14157, méthode A [24]) permet de déterminer le comportement d'un élément en pierre naturelle vis-à-vis de l'abrasion mécanique provoquée par le frottement de fines particules. La méthode d'essai considérée comme référence par les normes européennes consiste à mesurer l'empreinte laissée par un disque métallique qui frotte sur un échantillon de pierre (*Méthode Capon*). Plus la longueur d'empreinte est faible, plus la pierre résiste à l'usure.

Remarque: lors du choix d'un type de pierre naturelle, il est important de tenir compte de toutes les propriétés susmentionnées et des exigences correspondantes. L'ensemble de ces propriétés va déterminer la durabilité du matériau choisi. Le choix d'un type de pierre naturelle avec une résistance à la compression exceptionnellement élevée, mais qui ne satisfait pas sur le plan de la résistance au gel ou à l'usure, engendrera inévitablement des problèmes dans le temps.

2.1.4 Critères de sélection des éléments en pierre naturelle

Les éléments en pierre naturelle sont sélectionnés en fonction de leur aspect esthétique, de leur aptitude à l'utilisation et de leur durabilité. Certains critères sont établis de manière générale et sont communs à tous les éléments en pierre naturelle. D'autres critères sont spécifiques au type de produit utilisé et à l'usage qui en sera fait.

- **La nature lithologique:** les éléments en pierre naturelle doivent être compacts, à grains serrés et de texture homogène. Aucune trace d'altération ou de schistosité n'est acceptée afin d'éviter tout délitage. Dans le cadre d'un projet, il y a lieu de s'assurer de la provenance géographique et géologique de la pierre.
- **Les dimensions géométriques:** il existe une grande diversité de formats. Les dimensions sont déterminées conformément à la norme NBN EN 13373 [25]. Pour déterminer les écarts autorisés par rapport aux dimensions, des classes sont définies pour les différents types d'éléments en pierre naturelle (*dalles, pavés et bordures*) dans les normes correspondantes (resp. NBN EN 1341, 1342 et 1343 [6, 7, 8]). Les classes d'application en Belgique sont déterminées dans les différentes PTV (PTV 841, 842 et 843 [9, 10, 11]).
- **L'absorption d'eau par capillarité (NBN EN 1925 [18]):** les PTV 841, 842 et 843 [9, 10, 11] préconisent une déclaration de la valeur maximale attendue.
- **La porosité:** la porosité ouverte a une incidence non négligeable sur le comportement du matériau aux salissures. Un matériau poreux a tendance à accumuler plus de saletés au sein de la pierre et occasionnera des opérations de nettoyage plus intenses, à moins de procéder à un traitement préventif de la pierre. Cet élément doit être pris en compte pour la sélection de la pierre. Les PTV 841, 842 et 843 [9, 10, 11] préconisent la déclaration de la masse volumique apparente et de la porosité.
- **La résistance à la compression** est une caractéristique pertinente pour les pavés. La PTV 842 [10] définit la résistance à la compression minimale attendue en fonction de la classe de trafic à considérer. Quoiqu'il en soit, une résistance à la compression minimale attendue de 50 MPa doit être atteinte. En fonction de la classe d'utilisation, il est nécessaire d'exiger une résistance à la compression supérieure (voir tableau 2.2). Il faut néanmoins souligner qu'il n'est pas très utile d'exiger une résistance à la compression exagérément élevée. Que du contraire, quand une résistance à la compression trop élevée est exigée, il se peut que certains types de pierre naturelle, qui conviennent pour l'application, soient exclus à tort.

A noter que la résistance à la compression n'est pas le seul paramètre à prendre en compte pour la résistance du revêtement au trafic considéré. En effet, les dimensions des pavés, en particulier leur épaisseur, jouent également un rôle important. De même, le choix de la couche de pose combiné à celui du matériau de jointoiement influencera directement la durabilité du revêtement pour un trafic considéré. Ces principes sont exposés en détail au chapitre 3 du présent document.

Résistance à la compression E_c (MPa)	Classe d'utilisation	Usage (pour information)
Pas d'exigences	0	Décoration
> 50	1	Pavés posés sur mortier, usage piétonnier uniquement
> 50	2	Zones piétonnières et cyclables; jardins, balcons
> 85	3	Accès occasionnel de véhicules automobiles, de véhicules légers et de motocyclettes; entrées de garage
> 85	4	Zones de circulation piétonnière, places de marches empruntées occasionnellement par les véhicules de livraison et de secours
> 100	5	Zones de circulation piétonnière fréquemment empruntées par des poids lourds
> 100	6	Routes et rues; stations-services

Tableau 2.2 – Classes d'utilisation et résistances à la compression minimales attendues E_c correspondantes pour les pavages en pierre naturelle, telles que reprises dans le document PTV 842 [10, en cours de révision]

- La résistance à la flexion:** la résistance à la flexion minimum attendue est une caractéristique pertinente pour les dalles et les bordures. Ce paramètre permet de déterminer par calcul la charge de rupture d'un élément donné. Les normes NBN EN 1341 et 1343 [6 et 8] définissent des classes de 0 à 6 en fonction de l'usage (voir tableau 2.3). A chaque classe correspond une charge de rupture minimum. Le calcul des charges de rupture est repris dans les PTV correspondantes, les PTV 841 et 843 [9 et 11]. Ce calcul tient compte de la résistance à la flexion minimum attendue, des dimensions de l'élément et d'un coefficient de sécurité.

Charge de rupture (kN)	Classe d'utilisation	Usage (pour information)
Pas d'exigences	0	Décoration
> 0,75	1	Dalles posées sur mortier, usage piétonnier uniquement
> 3,5	2	Zones piétonnières et cyclables; jardins, balcons
> 6,0	3	Accès occasionnel de véhicules automobiles, de véhicules légers et de motocyclettes; entrées de garage
> 9,0	4	Zones de circulation piétonnière, places de marches empruntées occasionnellement par les véhicules de livraison et de secours
> 14	5	Zones de circulation piétonnière fréquemment empruntées par des poids lourds
> 25	6	Routes et rues; stations-services

Tableau 2.3 – Classes d'utilisation et charge de rupture minimale exigée correspondante pour les dalles en pierre naturelle et pour les bordures en pierre naturelle, telles que reprises dans les normes NBN EN 1341 (annexe A) [6] et NBN EN 1343 (annexe A) [8] et les PTV 841 [9] et PTV 843 [11]

- **La résistance au glissement:** de manière générale, on considère qu'une valeur du coefficient supérieure à 35 (valeur USRV), induit un risque de glissade faible. Cette valeur est exigée dans les PTV 841, 842 et 843 [9, 10, 11].
La finition choisie influence naturellement la résistance au glissement de l'ouvrage. Plus elle est grossière, plus elle est antidérapante. Cependant, d'autres critères inhérents à l'ouvrage peuvent également influencer sa glissance résultante, comme par exemple la nature et la fréquence des joints.
- **La résistance à l'usure:** l'usure d'un revêtement est essentiellement provoquée par le trafic auquel il est soumis. L'aptitude d'une pierre à résister à la perte de la structure doit donc être d'autant plus importante que les sollicitations issues du trafic sont sévères. Suivant les PTV 841, 842 et 843 [9, 10, 11], le critère de résistance à l'usure est considéré comme atteint si la valeur d'usure individuelle est inférieure ou égale à 24 mm.
- **La sensibilité au gel-dégel:** quelle que soit l'application visée, les éléments en pierre naturelle posés à l'extérieur doivent être non gélifs.

2.1.5 Quelques exemples de pathologies connues de la pierre naturelle

La réussite d'un projet de revêtement routier en pierre naturelle constitue en soi une double récompense puisque la satisfaction d'une mise en valeur esthétique complète celle de la réussite d'ordre technique.

Lorsque malheureusement des désordres apparaissent dans une réalisation, il est souvent difficile de déterminer si l'origine en est dans la conception ou dans l'exécution, dans le choix des matériaux ou dans le dimensionnement des produits. Ne sont abordées ici que les pathologies liées à la nature même de la roche, les autres cas seront traités dans le chapitre 5 «Entretien et réparation».

La pierre naturelle peut en effet présenter des caractéristiques variables qu'il est crucial de bien connaître et de maîtriser afin d'être certain que le matériau choisi se comportera correctement pour l'application envisagée. Les informations fournies par le producteur ou par le fournisseur d'éléments en pierre naturelle (fiche technique, document ATG, voir § 2.2, etc.) s'avèrent très utiles dans ce processus de sélection et constituent un outil précieux pour établir une procédure de réception fiable. Cette nécessité s'impose d'autant plus si des types de pierres au comportement encore peu connu sous nos climats sont concernés.

Il y a lieu de souligner l'importance de la représentativité de l'échantillonnage pour la réalisation des essais d'aptitude et ensuite de la traçabilité des fournitures par rapport aux matières utilisées pour les analyses. Il se révèle également utile de bien connaître les pathologies déjà observées, dont les cas les plus fréquents sont repris au tableau 2.4.

Symptômes et photos*	Descriptions	Causes
<p>Roches sédimentaires silicoclastiques-siliceuses (niveau 2.1 selon le document PTV 844) [2]</p> <p>Clivage ou refente de pavés de roches gréseuses</p> 	<p>Concerne des grès quartzeux voire quartzitiques présentant une fine stratification localement soulignée par des lamines sombres. La dégradation consiste en une rupture parallèle à la stratification, ce clivage s'effectuant superficiellement mais aussi dans l'épaisseur du pavé. Le délitement s'effectue davantage au niveau des saillies présentes sur les chants latéraux des pavés démaigris. Les plans de rupture correspondent probablement aux discontinuités pétrographiques.</p>	<p>L'analyse pétrographique montre la présence de minces lits enrichis en minéraux divers, dont des micas, allongés parallèlement à la strate, ou en argiles, voire à une trame de quartz à granulométrie serrée, avec un film d'argiles.</p> <p>Il est possible qu'un effet de fatigue soit en cause, des chocs répétés (surtout en voirie circulée), et que le mode de pose puisse être incriminé, de même qu'un gel subséquent à la pénétration d'eau, les chocs thermiques ou l'altération chimique des lits de minéraux contrastés.</p>
<p>Désagrégation de pavés par morcellement</p> 	<p>Désagrégation plus ou moins avancée de pavés, qui se morcellent en cailloutis de plus en plus té nus, observée surtout chez des grès arkosiques. Ce phénomène peut prendre des formes inhabituelles, évoquant l'aspect de carton-pâte.</p>	<p>Les analyses pétrographiques suggèrent que des feldspaths altérés dès le moment de la sédimentation (séricitisation), présents parfois en abondance (jusqu'à 40 %) sont probablement la cause première de l'altération.</p> <p>D'autres phénomènes comme fatigue ou gel peuvent accentuer ou accélérer la dégradation des éléments.</p>

* Ces photos représentent des exemples de pathologies connues; d'autres pathologies peuvent être causées par une mauvaise mise en oeuvre ou une mauvaise conception (voir chapitre 5).

Tableau 2.4 – Cas les plus fréquents de pathologies de pierres naturelles (Photos: CSTC et CRR)

suite à la page 43

Symptômes et photos*	Descriptions	Causes
Roches sédimentaires carbonatées (niveau 2.2 selon le document PTV 844) [2]		
<p>Joints stylolithiques</p> 	<p>Dégradations par des écaillages plus ou moins profonds, qui succèdent à l'apparition de noires, zones piquetées. Ces joints ou terrasses concentrent argiles, matières organiques et divers insolubles.</p>	<p>Présence de joints stylolithiques (ou «terrasses») dans les roches sédimentaires carbonatées bioclastiques, disposés (sub)parallèlement à la stratification et par conséquent aussi à la surface des dalles lorsque celles-ci sont débitées à passe.</p>
<p>Fissuration des calcaires recristallisés</p> 	<p>Fissurations plus ou moins prononcées, suivies de désagrégations.</p>	<p>Recristallisation produisant des cristaux de calcite (ou parfois de dolomite) de grandes dimensions. C'est un phénomène de décohérence intergranulaire qui entre en jeu et fragilise le matériau, qui finit par se désagréger. D'autres causes aggravantes peuvent être invoquées, telles que chocs mécaniques répétés, chocs thermiques ou gel après pénétration d'eau, pour accentuer les dégradations.</p>
* Ces photos représentent des exemples de pathologies connues; d'autres pathologies peuvent être causées par une mauvaise mise en œuvre ou une mauvaise conception (voir chapitre 5).		

Tableau 2.4 – Cas les plus fréquents de pathologies de pierres naturelles (Photos: CSTC et CRR)

suite à la page 44

Symptômes et photos*	Descriptions	Causes
Roches sédimentaires carbonatées (niveau 2.2 selon le document PTV 844) [2] (suite)		
<p>Changement de teinte de roches calcaires et certains grès</p> 	<p>Des problèmes de décoloration ou de changement de teinte, jaunissement ou brunissement, voire «rouille», ont été recensés dans des roches calcaires peu fossilifères et dans certains grès.</p>	<p>La présence de pyrite finement dispersée, surtout framboïdale, localement accompagnée d'argile contenant du fer non fixé, peut être invoquée, un phénomène d'oxydation se produisant alors en présence d'humidité. Les oxydes et hydroxydes métalliques générés migrent en surface, d'autant plus que la dissolution est importante, en relation directe avec la teneur en alcalins du milieu, et provoquent les changements de couleurs non souhaités.</p>
Roches magmatiques volcaniques (niveau 1.2 selon le document PTV 844) [2]		
<p>Blanchissement des basaltes</p> 	<p>Des roches magmatiques sombres à grain fin telles que les basaltes montrent sporadiquement un blanchissement des pavés, qui se détériorent progressivement. La partie superficielle du pavé, d'abord assombrie, finit par se détacher du corps de l'élément, mettant au jour une zone grisâtre désagrégée par ces phénomènes d'altération chimique.</p>	<p>Présence dans une certaine proportion de verre volcanique, qui se dévitrifie en entraînant l'altération du matériau. Un tel phénomène a été qualifié de «coup de soleil» dans la NBN EN 13242 [29].</p>

* Ces photos représentent des exemples de pathologies connues; d'autres pathologies peuvent être causées par une mauvaise mise en oeuvre ou une mauvaise conception (voir chapitre 5).

Tableau 2.4 – Cas les plus fréquents de pathologies de pierres naturelles (Photos: CSTC et CRR)

Dans la plupart de ces cas, une analyse pertinente des informations relatives aux pierres livrées, suivie d'un examen visuel attentif préliminaire et éventuellement complété par un examen pétrographique détaillé, réalisé par lames minces en microscopie optique, permet de déceler certains caractères tels que microstructure (microporosité et microfissures notamment) ou cristallinité des constituants, ou la présence de minéraux altérables ou déjà altérés. Certaines techniques plus élaborées (microscopie électronique, analyses par diffraction, etc.) peuvent être mises en œuvre pour affiner ce diagnostic et mettre en garde. Mais certains phénomènes restent difficilement prévisibles et impossibles à éviter par tri sélectif des produits.

2.2 Certification des matériaux

2.2.1 Introduction

Les dalles, pavés et bordures en pierre naturelle ne peuvent être mis sur le marché européen, et donc également en Belgique, que s'ils disposent d'un marquage CE. Ce marquage réglementaire est apposé sur base de la partie harmonisée des normes européennes NBN EN 1341 [6], NBN EN 1342 [7] et NBN EN 1343 [8], suivant les modalités des annexes ZA de ces normes.

Pour ces produits, il existe aussi, en Belgique, un système de certification volontaire qui se matérialise par l'utilisation des marques ATG/BENOR, présentes sur les emballages et/ou documents d'accompagnement. Ce système augmente le niveau de confiance dans la conformité des produits par l'intervention d'une tierce partie indépendante, accréditée, qui effectue des vérifications en continu, selon un programme de visites et d'essais bien défini.

2.2.2 Marquage CE

Le Règlement (UE) n°305/2011 [26] établit les conditions harmonisées de commercialisation pour les produits de construction en Europe. Il a abrogé la Directive 89/106/CEE [27], échue en juillet 2013, des mesures transitoires ayant été mises en place pour assurer la transition.

Dans la pratique, les produits de voirie sont soumis à l'obligation de marquage CE, en vertu des normes harmonisées NBN EN 1341 [6], NBN EN 1342 [7] et NBN EN 1343 [8]. Le produit doit être accompagné d'une «**Déclaration de Performance**» établie par le fabricant, en tenant compte de ses produits et des usages prévus. Les informations relatives à la déclaration de performance peuvent être communiquées par voie informatique à condition qu'un lien univoque puisse être établi entre le produit et la déclaration de performance.

Le système d'évaluation et de vérification de la constance des performances retenu pour les produits de voirie en pierre naturelle est le système 4. Il correspond à une déclaration, par le fabricant, des performances, en ce qui concerne les caractéristiques essentielles du produit, sur la base des éléments suivants, effectués par le fabricant:

- **la détermination du produit type sur la base d'essais de type initiaux** ou de la documentation descriptive du produit;
- **le contrôle de la production en usine.**

Notons que dans ce système 4, il n'y a pas d'intervention prévue d'un organisme notifié, la déclaration est donc le seul fait du producteur.

Dans tous les cas, le marquage CE apporte la garantie que le fabricant assume la responsabilité des performances déclarées.

Pour tous les produits, y compris ceux fabriqués en dehors de l'Union Européenne, le marquage reprend le nom et l'adresse du fabricant ou de son représentant mandaté.

La figure 2.7 reprend un exemple de marquage CE et de «Déclaration de Performance conformes».

CE		<i>Symbole du marquage CE repris dans la Directive 93/68/EEC</i>
Nom société 12		<i>Nom ou marque d'identification du fabricant (le siège social du fabricant peut aussi être ajouté) Deux derniers chiffres de l'année au cours de laquelle le marquage a été apposé</i>
EN 1342:2012 Pavés en pierre naturelle «Grisette», grès, gris Pierreville, Belgique Pour zones extérieures piétonnes et/ou de circulation de véhicules		<i>Numéro de la norme européenne et année de sa publication Description du produit Nom traditionnel, type de pierre, couleur Lieu d'origine de production Utilisation prévue</i>
Libération de substances toxiques	NPD	<i>Performances des principales caractéristiques réglementées, qui doivent être déclarées pour l'usage prévu</i>
Résistance à la rupture		
Résistance à la compression (EN 1926) (valeur minimum attendue)	97,2 MPa	
Glissance		
Résistance au glissement humide (EN 14231)	45	
Durabilité		
Résistance au gel-dégel – essai technologique (EN 12371)	(97,2/90,0) MPa	

Figure 2.7 – Exemple de marquage CE et déclaration de performance de pavés

2.2.3 Certification ATG/BENOR

Le système de certification volontaire ATG/BENOR est basé sur:

- **une étude initiale du gisement** menée par un rapporteur/géologue désigné par l'UBAtc³ (*tierce partie indépendante*). Cette étude doit permettre de caractériser le gisement et d'identifier les risques potentiels liés à la pierre dans son gisement. Elle conduira à la rédaction d'un texte d'ATG. Au travers de l'identification des risques potentiels, elle permettra également d'adapter le système de maîtrise de la production de manière à permettre de délivrer des produits conformes aux spécifications.

Le texte d'ATG est un document public, dont la validité doit être vérifiée en temps réel sur le site de l'UBAtc www.ubatc.be;

- **l'assurance de la traçabilité** entre le gisement et le produit délivré. La traçabilité doit permettre de s'assurer que les produits délivrés sont bien fabriqués à partir de la pierre issue du gisement identifié par le numéro d'ATG. De cette manière, les caractéristiques intrinsèques de la pierre reprises dans le texte d'ATG peuvent être utilisées pour la caractérisation des produits en pierre;
- **la vérification de la maîtrise de la production**, avec un accent particulier porté à la maîtrise de la sélection, est réalisée au cours d'un audit initial du système de production mené par une tierce partie indépendante. Les critères de sélection ainsi que l'efficacité du système de traçabilité mis en place sont, à cette occasion, notamment vérifiés. Le système de sélection de la pierre doit notamment permettre d'assurer que toute matière non-conforme au texte d'ATG soit écartée au cours du processus de production et ne soit donc pas utilisée pour la fabrication des produits porteurs de la marque ATG. En fonction des cas, la conformité du produit peut également être testée;
- **la surveillance continue de ces éléments** par une tierce partie indépendante.

La combinaison des trois premiers éléments que sont la bonne connaissance du gisement, la traçabilité et la maîtrise de la production/sélection, permet l'utilisation des valeurs des caractéristiques intrinsèques de la pierre publiées dans le texte d'ATG pour les produits délivrés avec référence à l'ATG. Il existe deux filières de certification volontaire.

2.2.3.1 Filière 1 – Fabrication en atelier – Déclarations de qualité

Cette filière permet à des ateliers indépendants d'utiliser l'Agrément Technique d'un producteur de pierre comme base de déclaration pour les produits fabriqués dans leurs ateliers.

Tous les principes énoncés ci-avant sont d'application (étude initiale du gisement, traçabilité, maîtrise de la production et surveillance continue), mais peuvent ainsi être répartis sur plusieurs sociétés.

Ainsi:

- l'étude initiale du gisement, la traçabilité et la maîtrise de la production jusqu'en sortie de site seront vérifiées et surveillées chez le producteur de pierre;
- la vérification et la surveillance de la traçabilité et de la maîtrise de la production sera poursuivie chez le fabricant. Elle s'appuie sur un manuel «qualité de l'unité de fabrication» validé par un organisme de certification et régulièrement audité, ainsi que sur des contrôles effectués sur chantier.

³ Union belge pour l'agrément technique dans la construction.

Un système de surveillance global est ainsi mis en place **sur toute la chaîne de production** depuis le gisement jusqu'à la délivrance du produit fini. Il permet de valider avec un bon niveau de confiance, l'utilisation des caractéristiques intrinsèques de la pierre publiées dans le texte d'ATG pour les produits finis délivrés avec référence à l'ATG (déclaration de qualité), mais aussi, au travers des contrôles mis en place dans l'unité de fabrication et sur chantiers, de valider l'aptitude du fabricant, et de son système de production et d'autocontrôles, à délivrer des produits conformes.

2.2.3.2 Filière 2 – Production en série – Certification ATG/BENOR

Cette filière est essentiellement adaptée aux productions en série de pièces standard. La surveillance externe va jusqu'au contrôle des produits finis avec, comme spécifications de référence les PTV 841, 842 et 843 [9, 10, 11]. Il s'agit d'une certification de produits, régie par le règlement d'application TRA19 [28] de COPRO. Les marques ATG et BENOR sont utilisées sur les produits finis.

Outre des audits réguliers des unités de production et fabrication, des essais externes sur les produits finis sont réalisés suivant un programme annuel déterminé. La traçabilité reste un élément important, permettant l'utilisation des caractéristiques intrinsèques de la pierre définies dans le texte d'ATG.

Cette certification répond sans conteste aux critères de pertinence définis dans l'annexe 2 du document de référence CCT QUALIROUTES-A-3 [13]. Il est aussi reconnu en Région Flamande, conformément au SB 250 [12]. En Région de Bruxelles-Capitale, il n'y a pas de disposition particulière dans le cahier des charges type (CCT 2015) [14].

2.3 Matériaux de la couche de pose

2.3.1 Généralités

La couche de pose se définit comme une couche épaisse de quelques centimètres dont le rôle est d'une part de compenser les petites inégalités de la fondation et de l'épaisseur des pavés (ces inégalités doivent cependant toujours rentrer dans les tolérances admises) et d'autre part de permettre une insertion des pavés («nichage») afin de bien les maintenir en place.

Outre les sables et gravillons non liés qui sont les matériaux les plus anciennement utilisés en couche de pose de pavés (pose souple), les matériaux liés (pose rigide) sont de plus en plus utilisés et sont également décrits dans le présent chapitre.

En règle générale, on opte pour l'un des deux concepts, et pour le choix du type de couche de pose, cette cohérence avec le type de jointoiement est maintenue:

- «flexible»: une couche de pose perméable constituée de sable et/ou de gravillons en combinaison avec un jointoiement de type souple;
- «rigide»: une couche de pose rigide généralement imperméable en combinaison avec un jointoiement rigide. Si le matériau de jointoiement est de type perméable, le matériau de couche de pose doit l'être également.

Le choix du matériau pour la couche de pose dépend entre autres de la charge de trafic et du jointoiement choisi ou inversement. Ce choix sera approfondi au chapitre 3 de ce code de bonne pratique.

2.3.2 Matériaux non liés

2.3.2.1 Couche de pose en sable ou en gravillons

Le sable (0/D, avec $D \leq 6,3$ mm)⁴ et les gravillons (d/D) sont définis dans la norme NBN EN 13242 [29] et la prescription technique PTV 411 [30]. Seuls les granulats provenant de pierre naturelle sont autorisés. Les granulats doivent être issus de concassage; ceci peut être vérifié par la mention de la catégorie C90/3 suivant la norme NBN EN 13242 [29]. Pour permettre l'évacuation de l'eau qui s'infiltré par les joints dans la couche de pose, il est très important d'utiliser un sable ou un gravillon avec une forte restriction en particules plus fines que 63 μm .

Dans le cas où l'on opte pour une couche de pose en sable, une granulométrie 0/6,3 est conseillée.

Si on utilise des gravillons, la préférence est généralement donnée à une granulométrie 2/6,3 et un coefficient de Los Angeles inférieur ou égal à 30. Dans tous les cas, les exigences reprises dans les différents cahiers des charges types doivent être respectées. Les exigences particulières concernant la granulométrie et les caractéristiques des granulats dépendent de la catégorie de trafic prise en compte; ces exigences sont détaillées au chapitre 3.

Si celles-ci ne font pas l'objet d'une certification volontaire, les caractéristiques des granulats doivent être contrôlées par des essais. Certaines spécifications ne sont pas mesurables sur un sable ou un gravillon fin, comme par exemple la valeur du coefficient Los Angeles. Dans ce cas, la caractéristique devra être mesurée sur des gravillons issus de la roche-mère. Pour garantir une mise en œuvre aisée de la couche de pose, il faut également considérer l'ouvrabilité lors du choix des matériaux.

2.3.3 Matériaux liés

2.3.3.1 Sable-ciment

Le sable-ciment est un mélange homogène de sable (de préférence du sable de rivière 0/4), de ciment (100 kg/m^3 à 125 kg/m^3), d'eau de gâchage et éventuellement de cendres volantes. La granulométrie, ainsi que la teneur en ciment et en eau sont déterminées au moyen d'une étude préliminaire. L'utilisation de sable de concassage est fortement déconseillée et le sable doit de préférence être lavé; en tout cas, la teneur en particules fines doit rester limitée ($f_{1,6}$ selon le SB 250 [12], $f_{2,2}$ selon le CCT Qualiroutes [13] et le CCT 2015 [14]). C'est l'entrepreneur qui détermine en concertation avec la centrale de malaxage la composition finale, mais il doit tenir compte des prescriptions reprises dans les différents cahiers des charges types.

Dans le cas d'une couche de pose en sable-ciment, la pose et la fixation des pavés (en pierre naturelle) se font avant la prise de la couche de pose (2 à 3 h après la préparation du mélange). Aussi, il est recommandé de toujours travailler avec plusieurs livraisons par jour. En cas de risque de gel dans les vingt-quatre premières heures, il ne faut pas mettre en œuvre de sable-ciment.

⁴ Dans la version d'application au moment de la rédaction de ce document, les granulats fins (sables) sont définis par un D_{max} de 6,3 mm. Dans la prochaine version de cette norme, il est prévu d'abaisser cette limite à 4 mm.

Pendant la mise en œuvre, la qualité du sable-ciment est contrôlée selon le SB 250 [12] en confectionnant des éprouvettes Proctor. La résistance à la compression moyenne des trois éprouvettes Proctor s'élève au moins à 3,0 MPa après 28 jours. Suivant le SB 250 [12], les mélanges doivent être certifiés BENOR ou équivalent.

Des avis très divergents existent sur l'utilisation du sable-ciment comme couche de pose pour les revêtements modulaires. S'il a été bien posé, le matériau a certainement prouvé toutes ses qualités. Pour arriver à un résultat de qualité, il est toutefois très important que le placement soit réalisé par quelqu'un qui dispose d'une expérience suffisante.



Figure 2.8 – Couche de pose en sable-ciment

2.3.3.2 Mortier de ciment

Le mortier pour couche de pose est composé de sable (0/4 ou 0/6,3), de ciment, d'eau de gâchage et d'adjuvants éventuels tels qu'un retardateur de prise, un entraîneur d'air, un agent de rétention, etc. La quantité de ciment s'élève au moins à 300 kg/m³ de sable sec. Pour améliorer le pouvoir adhésif et l'adhérence du mortier, des polymères (résine non réactive) peuvent être ajoutés.

L'utilisation de mortier comme couche de pose est uniquement recommandée quand le trafic est limité, si la fondation est suffisamment rigide et quand les joints sont aussi réalisés en mortier (modifié).

Pour ce type de couche de pose, il y a lieu d'être attentif à une mise en œuvre du mortier dans un délai acceptable. L'apport du matériau doit être réglé de manière à ce que la pose des pavés puisse avoir lieu avant que le mortier ne prenne.

2.4 Matériaux de jointolement

2.4.1 Généralités

Le joint désigne le matériau utilisé entre les pavés pour combler les vides résiduels inhérents au calepinage et aux tolérances de fabrication des pavés. Celui-ci peut être souple ou rigide, perméable ou imperméable et doit être adapté au mode de pose choisi.

Les matériaux de jointolement constituent un élément essentiel des revêtements modulaires. Pour que les pavés puissent fonctionner comme revêtement, les joints entre les pavés doivent être entièrement remplis. En effet, des pavés désolidarisés ne sont pas résistants au déplacement et/ou aux rotations sous l'effet du trafic. Un joint bien rempli empêchera aussi les pavés de pivoter ou de se détacher.

Selon le type de pose choisi, souple ou rigide, le mode de fonctionnement du joint diffère.

Dans le cas d'une pose souple (voir figure 2.9), la couche de pose et le jointolement permettent le transfert des efforts vers les couches inférieures de la voirie. Le choix et le respect de l'appareillage (transfert des efforts dans le plan horizontal), ainsi que l'effet de voûte dans le plan vertical sont ici essentiels.

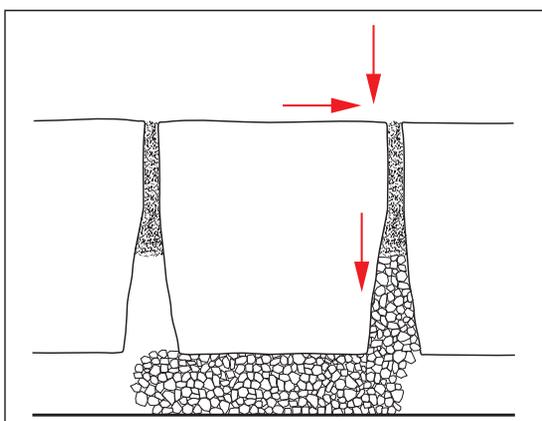


Figure 2.9 – Principe de transfert de charge entre les pierres d'un revêtement au moyen de joints complètement remplis. La force qui agit sur une pierre sous l'influence du trafic, est partiellement transférée à la pierre adjacente par le matériau de jointolement et la couche de pose

Dans le cas d'une pose selon le mode rigide, la transmission des efforts se fait de manière similaire au principe des chaussées monolithiques en béton. Il est donc essentiel d'assurer une parfaite adhérence entre le matériau de jointolement et le pavé. L'étanchéité du matériau est essentielle. De plus, la qualité du matériau utilisé en couche de pose doit être irréprochable.

Le matériau de jointolement doit avoir une granulométrie compatible avec la largeur des joints. Le choix du matériau de jointolement dépend donc aussi du type de pavé choisi (ainsi que de la largeur et du pourcentage de joint) et de la couche de pose (p.ex. stabilité du filtre, voir chapitre 3).

2.4.2 Matériaux non liés

Par matériaux classiques non liés, on entend les matériaux de jointolement tels que les sables et mélanges granulaires naturels ou artificiels (sable quartzitique, sable de mer, sable calcaire concassé ou gréseux de calibre 0/1 ou 0/2 ou 0/4 ou 0/6,3) et les gravillons fins (par exemple, porphyre, gravillons calcaires, gravillons de basalte de calibre 2/4-6,3). Le calibre maximal est de 1 mm pour des joints étroits (< 2 mm) ou de 0,8 fois la largeur de joint avec un maximum de 8 mm pour des joints larges. On utilise

de préférence des granulats anguleux pour obtenir une meilleure cohésion. L'utilisation de sable rond est tout à fait déconseillée.

Les joints non liés jouent un rôle de stabilisateur élastique des pavés et ont une fonction de blocage et de répartition des efforts entre les pavés dans le revêtement. Le remplissage correct des joints entre les pavés assure la continuité de transmission des efforts entre les pavés. En fonction de la qualité du matériau, les joints souples peuvent également assurer l'étanchéité superficielle de la chaussée si une pente transversale suffisante est prévue.

Toutefois, une partie de l'eau pourra toujours s'infiltrer, donc un lit de pose perméable est ici obligatoire (sable 0/6,3 ou gravillon 2/6,3 par exemple).

Evidemment, ces matériaux de jointoiement non liés/souples (sable, gravillons ou granulats) sont moins résistants à l'aspiration par les balayeuses, mais sont plus simples à appliquer et plus faciles à réparer. Il est donc aussi conseillé de procéder régulièrement au rejointoiement afin que les joints soient en tout temps aussi bien remplis que possible.

Le sable pour le jointoiement des pavages doit avoir une teneur limitée en particules fines ($< 63 \mu\text{m}$), (au moins de classe f_{10} et de préférence même f_5 selon la PTV 411 [30]). En ce qui concerne la qualité des particules fines, la valeur au bleu de méthylène doit en outre satisfaire à: $\text{MBF} \leq 10$ ou $\text{MB} \leq 1,5$ (catégorie a selon le document PTV 411) [30].

Le gravillon utilisé en jointoiement (2/4 ou 2/6,3) répond aux catégories LA_{20} , MDE_{15} et PSV_{50} selon la NBN EN 13242 [29] concernant la résistance à la fragmentation et à l'usure, et le coefficient de polissage accéléré (catégorie Ab ou 3 selon le document PTV 411 [30]). La proportion de particules fines du mélange granulaire homogène (0/6,3) doit en outre être limitée à 5 %.



Figure 2.10 – Jointoiement au porphyre concassé 2/4

2.4.3 Matériaux liés

Les matériaux liés les plus classiques sont les matériaux de jointoiement liés au ciment et les mortiers modifiés – avec polymères ou d'autres additifs ajoutés pour des propriétés améliorées telles qu'une adhérence plus élevée ou une meilleure ouvrabilité – grâce auxquels un joint étanche à l'eau et à l'air est créé. Ces matériaux de jointoiement «fermés» sont (la plupart du temps) appliqués pour des joints plus larges (8 à 10 mm) de pavages en pierre naturelle et/ou pour l'étanchéisation de plus grandes ouvertures autour d'obstacles et de filets d'eau, sur des îlots directionnels, etc. Des points d'attention importants pour ces matériaux sont la fissuration potentielle due au retrait et la résistance gel-dégel. Le liant rend ces matériaux plus chers que des matériaux non liés.

Les joints rigides font partie intégrante du complexe monolithique constitué de la fondation et du revêtement. Ils participent à la reprise intégrale des efforts horizontaux et verticaux de la circulation. Dans le cas d'une pose rigide, des joints de dilatation sont nécessaires (voir chapitre 3).

2.4.3.1 Mortier de ciment modifié ou non

Ceci concerne les mortiers de jointoiement à base de ciment, de sable et d'eau, avec additifs chimiques ou non. L'ajout d'additifs (principalement des émulsions de polymère) engendre une amélioration de l'adhérence et une amélioration des propriétés mécaniques («mortier modifié»).

Il existe aussi des mortiers de jointoiement au retrait compensé qui, dans certains cas, doivent être appliqués une fois que la couche de pose a durci.

La quantité minimum de ciment est donnée dans les différents cahiers des charges types (typiquement 400-500 kg ciment par m³ sable sec). Les mortiers de jointoiement peuvent être livrés préemballés sur le chantier (mortiers prêts à l'emploi), où l'ajout d'eau se fait dans une bétonneuse ou un autre malaxeur. Ils peuvent également être livrés sur place à l'aide d'un malaxeur à béton. Les mortiers de ciment sont toujours utilisés pour des joints larges (5-25 mm) et souvent avec une profondeur de joint minimum exigée de 30-50 mm (voir chapitre 3, tableau 3.6).

Le contrôle de la qualité peut se faire sur chantier en confectionnant des prismes (160 mm x 40 mm x 40 mm), sur lesquels on détermine après 28 jours d'abord la résistance à la flexion, puis la résistance à la compression. D'autres propriétés importantes sont entre autres le retrait, la résistance au gel/dégel, en présence de sels de déverglaçage ou non, l'adhérence entre pavé et mortier, l'absorption d'eau et la résistance à l'usure.



Figure 2.11 – Mise en œuvre de mortier modifié

2.4.3.2 Sable-ciment

L'utilisation de sable-ciment comme matériau de jointoiement est fortement déconseillée. La consistance (dite «terre humide») et le manque d'adhérence propres à ce matériau ne permettent pas une réalisation correcte des joints. De plus, la résistance mécanique du sable-ciment est largement insuffisante.

2.4.3.3 Mortiers bitumineux



Figure 2.12 – Mise en œuvre de mortier bitumineux

Le mortier bitumineux est composé de sable grossier et de liant, le liant pouvant être soit une émulsion de bitume additionnée d'un émulsifiant, soit une émulsion à base de liants synthétiques clairs modifiés par des polymères. L'émulsion à base de liants synthétiques clairs est pigmentable.

Malgré son bon comportement sous trafic intense en général et son imperméabilité, ce produit de jointoiement est peu utilisé car après sa mise en œuvre, la surface des pavés en est partiellement recouverte. Il est par la suite difficile d'éliminer les traces subsistantes à moins d'avoir épandu préalablement au jointoiement un agent anti collant sur le pavage. Ces produits filmogènes ne peuvent être utilisés que pour une protection temporaire des pavés lors de la phase de jointoiement à l'émulsion.

En contrepartie, les mortiers bitumineux présentent l'avantage de ne pas nécessiter la pose de joints de dilatation, ce matériau étant à considérer comme souple (et imperméable).

2.4.3.4 Mortiers de jointoiement liés à la résine

Ces mortiers de jointoiement se composent d'un mélange de sable quartzéux, d'une résine synthétique et d'additifs organiques et anorganiques éventuels, où le squelette sableux est lié avec une résine synthétique mono ou bicomposante (généralement époxy) qui durcit complètement (thermodurcissable) par une réaction chimique. La courbe granulométrique du sable et le type et le dosage du liant sont adaptés en fonction de la charge de trafic attendue. Il existe des mortiers de jointoiement (monocomposants) prêts à l'emploi qui peuvent être utilisés immédiatement en tant que tels (généralement à base de polybutadiène), des systèmes où un composant est déjà prémélangé avec du sable et le deuxième doit être ajouté sur le chantier, ou encore des mortiers de jointoiement où les deux composants doivent être mélangés avec le sable. Généralement, on ajoute encore de l'eau au mélange dans une dernière phase pour améliorer la fluidité et l'ouvrabilité dans les joints. Ces mortiers liés au polymère sont donc toujours appliqués plus ou moins à «l'état humide» (contrairement aux sables polymères secs, voir § 2.4.3.5).

En outre, contrairement au mortier de jointoiement lié au ciment (voir § 2.4.3.1), ils sont toujours un peu perméables à l'eau. La perméabilité à l'eau varie en fonction du produit choisi et de la teneur en résine ajoutée. Un mortier de jointoiement à base de résine synthétique doit donc aussi être combiné avec une couche de pose et une fondation perméables à l'eau (il faut à tout le moins prévoir un drainage de sorte qu'il ne puisse pas rester d'eau dans la couche de pose). La limite entre perméabilité et imperméabilité – et partiellement aussi entre souple et rigide – est cependant parfois aussi vague et va de pair

avec la masse volumique du mortier. Plus celle-ci est élevée, plus la perméabilité est faible, mais plus la charge de trafic autorisée est élevée, de même que la résistance aux balayuses-brosseuses.

En fonction du type de produit, des mortiers de jointoiment liés à la résine peuvent donc être appliqués suivant le concept rigide, (quasi) imperméable (masse volumique supérieure et charge de trafic supérieure) ou le concept flexible perméable (charge de trafic inférieure, masse volumique inférieure, couche de pose de sable 0/8 ou gravillons 2/8, par exemple). Il convient de souligner que pour le mortier, 2 mm est le plus petit diamètre de calibre, parce que sinon le mortier de jointoiment est susceptible de disparaître dans la couche de pose (stabilité du filtre).

Quoi qu'il en soit, les mortiers de jointoiment liés à la résine ne peuvent être utilisés que dans des joints plus larges (5-30 mm) avec une profondeur de joint minimum de 30 mm.

Pour certains produits, il y a lieu d'être attentif au fait qu'ils peuvent laisser un film à la surface de la pierre. Il est un fait que ce film disparaît avec le temps par altération et sous l'influence du trafic, mais il peut engendrer dans certains cas des effets esthétiques permanents indésirables.

L'utilisation de ce type de matériau encore peu connue en Belgique reste limitée à des applications peu circulées.

2.4.3.5 Sable polymère

Les sables polymères sont des sables de jointoiment prémélangés avec des liants polymères (non époxy) qui (comme le sable de jointoiment classique) doivent être brossés à sec dans les joints, compactés à la plaque vibrante sur les pavés et ensuite humidifiés ou embrumés avec de l'eau. Ils durcissent ensuite complètement, mais restent théoriquement quand même partiellement élastiques dans des conditions humides. Le liant peut être d'origine synthétique (matières synthétiques ajoutées) ou naturelle (p.ex. colles végétales, organiques, donc liant biologique) et selon la nature et le dosage de ce liant, le matériau de jointoiment peut, à l'état durci, être plus ou moins élastique, voire avoir un comportement plastique dans des conditions humides. On affirme en outre que certains matériaux avec liants biologiques seraient aussi auto-réparants dans le cas de l'apparition de petites fissures dans la masse du joint sous l'influence d'eau ajoutée (p.ex. goutte de pluie).

Les sables polymères, ou plus généralement "les sables liés aux polymères" sont des matériaux de jointoiment assez innovants et récents avec lesquels on n'a encore que peu, voire pas, d'expérience dans la pratique. Il sont de toute façon uniquement utilisables dans des joints plus étroits (1-10 mm) et pour l'instant uniquement réservés à la classe de trafic la plus faible. En fonction du type et de la quantité de liant appliqué (polymère), ils sont aussi toujours dans une plus ou moins grande mesure perméables et ils doivent être combinés avec une structure perméable à l'eau.



Figure 2.13 – Principe du sable polymère

2.4.4 Couche d'adhérence/pont d'adhérence

Pour des éléments en pierre naturelle avec une finition lisse de la face de pose, et plus généralement pour améliorer l'adhésion entre la pierre naturelle et une couche de pose liée au ciment, on peut appliquer une couche d'adhérence, c'est-à-dire un enduit de mortier adhésif, entre la couche de pose et la face de pose du pavé.

Une telle couche d'adhérence (que l'on appelle aussi *barbotine* dans la pratique) est une couche d'adhérence prête à l'emploi placée «frais sur frais» sur la couche de pose. Il s'agit d'une technique issue de l'industrie du carrelage, mais à l'heure actuelle, aussi appliquée pour des cas spécifiques (p.ex. pour des pierres lisses, sciées) dans des revêtements en pierre naturelle. La technique de la «barbotine» est parfois appliquée à hauteur des joints de dilatation pour ainsi fixer davantage les pierres le long des joints à la couche de pose (voir chapitre 3).



Figure 2.14 – Pose d'une couche d'adhérence

Il existe différents types de couches de barbotine:

- des mortiers adhésifs préemballés **prêts à l'emploi**, qui doivent juste encore être mélangés à de l'eau sur le chantier;
- des couches d'adhérence **artisanales** obtenues en mélangeant du sable et du ciment dans une proportion 50/50 avec une dispersion synthétique diluée ou non avec de l'eau. Pour certains types de pierre naturelle, il est en outre recommandé d'utiliser une dispersion synthétique étanche à l'eau.

Cette couche de mortier peut être appliquée, soit par épandage (voir figure 2.14), soit avec une brosse, soit par immersion de la pierre dans le mortier frais jusqu'à 1/3 de son épaisseur. On laisse aussi le temps à la couche d'adhérence de se fixer avant de placer la pierre dans le lit de pose.

Pour évaluer la qualité de la couche d'adhérence, il est préférable de mesurer la résistance au cisaillement entre deux pierres posées l'une sur l'autre avec une fine couche de mortier adhésif, conformément à la NBN EN 12003 [31]. Une tension de cisaillement de plus de 1 MPa après 28 jours indique une couche d'adhérence effectivement fonctionnelle.

Alternativement, l'adhérence peut aussi être testée par un essai de traction directe (*pull-off test*, par exemple selon la NBN EN 1542 [32]), pour lequel une valeur minimale de 0,5 MPa est indiquée après 28 jours.

Chapitre 3

Conception et dimensionnement

Le meilleur des revêtements ne pourra jamais résister s'il est mis en œuvre sur une structure de chaussée mal dimensionnée ou si le choix des matériaux n'est pas adapté à la charge de trafic attendue. Ainsi, la conception et le dimensionnement de tout revêtement se doit de prendre en compte la structure globale de la voirie.

Les différents éléments de la structure (sous-fondation, fondation, couche de pose, matériau de jointoiement, etc.) doivent être sélectionnés de manière cohérente. Lors de la phase de conception, il est donc nécessaire de prendre en compte les différentes exigences auxquelles le revêtement en pierre naturelle devra répondre. Les aspects tels que l'utilisation future, la charge du trafic, les câbles et les conduites, l'entretien futur, le budget et les exigences esthétiques auront chacun un impact sur le projet final.

3.1 Description et rôle des éléments de la structure routière

3.1.1 Structure de chaussée (route et voirie assimilée)

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 3.1) de quatre éléments structurels qui sont de bas en haut:

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

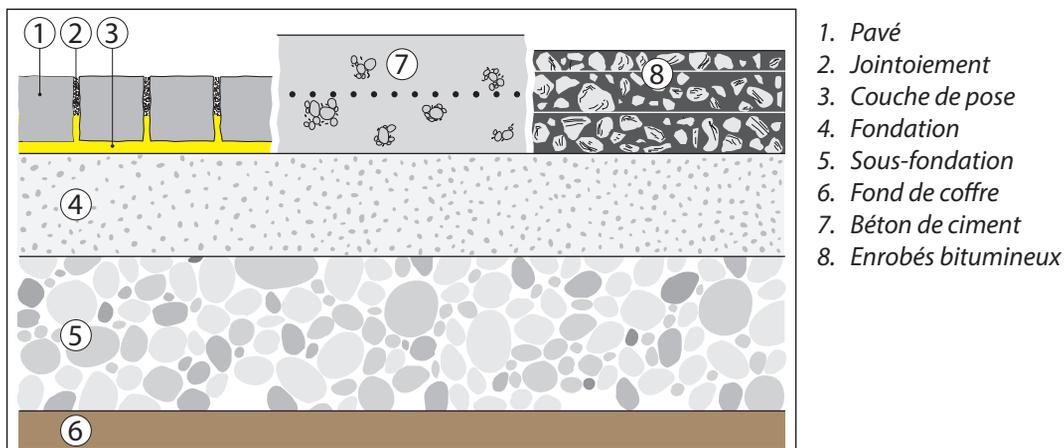


Figure 3.1 – Structure d'une chaussée (schéma de principe) [33, p. 3]

1. Pavé
2. Jointoiement
3. Couche de pose
4. Fondation
5. Sous-fondation
6. Fond de coffre
7. Béton de ciment
8. Enrobés bitumineux

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 code de bonne pratique soit essentiellement consacré aux revêtements modulaires en pierre naturelle, il nous 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.

3.1.2 Sol en place et fond de coffre

Le fond de coffre correspond au dernier mètre du sol-support. Il est généralement constitué du matériau présent sur place (ou d'un matériau d'apport dans le cas d'un remblai).

La portance du sol-support conditionne en grande partie la structure routière qui le surmonte (notamment son épaisseur).

La portance du fond de coffre est généralement jugée suffisante lorsque le coefficient de compressibilité M1 (mesuré lors du premier cycle de l'essai à la plaque statique belge) est égal ou supérieur à 17 MPa. En cas de valeurs inférieures, diverses techniques d'amélioration de la portance sont à prévoir telles qu'un compactage complémentaire, le traitement des sols au moyen de liants ou la substitution d'une partie du sol en place par un matériau d'apport avec pose éventuelle d'une géogrille.

En présence de sols limono-argileux, la présence d'une quantité relativement importante d'eau dans le sol peut diminuer, voire supprimer (*en cas de sol saturé*), toute portance du sol. Il importe dans ce dernier cas, de prévoir un dispositif de drainage qui contribuera à améliorer la portance du sol.



Figure 3.2 – Pose d'un géotextile anticontaminant sous la sous-fondation

Certains sols particulièrement sensibles aux cycles gel-dégel (*risque de gonflement*) doivent être préservés de toute venue du front de gel. L'épaisseur de la structure routière doit dès lors être conçue pour empêcher cela.

Il est recommandé de poser entre le fond de coffre et la structure routière (voir figure 3.2) un géotextile anticontaminant et non tissé. Ce géotextile fait en première instance office de filtre et empêche de ce fait la pollution de la sous-fondation en évitant la remontée dans le corps de la chaussée, des particules fines présentes dans le sol.

Afin d'optimiser la structure, il convient de réaliser une campagne de reconnaissance préalable aux études de conception et de dimensionnement afin de déterminer la nature et les principales caractéristiques des matériaux en place. Cette campagne doit comporter des essais au pénétromètre dynamique (*sonde de battage légère type CRR, appareil PANDA, etc.*) ainsi que la réalisation de forages avec prise d'échantillons et mesure de la teneur en eau.



Figure 3.3 – Essais géotechniques réalisés avant et en cours de projet (essai à la plaque et essai PANDA)

3.1.3 Sous-fondation

La sous-fondation assume plusieurs fonctions à court et à long terme:

- 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.

Pour remplir ces différentes fonctions, les matériaux constituant la sous-fondation doivent être non gélifs et suffisamment drainants (*faible teneur en fines*). Ils doivent en outre être faciles à compacter.

Les cahiers des charges actuels permettent d'utiliser des granulats naturels, recyclés (recyclés mixtes ou recyclés de béton) ou artificiels (*scories, mâchefers d'incinérateur d'ordures ménagères, etc.*). Les matériaux autorisés varient d'une Région à l'autre. Il est donc recommandé de consulter le cahier des charges de la Région concernée [12, 13, 14].

Les types de sous fondation les plus utilisés sont les suivants:

- **la sous-fondation en sable**, constituée d'une couche de sable drainant ou de sable pour sous-fondation. Elle peut être surmontée d'une couche d'environ 8 à 10 cm d'épaisseur composée d'un empierrement discontinu lorsque la sous-fondation est posée en plusieurs phases;
- **la sous-fondation en empierrement**, constituée d'un mélange homogène de sable pour sous-fondation et d'un empierrement de gros calibre (granularité maximale égale à 80 ou 125 mm selon les Régions);
- **la sous-fondation en sol traité** in situ ou en centrale dont le rôle est non seulement de modifier les propriétés physiques et mécaniques du sol mais également de rendre le mélange insensible vis-à-vis de l'eau et des cycles gel-dégel par l'ajout de liants appropriés (chaux, ciment, liants hydrauliques routiers). Dans ce cas, le rôle drainant de la sous-fondation doit être assuré soit par la fondation soit par un dispositif spécifique de drainage.

Pour plus d'informations à ce sujet, voir le guide pratique du CRR pour la réalisation de la sous-fondation à l'aide de matériaux stabilisés (*Code de bonne pratique pour le traitement des sols à la chaux et/ou aux liants hydrauliques* – R 81/10 [34] et *Guide pratique n° 2 spécifique à la stabilisation des sols pour couches de sous-fondation* [35]).

Le choix de l'un ou l'autre type de sous-fondation dépend essentiellement de la disponibilité et du coût des matériaux, étant entendu que ceux-ci doivent satisfaire aux exigences techniques requises par le cahier des charges.

La sous-fondation doit avoir une portance suffisante pour la pose des couches supérieures ainsi que des bordures, caniveaux et autres éléments linéaires. Le critère de portance généralement accepté dans les cahiers des charges est l'obtention lors de l'essai à la plaque statique belge, d'une valeur de coefficient de compressibilité (M1) égale ou supérieure à 35 MPa. La portance doit être maintenue même si la couche de sous-fondation est exposée pendant plusieurs mois à la pluie et au gel.

L'épaisseur de la sous-fondation est le plus souvent conditionnée par la profondeur de pénétration du front de gel. En effet, si le sol est constitué de matériaux gélifs, il faut faire en sorte que le front de gel n'atteigne jamais son niveau. En effet, lorsque les matériaux gélifs gèlent, ceux-ci se dilatent, ce qui peut mener à un soulèvement de la chaussée. Pour ce faire, on doit augmenter l'épaisseur de la sous-fondation.

Il est dès lors crucial de contrôler la sensibilité au gel du sol d'une part et de déterminer la profondeur du front de gel d'autre part.

La profondeur Z de pénétration du gel, exprimée en cm, est par définition:

$$Z = 5 * J^{0,5}$$

J est ici l'indice de gel. Cet indice est le nombre de degrés-jours entre les points supérieur et inférieur sur une courbe cumulée des degrés-jours en fonction du temps pour une saison de gel. En principe, on retient l'indice de gel décennal: il s'agit de l'indice de gel maximal que l'on observe sur une période de dix ans.

La valeur de J est donnée dans le tableau 3.1 pour différentes stations météorologiques, pour la période 1995-2005. A l'aide de ces chiffres, il a été possible de calculer les valeurs correspondantes de la profondeur Z de pénétration du gel.

Station météorologique	Province	Indice de gel décennal (°C.jours)	Z (cm)
Middelkerke	Flandre occidentale	147	61
Moerbeke	Flandre orientale	133	58
Geel	Anvers	157	63
Gorseme	Limbourg	154	62
Uccle	Bruxelles	135	58
Beauvechain	Brabant wallon	167	65
La Hestre	Hainaut	143	60
Thirimont	Hainaut	196	70
Ciney	Namur	210	72
Rochefort	Namur	348	93
Liège	Liège	124	56
Thimister	Liège	182	67
Hockay	Liège	212	73
Mont Rigi	Liège	290	85
Stavelot	Liège	270	82
Nadrin	Luxembourg	340	92
Libramont	Luxembourg	223	75
Arlon	Luxembourg	254	80

Tableau 3.1 – Indice de gel et profondeur Z de pénétration du gel en différents lieux

L'épaisseur (*en cm*) de la structure non gélive à mettre en œuvre dépend de la profondeur de pénétration du gel:

$$D_{\text{sans gel}} = a * Z$$

La valeur de *a* est égale à 0,8 lorsque la nappe phréatique est située à plus de 1,4 m en dessous de la surface du revêtement. Si ce n'est pas le cas, *a* équivaut alors à 1,0.

Si la structure prévue est moins épaisse que l'épaisseur non gélive nécessaire calculée ci-avant, il faut alors, si le sol est sensible au gel, soit remplacer une partie du sol par un matériau non sensible au gel (*empierrement*), soit améliorer le sol avec un produit de traitement adapté (*chaux, liant hydraulique routier, ciment, etc.*).

3.1.4 Fondation

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.

Une distinction est faite entre les fondations non liées (empierrement et gravier) et les fondations liées (sable-ciment, empierrement stabilisé, béton maigre armé et non armé, béton maigre drainant et béton sec compacté). Une fondation liée offre comme avantage une plus grande rigidité, stabilité et durabilité et donc une amélioration du comportement de la structure sous l'effet du trafic, de l'eau et du gel. Excepté pour le béton maigre drainant, une fondation liée est généralement non perméable. Il y a lieu d'en tenir compte dans la conception du drainage du projet.

Les matériaux utilisés en fondation non liée peuvent être des granulats naturels ou secondaires (recyclés de béton, laitier concassé). Certaines Régions acceptent l'emploi de granulats de recyclés mixtes (béton – maçonnerie) ou contenant des débris hydrocarbonés ainsi que des scories d'aciéries.

3.1.4.1 Fondation non liée

Celle-ci est constituée de plusieurs calibres de granulats, de sable et d'éléments fins sans ajout de liant. On distingue:

- **la fondation en empierrement à granularité continue**, relativement aisée à mettre en œuvre et à compacter. Le risque de ségrégation est limité. Elle présente une faible perméabilité;
- **la fondation en empierrement à granularité discontinue**, constituée d'un squelette granulométrique dont une fraction granulométrique est absente.

Le choix entre empierrement continu et discontinu se fait sur base de la perméabilité recherchée. Si la perméabilité n'est pas une priorité, il est conseillé d'utiliser un empierrement continu dont la qualité de mise en œuvre est plus facile à maîtriser puisqu'il est plus aisément compactable et ne se désagrège pas aussi facilement lors du transport et du stockage qu'un empierrement discontinu. Si la fondation doit être relativement perméable, il est nécessaire d'utiliser un empierrement discontinu.

Pour une fondation non liée, le coefficient de compressibilité M1 déterminé lors du premier cycle de l'essai de chargement à la plaque doit être au minimum égal à 110 MPa.

3.1.4.2 Fondation liée

Celle-ci peut être liée au ciment, à un mélange de laitier granulé et de chaux ou éventuellement au liant hydraulique routier et doit être préparée dans une centrale de malaxage. Les mélanges aux liants hydrauliques sont couverts par la série de normes NBN EN 14227-1, -2, -3 et -5 [36, 37, 38, 39] et font l'objet d'une certification volontaire BENOR.

- **La fondation en empierrement à granularité continue lié** au ciment, à un mélange de laitier granulé et de chaux ou éventuellement au liant hydraulique routier. Elle doit être préparée dans une centrale de malaxage. Sa teneur en eau lors de la mise en œuvre est déterminante pour le résultat du compactage (portance). Sa portance est vérifiée au moyen de l'essai à la plaque statique belge réalisé avant la prise du ciment.

La stabilisation de l'empierrement permet pour un trafic donné, de diminuer l'épaisseur globale de la structure. Ce type de fondation convient particulièrement pour les trafics modérés.

- **La fondation en sable-ciment (sable stabilisé)** est un mélange homogène de sable, de ciment et d'eau. La résistance à la compression qui est obtenue dépend fortement du respect de la teneur optimale en eau, déterminée avec un essai Proctor, du degré de compactage ainsi que de la nature du sable utilisé. En Région de Bruxelles-Capitale et en Région flamande, la résistance à la compression

est vérifiée sur les carottes, après au moins vingt-huit jours. En Wallonie, la portance est vérifiée au moyen de l'essai à la plaque statique belge, avant la prise du ciment.

Une fondation de ce type ne peut être utilisée qu'avec du trafic léger.

- **La fondation en béton maigre** renforcée éventuellement d'un treillis d'armature est constituée d'un mélange de ciment (*min. 100 kg/m³*), d'eau, de sable et de gravillons. Elle permet une bonne répartition des contraintes verticales vers les couches sous-jacentes, ce qui fait que le béton maigre est principalement utilisé lorsque le sol a une faible portance et pour les routes dont l'intensité de trafic est élevée.

Le béton maigre peut présenter des fissures de retrait thermique. Pour éviter que la fondation se fissure, il faut prévoir des joints de retrait espacés d'une distance maximale de 5 m par sciage sur 1/3 de l'épaisseur de la fondation ou en faisant une entaille dans le béton frais.

En cas de raccordement avec des bâtiments existants, il faut tenir compte d'une éventuelle dilatation de la fondation en béton maigre. Il est nécessaire de placer un joint d'isolation entre la façade et la fondation pour reprendre cette dilatation.

- **Une fondation en béton maigre drainant** est composée d'un béton maigre perméable à l'eau et caractérisé par des gravillons de granularité discontinue (absence de sable). Cette fondation a pour but d'éviter que l'eau ne stagne sur la fondation. Les propriétés du matériau du lit de pose doivent tenir compte du caractère drainant et de la structure ouverte de la fondation. Une fondation en béton maigre drainant n'a évidemment de sens que si le fond de coffre est suffisamment drainé.

Pour que le béton drainant remplisse sa fonction de drainage de manière durable, il peut être nécessaire de prévoir la pose d'un géotextile entre le béton maigre drainant et la couche de pose. Sans le géotextile, les fines présentes dans la couche de pose risquent de s'infiltrer dans le béton maigre drainant, compromettant ainsi sa perméabilité. La pose de ce géotextile peut cependant induire des problèmes d'adhérence du revêtement. Il convient d'être attentif à ce risque.

Les remarques concernant le placement de joints de retrait et de dilatation au niveau de la fondation en béton maigre sont également d'application pour le béton maigre drainant.

- **Une fondation en béton sec compacté** a une composition comparable à celle du béton maigre, mais contient une teneur en ciment plus élevée (*min. 200 kg/m³*). La dimension maximale des grains est limitée à 20 mm. Le béton sec compacté a pour avantage de pouvoir être mis en service presque immédiatement après la mise en œuvre. Il y a lieu de prévoir des joints de retrait et d'isolation comme pour les fondations en béton maigre.

Hormis les empièvements liés et le sable-ciment, la résistance à la compression des fondations liées est vérifiée a posteriori par prélèvement de carottes et réalisation d'un essai de compression à 90 jours. Les exigences à respecter sont indiquées dans les différents cahiers des charges.

Il convient de se référer aux différents cahiers des charges types régionaux pour des spécifications plus détaillées.

3.1.5 Revêtement

En tant qu'élément supérieur de la structure, le revêtement subit l'effet direct des actions extérieures, que ce soit le trafic ou les agents climatiques (température, eau, gel).

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.

3.1.6 Revêtements en éléments modulaires de pierre naturelle

L'ensemble des éléments modulaires en pierre naturelle, du matériau de jointoiment et de la couche de pose constitue le revêtement (voir figure 3.4). Celui-ci va garantir le transfert des contraintes vers les couches inférieures, mais doit également respecter le confort de l'utilisateur.

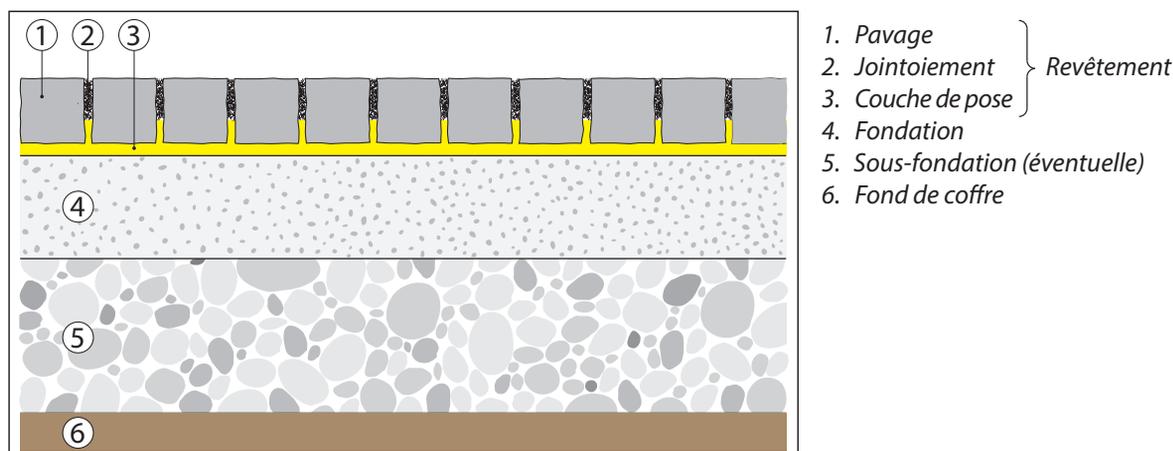


Figure 3.4 – Structure globale d'un revêtement en pavés

Le revêtement assure aussi la protection des couches sous-jacentes contre l'infiltration d'eau. Dans cette optique, les joints doivent toujours être aussi imperméables que possible. Si la nature du joint ne permet pas de garantir une imperméabilité absolue (matériau non lié par exemple), ou si on a délibérément opté pour une pose de type perméable, il est indispensable d'assurer une évacuation de l'eau infiltrée en choisissant un matériau de la couche de pose de type perméable (gravillon 2/4 ou 2/6,3 par exemple) de telle manière que l'eau pourra être évacuée.

Un contrebutage est toujours nécessaire quelle que soit la surface à paver ou à daller, l'appareillage et le trafic attendu, et ce pour deux raisons principales:

- le contrebutage permet d'enserrer les pavés ou les dalles et d'éviter ainsi les glissements, basculements et rotations d'éléments sous l'influence des efforts induits par le trafic, tant lors de la pose (contrebutage provisoire ou bordures définitives lorsqu'un côté de la chaussée a été posé) qu'après la mise en service définitive;
- le contrebutage permet d'empêcher le départ des matériaux du lit de pose emportés par l'eau.

3.2 Principes généraux de conception et de dimensionnement

L'objectif ultime de toute étude de conception et dimensionnement d'une voirie est de réaliser une structure multicouches qui pourra résister aux différentes contraintes et sollicitations présentes (trafic, gel) sans déformation permanente du sol sur lequel elle repose et ce, durant toute la période de vie déterminée (*pour des pavages, généralement estimée à vingt ans*).

La durée de vie d'une chaussée peut être déterminée à l'aide des caractéristiques spécifiques et des lois de fatigue des différents types de fondation. Cette durée de vie est généralement exprimée de manière théorique en un nombre de passages d'essieux standard et peut, si l'on connaît le spectre du trafic, être transposée en une durée de vie exprimée en années.

Pour ce faire, différents paramètres doivent être pris en considération tels que:

- le trafic;
- les caractéristiques du sol porteur;
- la sensibilité du sol au gel;
- les venues d'eaux (superficielles et souterraines).

3.2.1 Règles générales pour le dimensionnement

Le dimensionnement consiste à déterminer la nature et l'épaisseur des différentes couches de la structure que sont la sous-fondation, la fondation et le revêtement en fonction des différents paramètres cités ci-dessus.

Il convient d'être particulièrement vigilant aux points suivants:

- **l'épaisseur de la structure routière** totale (revêtement, fondation et sous-fondation) doit permettre d'empêcher toute pénétration du front de gel dans le fond de coffre (voir § 3.1.3);
- **le fond de coffre** doit porter la chaussée et supporter les charges du trafic, et ce quelles que soient les conditions climatiques. Ainsi, les principaux paramètres à prendre en considération lors des études de conception et de dimensionnement sont la portance du fond de coffre, la teneur en eau du sol et la sensibilité du matériau aux cycles gel-dégel;
- **la composition et l'épaisseur de la sous-fondation** doivent être déterminées afin de respecter la portance du sol et d'assurer un bon drainage;
- **la composition et l'épaisseur de la fondation** doivent être déterminées de manière à résister aux différentes contraintes et déformations.

3.2.2 Drainage et évacuation de l'eau dans la conception

L'eau joue souvent un rôle néfaste au sein d'une structure routière. Il importe donc de veiller à ne pas provoquer des accumulations d'eau qui mèneraient inévitablement à des dégradations au niveau de la structure.

Ainsi, il est primordial d'assurer un drainage efficace, tant par le choix des matériaux des différentes couches de la structure elle-même que par une bonne conception du drainage de l'eau hors de la structure vers le réseau d'égouttage.

Le choix d'une structure en matériaux perméables (hormis la pierre naturelle) permet à l'eau de s'infiltrer vers le fond de coffre et ne posera pas de problème particulier de drainage. Le concepteur devra veiller

dans ce cas à ce que tous les matériaux sélectionnés dans la structure (jointoiment, couche de pose, fondation) soient effectivement perméables.

Dans les cas où le type de trafic prévu nécessite l'application d'une pose de type rigide (voir § 3.3.9), donc (généralement) imperméable, il est primordial d'assurer une évacuation rapide des eaux de surface en prévoyant une pente transversale d'au moins 2 %. D'autre part, il sera nécessaire d'assurer une évacuation efficace des eaux de surface en prévoyant un nombre suffisant d'avaloirs et de caniveaux et des pentes permettant une évacuation rapide des eaux. Le choix du matériau de jointoiment est essentiel, celui-ci devant être parfaitement imperméable durant toute sa durée de vie.

Plus de détails concernant le drainage et l'évacuation de l'eau hors de la structure routière sont donnés dans le *Code de bonne pratique pour la protection des routes contre les effets de l'eau* - R 88/14 [40] et dans le § 3.3.14 du présent code de bonne pratique.

3.3 Règles de conception spécifiques aux revêtements modulaires en pierre naturelle

3.3.1 Méthodologie

L'opération de conception et de dimensionnement de structures en éléments de pierre naturelle comporte les étapes suivantes:

1. dimensionnement général de la structure;
2. choix du pavé et du type d'appareillage;
3. conception du type de pose (joint, couche de pose);
4. conception de la fondation;
5. étude du drainage.

3.3.2 Prise en compte du trafic

3.3.2.1 Référentiel pour revêtements modulaires en pierre naturelle circulés par des véhicules

Le dimensionnement des voiries circulées par des voitures ou des camions se fait tout d'abord en fonction du trafic. Quatre catégories de trafic ont été définies (de I à IV) et des structures-types valables y ont été associées sur base de calculs théoriques, de méthodes empiriques ou de l'expérience acquise dans différents pays. Ces catégories, définies initialement dans le *Code de bonne pratique pour la conception et l'exécution des revêtements en pavés de béton* – R 80/09 [41], ont été adaptées aux pavages en pierre naturelle.

Chaque catégorie de trafic est définie par une charge maximum de véhicules légers (poids inférieur à 3,5 t) et de véhicules lourds (poids supérieur à 3,5 t). Cette charge est déterminée sur base d'un nombre quotidien de véhicules comptés dans les deux sens de la circulation.

Catégorie	Type de trafic			Classe de construction indicative selon SB 250 (ch.2, § 8.3)	Réseau indicatif selon CCT Qualiroutes (§ B.1)
	Piétons, cyclistes, motocyclistes	Véhicules légers (<3,5 t)	Véhicules lourds (>3,5 t)		
I	Illimité	< 5 000/jour	< 200/jour	B6-B7	IIIa
II	Illimité	< 5 000/jour	< 100/jour	B8-B9	IIIa
III	Illimité	< 500/jour	< 20/jour	B10	IIIa
IV	Illimité	Occasionnel	Aucun	BF	IIIb

Tableau 3.2 – Catégories de trafic pour revêtements modulaires en pierre naturelle

Les catégories de trafic permettent principalement de définir les épaisseurs de fondation, de la couche de pose et des éléments modulaires. Pour la conception du revêtement lui-même (type de pose, type de pierre, appareillage), d'autres critères que le nombre de véhicules légers ou lourds entrent en ligne de compte. Ceux-ci sont décrits au § 3.3.2.3.

3.3.2.2 Référentiel pour revêtements modulaires en pierre naturelle circulés par des piétons et des véhicules

Des «classes d'utilisation» de 0 à 6 sont définies respectivement dans les PTV 841, 842 et 843 [9, 10, 11] pour des applications de dalles, pavés et bordures. Ces classes correspondent à des applications de décoration, piétonnes ou mixtes (piétons et véhicules) jusqu'à la classe 6, la plus chargée, regroupant les routes et rues et les stations-services.

Ces classes permettent uniquement de définir les critères de résistance minimum des éléments à utiliser pour le projet (résistance à la compression pour les pavés ou charge de rupture pour les dalles) et ne mènent pas à un dimensionnement au sens strict de la structure.

3.3.2.3 Domaines d'utilisation des pavés en pierre naturelle

Outre la charge de trafic à prendre en considération et définie au § 3.3.2.1, il faudra également tenir compte de sollicitations spécifiques particulières liées à la vitesse et au mode de déplacement des véhicules (freinages, virages serrés, etc.). Ces sollicitations nécessiteront des précautions supplémentaires pour la conception du revêtement.

Différents domaines d'utilisation des pavés en pierre naturelle peuvent ainsi être définis, cette définition des domaines d'utilisation permettant de se rattacher à une situation de trafic concrète et d'y associer des exigences techniques. Elle permet également de prendre en compte les contraintes spécifiques dues à des situations particulières, comme par exemple les frictions générées par un trafic lourd effectuant des manœuvres à faible vitesse (place de marché).

Les *domaines d'utilisation* sont définis au tableau 3.3. Une correspondance par rapport aux catégories de trafic et aux classes d'utilisation leur est assignée. Plus loin dans le présent document, un tableau synthétique reprenant les exigences techniques liées à un domaine d'utilisation sera donné (voir § 3.3.11).

Catégorie de trafic	Domaine d'utilisation	Classe PTV
I	Voirie trafic intense	6
II	Voirie trafic modéré	6
II	Parking trafic lourd/Place de marché	4-6
III	Voirie trafic limité	6
III	Parking trafic léger	3
IV	Voie piétonne et piste cyclable non accessible à des véhicules ⁽¹⁾	1-2

⁽¹⁾ Si des poids lourds (livraison, ambulance) sont susceptibles de circuler même occasionnellement, passer au domaine «Parking trafic lourd/Place de marché»

Tableau 3.3 – Domaines d'utilisation et catégories de trafic correspondantes

L'utilisation de la pierre naturelle en *voirie de tram* n'a pas été prise en compte dans le tableau 3.3 vu le nombre de retours d'expérience négatifs constaté actuellement sur ce type de projet. Tout d'abord, la présence des rails pose de nombreuses difficultés techniques dans la conception et la mise en œuvre: le système de fixation du rail, le respect de l'espacement des rails et de la courbure, l'évacuation et le drainage de l'eau nécessitent une attention particulière et beaucoup de précision. Ensuite, lors de la mise sous trafic de la voirie, les vibrations créées lors des passages de tram combinées à la circulation des véhicules sont la cause de très nombreuses dégradations même si la conception et la mise en œuvre ont été correctement exécutées. Des systèmes préfabriqués sont actuellement en phase de test pour trouver une solution à cette problématique.

L'utilisation de la pierre naturelle comme revêtement pour *les arrêts de bus* est déconseillée. En effet, les nombreux efforts de freinage et de démarrage conjugués aux éventuels mouvements de rotation générés par ces véhicules d'un poids comparable à celui d'un poids lourd ne conviennent généralement pas à des revêtements en éléments modulaires.

Les toitures-parking sont pas non plus reprises dans les domaines d'utilisation standard pour la pierre naturelle. En effet la présence d'un complexe d'étanchéité sur dalles en béton et la nécessité de prévoir une évacuation efficace de l'eau mènent souvent à des dégradations du revêtement en pierre naturelle. De plus, si la pose de joints de dilatation s'avère nécessaire (en cas de pose de type rigide), il est très difficile de trouver des systèmes permettant le placement de joints sans nuire à la durabilité du revêtement lui-même et du complexe d'étanchéité. Ce type d'application n'est pas pour autant à exclure, mais il nécessite une conception bien étudiée et adaptée aux spécificités liées à la mise en place de parkings sur toitures.

Enfin, des précautions particulières doivent être prises pour des applications de pavages en pierre naturelle sur *les ponts avec trafic intense* afin de prendre en compte des vibrations occasionnées par le trafic. De plus, le placement d'un complexe d'étanchéité est peu compatible avec un revêtement en pavés naturels. Pour cette raison, ce type d'application n'a pas été repris de manière standard dans le présent document car ce type de projet doit être pris en compte au cas par cas.

3.3.3 Règles de dimensionnement des couches

Le tableau 3.4 définit le dimensionnement recommandé des couches en fonction de la catégorie de trafic définie en § 3.3.2.1. Ce tableau a été établi en tenant compte d'une durée de vie de vingt ans pour un revêtement en pavés de pierre naturelle. Le tableau 3.4 ne donne pas de directive pour le dimensionnement de la sous-fondation. Les règles de conception du fond de coffre et de la sous-fondation sont reprises au § 3.1.3 du présent code de bonne pratique.

Catégorie de trafic		I	II	III	IV
Épaisseur nominale minimum pavé (cm) ⁽¹⁾		12	10	8	8 ou 6 ⁽²⁾
Épaisseur couche de pose <u>sous</u> les pavés après compactage (cm)		5-8	4-6	3-5	2-4
		Au maximum la moitié de l'épaisseur des pavés			
Nature et épaisseur (cm) de la fondation	Béton sec compacté	20	15	-	-
	Béton maigre	25	20	15	-
	Béton maigre poreux	-	20	15	-
	Empierrement avec liant hydraulique	-	25	15	-
	Sable-ciment	-	-	20	15
	Empierrement	-	35	25	15
Sous-fondation: voir § 3.1.3.					
⁽¹⁾ Pour un revêtement en dalles, se référer aux règles définies dans le document PTV 841 [9].					
⁽²⁾ 6 cm sont suffisants si l'application est exclusivement piétonne; si des véhicules sont susceptibles de circuler sur le revêtement (entrées de garage, par exemple), une épaisseur minimum de 8 cm est sélectionnée.					

Tableau 3.4 – Dimensionnement des couches en fonction des catégories de trafic pour un revêtement en pavés

Pour les revêtements en dalles, les règles du document PTV 841 [9] s'appliquent pour ce qui concerne l'épaisseur minimum des dalles. Les classes d'utilisation qui y sont définies (voir chapitre 2) sont plus adaptées aux applications non circulées ou peu circulées spécifiques aux dalles; les dalles ne conviennent généralement pas pour des applications en catégories I, II et III. Pour des applications en catégorie III, il est en tout cas nécessaire de réaliser une étude spécifique concernant les dimensions des dalles et les matériaux de pose et de jointoiement avec une attention spécifique pour l'adhérence des dalles avec la couche de pose.

Lors de la détermination de l'épaisseur des éléments, il y a lieu de tenir compte des tolérances dimensionnelles sur l'épaisseur de cet élément. Si par exemple, une tolérance de 4 mm est prescrite (cas des dalles d'une épaisseur supérieure à 80 mm), il faut prescrire des dalles avec une épaisseur nominale minimum de 4 mm de plus que l'épaisseur déterminée par calcul.

3.3.4 Principes de conception spécifiques aux structures en revêtements de pavés en pierre naturelle façonnés de manière traditionnelle

Le profil d'une structure en pavage se présente classiquement comme illustré à la figure 3.5.

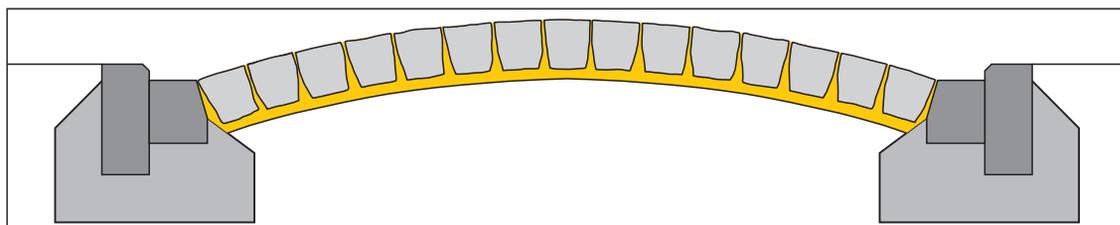


Figure 3.5 – Coupe transversale type traditionnelle d'un pavage en pierre naturelle [42, p. 56]

Trois principes fondamentaux constituent les spécificités des pavages en pierre naturelle:

- l'effet de voûte dans le plan vertical;
- l'effet d'arc dans le plan horizontal concerne uniquement les pavés mosaïques;
- l'effet de compactage et de stabilisation dû au démaigrissement des pavés.

Cette conception traditionnelle présente des avantages au niveau de la stabilité de la structure, mais aussi au niveau de l'évacuation des eaux de ruissellement. Elle n'est actuellement plus systématiquement appliquée.

3.3.4.1 Effet de voûte dans le plan vertical

Historiquement, les anciens pavages étaient tous réalisés suivant un profil en travers bombé permettant, comme pour une maçonnerie, de profiter d'un effet de voûte contribuant à la stabilité du revêtement.

Pour que cet effet de voûte soit efficace, il faut que le bombement soit suffisant, que les joints soient correctement remplis, que les pavés présentent un démaigrissement adéquat et que le contrebutage latéral du pavage soit stable et correctement dimensionné.

Suite à l'évolution technique de différents matériaux liés au ciment, utilisés en tant que fondation, lit de pose, ou jointoiment, leur utilisation s'est fortement accrue et le profil en travers des revêtements pavés s'est progressivement aplani, l'effet de voûte n'étant plus considéré comme absolument indispensable à la stabilité du pavage. C'est la raison pour laquelle de nombreux pavés actuellement commercialisés sont parallélépipédiques et ne présentent plus de démaigrissement.

3.3.4.2 Effet d'arc dans le plan horizontal (pavés mosaïques)

Un principe similaire à l'effet de voûte pouvant exister dans le profil en travers d'un pavage en pierre naturelle existe, pour les pavages en mosaïques, dans le plan horizontal.

Les efforts horizontaux de cisaillement peuvent ainsi être répartis entre les pavés du fait du décalage des joints, pour être ensuite répartis entre les différents arcs de cercles constituant le revêtement.

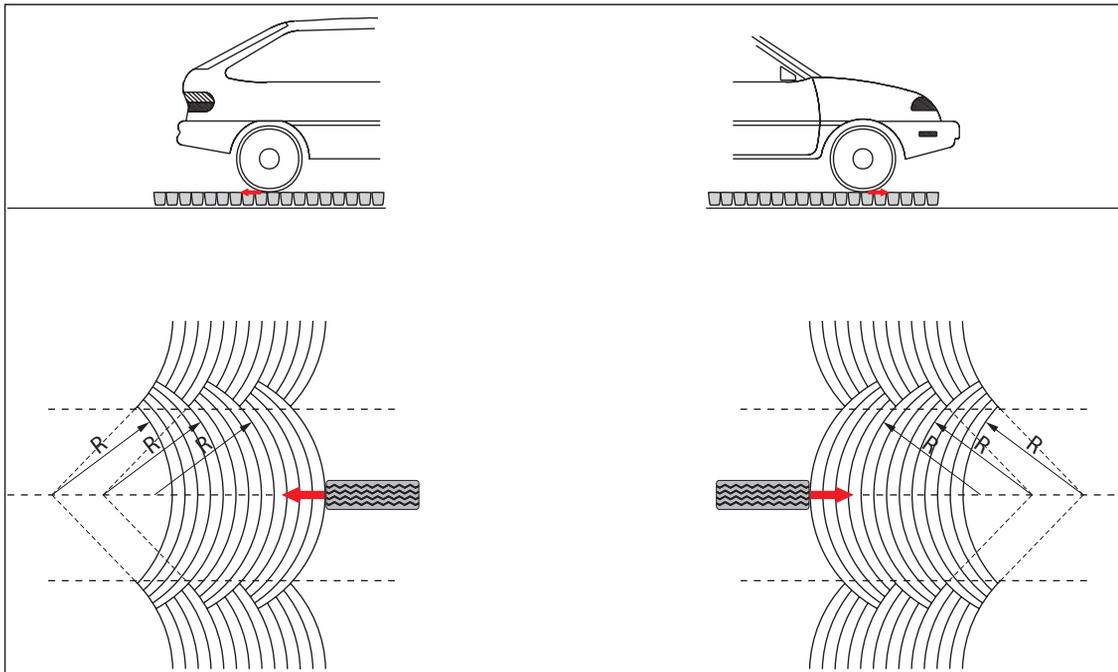


Figure 3.6 – Pavages en appareillage courbe – Effet de voûte dans le plan horizontal: orientation des contraintes en zone d'accélération (à gauche) et orientation des contraintes en zone de freinage (à droite)

3.3.4.3 Effet de compactage et de stabilisation dû au démaigrissement des pavés

Contrairement aux pavés en béton, posés sur le lit de pose, les pavés en pierre naturelle façonnés de manière traditionnelle doivent être nichés au sein du lit de pose. C'est pour cette raison que les pavés en pierre naturelle façonnés de manière traditionnelle doivent présenter un démaigrissement suffisant. Celui-ci permet non seulement le nichage des pavés dans le lit de pose, mais également le compactage naturel de ce dernier entre les pavés ainsi que la pose de ces pavés suivant un profil bombé.

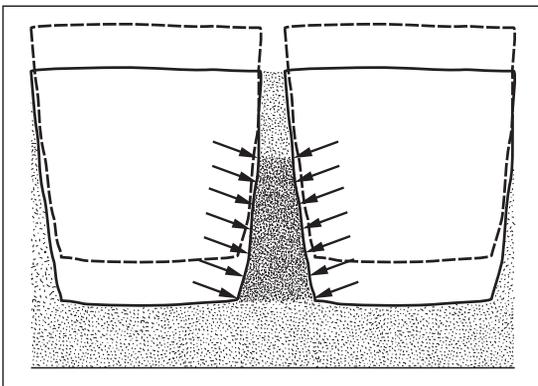


Figure 3.7 – Nichage des pavés dans la couche de pose

3.3.5 Choix de l'élément en pierre naturelle

Le type et la dimension des éléments sont sélectionnés en fonction de l'application visée (domaine d'application essentiellement) et de critères esthétiques éventuellement liés au contexte architectural dans lequel ils seront placés (site historique, effets visuels, etc.).

Les cahiers des charges doivent préciser les valeurs limites des caractéristiques prescrites selon leur contexte d'application (type et intensité du trafic, risque de salissures, etc.).

Outre les exigences de base concernant la glissance, la résistance à l'usure et la résistance aux cycles de gel- dégel définies au chapitre 2, les prescriptions doivent prendre en compte les éléments suivants, compte tenu de l'application visée:

- la **dimension des produits**: outre l'épaisseur, la largeur et la longueur des éléments, il y a lieu de préciser l'état des différentes faces (vues et non vues) et des arêtes, les dimensions géométriques ainsi que les tolérances de fabrication (rectitude, équerrage, planéité, etc.) du produit final;
- la **résistance à la compression ou à la flexion minimum attendue de la pierre**: les exigences en fonction de l'application sont reprises dans les PTV 841, 842 et 843 [9, 10, 11]. Plus de détails sont donnés au § 2.1.4 du chapitre 2 du présent document;
- l'**évolution de la glissance**: certains types de pierres ont la particularité de se polir facilement sous l'effet du trafic et de devenir rapidement très, voire trop, glissantes après leur mise en œuvre (comme certains calcaires par exemple). L'utilisation de ce type de matériaux est à proscrire pour tous les domaines d'utilisation soumis à un trafic intense de véhicules. Il n'existe malheureusement pas encore de méthode de mesure normalisée permettant de mesurer cette propriété de manière objective (combinaison de l'essai d'usure et de détermination de la glissance). Les retours d'expérience sont ici les seuls indicateurs permettant de déceler ce risque;
- la **protection contre les salissures** qui ont tendance à pénétrer à l'intérieur de l'élément et qui sont, de ce fait, plus difficiles à éliminer par la suite. Généralement, il convient de prévoir une porosité de l'échantillon inférieure à 4 % ou, si ce n'est pas le cas, de prévoir un traitement de surface adéquat.
- le **traitement de finition**: il importe de prévoir un traitement de finition limitant au maximum le risque de glissade (flamage, sablage, grenailage, bouchardage, etc.). Les finitions lisses ou des bruts de sciage sont généralement à proscrire pour des raisons de sécurité et de confort, sauf si des mesures de rugosité sur la surface finie prouvent le contraire.

3.3.6 Choix de l'appareillage des éléments modulaires en pierre naturelle

L'appareillage peut être défini comme le plan de pose des pavés les uns par rapport aux autres pour constituer l'aspect final du revêtement. Son choix résulte principalement de l'effet architectural recherché, mais doit aussi tenir compte de l'importance du trafic et de la stabilité correspondante du pavage.

On distingue les appareillages droits et les appareillages mosaïques.

3.3.6.1 Appareillages droits

Tout type de pavé et de dalle convient à ce type d'appareillage.

Parmi les appareillages droits les plus fréquents pour la pierre naturelle, il convient de citer:

	<ul style="list-style-type: none"> ▪ appareillage en rangées droites à joints décalés ou alternés: les éléments sont posés en lignes droites et les joints sont alternés d'une rangée à l'autre, de telle manière que la liaison concerne au moins le tiers de la longueur des pavés. Cette découpe est réalisée en plaçant un morceau ou une boutisse (un pavé et demi) à une demi-extrémité de chaque rangée. La circulation doit se faire perpendiculairement aux joints continus;
	<ul style="list-style-type: none"> ▪ appareillage en panneau: les éléments sont posés en lignes droites et les joints sont alignés dans les deux directions (parallèle et perpendiculaire à l'axe longitudinal). Cette forme doit se limiter aux applications piétonnes et aux pistes cyclables;
	<ul style="list-style-type: none"> ▪ appareillage en carrés sur pointe: les éléments sont posés en lignes droites et les joints sont alignés dans les deux directions obliques à l'axe longitudinal. Cette forme est à déconseiller pour une voirie circulée.

Figure 3.8 – Exemples d'appareillage droit (Photos: Febenat)

3.3.6.2 Appareillages courbes (uniquement pavés)

Les appareillages courbes sont réalisés à partir de pavés mosaïques de dimensions légèrement variables.

- **Appareillages à cercles non concentriques**

Les centres des cercles, permettant d'exécuter le dessin de l'appareillage, sont disposés sur des points différents pour une juxtaposition d'arcs de rayon constant.

Ces appareillages ne peuvent être réalisés qu'avec des pavés de dimensions variables. Les plus petits pavés sont posés à la naissance des arcs et la clé de voûte est fermée avec les plus gros pavés.

Parmi ces appareillages, on distingue:

	<ul style="list-style-type: none">▪ appareillage en arceaux, spires ou cercles;
	<ul style="list-style-type: none">▪ appareillage en queue de paon.

Figure 3.9 – Exemples d'appareillage à cercles non concentriques (Photos: ©PierresEtMarbresDeWallonie)

- **Appareillages à cercles concentriques**

Les cercles de construction de l'appareillage partent tous d'un même centre. Ces appareillages peuvent être réalisés soit avec des pavés de plusieurs modules par format et de dimensions variables, soit avec des pavés calibrés de dimensions constantes.

Parmi ces appareillages, on distingue:

	<ul style="list-style-type: none">▪ appareillage en éventails polycentriques;
	<ul style="list-style-type: none">▪ appareillage en écailles.

Figure 3.10 – Exemples d'appareillages à cercles concentriques (Photos: ©PierresEtMarbresDeWallonie)

Le savoir-faire en matière de pavage commence par une conception avisée des appareillages qui nécessite une bonne connaissance des différentes possibilités offertes, selon les matériaux disponibles, pour ne pas générer des situations de projets irréalisables dans la pratique.

3.3.7 Principes de conception de l'appareillage spécifiques aux pavés en pierre naturelle

Traditionnellement, les pavages en pierre naturelle étaient réalisés avec des appareillages qui avaient pour principale fonction de résister aux contraintes de la circulation sans solliciter de manière significative la structure. Cette dernière, lorsqu'elle existait, se réduisait souvent à la disposition de moellons enchâssés plus ou moins verticalement dans le sol pour consolider la structure en créant un effet de voûte. Cette règle n'est plus valable dans les aménagements actuels, sauf dans le cas de rénovation d'anciens pavages peu circulés.

Les sollicitations du trafic ont considérablement augmenté depuis les premières chaussées pavées et le pavage seul pourrait difficilement en supporter les contraintes sans être associé à une structure sous-jacente suffisamment dimensionnée.

Le mécanisme des filières de production des pierres standardise les produits selon des dimensions répétitives bien adaptées aux pavages en ligne à joints alternés. En revanche, la réalisation d'un appareillage courbe nécessite soit de choisir un calepinage compatible avec un seul format de pavés, soit de réaliser une commande comprenant plusieurs formats différents de pavés pour s'adapter au calepinage choisi.

Dans ce contexte, il est difficile de retrouver une diversité de formats pour répondre aux assemblages courbes tels qu'ils étaient conçus initialement, à partir de pavés taillés manuellement. Il faut aussi souligner que les pavages à l'ancienne réclament dextérité et savoir-faire, fruit d'une formation spécifique précise et d'une longue expérience pratique, le tout s'accommodant parfois mal des contraintes modernes de rapidité et d'optimisation économique.

Dans bon nombre de projets actuels en pierre naturelle, le choix de l'appareillage relève (trop) souvent de considérations purement esthétiques. L'auteur de projet ne doit pas perdre de vue les considérations techniques pouvant exclure ou donner la préférence à tel ou tel appareillage plus à même de faire face aux sollicitations induites par le trafic.

Enfin, dans le cadre de la réalisation d'un aménagement en pierre naturelle, il ne faut jamais oublier que le choix d'un appareillage est indissociable de la forme et des dimensions des pavés, de la largeur de la chaussée, du sens et de l'importance de la pente ainsi que du sens de circulation.

Le choix et l'orientation de l'appareillage ne relèvent pas seulement de considérations esthétiques, mais dépendent aussi des facteurs suivants:

- **le type de pavé:**
 - *les appareillages courbes* ne peuvent être réalisés qu'avec les pavés mosaïques;
 - *les appareillages droits* peuvent théoriquement être réalisés avec tous types de pavé, même si on ne préférera y recourir que dans le cas des pavés oblongs (les pavés mosaïques, de dimensions plus réduites, devant de préférence profiter de l'effet de voûte dans le plan horizontal – voir § 3.3.4.2);

- **la forme des pavés:** celle-ci conditionne directement le type d'appareillage suivant lequel les pavés peuvent être posés;
- **la nature et l'intensité du trafic (pour les appareillages droits):** tous les appareillages de pose ne présentent pas la même résistance aux sollicitations induites par le trafic. L'appareillage en panneaux, par exemple, ne présente qu'une faible résistance aux sollicitations dues aux accélérations et aux freinages des véhicules. L'appareillage en lignes à joints alternés permet déjà, dans une plus large mesure, une meilleure répartition des efforts entre les pavés. En règle générale, les joints rectilignes dans le sens du trafic sont à éviter;
- **le sens du trafic et la pente longitudinale de la chaussée (pour les appareillages courbes):** les appareillages mosaïques doivent dans la mesure du possible être correctement orientés par rapport au sens du trafic et à la pente longitudinale de la chaussée, et ce pour rendre effectif l'effet de voûte dans le plan horizontal.

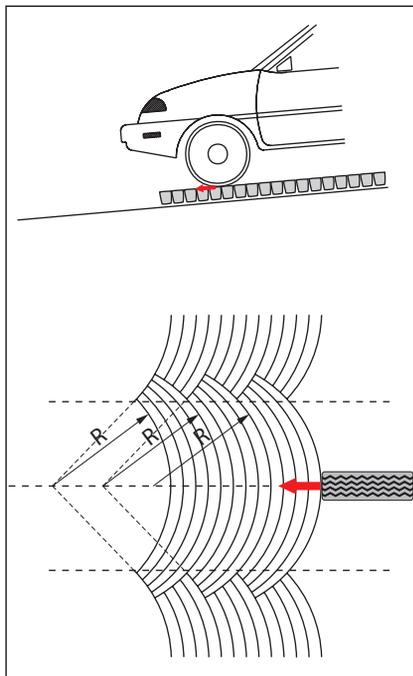


Figure 3.11 – Orientation d'un appareillage mosaïque en fonction de la pente longitudinale de la chaussée

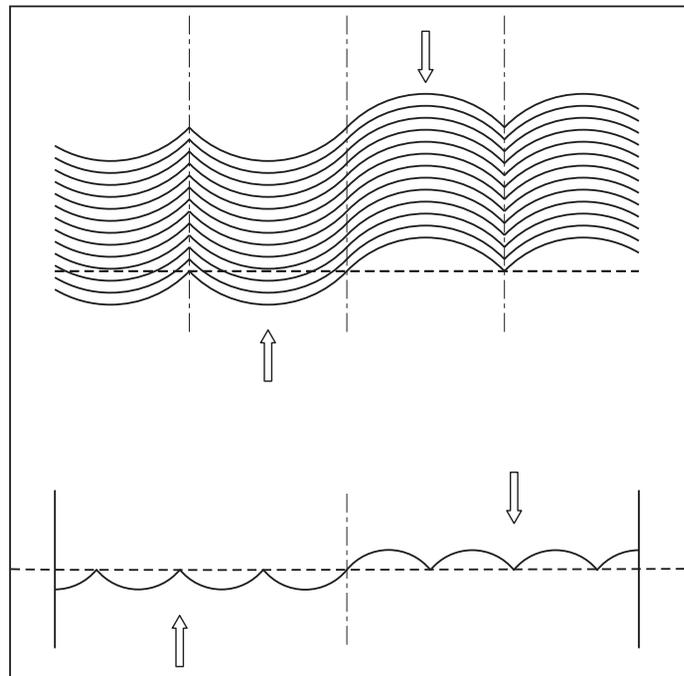


Figure 3.12 – Changement d'orientation d'un appareillage mosaïque à l'axe longitudinal de la chaussée, en fonction du sens de circulation des véhicules

3.3.8 Les raccords de pavage

Lors de changements de direction de la chaussée ou si un changement d'orientation de pavages en appareillages courbes s'impose, il est nécessaire de réaliser un raccord de pavage.

La conception de ces raccords doit garantir un bon maintien des pavés, et ce à des endroits où les contraintes de cisaillement et de freinage sont justement plus importantes. En règle générale, il faut éviter les découpes de pavé de plus de la moitié de leur surface.

Quelques exemples de raccords de pavages les plus connus sont repris dans les figures 3.13 à 3.16.

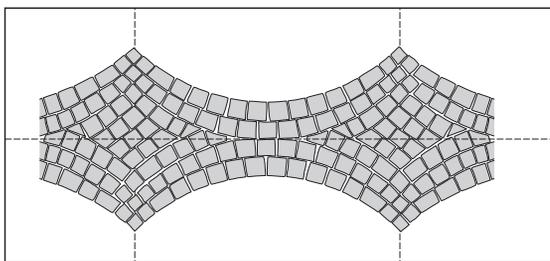


Figure 3.13 – Changement d'orientation d'un appareillage mosaïque au point haut du profil longitudinal de la chaussée (as de carreau)

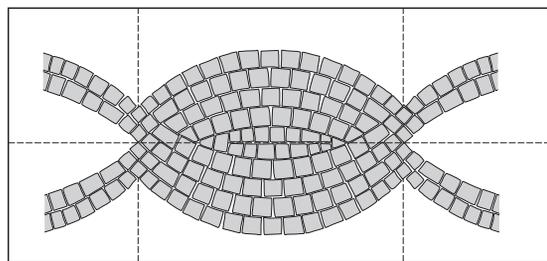


Figure 3.14 – Changement d'orientation d'un appareillage mosaïque au point bas du profil longitudinal de la chaussée (œil de bœuf)

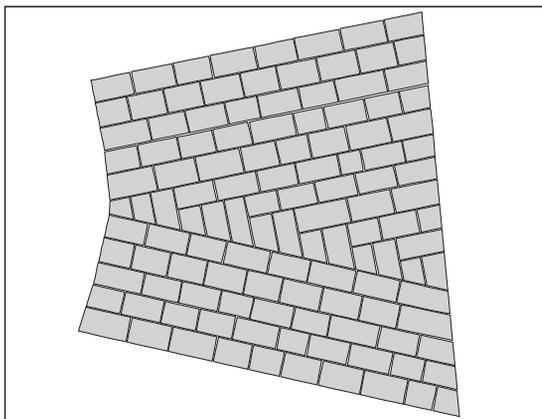


Figure 3.15 – Exemple d'appareillage en lignes – Traitement d'une courbe par réalisation d'une crémaillère

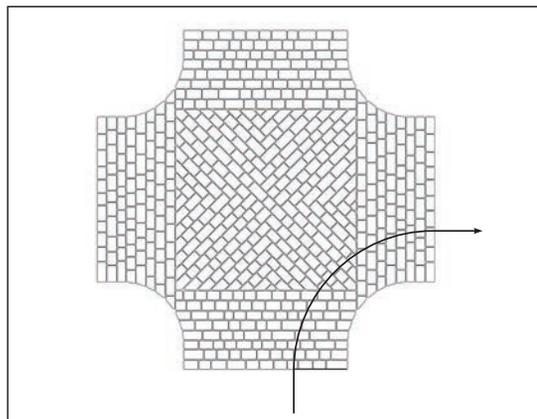


Figure 3.16 – Exemples d'appareillage en lignes (croix de chevalier) – Traitement d'un carrefour

3.3.9 Choix du type de pose d'éléments modulaires en pierre naturelle

Le type de pose concerne la combinaison *du matériau de jointoiement et de la couche de pose*. Le choix des matériaux de couche de pose et de jointoiement est donc essentiellement conditionné par ce principe. Actuellement, deux concepts coexistent:

- **la pose souple** se présente généralement sous forme d'un complexe composé d'un lit de pose en sable ou de gravillons et de joints en sable ou de gravillons fins.

Pour assurer la cohérence de ce concept et la bonne tenue du pavage, on ne choisira ce type de pose qu'en présence d'une fondation perméable. Hormis le cas particulier du béton maigre poreux, les fondations liées sont donc à exclure.

Ces structures sont assez résistantes aux efforts, facilement réparables et ne sont pas sujettes aux désordres de type fissuration ou soulèvement. Par ailleurs, les pavés sont facilement réutilisables, rendant le mode de pose souple écologiquement et économiquement très attractif; d'autre part, l'entretien a posteriori (p.ex. à l'aide d'une brosseuse ou d'une balayeuse) est moins facile (voir chapitre 5);

- **la pose rigide et généralement étanche:** cette technique de pose concerne la combinaison d'un lit de pose de type rigide (sable stabilisé, mortier par exemple) avec des joints en matériaux liés (mortier de ciment ou mortier modifié par exemple). Elle doit impérativement être mise en œuvre sur une fondation rigide (p.ex. béton maigre ou empierrement stabilisé).

Le revêtement subit les contraintes de déformation de manière similaire à celles que subit une chaussée monolithique en béton. Il est dès lors indispensable que l'adhérence entre le pavé et le matériau de jointoiement et celui de la couche de pose soit optimale. De plus, l'étanchéité de l'intégralité du revêtement doit être garantie par un bon choix et une bonne mise en œuvre des matériaux utilisés.

La nécessité de poser des joints de dilatation et de travailler avec des matériaux liés (et de qualité) rendent la conception et la mise en œuvre plus délicates que pour le mode de pose souple. Cependant, ce type de structure permet de résister aux efforts de cisaillement d'engins plus lourds (places de marché par exemple) et à un trafic plus chargé. L'entretien sera également plus aisé (joints résistants au nettoyage, pas de mauvaises herbes). En revanche, les réparations en cas de dommages seront plus coûteuses et il est très difficile de réutiliser les pavés tels quels.

Ces deux concepts de pose reposent sur les règles essentielles suivantes:

- il est impératif de réaliser une bonne évacuation des eaux de ruissellement en réalisant un profil transversal de la structure adéquat et, si l'on fait le choix d'une structure perméable, en utilisant des matériaux drainants pour la couche de pose et la fondation. Si l'on opte pour une structure imperméable, l'étanchéité du joint est essentielle (bonne adhérence, bon remplissage du joint);
- un joint souple doit toujours être associé à un lit de pose souple: un joint souple sur un lit de pose rigide engendre généralement le déplacement des pavés qui ont tendance à remonter et à dépasser. Ce mode de pose est généralement de type perméable et doit être associé à une fondation suffisamment perméable pour assurer l'évacuation des eaux infiltrées dans la structure;
- un joint rigide doit toujours être associé à un lit de pose et à une fondation rigides.

Le non-respect de ces règles de base mène inévitablement à des dommages (comme discuté au chapitre 5 et illustré en figure 3.17).



Figure 3.17 – Exemple d'incompatibilité entre le matériau de jointoiement et la couche de pose: combinaison d'une couche de pose rigide en sable-ciment et des joints souples en sable perméables où l'eau, le gel et le trafic provoquent le déchaussement des pavés

Les différentes combinaisons de fondation-lit de pose-matériaux de jointoiment sont reprises et commentées au tableau 3.5. Elles dépendent de différentes conditions telles que la perméabilité et la portance du sol, les venues d'eau sous les pavés, la charge de trafic, etc.

Joint	Lit de pose		Fondation	Cotation ⁽¹⁾	Remarque
Sable	Souple	Sable	Non liée	+/-	Déconseillé en cas de venues d'eau Uniquement pour catégories III-IV
			Liée	+/-	La fondation doit être perméable
		Gravillon concassé (split) (2/6,3)	Non liée	++	Applicable sur sol drainant vérifier stabilité de filtre entre joints et lit de pose Uniquement pour catégories III-IV
			Liée	+/-	La fondation doit être perméable
	Rigide	Tout type	Tout type	-	
Gravillon concassé (split) (2/4-2/6,3)	Souple	Sable (0/6,3)	Tout type	-	
		Gravillon concassé (split) (2/6,3)	Non liée	++	Applicable sur sol drainant
			Liée	+/-	La fondation doit être perméable (béton maigre drainant)
	Rigide	Tout type	Tout type	-	
Mortier de ciment traditionnel	Souple	Tout type	Tout type	-	
	Rigide	Sable-ciment	Non liée	-	
			Liée	+	
		Mortier de ciment	Non liée	-	
Liée	+/-	Uniquement pour catégorie IV			
Mortier de ciment modifié	Souple	Tout type	Tout type	-	
	Rigide	Sable-ciment	Non liée	-	
			Liée	+++	
		Mortier de ciment	Non liée	-	
Liée	+/-	Uniquement pour catégorie IV			

⁽¹⁾ - = Fortement déconseillé; +/- = Evaluation fonction du cas; + = Bon; ++ = Très Bon; +++ = Idéal
⁽²⁾ Peu de retour d'expérience en Belgique sur les produits de jointoiment et de couche de pose considérés; les cotations sont données à titre indicatif.

Tableau 3.5 – Liste des principales combinaisons «fondation–lit de pose–type de joint»

suite à la page 80

Joint	Lit de pose		Fondation	Cotation ⁽¹⁾	Remarque
Mortier bitumineux ⁽²⁾	Souple	Sable (0/6,3)	Non liée	+/-	Uniquement pour catégorie IV
			Liée	+/-	La fondation doit être perméable
		Gravillon concassé (split) (2/6,3)	Non liée	+/-	
			Liée	+/-	La fondation doit être perméable
Rigide	Tout type	Tout type	-		
Sable polymère ⁽²⁾	Souple	Sable (0/6,3)	Liée ou non	+	Trafic faible (catégorie IV), la fondation doit être perméable
	Rigide	Tout type	Tout type	-	
Mortier époxy ⁽²⁾	Souple	Gravillon concassé (split) (2/6,3)	Liée ou non	+/-	Trafic faible (catégorie IV), la fondation doit être perméable
	Rigide	Mortier perméable	Liée ou non	+	La fondation doit être perméable; convient généralement pour charge de trafic faible, à vérifier chez le fournisseur
⁽¹⁾ - = Fortement déconseillé; +/- = Evaluation fonction du cas; + = Bon; ++ = Très Bon; +++ = Idéal ⁽²⁾ Peu de retour d'expérience en Belgique sur les produits de jointoiment et de couche de pose considérés; les cotations sont données à titre indicatif.					

Tableau 3.5 – Liste des principales combinaisons «fondation–lit de pose–type de joint»

3.3.10 Recommandations complémentaires relatives aux joints et à la couche de pose pour les revêtements en pavés

D'autres recommandations sont nécessaires en ce qui concerne les différents éléments intervenant dans le mode de pose.

3.3.10.1 Dimensions et qualité des joints

L'épaisseur nominale minimum des pavés varie en général entre 6 et 12 cm. Ceci a une grande influence sur la hauteur du joint.

Dans le cas d'une charge de trafic, il convient de respecter un certain rapport profondeur-largeur des joints: la profondeur de joint doit être supérieure ou égale à 2 deux fois la largeur de joint. On peut prendre comme règle empirique qu'au moins la moitié de la hauteur du pavé doit être remplie de matériau de jointoiment.

Les exigences dimensionnelles concernant les joints sont données au tableau 3.6 en fonction de la catégorie de trafic considérée.

Catégorie de trafic	I	II	III	IV
Largeur l des joints liés (mm) ⁽¹⁾	$8 \leq l \leq 25$	$5 \leq l \leq 20$	$5 \leq l \leq 20$	$5 \leq l \leq 15$
Largeur l des joints non liés (mm)	Largeur aussi faible que possible mais compatible avec le D_{\max} du sable ou du gravillon			
Hauteur minimum de remplissage des joints (mm) ⁽¹⁾	50	40	40	30
⁽¹⁾ Dépendant de l'ouvrabilité du matériau et de la tolérance sur les dimensions du pavé				

Tableau 3.6 – Dimension des joints et hauteur de remplissage

Dans le cas d'une pose souple, avec matériau de jointoiment non lié, le choix du diamètre maximum des grains se fait en fonction de la largeur des joints. La granularité maximale s'élève à 1 mm pour des joints étroits (< 2 mm) ou à 0,8 fois la largeur de joint avec un maximum de 8 mm (largeur de joint 10-15 mm).

3.3.10.2 Couche de pose

La couche de pose est probablement l'un des éléments les plus importants de la chaussée. Il est primordial de consacrer suffisamment d'attention au choix du matériau ainsi qu'à la mise en œuvre de la couche de pose.

En premier lieu, il convient de s'attarder sur la structure qui se trouve sous la couche de pose. Il faut en effet profiler la fondation de telle manière qu'elle soit parallèle à la surface finie du pavage.

Les cahiers des charges types ne tolèrent pas d'irrégularités de surface des fondations supérieures à 1 cm.

Quelques éléments importants:

- **l'épaisseur de la couche de pose:** elle est fonction de l'épaisseur et du type de pavé (voir tableau 3.4);
- **le compactage de la couche de pose:** celui-ci n'a lieu qu'après la pose des pavés. La couche de pose doit en effet compenser les différences de hauteur de ces pavés. Un compactage préalable de la couche de pose mène à des différences de hauteur en surface;
- **la perméabilité de la couche de pose:** celle-ci est perméable à l'eau, à moins que l'on ne travaille sur base d'une pose rigide imperméable. On évite ainsi que de l'eau ne stagne sur la couche de pose;
- **l'impénétrabilité de la fondation:** lorsqu'une couche de pose non liée est mise en œuvre sur une fondation en empierrement, la partie supérieure de cette fondation doit alors être bien fermée (*éventuellement en y incorporant des fines par vibrations et/ou par arrosage*). Dans le cas contraire, des inégalités peuvent apparaître dans le revêtement puisque la couche de pose disparaît partiellement dans la fondation sous-jacente. La stabilité de filtre entre la fondation et la couche de pose peut être vérifiée au moyen de la relation suivante:

$$S_F = \frac{D_{15CI}}{D_{85CS}} \leq 5$$

D_{15CI} = diamètre des grains correspondant à 15 % de passant de la couche inférieure;

D_{85CS} = diamètre des grains correspondant à 85 % de passant de la couche supérieure.

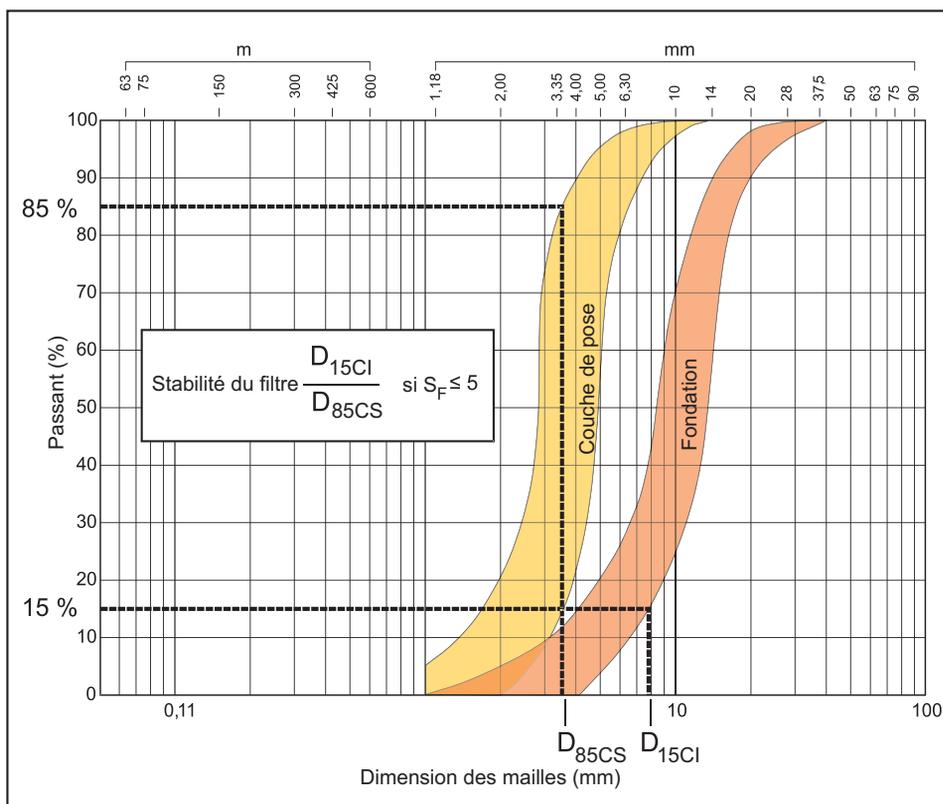


Figure 3.18 – Vérification de la stabilité de filtre entre la couche de pose non liée et la fondation [43, p. 36]

En cas de venue d'eau récurrente (nappe aquifère proche du fond de coffre), un lit de pose non lié risque de se dégrader par départ des particules, ce qui peut conduire à l'apparition de tassements. Il vaut mieux dans ce cas réaliser un lit de pose rigide. Un empierrement 2/6,3 ou 2/4 stabilisé avec du ciment permet d'aérer le mélange et ainsi de laisser passer l'eau, mais l'expérience en Belgique est encore limitée à ce sujet.

Dans le cas d'une pose de type souple, le choix du matériau se fait en fonction de la catégorie de trafic considérée (voir tableau 3.7).

Catégorie de trafic	Passant à 63 µm	Caractéristiques intrinsèques minimales ⁽¹⁾ suivant PTV 411 [30]
II	< 4,0 % (f_4 suivant PTV 411)	Ab ou 3
III	< 4,0 % (f_4 suivant PTV 411)	Bc ou 4
IV	< 7,0 % (f_7 suivant PTV 411)	Tous sables naturels/empierréments
⁽¹⁾ A mesurer sur une autre fraction granulométrique de gravillons de la même roche-mère		

Tableau 3.7 – Caractéristiques du matériau en fonction de la catégorie de trafic dans le cas d'une couche de pose non liée (la catégorie I n'est pas recommandée dans ce cas)

3.3.10.3 Recommandations relatives à la conception d'une couche de pose rigide en sable-ciment

Les retours d'expérience relatifs à l'utilisation de sable-ciment comme couche de pose sont fort divergents. Pour des voiries moyennement à fortement chargées, ce matériau offre une bonne solution s'il est correctement mis en œuvre. Une couche de pose en sable-ciment doit de préférence être combinée avec un jointoiment en mortier (modifié) et une fondation rigide en béton maigre drainant par exemple. De cette manière, on obtient une structure rigide qui offre une résistance aux contraintes de torsion et pour laquelle l'orniérage est quasiment exclu.

D'une manière générale, le recours au sable-ciment pour la réalisation de la couche de pose présente les inconvénients suivants:

- il est nécessaire de réaliser la mise en œuvre du pavage avant le début de la prise du ciment. Transport du sable stabilisé, épandage et dressage de la couche de pose et pose des pavés doivent en effet être réalisés **dans un délai d'environ trois heures**. Un sable-ciment mis en œuvre après le début de la prise risque de se déstructurer très facilement. Il sera alors plus sensible aux effets de l'eau et du gel qu'un sable non stabilisé de granulométrie appropriée. Il sera plus sensible à la déformation et se comprimera plus facilement qu'un sable non stabilisé de granulométrie optimale;
- dans le cas d'une pose sur sable-ciment, un délai d'environ quinze jours est nécessaire pour assurer une montée en résistance suffisante du matériau de couche de pose avant ouverture au trafic;
- en général on accorde plus d'attention à la granulométrie d'un sable non stabilisé qu'à celle d'un sable stabilisé au ciment. Ce contrôle de la granulométrie est pourtant une nécessité pour garantir une bonne stabilité.

3.3.11 Exigences pour les pavages en pierre naturelle en suivant le domaine d'utilisation

Domaine d'utilisation	Catégorie de trafic ⁽¹⁾	Épaisseur min. (cm)	Rc min. attendue E _L (MPa) ⁽³⁾	Appareillage	Type de pose ⁽²⁾	Exigences supplémentaires	Classe PTV 842
Voie piétonne et piste cyclable non accessible aux véhicules	IV	6	50	Tous	Souple ou rigide	Prise en compte des PMR	1-2
Parking trafic léger	III	8	85	Tous	Souple ou rigide	Prise en compte de la glissance et de son évolution ⁽⁴⁾	3
Voirie trafic limité	III	8	100	Tous	Souple ou rigide	Prise en compte de la glissance et de son évolution ⁽⁴⁾	6
Parking trafic lourd/ Place de marché	II	10	100	Pas en panneau	Rigide	Prise en compte de la glissance et de son évolution ⁽⁴⁾	4-6
Voirie trafic modéré	II	10	100	Pas en panneau	Souple ou rigide	Prise en compte de la glissance et de son évolution ⁽⁴⁾	6
Voirie trafic intense	I	12	100	Pas en panneau	Rigide	Prise en compte de la glissance et de son évolution ⁽⁴⁾	6

(1) Pour le dimensionnement, consulter tableau 3.4 Dimensionnement des couches en fonction des catégories de trafic pour un revêtement en pavés.
(2) Vérifier la compatibilité du joint avec la couche de pose et la fondation au moyen du tableau 3.5 Liste des principales combinaisons «fondation-lit de pose-type de joint».
(3) Résistance à la compression minimum attendue E_L telle que définie dans l'annexe B de la norme NBN EN 1342 [7]. Cette valeur est obligatoirement déclarée dans le cadre du marquage CE (DoP).
(4) Certains types de pierre ont la particularité de se polir facilement sous l'effet du trafic et de devenir rapidement très (trop) glissants après leur mise en œuvre (comme certains calcaires par exemple). L'utilisation de ce type de matériaux est à proscrire pour le domaine d'utilisation considéré. Il n'existe pour l'instant pas de méthode de mesure unanimement acceptée permettant de mesurer cette propriété de manière objective. Les retours d'expérience sont ici les seuls indicateurs permettant de déceler ce risque.

Tableau 3.8 – Synthèse des exigences pour la conception des pavages en pierre naturelle selon le domaine d'utilisation

3.3.12 Joints spéciaux

3.3.12.1 Joints de dilatation

Le coefficient de dilatation des roches peut provoquer des variations dimensionnelles de plusieurs centimètres par 100 m en cas d'amplitude de 50 °C (différence été-hiver).

Au cours d'une même journée, l'amplitude de température du revêtement peut atteindre 20 °C, voire plus. Le cas le plus défavorable concerne les pavages de couleur foncée soumis durant la journée à une exposition solaire et qui, en fin de journée, subissent un orage.

Les variations thermiques entre le jour et la nuit, entre l'été et l'hiver, comme les propriétés et comportement propres des matériaux, imposent de prendre en compte la dilatation thermique composant la structure.

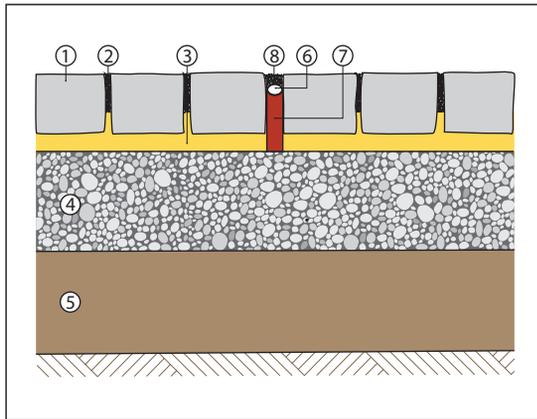
Pour les revêtements posés en mode souple, la dilatation est reprise par les joints de pavage et la mise en place de joints de dilatation n'est nécessaire qu'en cas de largeur de joint très réduite.

Des joints de dilatation sont nécessaires en cas de pavage réalisé suivant le concept de pose rigide. Leur nombre est calculé en fonction des caractéristiques des matériaux mis en œuvre et de la surface à paver. Sur base des coefficients de dilatation thermique des roches les plus utilisées en voirie, on peut considérer que les joints de dilatation peuvent être distants l'un de l'autre de maximum 10 m, tout en veillant à limiter les surfaces d'un seul tenant à 50 m² maximum. Selon la norme NF P98-335 [44], les joints de dilatation délimitent en général une zone de 40 m² à 60 m², la diagonale n'excédant pas 10 m.

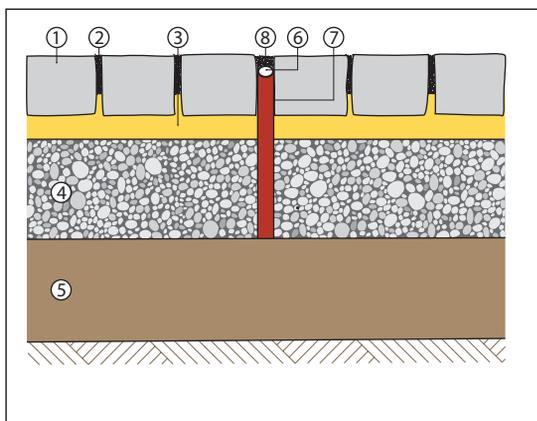
Les joints de dilatation doivent être remplis d'une fourrure imputrescible (et le cas échéant coïncider avec les joints dans les fondations liées). Celle-ci doit être relativement compressible, mais doit également pouvoir retrouver sa forme initiale après mise en compression. Les normes ASTM D1751-04 [45] et ASTM D1752-04a [46] donnent des spécifications pour ces produits testés suivant une série de normes d'essais spécifiques.

Après l'application de la fourrure, une bande circulaire en plastique ou en mousse doit être insérée au fond du joint et comprimée, pour éviter que la masse de scellement appliquée après ne colle à la fourrure.

Au-dessus (2-3 cm), le joint est scellé avec un produit de scellement coulé à froid ou un mastic élastique similaire. Ces produits répondent aux exigences de la norme NBN EN 14188-2 [47] et/ou NBN EN 15651-4 [48].



1. Pavé
2. Mortier de jointolement lié
3. Couche de pose rigide
4. Fondation
5. Fond de coffre
6. Fond de joint
7. Fourrure
8. Masse de scellement



1. Pavé
2. Mortier de jointolement lié
3. Couche de pose rigide
4. Fondation liée
5. Fond de coffre
6. Fond de joint
7. Fourrure
8. Masse de scellement

Figure 3.19 – Exemples de structure de joints de dilatation dans un pavage en pierre naturelle lié (coïncidant éventuellement avec joint de dilatation dans fondation liée)

3.3.12.2 Joints d'isolation

Les joints d'isolation permettent de désolidariser le revêtement d'autres parties de constructions indépendantes comme des murs de bâtiments, des ouvrages d'art et des points singuliers.



Figure 3.20 – Joint d'isolation séparant le mur d'habitation du trottoir

3.3.13 Conception et dimensionnement du contrebutage

Un contrebutage est toujours nécessaire lorsqu'on pose un pavage, d'une part pour enserrer les pavés et éviter ainsi les glissements et rotations des pavés sous l'influence des efforts induits par le trafic et, d'autre part, pour éviter que le matériau du lit de pose ne soit emporté par l'eau.

Il est toujours nécessaire de poser un contrebutage, indépendamment de l'importance de la surface, de l'appareillage, du type de pavé et du trafic attendu. Des éléments de contrebutage doivent toujours être prévus au début, à la fin et sur les côtés d'un revêtement pavé. Ceux-ci doivent être suffisamment stables (placement sur une fondation). Dans le cas de transitions vers d'autres types de revêtement (*p.ex. revêtement bitumineux, revêtement en béton, etc.*), la pose d'un contrebutage est également nécessaire, afin d'éviter que le pavage ne bouge en raison d'une éventuelle déformation du revêtement adjacent.

Dans le cas d'un raccordement à un revêtement bitumineux, il suffit de placer un contrebutage entre les deux revêtements. Dans le cas d'un raccordement à un revêtement en béton, un joint de dilatation doit être prévu.



Figure 3.21 – Contrebutage entre le trottoir et la chaussée avec un pavage en pierre naturelle



Figure 3.22 – Bordure à la transition entre un revêtement bitumineux et un pavage en pierre naturelle

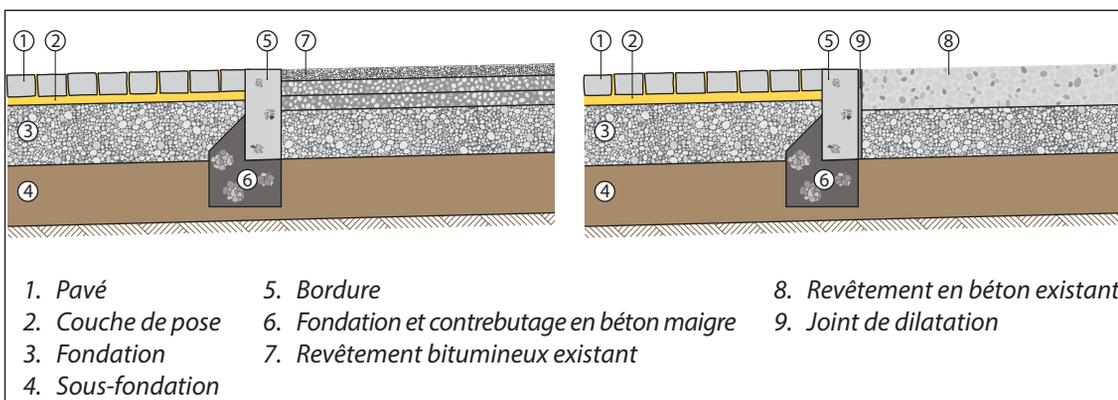


Figure 3.23 – Types de coupes longitudinales d'une transition entre différents types de revêtement

Pour le trafic de catégorie I, II, III (trafic léger – trafic lourd limité), il est préférable d'opter pour des éléments de contrebutage d'au moins 20 cm de largeur et d'épaisseur plutôt qu'un contrebutage haut de faible largeur. Figure 3.24 présente des solutions de contrebutage dans diverses situations.

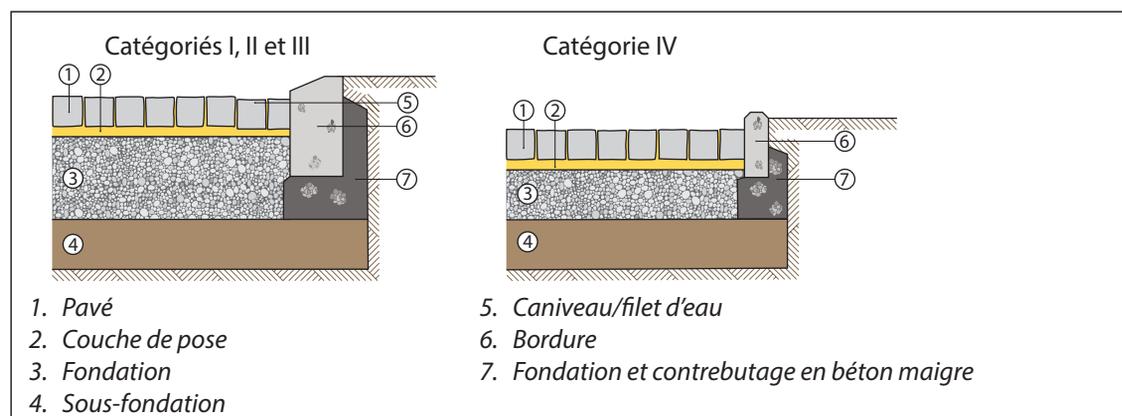


Figure 3.24 – Type de contrebutage pour les catégories de trafic I, II et III (gauche) et IV (droite)

3.3.14 Conception et dimensionnement des dispositifs d'évacuation des eaux

L'eau stagnante dans la fondation ou la couche de pose fait diminuer la stabilité et la portance de la structure et doit donc être évitée. Pour prévenir les effets négatifs de l'eau sur la structure, il est crucial:

- de limiter autant que possible la pénétration d'eau à travers les joints;
- d'évacuer aussi vite que possible l'eau infiltrée afin d'éviter qu'elle ne stagne dans la couche de pose ou dans la fondation.



Figure 3.25 – Exemple d'un bon jointolement avant l'ouverture au trafic

Dans le cas d'une pose suivant le concept souple–perméable, l'infiltration d'eau par les joints dans la structure est inévitable. On peut cependant limiter au maximum l'infiltration de l'eau dans la structure en optimisant le squelette granulométrique du matériau de jointolement et en veillant à un bon remplissage des joints. Pour garantir la stabilité de la structure, il est essentiel de garantir une bonne perméabilité de la couche de pose et de la fondation afin que l'eau infiltrée soit évacuée aussi vite que possible.

Dans le cas d'une pose suivant le concept rigide, étanche du revêtement l'étanchéité doit être évidemment garantie par l'utilisation d'un matériau de jointolement de qualité (bonne adhérence du matériau de jointolement, bonne résistance mécanique). Ensuite, il est important d'assurer une évacuation

efficace des eaux de ruissellement en surface de la chaussée. Cet impératif pourra être rencontré en prévoyant une pente transversale suffisante de 2 % minimum, ainsi que des caniveaux, des filets d'eau et des avaloirs en nombre suffisant et correctement implantés.

Si la fondation est de type imperméable (béton maigre, par exemple), il est possible de permettre l'évacuation de l'eau infiltrée dans la structure en prévoyant une ou deux tranchées drainantes ou de réaliser des ouvertures de drainage en bordure de chaussée. Pour ce faire, on peut forer des trous à travers la fondation imperméable à hauteur du filet d'eau et aux endroits les plus bas et les remplir d'un empierement de fine granulométrie avant de mettre en œuvre la couche de pose.

Lorsque le sol est perméable, il suffit généralement de prévoir une surface drainante sur les bords extérieurs du revêtement (empierement, gravier, etc.). Lorsque le sol est peu perméable, il est recommandé de prévoir une tranchée sur le périmètre de la surface pavée, dans laquelle est placé un tuyau d'évacuation perforé et incliné qui est raccordé au système d'égouttage ou qui déverse les eaux en profondeur, dans des couches plus perméables.

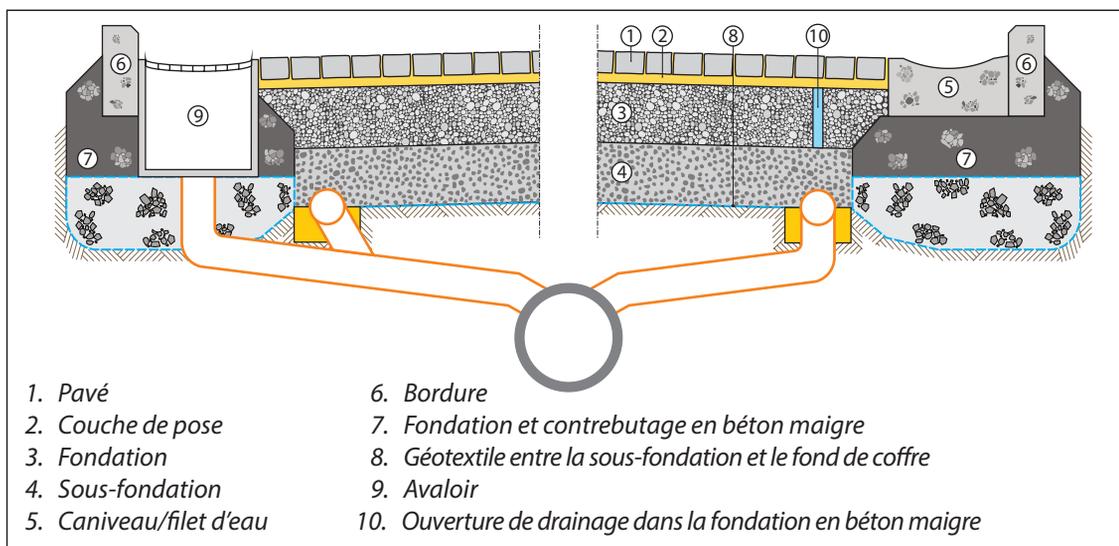


Figure 3.26 – Evacuation de l'eau via l'avaloir dans le cas d'un revêtement imperméable (côté gauche) et évacuation de l'eau qui a pénétré dans la fondation via un tuyau de drainage dans le cas d'un revêtement perméable sur une fondation imperméable (côté droit)

3.3.15 Prise en compte des besoins spécifiques des piétons et des cyclistes

Les piétons valides et moins valides, mais également les cyclistes, doivent disposer d'infrastructures de qualité pour se déplacer de manière confortable et en toute sécurité. Cette qualité d'usage passe par l'utilisation de revêtements conformes à leurs besoins en termes de planéité, stabilité, rugosité, absence d'eau ou d'obstacles, lisibilité et propreté.

Lors de la sélection des matériaux de revêtement à placer, par exemple sur un trottoir ou une piste cyclable, ces sept critères doivent être pris en compte pour garantir une réelle appropriation de l'aménagement par l'utilisateur, gage de son utilisation.

■ Planéité

L'uni du revêtement détermine en grande partie le sentiment de confort du cycliste, de la personne en chaise roulante, des enfants en poussette, etc. Ce confort sera également influencé par un certain nombre de paramètres comme la taille des pavés, l'appareillage et la largeur des joints.



Figure 3.27 – Pavés en pierre naturelle peu confortables vu les multiples défauts d'uni⁵

Pour garantir une planéité compatible avec les besoins des usagers actifs (piétons et cyclistes), l'utilisation de pavés sciés est à privilégier. Il y a lieu dans ce cas d'être attentif au risque de glissance et de prévoir le cas échéant une finition de surface adaptée. Les pavés platines offrent généralement un confort moindre pour l'utilisateur au regard des irrégularités de surface et nécessitent donc une attention particulière lors du choix de ceux-ci par le gestionnaire. Le recours à des échantillons est utile pour faire valider ce matériau par tous les usagers avant sa pose. Enfin si les pavés utilisés proviennent de la récupération d'anciens pavés, il sera nécessaire de les scier pour remplir les critères de planéité.

Le remplissage des joints constitue également un point d'attention particulier car si cette opération n'est pas effectuée avec soin, les usagers seront constamment soumis à des vibrations très inconfortables (effet de tôle ondulée).



Figure 3.28 – Pavés sciés utilisés lors du réaménagement d'une place en Région de Bruxelles-Capitale

■ Stabilité

Outre les effets négatifs sur la structure même du revêtement, un revêtement instable a également des conséquences directes sur le piéton, qui peut être déséquilibré. Les revêtements modulaires étant plus

⁵ Pour remarque, à la demande des usagers, mais également des commerçants disposant de terrasses, ces pavés ont été par la suite poncés sur site pour atténuer ces défauts d'uni et offrir ainsi un meilleur confort aux usagers. Cette situation doit bien évidemment être évitée, d'où l'importance dans le choix au préalable du matériau.

sujets à ce manque de stabilité qu'un revêtement continu, il est indispensable que les prescriptions de mise en œuvre proposées dans le présent document soient bien respectées. Une attention particulière doit être portée aux accès carrossables qui constituent bien souvent des zones où un problème récurrent de stabilité, généré par un trafic motorisé, est rencontré.

■ Rugosité

La rugosité du revêtement influence directement la résistance au glissement vis-à-vis de la semelle de chaussure, l'extrémité de la canne d'une personne âgée ou encore le pneu du vélo.

Les pavés en pierre naturelle peuvent, comparativement à d'autres types de revêtement, être considérés comme plus glissants. La rugosité de la surface du revêtement dépend de la face supérieure (clivée ou sciée) et de la finition de surface, de la nature de la roche (porphyre, grès, granite, etc.), ainsi que du nombre de joints et de leur largeur. Des mesures au pendule SRT peuvent peut-être donner une réponse définitive sur la rugosité in situ obtenue.

Si nécessaire, la rugosité des revêtements en pierre naturelle peut être améliorée en traitant la surface par bouchardage ou flammage par exemple. La pose de pierre naturelle brute en alternance avec de la pierre polie est parfois proposée dans certains aménagements mais ne constitue pas toujours une solution pour améliorer l'adhérence du revêtement. Tout dépend en effet des surfaces polies restantes qui doivent être les plus limitées possibles.



Figure 3.29 – Revêtement alternant de la pierre naturelle polie et brute. Au regard des surfaces polies existantes, le risque de glissance reste présent⁶

■ Absence d'obstacles

Même si un revêtement en pierre naturelle a été conçu et réalisé de manière optimale, certains éléments ponctuels peuvent venir ruiner les efforts réalisés au préalable. Il s'agit entre autres des racines d'arbres qui peuvent soulever le revêtement avec comme conséquence l'apparition de défauts d'uni et/ou de fissures.

Les revêtements modulaires en général, et donc les revêtements en pierre naturelle, sont plus sensibles aux racines que les revêtements continus. Des solutions existent néanmoins pour atténuer ces problématiques comme, par exemple, l'utilisation d'une fondation adéquate, la rehausse de l'infrastructure ou le choix d'essences d'arbres à l'enracinement profond (tilleuls, frênes, noisetiers, érables, etc.⁷ [49]).

⁶ Ce type de revêtement a été placé sur une zone en pente et plusieurs chutes à vélo ont été recensées.

⁷ Pour connaître la compatibilité des essences avec les revêtements modulaires, le lecteur est invité à consulter les multiples ouvrages consacrés aux arbres et à leur développement, comme par exemple «*Van den Berk et les Arbres*».

■ Evacuation des eaux

Un revêtement confortable, attractif et sécurisant pour le piéton ou le cycliste passe inévitablement par l'absence d'accumulation d'eau en surface. Tout comme pour les autres revêtements, l'évacuation des eaux est donc primordiale pour les revêtements en pierre naturelle.

Les principes généraux relatifs au drainage et à l'évacuation de l'eau tels qu'énoncés au §§ 3.2.2 et 3.3.14 du présent chapitre sont donc essentiels et doivent être appliqués pour que l'infrastructure réponde aux besoins des usagers.

■ Lisibilité

Un aménagement piéton ou cycliste doit être lisible pour tous les usagers, ce qui signifie que la composition de la surface doit leur permettre de comprendre d'un seul coup d'œil la trajectoire et les règles de cohabitation qui s'appliquent entre les différents modes de déplacement.

Une solution pour rendre lisible un aménagement réalisé en pierre naturelle est de jouer avec la teinte de la pierre et, dans une certaine mesure, avec l'appareillage utilisé.

■ Propreté

La propreté de l'aménagement est également un critère important pour le piéton ou le cycliste. En effet, un revêtement qui présente une surface propre sera d'autant plus attractif pour l'utilisateur, tout en augmentant son confort et sa sécurité.

Les revêtements en pierre naturelle résistent bien aux agents agressifs et aux hydrocarbures, sauf la pierre calcaire qui est plus sensible aux produits acides. Dans le cas spécifique des aménagements peu fréquentés par les piétons ou les cyclistes, il se peut que des mauvaises herbes s'installent dans les joints de revêtements mis en œuvre suivant le concept flexible, non lié. Dans ce cas, un petit entretien peut s'avérer nécessaire, comme abordé plus loin au Chapitre 5 (§ 5.4).

Lors du choix des matériaux à utiliser dans un espace public et outre les critères liés aux besoins des usagers, le gestionnaire doit également prendre en compte d'autres contraintes comme celles relatives aux règles urbanistiques et environnementales. Dans ce contexte, certains matériaux en pierre naturelle, parfois non compatibles avec les besoins de l'utilisateur, sont privilégiés/exigés. Afin d'éviter d'aménager un espace public inconfortable et donc peu attractif pour le public, des solutions existent et peuvent être proposées. C'est par exemple le cas sur des places publiques revêtues de pavés oblongs où un cheminement confortable réalisé en pavés sciés peut être proposé pour rejoindre chaque côté de cet espace public. C'est également le cas sur des chaussées en pavés où des bandes de confort en pavés sciés sont aménagées.



Figure 3.30 – Bande de confort en pavés sciés sur une chaussée en pavés classiques



Figure 3.31 – Aménagements confortables pour les cyclistes (pavés sciés en voirie), mais pas pour les piétons (pavés platines en trottoir)

3.3.16 Prise en compte de l'aspect environnemental

Depuis plusieurs années, la nécessité d'évaluer l'impact environnemental de projets de construction se précise et les règles liées à cette évaluation évoluent progressivement. Ces développements ont permis notamment la création de labels écologiques nationaux applicables aux produits de construction, dont la pierre naturelle. Bon nombre de ces labels sont basés sur l'Analyse du Cycle de Vie (ACV) réalisée selon la norme de référence ISO 14040 [50].

L'ACV permet d'établir des fiches de déclaration environnementales dont l'objectif est d'évaluer l'impact environnemental du produit visé en termes de changement climatique, de consommation d'énergie, de qualité de l'eau et de l'air, etc. L'analyse englobe les processus de production, de transport, de mise en œuvre et de traitement en fin de vie. Différents pays européens ont établi leur propre classification (NIBE aux Pays-Bas, FDES en France, etc.) afin de pouvoir comparer les produits entre eux.

Actuellement, peu de fiches de déclaration environnementale ont été créées en Europe. En Belgique, seuls deux types de pierres en application de voirie ont été évalués au moment de la rédaction du présent code de bonne pratique, à savoir, la pierre bleue de Belgique (dalles et bordures) et le grès (pavés platine).

De manière générale, la pierre naturelle offre un bon score environnemental de par sa longue durée de vie et sa possibilité de recyclage. L'empreinte CO₂ est favorable du fait que la production de ce matériau n'implique pas de processus de chauffe ou de cuisson. On observe également que les pertes de matière durant la phase de production peuvent être importantes. Cependant, ces pertes sont largement réutilisées sous forme de granulats concassés.

3.4 Etude d'ouvrage particulier

3.4.1 Structures pavées en pente

La conception et le dimensionnement d'une structure en pavés présentant un profil topographique longitudinal en pente nécessite de prendre en compte les points suivants:

- il est préférable de réaliser un **appareillage en arc**. Les arcs doivent être orientés de telle manière qu'un déplacement suivant la pente se fasse depuis le côté convexe vers le côté concave des arcs;
- **la forme des pavés doit être asymétrique (comme c'est le cas pour la plupart des pavés taillés à l'ancienne)**. L'une des deux faces posées perpendiculairement au trafic doit présenter un démaigrissement plus important que sa face opposée;

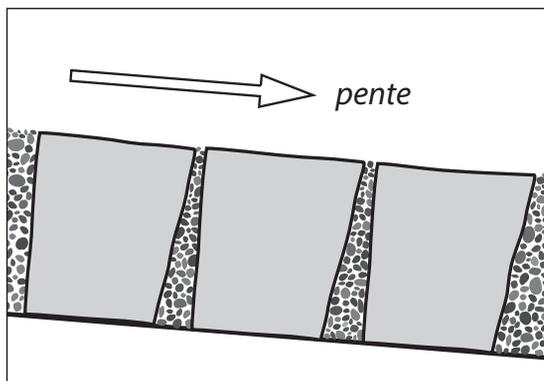


Figure 3.32 – Pose de pavés sur une pente (coupe suivant axe longitudinal)

- **le profil transversal bombé est moins important** vu l'évacuation de l'eau selon la pente longitudinale du terrain
- **afin d'éviter toute détérioration des joints par départ des éléments**, deux types de pose peuvent être utilisés:
 - la réalisation suivant un mode de pose rigide;
 - la réalisation de joints à l'émulsion ou en sable légèrement stabilisé (50-70 kg de ciment/m³ de sable) sur un lit de pose en sable drainant ou gravillons (2/6,3 pour améliorer le drainage) ou en sable également légèrement stabilisé. Les joints en sable et en gravillons ne sont donc pas recommandés dans ce cas;
- **les travaux de pavage doivent commencer par le bas de la pente.**

3.4.2 Revêtement en dalles

Pour les revêtements en dalles, il y a lieu de vérifier au préalable que la résistance à la flexion de la pierre, combinée aux dimensions du dallage, permet de résister aux contraintes de flexion compte tenu de l'application envisagée. Les différentes classes d'application sont définies au chapitre 2 du présent document.

La norme NBN EN 1341 [6] donne dans son annexe A une méthode simplifiée permettant d'effectuer cette vérification. Celle-ci est formulée dans le document PTV 841 [9] suivant la formule reprise à la figure 3.33. Attention, cette formule est en cours de révision et sera probablement modifiée lors de la prochaine publication du document PTV 841 [9].

$P = \frac{R_{tf} \times W \times t^2}{1500 \times L \times 1,6}$	<i>avec</i>	<i>P</i> charge de rupture calculée, en kN <i>W, L, t</i> largeur, longueur et épaisseur, en mm <i>R_{tf}</i> résistance à la flexion minimale attendue, en MPa
---	-------------	---

Figure 3.33 – Formule permettant de calculer la charge de rupture suivant le document PTV 841 [9] (version 1.0 du 28/02/2005 – formule en cours de révision)

3.4.3 Exigences spécifiques pour les éléments linéaires

De manière analogue aux revêtements en dalles, il y a lieu de vérifier que la charge de rupture liée à la résistance en flexion du matériau et aux dimensions de l'élément est supérieure à la charge de rupture minimum liée à la classe de trafic.

Chapitre 4

Exécution

4.1 Introduction

La réussite de la réalisation d'un revêtement en pierre naturelle repose autant sur une conception cohérente et réaliste du projet que sur sa qualité d'exécution.

Une mise en œuvre de qualité commence par la mise en place d'une procédure de réception et de contrôle des matériaux afin de s'assurer de leur conformité aux exigences du cahier des charges, et ce tout au long de l'approvisionnement.

La mise en place du fond de coffre et des fondations et sous-fondations, de même que la pose du revêtement en pierre naturelle, nécessitent le suivi des règles de l'art explicitées dans le présent chapitre. Ces règles doivent être respectées dans leur intégralité sous peine de compromettre l'ensemble du projet.

Différents contrôles permettent de s'assurer de la bonne exécution du revêtement et des couches sous-jacentes. Ceux-ci sont également décrits dans le présent chapitre.

4.2 Réception et contrôle des matériaux

4.2.1 Généralités

Préalablement à la mise en œuvre des éléments en pierre naturelle, il est nécessaire de procéder à un contrôle des matériaux livrés afin de s'assurer que ces produits correspondent bien à ce qui a été commandé ainsi qu'aux prescriptions du cahier des charges.

Ceci implique que le planning du chantier doit tenir compte du délai nécessaire à la réalisation des essais, mais aussi d'un délai de réaction dans le cas où un problème de qualité serait détecté. Pour cette raison, il est d'importance primordiale que l'entrepreneur prenne les dispositions nécessaires pour que la procédure de réception puisse être réalisée complètement entre la commande et le début de la pose.

Toute inadéquation entre les propriétés qualitatives effectives des fournitures livrées (*résistance, dimensions, tolérances, couleur, finition, quantité, etc.*) et les propriétés exigées peut en effet compromettre significativement la pérennité du revêtement.

La zone de réception et de stockage des produits doit être organisée de manière à les préserver des différentes dégradations qu'ils pourraient subir: détériorations de manutention, chocs, vol ou vandalisme.

4.2.2 Procédures d'approbation et de réception

Les procédures d'approbation et de réception des éléments en pierre naturelle diffèrent d'une Région à l'autre du pays, chaque administration régionale ayant établi un cahier des charges type décrivant ses exigences spécifiques.

Différentes approches coexistent, notamment en fonction de la prise en compte d'une marque de qualité (par exemple ATG/BENOR).

Quelle que soit la Région, la finalité de la procédure est la même: vérifier par échantillonnage la conformité des produits livrés par rapport aux prescriptions.

Dans un premier temps, cette vérification se fait au moyen d'échantillons de référence fournis pour le chantier, et à propos desquels un accord préalable a eu lieu (voir paragraphes ci-dessous). Ces échantillons permettent de vérifier:

- l'aptitude à l'emploi des produits livrés en fonction de l'application;
- l'adéquation des produits par rapport à des critères esthétiques, voire environnementaux et/ou sociaux.

Ensuite, un échantillonnage systématique des produits livrés est réalisé afin de s'assurer de la conformité de la livraison effective aux exigences prescrites.

4.2.2.1 Procédure appliquée en Wallonie et en Région de Bruxelles-Capitale

Les démarches décrites dans les cahiers des charges de la Wallonie [13] et de la Région de Bruxelles-Capitale [14] sont basées sur le principe de réception systématique par lots.

1. Réception documentaire

Sur base de la déclaration d'origine de la pierre, des rapports d'essais associés et de la déclaration de performance, le pouvoir adjudicateur s'assure que les caractéristiques du matériau correspondent bien aux exigences du cahier des charges.

2. Echantillon contractuel

Un échantillon contractuel (ou «de référence») est présenté au pouvoir adjudicateur. L'échantillon doit être représentatif des variations extrêmes de l'aspect (teintes, grains, veines, fossiles, etc.), de la finition de surface de toutes les faces et de la forme qui sont prescrites pour le marché.

3. Essais de réception

Des prélèvements pour essais de réception sont effectués par le pouvoir adjudicateur en présence du fournisseur et de l'entrepreneur. Les prélèvements se font à la carrière ou, pour les éléments importés, sur le lieu de stockage en Belgique.

Une vérification des caractéristiques pertinentes des produits est ensuite effectuée à l'endroit du prélèvement ou en laboratoire. Les essais sont réalisés suivant la procédure décrite dans le cahier des charges type de la Région concernée.

4.2.2.2 Procédure appliquée en Flandre

Suivant les dispositions générales du cahier des charges type SB 250 [12], les éléments modulaires en pierre naturelle sont acceptés sur base d'un certificat de conformité aux documents PTV 841, 842 ou 843 [9, 10, 11] délivré par un organisme indépendant. Pour les éléments en pierre naturelle, un certificat BENOR délivré par l'organisme COPRO ou un certificat équivalent est exigé. En l'absence de ce certificat, un contrôle de réception par lots est effectué.

Si les produits disposent d'un certificat BENOR (et donc aussi d'un agrément technique avec certification ATG), ou d'un certificat déclaré comme équivalent, le contrôle de réception se limite à une vérification des caractéristiques déclarées sur les fiches techniques ATG et BENOR.

Le surveillant de chantier vérifie que les documents transmis par l'entrepreneur sont conformes aux prescriptions du cahier des charges ainsi qu'au lot fourni. Les bons de livraison des produits livrés doivent être porteurs du logo BENOR.

Si les produits ne disposent pas d'un certificat BENOR, une réception par lots est effectuée par un organisme de contrôle. Le schéma de contrôle est équivalent à celui appliqué dans le cadre de la certification. Les essais sur les matériaux et sur les produits sont effectués selon les prescriptions reprises dans les différents documents PTV [9, 10, 11].

4.2.3 Cas particulier des matériaux de réemploi ou de recyclage

Lorsque les pavés, dalles ou bordures sont constitués pour tout ou partie de matériaux de réemploi, une préparation est généralement nécessaire. Elle consiste au minimum en un nettoyage des éléments de récupération afin de les débarrasser des résidus de couche de pose, produits de jointoiement et autres éléments qui pourraient y adhérer ou y être mélangés. Dans ce cas, on parle de «pavés de réemploi». Dans certains cas, un traitement plus élaboré, comme le resciage par exemple, conduit à la fabrication de «pavés recyclés».

Actuellement, peu de documents réglementaires ou normatifs prennent le recyclage des éléments modulaires en pierre naturelle en compte. Au moment de la rédaction de ce code de bonne pratique, seul le cahier des charges type CCT Qualiroutes [13] y fait référence. Lorsqu'il s'agit de matériaux recyclés et de réemploi, la déclaration d'origine (sur laquelle est basée la procédure de réception préalable) doit mentionner (entre autres) «l'origine des matières premières y compris la traçabilité administrative de la dernière mise en œuvre au moins et les différents intervenants de la filière», ainsi qu'une procédure d'acceptation des matières premières telle qu'elle est établie dans le cadre du contrôle de production en usine (FPC). Dans la pratique, ceci n'est pas évident pour des revêtements plus anciens (40-50 ans).

4.2.4 Réception des produits en cohérence avec l'appareillage de pose prescrit

Lors de la réception, l'entrepreneur s'assurera de l'adéquation des produits en termes de format, d'épaisseur, d'appareillage, de l'appareillage de pose prescrit, de tolérances, etc. au revêtement à réaliser.

4.3 Conditions météorologiques générales

De manière générale, les travaux de voirie doivent toujours être réalisés dans des conditions météorologiques compatibles avec tous les matériaux utilisés dans la structure de la chaussée.

Des précautions particulières sont à prendre en cas de températures faibles (*voire négatives*) ou trop élevées, et ce en fonction des matériaux mis en œuvre. Les cahiers des charges types des trois Régions fixent les conditions météorologiques pour lesquelles des mesures particulières sont à prendre.

En règle générale:

- les bétons et mortiers à base de ciment peuvent être mis en œuvre à des températures comprises entre 5 et 25 °C. En cas de dépassement de 25 °C, la mise en œuvre est possible. Cependant, il y a lieu de prendre des précautions particulières, soit par l'usage d'adjuvants, soit par la protection des travaux en cours (voir figure 4.1), ou par une combinaison des deux. Les matériaux liés au ciment ne peuvent être mis en œuvre à des températures inférieures à 5 °C et devront être maintenus hors gel pendant une période de sept jours suivant leur mise en œuvre;
- les matériaux bitumineux peuvent être mis en œuvre à des températures supérieures à 5 °C et ne peuvent être appliqués en cas de fortes précipitations;
- les joints liés à la résine (en général époxy) peuvent être utilisés aux températures indiquées par le fabricant. La température de mise en œuvre idéale dépend de la composition époxy spécifique. Un système de joint lié à la résine est un système réactif chimiquement qui dépend fortement de la température.



Figure 4.1 – Exemple de protection du revêtement en pierre naturelle en cas de conditions météorologiques défavorables

4.4 Travaux préalables au revêtement

4.4.1 Préparation du fond de coffre

Avant le placement d'un géotextile et de la sous-fondation, il faut aplanir les inégalités du fond de coffre – il est très important que le profilage du fond de coffre soit parallèle au profil du futur revêtement – et procéder à un compactage. Il est préférable d'utiliser un rouleau statique plutôt qu'un rouleau vibrant, pour éviter que les vibrations ne fassent remonter l'eau.

La portance du fond de coffre est déterminée à l'aide d'un essai de chargement à la plaque. Le module de compressibilité déterminé lors de cet essai doit au moins être égal à 17 MPa. Si ce n'est pas le cas, le sol doit être recompacté, amélioré ou remplacé.

4.4.2 Mise en place du dispositif de drainage

La conception et le dimensionnement du drainage de la voirie est réalisée en phase de projet (voir § 3.3.14).

Lors de la mise en œuvre, il conviendra de vérifier le bon fonctionnement des dispositifs de drainage. Ce contrôle peut se faire, dans un premier temps, par un repérage visuel des obstacles hydrauliques et de tout ce qui pourrait entraîner l'accumulation locale d'eau. Dans un second temps, on pourra vérifier l'absence de zones d'accumulation d'eau et l'efficacité des drains par un arrosage abondant.

4.4.3 Mise en œuvre de la sous-fondation

Selon l'épaisseur de la sous-fondation, les matériaux peuvent être mis en œuvre en une ou plusieurs couches. L'épaisseur maximale de chaque couche est de 30 cm. Le profil de la sous-fondation est toujours parallèle au profil du futur revêtement.

Après compactage, la portance, mesurée par l'essai de chargement à la plaque, doit au minimum être de 35 MPa. Si la sous-fondation est en sable, il faut utiliser une plaque de 750 cm² pour cet essai. Dans les autres cas, c'est une plaque de 200 cm² qui est utilisée.

4.4.4 Mise en œuvre du contrebutage et finition des bords

Pour empêcher le glissement des pavés sous l'effet des efforts horizontaux causés par la circulation des véhicules, les pavages doivent toujours être contrebutés latéralement. Ce contrebutage se fait généralement par des éléments linéaires de type bordure et/ou filets d'eau, ces éléments étant eux-mêmes posés sur une fondation en béton maigre et épaulés par du béton maigre en face arrière.



Figure 4.2 – Pose des éléments de contrebutage avant la fondation et la couche de pose

La fondation des éléments linéaires de contrebutage commence au niveau de la sous-fondation de la route, voire plus bas encore. Les éléments de contrebutage sont quant à eux mis en place avant la fondation et la couche de pose.

Le pavage et la fondation situés le long d'éléments linéaires de contrebutage ne peuvent être compactés que lorsque ces derniers ont atteint un niveau de résistance mécanique suffisant. Cette résistance dépend:

- du temps de durcissement du contrebutage coulé sur place;
- du temps de durcissement du support de la fondation (béton maigre, sable-ciment) des éléments de contrebutage préfabriqués.

Sous des conditions climatiques normales, le durcissement prend généralement deux à trois jours. Ce délai a surtout son importance lorsque le contrebutage est coulé sur place.

Il est important que les éléments linéaires de contrebutage ne reposent pas seulement sur une fondation, mais qu'ils soient également dotés d'un épaulement suffisant, bien compacté, en béton maigre.

Dans certaines situations particulières, il peut être nécessaire de prévoir des éléments de contrebutage placés transversalement au sens de circulation pour s'opposer au glissement longitudinal des pavés.



Figure 4.3 – Exemple de contrebutage transversal dans une rue en pente

Lorsqu'on met en œuvre un pavage de façade à façade, sans pose d'éléments de contrebutage, un joint d'isolation doit être réalisé entre la fondation, le revêtement et la façade.

4.4.5 Réalisation de la fondation

Il est très important que le profilage de la fondation soit parallèle au profil du futur revêtement, afin de garantir à la couche de pose une épaisseur la plus constante possible. Si tel n'est pas le cas, le pavage prendra inéluctablement, au fil du temps et des sollicitations, la forme du support.



Figure 4.4 – Importance d'une bonne planéité et d'un profilage de la fondation

Dans le cas d'une fondation réalisée en mélange à base de liant hydraulique, la teneur en eau du matériau doit être optimale lors de la mise en œuvre. Celle-ci est définie à l'aide d'un essai Proctor modifié. Lors de cet essai, la masse volumique d'éprouvettes compactées de manière standardisée est mesurée en fonction de leur teneur en eau. La teneur en eau optimale du mélange est celle correspondant à la masse volumique la plus élevée. Toutes les manipulations des matériaux liés aux ciments doivent être réalisées dans les deux heures suivant la confection du mélange.

La fondation est d'abord compactée par vibration. Ce compactage dynamique offre un premier compactage efficace sur toute l'épaisseur. Le nombre de passes dépend du type de machine vibrante et du type de fondation. Il peut éventuellement être déterminé au préalable sur une section d'essai. Dans le cas d'un empierrement, la finition sera surtout statique, avec un compacteur à pneus par exemple. La portance de la fondation, mesurée par un essai de chargement à la plaque, doit atteindre au minimum 110 MPa.

Dans tous les cas, il y a lieu de s'assurer de la perméabilité de la fondation, que ce soit par le choix du matériau ou par l'aménagement d'orifices de drainage. Pour une fondation en béton maigre, en béton maigre drainant ou en béton sec compacté, des joints de retrait doivent être sciés ou moulés dans le béton frais à intervalle de 5 m. En cas de raccordement avec des bâtiments existants, il faut tenir compte d'une éventuelle dilatation de la fondation en béton maigre. Il est nécessaire de placer un joint d'isolation entre la façade et la fondation pour reprendre cette dilatation. Un essai de résistance à la compression sur cylindre prélevé dans la structure permet de vérifier si la résistance à la compression répond aux exigences du cahier des charges.

Une vérification particulière du compactage des fondations et sous-fondations doit être faite à proximité des accessoires de voirie qui émergent ou affleurent (*avaloirs, trapillons, etc.*). Autour de ces points singuliers, la fondation et sous-fondation éventuelle doivent être d'épaisseur constante et parfaitement compactées pour éviter tout tassement ultérieur qui sera préjudiciable à la planéité du revêtement ainsi qu'à sa tenue dans le temps.

Dans le cas d'émergence de trapillons et de regards de visite, le paveur vérifiera si le support n'est ni fissuré, ni endommagé dans son étanchéité, ni propice à la stagnation d'eau, et s'il dispose de l'épaisseur nécessaire pour mettre en œuvre toutes les couches de la structure suivant les épaisseurs prescrites.

Les inégalités de la fondation, mesurées avec une règle de 3 m, ne peuvent jamais dépasser 10 mm selon les cahiers des charges types régionaux. Avant la mise en œuvre de la couche de pose, les éventuelles inégalités doivent être éliminées à l'aide d'un microbéton (poreux si la fondation est en béton poreux) pour les fondations liées et d'un matériau fin adapté pour les fondations non liées. Les erreurs de planéité ne doivent en aucun cas être rattrapées par des variations de l'épaisseur de la couche de pose.

4.5 Travaux de réalisation du revêtement en pavés

4.5.1 Mise en œuvre de la couche de pose

Avant de procéder à l'épandage de la couche de pose, il convient de s'assurer que la surface de la fondation ne présente pas de laques d'eau, d'impuretés et d'inégalités.

La couche de pose doit être étendue partout de manière uniforme. Il est très important que son épaisseur reste constante car une épaisseur excessive ou insuffisante du matériau de couche de pose engendre généralement des mouvements postérieurs des pavés (affaissement ou émergence).

La couche de pose n'est pas compactée avant la pose des pavés. Les pavés sont dans un premier temps nichés dans la couche de pose. Ensuite, c'est l'ensemble du pavage et de la couche de pose qui est compacté pour arriver à l'épaisseur nominale prescrite de la couche de pose. Avant ce compactage, une partie du matériau de la couche de pose peut complémentarément être balayée dans les joints pour stabiliser davantage les pavés. Dans le cas d'une couche de pose en sable-ciment, le remplissage s'effectue jusqu'à la moitié de l'épaisseur du pavé. Dans le cas de gravillons, toute l'épaisseur peut être comblée.



Figure 4.5 – Nichage des pavés dans la couche de pose, suivi du compactage

Lorsque la couche de pose est en sable-ciment, il faut tenir compte des points d'attention suivants:

- le sable-ciment doit avoir une consistance «terre humide» lors de sa mise en œuvre;
- il est recommandé d'humidifier la surface de la fondation et les pavés préalablement à la mise en place de la couche de pose, ceci afin d'éviter la migration de l'eau de gâchage hors de la couche de pose ou du produit de jointoiment;
- les pavés doivent être posés et compactés avant que le sable-ciment ne commence à durcir. Pratiquement, le délai de mise en œuvre est d'environ trois heures; ceci implique généralement la mise en œuvre et l'approvisionnement du sable-ciment au fur et à mesure de l'avancement du pavage;
- en cas de risque de gel dans les premières 24 h, il est interdit de mettre en œuvre du sable-ciment.

Si la fondation et la couche de pose sont toutes deux en sable-ciment, la fondation est compactée avant la mise en œuvre de la couche de pose.

4.5.2 Pose des pavés

4.5.2.1 Généralités

Il est à recommander que le maître d'ouvrage et l'adjudicataire se concertent avant le début des travaux sur un certain nombre de sujets qui s'appliquent spécifiquement aux revêtements en pierre naturelle, comme les joints, le jeu de variations de formats dans le cas d'appareillages en arcs de cercle, les différences dans le pavage entre, d'une part, la pierre naturelle et, d'autre part, les pavés de béton et les pavés de terre cuite.

Une section expérimentale de référence peut aider à se faire une meilleure idée de l'aspect final du pavage. On évite ainsi des discussions ultérieures concernant la qualité du travail fourni.

Pour ce qui concerne la pose des pavés, un facteur essentiel de réussite repose sur le savoir-faire et l'expérience des paveurs impliqués dans le projet. L'évolution des techniques et matériaux mis en œuvre en voirie a entraîné la disparition des pavés de pierre naturelle de bon nombre de voiries. Durant une cer-

taine période, ces revêtements ont surtout été réservés aux sites dont le caractère historique ou prestigieux vise à être renforcé par la pierre naturelle. Ce recours moins fréquent aux pavages en pierre naturelle et la nécessité d'adapter les techniques de pose aux nouveaux matériaux ont entraîné, par la force des choses, la perte d'une partie de l'expérience des paveurs d'autrefois. Toutefois, à l'heure actuelle, on observe à nouveau une recrudescence de l'application des pavages en pierre naturelle là où un certain cachet ou un effet esthétique a été visé dans un environnement urbain. Dès lors, il est toujours nécessaire que le paveur dispose d'une expérience spécifique relative au produit et à l'appareillage appliqué.

Au moment de la mise en œuvre, le paveur effectue un tri des pavés afin d'éliminer tout pavé ébréché, abîmé, de dimension non conforme, ou tout autre défaut technique ou esthétique. Ce tri est réalisé indépendamment de la procédure de réception et peut mener à un rebut d'une partie de la livraison; un rebut de 5 % est considéré comme acceptable.

Quel que soit l'appareillage de pose choisi, la technique de pose diffère peu. Pour une mise en œuvre souple, le paveur sélectionne les pavés lors de la pose, de manière à obtenir le meilleur serrage possible. Pour une mise en œuvre rigide, les joints doivent avoir une largeur d'au moins 1 cm. Les pavés sont ensuite nichés un par un les martelant dans la couche de pose, tout en veillant à l'alternance des joints ou à l'appareillage recherché.

Il importe également de vérifier régulièrement la linéarité des joints tant dans le sens longitudinal que transversal, par exemple à l'aide d'une corde.



Figure 4.6 – Pose de pavés avec contrôle visuel de la linéarité des joints

Voici quelques règles techniques de base à respecter:

- en cas de voirie en pente, il convient de procéder par le bas et de réaliser une fondation adaptée à l'évacuation de l'eau;
- les découpes des pavés à des dimensions inférieures à un demi-pavé sont à proscrire;
- le paveur doit veiller à ce que la largeur des joints soit conforme aux exigences du cahier des charges (voir tableau 3.6). Des joints trop larges influencent négativement la bonne tenue dans le temps du pavage; des joints trop étroits rendent difficile (voire impossible) le remplissage correct des joints et augmentent le risque de mise en contact des pavés entre eux, ce qui peut également nuire à la bonne tenue des pavés;
- aux bords, on peut éventuellement appliquer une assise de panneresses («règle») de simples pavés, pour obtenir une meilleure finition de l'appareillage (voir figure 4.7);



Figure 4.7 – Pose d'une assise de panneresses



Figure 4.8 – Différences de couleur

- normalement, on commence aux bords du revêtement et on travaille perpendiculairement à l'axe de la route. Le sens à partir duquel on pose les pavés doit être choisi avec précaution – entre autres en fonction du phasage des travaux, de l'ouverture escomptée au trafic et des connexions transversales avec d'autres routes;
- pour éviter d'éventuelles différences de couleur entre des pavés adjacents, il est conseillé de prendre de la pierre naturelle de différentes livraisons et de mélanger lors du pavage.

4.5.2.2 Appareillages droits

L'alignement des joints continus se fait perpendiculairement à l'axe de circulation. Les changements de direction sont réalisés par des raccords de pavage permettant de maintenir l'alignement des joints par rapport à l'axe de circulation (voir aussi chapitre 3, § 3.3.8).



Figure 4.9 – Orientation des joints continus perpendiculairement à la direction du trafic

Pour un appareillage en panneau, on choisit une plus petite tolérance dimensionnelle pour garder les joints dans les largeurs souhaitées.

4.5.2.3 Appareillages mosaïques

La forme et la largeur des arcs sont conditionnées par le type d'appareillage mosaïque choisi, le type de pavés utilisés et la largeur de la chaussée à revêtir. La largeur des arcs doit nécessairement diviser exactement la largeur de la chaussée, déduction faite des caniveaux et filets d'eau, pavés en premier lieu avec deux ou trois rangées longitudinales placées parallèlement à la bordure du trottoir. Les demi-arcs situés en bordure de la surface à paver viennent se terminer perpendiculairement sur les filets d'eau ou caniveaux.

L'arc a son centre vers le point bas quand la pente longitudinale est supérieure à 3 %. Quand la pente est inférieure à 3 %, le centre de l'arc est placé si possible en fonction des sollicitations engendrées par le trafic (voir figures dans chapitre 3, § 3.3.7).

Les appareillages courbes à cercles non concentriques nécessitent l'emploi de pavés de différentes dimensions, les plus petits étant posés aux naissances des arcs et les plus gros à la voûte. Ce type d'appareillage est impossible à réaliser correctement avec des pavés d'un seul format.

Au droit des accessoires de voirie (*trapillons par exemple*), des adaptations sont à prévoir en proposant un appareillage de pose bien spécifique pour épouser le contour des éléments incorporés au revêtement.



Figure 4.10 – Exemple de pose autour de points singuliers

4.5.3 Compactage par vibration du pavage et remplissage des joints

Ce n'est qu'après la mise en œuvre de l'intégralité du pavage (y compris la finition des bords), que les joints sont éventuellement brossés une première fois avec le même matériau que la couche de pose (p.ex. sable-ciment, gravillons 2/4). Les pavés sont ensuite scellés avec une plaque vibrante, et la couche de pose est également compactée.

Idéalement, il y a un chevauchement d'une demi-largeur de plaque vibrante. Elle est aussi conduite le plus près possible contre les bords du revêtement pour également obtenir un bon compactage le long des contrebutages et autour des points singuliers.

Si nécessaire, le poids de la plaque vibrante est adapté au type de pavés.

Pendant la vibration, les pavés endommagés sont remplacés et les différences de profil, les inégalités de surface et les trop grandes différences de hauteur entre les pavés sont corrigées; les irrégularités et les différences de hauteur s'élèvent au maximum à deux fois la différence de hauteur maximale autorisée à la surface de contact des pavés ou des pavés mosaïques.

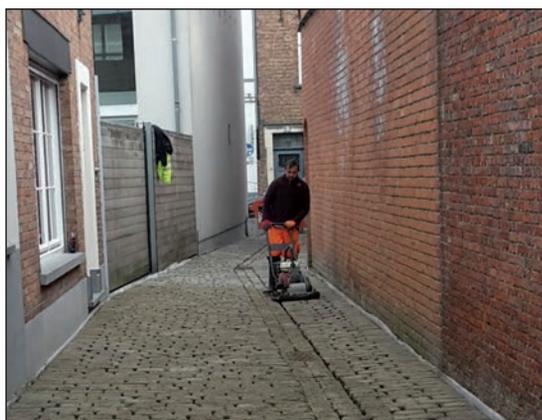


Figure 4.11 – Compactage adéquat du pavage, également sur les bords

Avant de procéder au remplissage complet des joints, il faut s'assurer que le matériau de jointoiment est compatible avec la largeur des joints (voir aussi le tableau 3.6 dans le chapitre 3).

Entre les éléments de pierre naturelle, différents types de joints et de matériaux de jointoiment peuvent être utilisés, selon la structure du revêtement appliquée. Le type de jointoiment doit cependant toujours être choisi en fonction du concept (flexible ou rigide, perméable ou imperméable – voir aussi tableau 3.5 dans le chapitre 3).

La technique de remplissage diffère selon le type de joints et la couche de pose appliqués.

- **Cas de joints en sable et gravillons.** Les étapes suivantes sont réalisées successivement en une seule phase:
 - remplissage des joints jusqu'à quelques centimètres en dessous de la surface par le matériau de la couche de pose (sable ou gravillons 2/4, 2/6,3) humide. Dans certains cas, une opération de préhumidification des pavés peut être réalisée;
 - compactage de l'ensemble par vibration (voir ci-dessus);
 - remplissage et gravillonnage des centimètres supérieurs du joint avec du sable (plus sec) ou des gravillons fins 0/2;
 - répétition de cette dernière opération après quelques semaines si nécessaire, si des vides sont apparus.



Figure 4.12 – Compactage des pavés humidifiés, suivi du remplissage des joints

En cas de dégradation des pavés lors de ces opérations, il convient de remplacer les pavés et de recommencer les opérations ci-dessus à petite échelle.

- **Cas des joints de type rigide** (mortiers de ciment modifiés ou non): les joints doivent avoir une largeur permettant de s'assurer de la bonne pénétration du mortier. Il y a lieu de s'assurer que le rapport eau-ciment du produit de jointoiement est respecté. Lors de la préparation du mortier, la quantité d'eau doit être respectée par rapport à ce que le fabricant a indiqué.

Si la pierre naturelle est quelque peu poreuse, il peut être recommandé de l'humidifier préalablement avec de l'eau pure, pour éliminer la force d'aspiration et empêcher que le mortier de jointoiement ne colle directement à la surface.

Les pavés doivent être bien fixés dans la couche de pose. Il est préférable de laisser suffisamment de temps (p.ex. sept jours) entre la pose des pavés et la mise en œuvre du jointoiement pour le tassement des pavés et le retrait éventuel de la sous-couche. Il est important que les joints soient complètement et assez profondément remplis avec du mortier. La profondeur de joint minimale est de 3 cm.

Le jointoiement se fait en deux phases.

Phase 1:

- vibration des pavés nichés dans la couche de pose en sable-ciment afin d'obtenir la planéité du profil, le compactage de la couche de pose et le serrage des pavés;
- soufflage des joints pour éliminer toute impureté éventuelle;
- remplissage des joints jusqu'à ou juste en dessous de la surface des pavés ou du côté chanfreiné, si présent. Le matériau est épandu sur la surface et poussé à la raclette dans les joints;
- respect d'une période de prise-séchage.

Phase 2: nettoyage du pavage au moyen d'une machine éponge ou avec jet d'eau afin d'enlever toute trace de ciment sur les pavés.



Figure 4.13 – Remplissage des joints au mortier modifié



Figure 4.14 – Nettoyage des pavés après remplissage des joints

Le mortier de jointoiement superflu est enlevé pour éviter qu'il ne colle à la surface avant la prise et qu'un voile de ciment se forme. Ce nettoyage peut se faire à l'aide d'une brosseuse ou d'une machine éponge, ou par arrosage avec de l'eau. A cette occasion, il faut veiller à ne pas dénuder ni creuser les joints. Pour ce faire, on attend le bon moment, quand le mortier dans le joint a pris et offre une certaine résistance. Il est recommandé de tenir compte des conditions climatiques lors de l'exécution du jointoiement et du nettoyage.

- **Cas des joints en émulsion ou en mortier bitumineux** (généralement pour l'entretien des joints existants en mortier bitumineux): l'opération de remplissage de joints se fait en trois phases.

Phase 1:

- nettoyage des joints ouverts à l'aide d'un soufflet à air comprimé ou au nettoyeur à haute pression, jusqu'à 1/3 de la hauteur du pavé et au minimum à 3 cm de profondeur;
- remplissage des joints jusqu'au sommet par l'émulsion ou le mortier bitumineux. Le matériau est épandu sur la surface et poussé à la raclette dans les joints;
- compactage de l'ensemble par vibration.



Figure 4.15 – Remplissage des joints au mortier bitumineux

Phase 2 (une à deux semaines après):

- soufflage du joint à l'air afin d'éliminer la croûte superficielle (0,5 à 1 cm);
- déversement de l'émulsion en surface et passage à la raclette afin de combler les nouveaux vides.

- *Phase 3 (d'une semaine à six mois après):* réalisation des mêmes opérations que pour la phase 2.

Remarque: entre ces phases, le trafic peut être admis, ce qui permet une meilleure mise en place du dispositif. Cependant, cette technique nécessite de fermer et rouvrir la route à la circulation plusieurs fois.

- **Cas des mortiers liés à la résine (époxy):** le remplissage se fait en une seule phase.

Les joints doivent d'abord être bien nettoyés et les profondeurs et largeurs minimales de joint indiquées par le fabricant doivent être prises en compte.



Figure 4.16 – Remplissage des joints au mortier lié à la résine epoxy

Les différents composants de la résine époxy sont d'abord mélangés avec du sable calibré puis, pour une meilleure ouvrabilité, avec de l'eau. Le mélange est ensuite poussé à la raclette dans les joints du pavage préalablement humidifié. Après une dizaine de minutes, la surface du pavage peut être prudemment brossée avec un balai pour enlever tous les résidus de mortier. Le bon moment pour ce nettoyage est normalement atteint quand il ne reste plus de voile blanc lors du balayage, et il faut toujours balayer en diagonale.

Avec un jointoiment lié à l'époxy, il reste, après la mise en œuvre, un film gras sur la pierre naturelle. Il en résulte au début un risque plus élevé d'accidents en raison d'une rugosité moindre et d'une résistance à la glissance moins élevée. Ce film disparaît après quelques mois sous l'influence du soleil et de la pluie.

Pour les produits liés au ciment, et certainement pour les matériaux de jointoiment bitumineux, le risque de formation d'un voile sur la pierre naturelle ou de salissure de celle-ci existe. Pour éviter cela, le revêtement doit être bien nettoyé peu après la mise en œuvre du jointoiment.

4.5.4 Joints de dilatation dans le pavage

Lors d'une pose de type rigide, on met en œuvre des joints de dilatation pour compenser les mouvements thermiques des pavés pendant une période chaude (chapitre 3, § 3.3.12). Dans ce cas, le joint de pavage normal à des distances déterminées est remplacé par un joint plus large (10-20 mm). Dans celui-ci, à hauteur du pavé et de la couche de pose, on glisse une fourrure d'un matériau incompressible et imputrescible (liège comprimé, mousse de polyéthylène de masse volumique suffisante et certains types de caoutchouc), jusqu'à une hauteur d'environ 2-3 cm sous la surface de contact du pavé. Pendant le jointoiment avec le mortier lié, ce creux est alors rempli provisoirement avec une bande (en bois ou en plastique) ou un cordon rond. Après le jointoiment, elle est enlevée et le haut du joint est rempli avec un matériau élastique adéquat pour colmater le joint. Il est important qu'il y ait aussi un fond de joint entre la fourrure de joint et le couvre-joint, pour éviter que ce dernier ne colle à la fourrure de joint.

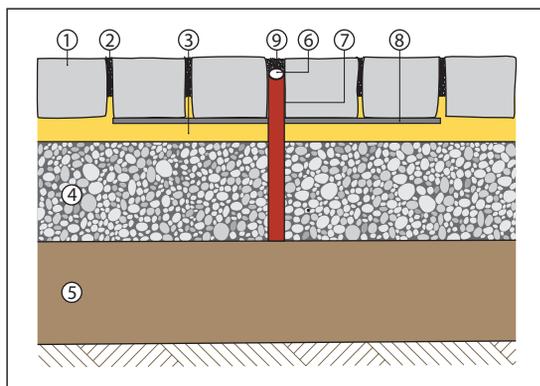


Figure 4.17 – Mise en œuvre de joints de dilatation

Typiquement, ces joints sont appliqués tous les 10 à 20 m; cela peut aussi être nécessaire avant et après les virages. Si un joint a été placé dans une fondation liée au ciment, il doit coïncider avec un joint de dilatation dans le pavage.

Cependant, les pavés à ces endroits sont moins soutenus d'un côté et peuvent perdre de la stabilité, et dès lors, sous l'effet du trafic, bouger dans le sens du joint. Quand le trafic passe directement sur les joints de dilatation, cela peut entraîner un mouvement (basculement) du pavé vis-à-vis du joint et causer dans certains cas des dommages et/ou un effritement. Il est donc indiqué de réaliser ces joints, dans la mesure du possible, dans les parties non sollicitées du revêtement modulaire.

En Allemagne, pour améliorer la stabilité des pavés au droit du joint de dilatation, on applique parfois, entre une couche de pose rigide et les pavés, une fine couche d'adhérence (par exemple, même matériau que le mortier de jointolement), sur une longueur approximative de 0,5 m de part et d'autre du joint (voir figure 4.18).



1. Pavé
2. Mortier de jointolement lié
3. Couche de pose rigide
4. Fondation
5. Fond de coffre
6. Fond de joint
7. Fourrure
8. Couche d'adhérence
9. Masse de scellement



Figure 4.18 – En haut: application d'une couche d'adhérence (Haftbrücke) entre la couche rigide et la pierre naturelle au droit des joints de dilatation, telle qu'appliquée en Allemagne. En bas: exemple du trempage des pavés au droit du joint de dilatation

4.6 Opérations de contrôle

4.6.1 La fondation

Les points suivants demandent un suivi attentif en cours de chantier:

- respect du parallélisme de la surface de la fondation par rapport à la surface finie;
- planéité de la surface supérieure;
- mesure de la portance ou de la résistance à la compression;
- vérification du compactage autour des points singuliers.

4.6.2 La couche de pose

Il y a lieu de vérifier principalement l'absence d'éléments grossiers (cailloux, pierres) à moins d'un centimètre sous le pavé. Ces éléments peuvent provoquer la remontée du pavé. Le contrôle porte également sur le respect de l'épaisseur de la couche de pose et de sa granularité.

La planéité de la surface supérieure sera aussi contrôlée, et en cas d'utilisation de sable-ciment, la résistance à la compression sur base des essais Proctor également.

4.6.3 La surface finie

Un contrôle à la règle de 3 m est effectué. Les irrégularités de surface de plus de 10 mm impliquent un démontage avec remise à niveau. Il en va de même avec les poches retenant l'eau de pluie.

Le profil est vérifié par mesure topographique.

4.6.4 Les joints

Le contrôle des joints finis se limite à une vérification de l'aspect permettant de se faire une idée sur la qualité de remplissage. La largeur des joints peut également être vérifiée.

Les joints de dilatation doivent être posés suivant le schéma d'implantation convenu. Il y a également lieu de vérifier si ces joints peuvent remplir leur rôle correctement (remplissage avec un produit adéquat et absence d'éléments parasites).

4.6.5 Caractéristiques de surface

En cas de doute, ou si le cahier des charges le prescrit spécifiquement, l'adhérence in situ du revêtement peut aussi être mesurée avec un pendule (appareil SRT).



Figure 4.19 – Mesure de l'adhérence au pendule SRT

4.7 Spécificités des travaux de pose de bordure

Les contrebutages en général, et donc aussi les bordures de trottoir en pierre naturelle en particulier, sont toujours mis en œuvre avant la fondation et la couche de pose. Il va de soi qu'avant de mettre en œuvre le contrebutage, il faut déterminer la largeur de la surface à revêtir. Cela dépend notamment des dimensions réelles des pavés à poser, pour lesquels il faut tenir compte de tolérances de dimensions (voir chapitre 2). Non seulement le contrebutage doit reposer sur une fondation, mais il doit également être doté d'un épaulement bien compacté en béton maigre. Eventuellement, entre la bordure du trottoir en pierre naturelle et le pavage adjacent, un joint d'isolation peut également être prévu, ce qui induit cependant un affaiblissement de la structure routière.

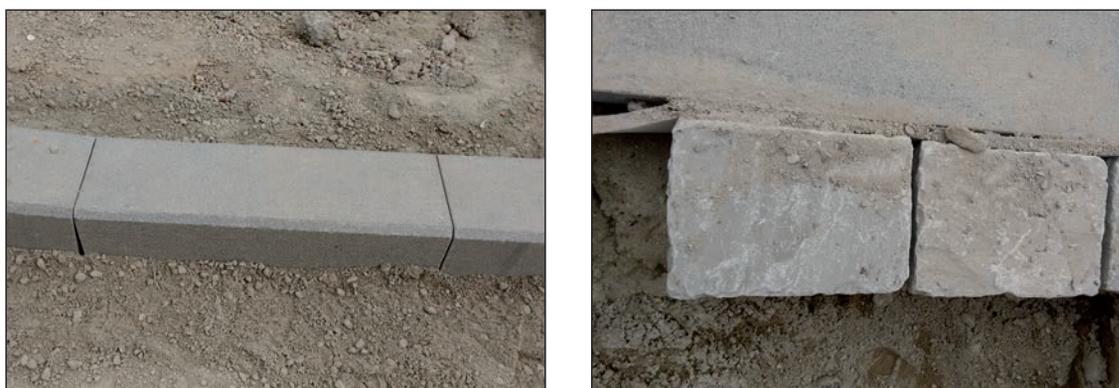


Figure 4.20 – Pose de bordure et joint d'isolation (droite) entre bordure et pavés

Les bordures en pierre naturelle doivent être posées suivant les données qui sont mentionnées dans les cahiers des charges types. Dans ce cadre, il faut tenir compte, entre autres, du type de bordure (A, B, C, D, en fonction du chanfrein au-dessus), des dimensions de la fondation et de l'épaulement de la bordure, du mode de pose de la bordure sur la fondation, et du relevé de la bordure par rapport à la chaussée et/ou au filet d'eau.

En fonction du type, les bordures sont arasées ou relevées:

- bordures de trottoir de types A, B et D: relevées;
- bordures de trottoir de type C: relevées ou arasées.

Les bordures relevées sont toujours dotées d'une fondation et d'un épaulement en béton maigre à l'arrière.

Les joints se trouvent dans un plan vertical perpendiculairement à l'axe de la chaussée. Sauf avis contraire dans les pièces du marché, les bordures de trottoir sont posées avec des joints de 5 à 10 mm de large et les joints ne sont pas remplis. Le joint longitudinal entre la bordure et le filet d'eau par contre est toujours rempli d'un produit de scellement.

Les courbes avec des bordures de type C sont réalisées avec des éléments rectilignes. Dans les courbes dont le rayon de courbure est inférieur à 15 m, les cahiers des charges types précisent si des bordures courbes ou droites de moins de 1 m de longueur sont utilisées. La coupe éventuelle des bordures s'effectue obligatoirement par sciage.

Les directives dispensées par les différents cahiers des charges types pour l'exécution doivent toujours être suivies.

4.8 Spécificités des travaux de pose de dalle

Contrairement aux pavés, les dalles en pierre naturelle sont posées ou agencées sur la couche de pose, avant d'être scellées avec un marteau de paveur approprié. En principe, aucun compactage ne se fait par vibration – sauf avec un appareil vibrant à roulettes à haute fréquence (p.ex. appareil ultrason sur roulettes) –, pour ne pas endommager la surface.



Figure 4.21 – Appareil ultrason sur roulettes

La couche de pose en sable-ciment ou le lit de mortier est dans ce cas uniquement égalisé(e) et profilé(e) pour obtenir l'épaisseur prescrite et uniforme après compactage. On peut utiliser pour cela les règles de pose en métal qui sont solidement scellées, ou une règle en métal posée sur le contrebutage.

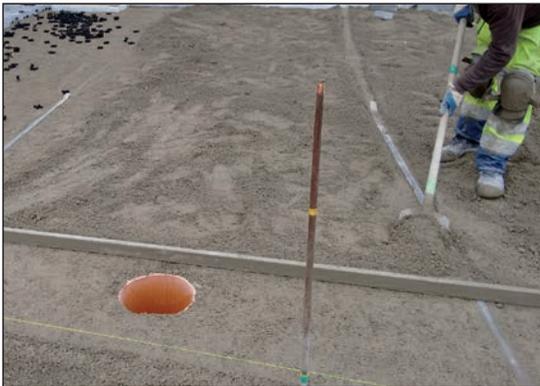


Figure 4.22 – Profilage et égalisation du lit de mortier pour dalles en pierre naturelle

La pose de pavés sur un lit de mortier doit être terminée avant le début de la prise (généralement dans les deux à quatre heures après la confection d'un mortier). Ce n'est qu'en cas d'utilisation de retardateurs de prise qu'une dérogation est autorisée. Les joints sont remplis avec du mortier de ciment (modifié). Les joints de dilatation éventuels sont nettoyés et remplis avec un produit de scellement, jusqu'à 2 cm de profondeur, avant le durcissement du mortier.

Les pavés en pierre naturelle avec une finition lisse, sciée en dessous et sur les côtés sont mis en œuvre de la même manière que les dalles de pierre naturelle (agencement sur la couche de pose et PAS DE vibration à la plaque). Pour améliorer l'adhérence entre le pavé et la couche de pose, il est toutefois indiqué dans ce cas d'appliquer une couche d'adhérence entre les deux (voir chapitre 2, § 2.4.4).

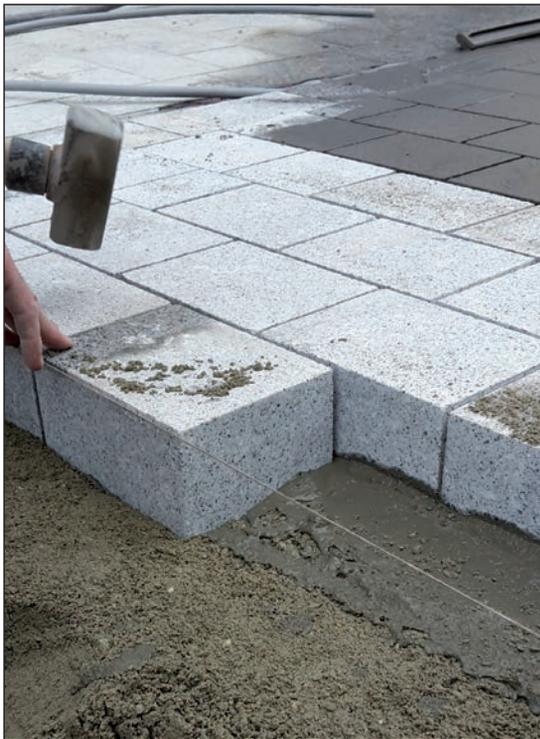


Figure 4.23 – Mise en œuvre de pavés en pierre naturelle sciés avec application d'une couche d'adhérence entre la couche de pose et le pavé

Chapitre 5

Entretien et réparation des revêtements modulaires en pierre naturelle

5.1 Généralités

Pour un rendement optimal de l'investissement, un entretien régulier des revêtements en pierre naturelle est nécessaire, comme pour tous les revêtements routiers. De plus, si le revêtement n'est pas entretenu préventivement sur une base régulière, il subira inévitablement des dégradations à plus long terme.

Une bonne gestion du réseau routier consiste donc aussi à détecter à temps les défauts, à contrôler la gravité des dégradations et surtout à déterminer la cause des défauts pour définir une méthode de réparation adéquate, soit provisoire, soit définitive.

Entretenir à temps et effectuer de petites interventions permet parfois d'éviter que les dégradations ne s'étendent et qu'une réfection complète devienne nécessaire. Malheureusement, dans la pratique, cet entretien préventif est souvent négligé car il semble à court terme assez cher et chronophage. Pourtant, à moyen ou long terme, il peut s'avérer très rentable, s'il permet de postposer la reconstruction.

On distingue les formes d'entretien suivantes:

- le **nettoyage** du revêtement, nécessaire pour pouvoir garantir la propreté de l'espace public;
- la **maîtrise des mauvaises herbes** pour garantir le confort et la sécurité des usagers de la route et/ou l'aspect esthétique du revêtement;
- l'**entretien préventif**, qui a pour but de maintenir le niveau de service du revêtement;
- l'**entretien curatif**, effectué quand les dégradations ou les défauts sont tels que des réparations locales sont nécessaires, ou qu'il faut procéder à la réfection complète de la chaussée (ou d'une partie de celle-ci).

Le nettoyage du revêtement comprend l'ensemble des mesures généralement nécessaires pour garder le revêtement propre. Cet entretien a pour but de garantir le confort des usagers (et des riverains), la qualité hygiénique et la sécurité. La gestion des mauvaises herbes peut être considérée comme un cas particulier de «nettoyage» pour combattre la végétation indésirable.

Un entretien préventif est réalisé pour maintenir un revêtement en bon état de fonctionnement et pour conserver le niveau de service de la chaussée. Idéalement, un entretien de ce type se fait périodiquement ou est planifié. Pour ce faire, il est nécessaire de définir ou de se tenir à une stratégie, entre autres en ce qui concerne l'inspection du revêtement, la fréquence nécessaire, le niveau d'intervention et les priorités, ainsi que le planning des mesures. Dans le cas de dégradations locales (p.ex. affaissement local), il peut s'agir de l'inspection et du remplissage des joints ou du remplacement du revêtement (pavés et couche de pose).

Un entretien curatif consiste en des travaux de réparation en cas de défauts locaux ou plus étendus qui compromettent le fonctionnement du revêtement puisqu'ils menacent la sécurité de l'utilisateur, le confort d'utilisation des riverains et la durabilité des bâtiments adjacents. Des dégradations de ce type requièrent une intervention rapide, parfois urgente et provisoire pour endiguer le risque. Ces réparations provisoires sont généralement suivies de la planification de plus gros travaux d'entretien, qui peuvent aboutir à la réfection complète de la structure routière (fondation comprise) sur une certaine zone ou partie de la route.

Avant d'intervenir (préventivement et/ou curativement), il est crucial de rechercher les causes des dégradations, pour en éviter d'autres. Les défauts et dégradations aux revêtements modulaires en pierre naturelle sont généralement dus à l'une ou l'autre des causes suivantes:

- **revêtement inapproprié pour l'utilisation en question:** non-respect du domaine d'application, par exemple en fonction de la charge de trafic;
- **conception imparfaite** (voir chapitre 3): principes de base non respectés, mauvais choix de matériaux, incompatibilité entre les couches, pas de drainage, etc.;
- **exécution imparfaite** (voir chapitre 4): matériaux qui ne satisfont pas aux exigences du cahier des charges type ou du cahier spécial des charges, compactage insuffisant, négligence lors du sciage/de la coupe des pavés, durée d'ouvrabilité des matériaux liés au ciment non respectée, etc.;
- **contrôle imparfait**, voire absence de contrôle.

Il importe donc de respecter les règles de bonne pratique pour la conception et l'exécution, telles que décrites entre autres dans cette publication, puis de réaliser un entretien régulier et adapté. Dans les lignes qui suivent, nous décrivons d'abord plus en détail les principales dégradations des revêtements modulaires en pierre naturelle et leurs causes probables. Nous nous intéressons ensuite de plus près aux différentes opérations d'entretien et de réparation de ces revêtements.

5.2 Principales dégradations et causes

Les principales dégradations des revêtements modulaires en pierre naturelle appartiennent aux groupes suivants:

- dégradation d'un élément: éléments endommagés, écaillage, éclatement, usure, etc.;
- perte de cohésion structurelle du revêtement: largeur de joint inapproprié, glissement et/ou pivotage d'éléments, cassure d'éléments;
- fissures ou fentes dans le mortier de jointoiment lié;
- déformation: défaut d'uni transversal et longitudinal, inégalités locales ou affaissements locaux.

5.2.1 Dégradation d'un élément



Figure 5.1 – Exemple d'éclatement ou de désintégration de certains types de pierre naturelle en raison des conditions climatiques et/ou de la charge de trafic

Pour cette forme de dégradation, il s'agit souvent de dégâts à la surface (texture) de l'élément dus à l'usure ou à l'écaillage, par exemple sous l'influence de cycles de gel-dégel en présence ou non de sels de déverglaçage ou des charges de trafic plus élevées que prévu.

Dès le début du projet, il y a lieu de prendre en compte que des éléments peuvent s'abîmer et devront à terme être remplacés. Pour la pierre naturelle, il est souvent très difficile de retrouver exactement les éléments avec un aspect identique. Lors de l'exécution, il peut donc être utile de garder des matériaux de réserve et de les laisser vieillir dans les mêmes conditions que le revêtement même.

Pour prévenir une telle dégradation (qui est aussi partiellement liée au type de pierre naturelle, voir § 2.1.5 dans le chapitre 2), il est primordial de choisir des matériaux de qualité qui satisfont à des critères importants tels que la résistance à l'usure et aux intempéries pour l'utilisation visée.

Une deuxième forme de dégradation de surface est l'effritement aux coins et aux bords, qui survient par exemple en manipulant les éléments sur le chantier ou parce que les éléments ne sont pas adaptés à l'utilisation en question.

Cette dégradation ne peut certainement pas être confondue avec des pierres *tambourinées*, qui sont volontairement vieillis artificiellement aux coins et aux bords. Pour des éléments réutilisés aussi, il va falloir appréhender autrement l'évaluation de la surface.

Enfin, une cassure des éléments mêmes peut se produire par contact local (ponctuel) entre les éléments, si le revêtement a été mis en place avec des joints trop étroits. Typiquement, une largeur de joint minimale de 8-10 mm est nécessaire pour pouvoir remplir les joints correctement tout en garantissant la stabilité nécessaire (voir aussi chapitre 3).

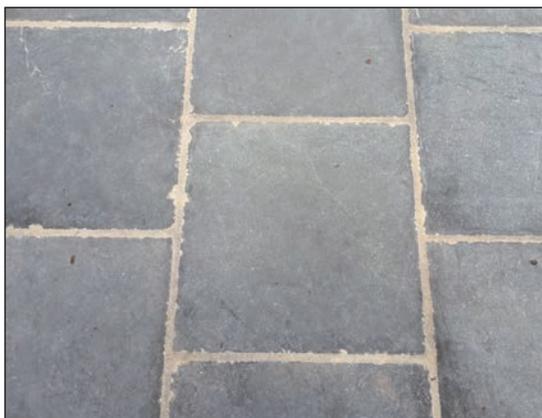


Figure 5.2 – Exemple d'éléments en pierre naturelle *tambourinés*, qui ont été vieillis volontairement et ne peuvent donc pas être considérés comme des dégradés!



Figure 5.3 – Exemple de cassure ou d'effritement aux bords des pavés, à cause de joints trop étroits

5.2.2 Perte de cohésion structurelle

Un deuxième groupe important de dégradations est lié à la perte de cohésion dans le revêtement. Cela peut avoir un rapport avec une largeur de joint excessive, probablement due à la qualité de l'exécution (p.ex. remplissage des joints incorrect) ou à de trop grands écarts dimensionnels des éléments. L'appareillage aussi a un impact important sur la stabilité du revêtement, comme déjà abordé au § 3.3.7 du chapitre 3.

La perte de cohésion peut aussi être due au déplacement ou au détachement des éléments mêmes, par exemple en raison de joints trop larges, d'un appareillage inadapté ou d'une finition non soignée aux bords et autour des points singuliers. Pour la finition des bords, il est très important de ne pas utiliser de pavés sciés dont la taille est inférieure à un demi-pavé afin de garantir la stabilité du revêtement.

Enfin et certainement pour une exécution non liée, un bon contrebutage est indispensable pour maintenir ensemble les éléments et garantir la largeur de joint et la stabilité du revêtement à plus long terme. Ceci s'applique aussi bien aux extrémités qu'aux bords du revêtement en pierre naturelle.



Figure 5.4 – Exemples de perte de cohésion structurelle du revêtement due à des joints trop larges, à un appareillage inadapté, à l'absence de contrebutage et/ou à une finition non soignée aux bords et autour des points singuliers

5.2.3 Fissures ou dégradations dans des joints liés (au ciment)

Un phénomène de dégradation courant est la présence de fissures dans des joints liés. Quand un jointolement lié se détache d'un élément, cela aboutira en général progressivement à un effritement du joint sous la charge de trafic et il faut donc intervenir à temps pour résoudre ce problème (voir infra dans le § 5.5.1). Souvent, cela est aussi lié à des contraintes et mouvements thermiques excessifs dans le cas d'une conception inappropriée des joints de dilatation et/ou de transitions de surfaces plus grandes vers des surfaces plus petites.

Les causes peuvent cependant être multiples – d’une conception inadaptée à une exécution peu soignée –, et sont souvent difficiles à détecter par la suite:

- qualité insuffisante du produit par rapport à la charge de trafic;
- appareillage inadapté;
- profondeur de joint insuffisante;
- non-respect du rapport eau/ciment;
- exécution dans de mauvaises conditions climatiques;
- ouverture au trafic trop rapide;
- compactage insuffisant de la couche de pose;
- incompatibilité avec le matériau de la couche de pose;
- impuretés lors du remplissage des joints;
- problèmes avec les joints de dilatation;
- etc.



Figure 5.5 – Des fissures dans des joints liés au ciment sont une dégradation fréquente dont les causes peuvent être multiples

5.2.4 Déformation du revêtement

5.2.4.1 Défaut d’uni transversal

Un défaut d’uni transversal – principalement orniérage – dans des revêtements en pierre naturelle, est en général dû à:

- des défauts dans la **fondation** dont la portance est insuffisante en raison par exemple d’un sous-dimensionnement ou d’un mauvais compactage;
- des défauts dans la **couche de pose** dus à une mauvaise qualité des matériaux utilisés ou d’une épaisseur trop importante, ce qui peut entraîner des tassements.

Lors de la réparation de telles dégradations, il est donc important de d’abord éliminer les causes, qui peuvent se situer au niveau de la fondation ou de la couche de pose, ou éventuellement être dues à une incompatibilité de différentes couches et matériaux. Un exemple de ce dernier cas est «l’effet de pompage», souvent causé par le fait qu’une fondation imperméable (p.ex. béton maigre) est combinée à une couche de pose et des joints de sable/gravillons non liés et que le drainage est dès lors insuffisant. L’eau qui s’est infiltrée via les joints reste sur l’interface entre la couche de pose et la fondation, où elle engendre l’érosion de la fondation sous l’influence du trafic («pompage») et l’expulsion de fines particules de la couche de pose – avec toutes les conséquences que cela entraîne.



Figure 5.6 – Exemples d'ornièrage et «effets de pompage» dans un revêtement en pierre naturelle

5.2.4.2 Défaut d'uni longitudinal

Outre un défaut d'uni transversal, un revêtement en pierre naturelle peut aussi présenter un défaut d'uni longitudinal dont les causes possibles sont des tranchées transversales mal comblées et/ou mal compactées, des différences de dilatation thermique avec les contraintes correspondantes en cas de fondations liées, des raccords avec d'autres revêtements ou un choix irrfléchi d'emplacement des joints de dilatation. Pour le raccord avec d'autres revêtements, nous renvoyons au § 3.3.13 dans le chapitre 3. Une conception et une exécution correctes des joints de dilatation dans les revêtements en pierre naturelle liés sont décrites aux chapitres 3 et 4.

Afin de maîtriser les fissures de retrait dans une fondations liée au ciment (qui peuvent remonter en surface: fissures de réflexion) il y a lieu de protéger suffisamment la couche de fondation contre la dessiccation et/ou d'entailler les joints dans le béton frais à une distance suffisamment courte l'un de l'autre (≤ 5 m) ou de les scier dans le béton durci. Dans ce cas, il est important que les joints de dilatation dans le revêtement coïncident avec les joints de retrait dans la fondation.



Figure 5.7 – Exemples de défaut d'uni longitudinal et de dégradation, à imputer aux mouvements thermiques et/ou au raccord à d'autres revêtements

5.2.4.3 Déformations locales

Des déformations locales telles que des inégalités et des affaissements locaux sont souvent un signe d'erreurs dans l'exécution ou la mise en œuvre d'un revêtement en pierre naturelle. S'il s'agit d'un problème plus général, les dégradations sont peut-être davantage à imputer à une mauvaise conception.

Des affaissements locaux peuvent être dus à des défauts dans la fondation suite à un mauvais compactage ou à un défaut d'uni, à un contrebutage imparfait (p.ex., sans épaulement en béton maigre), à une accumulation d'eau dans la chaussée en cas de drainage insuffisant ou inexistant (voir infra), à une finition peu soignée autour des points singuliers ou à une incompatibilité des couches constitutives.



Figure 5.8 – Exemples de déformations locales dues à une exécution peu soignée et/ou à des défauts de conception

À cet égard, il est extrêmement important de choisir un concept cohérent pour le revêtement, comme décrit clairement au § 3.3.9 du chapitre 3:

- soit un concept souple avec généralement une couche de pose en sable ou gravillons et des joints non liés sur une fondation perméable, de sorte que l'eau ne puisse pas stagner dans la structure de chaussée;
- soit un concept rigide avec des joints et une couche de pose liés et une fondation (plus) rigide. Le jointoiement est crucial pour assurer que le revêtement fonctionne de manière monolithique. Si ce type de pose est généralement imperméable, la drainabilité de la fondation doit être cependant toujours assurée.

Quand des joints de mortier rigides par exemple sont combinés avec une couche de pose souple en sable, des tassements différentiels de matériaux engendreront très rapidement des problèmes de détachement ou d'effritement du jointoiement, voire de cassure d'éléments.

L'inconvénient du mode de pose rigide est que leur réparation est plus compliquée lorsque des dégradations surviennent. Il est alors nécessaire d'assurer une bonne adhérence entre les différentes couches.



Figure 5.9 – Réparation plus difficile lors de l'exécution selon le mode de pose rigide

5.2.5 Mauvaise évacuation des eaux et/ou mauvais drainage

Enfin, nombre des dégradations mentionnées ci-dessus sont liées à une mauvaise évacuation des eaux et/ou à un mauvais drainage du revêtement. Dans le cas d'un pavage classique, il faut prévoir une bonne évacuation des eaux pour éviter des dégradations: d'une part à la surface, en prévoyant une pente transversale suffisante pour évacuer aussi rapidement que possible l'eau vers les avaloirs et les caniveaux; d'autre part, dans la structure même, pour évacuer de la couche de pose et de la fondation l'eau qui s'est tout de même infiltrée via les joints. La conception correcte des dispositifs d'évacuation des eaux est décrite au § 3.3.14 du chapitre 3.



Figure 5.10 – Exemples de dégradation due à une mauvaise évacuation des eaux du revêtement en pierre naturelle

5.3 Nettoyage

Le nettoyage des revêtements en pierre naturelle peut consister à balayer, brosser, projeter de l'eau sous haute pression ou à appliquer un autre traitement, nécessaire en raison des conditions d'exposition, du type de joint ou de l'aspect souhaité du revêtement. Du chewing-gum par exemple est une pollution spécifique qui requiert pour l'enlever des techniques adaptées telles que de la vapeur, de l'eau chaude sous haute pression ou de la projection de glace. Il est entendu que le revêtement ou la pierre naturelle même ne peut subir aucun dommage lors d'un tel traitement.



Figure 5.11 – Nettoyage de pierre naturelle

Dès la phase de conception (chapitre 3), il importe de prendre en compte l'entretien envisagé. Ainsi, il est préférable de ne pas jointoyer au gravillon une place très fréquentée par des piétons où passe chaque jour une balayeuse. Il est très important que le choix des matériaux soit dès la conception adapté à l'utilisation du revêtement et aux restrictions que son entretien impose: intensité d'utilisation et entretien régulier et intensif requis ou pas (p.ex. place en plein centre avec marché hebdomadaire), impact

du type de joint (non lié ou lié) sur le développement des mauvaises herbes et maîtrise des mauvaises herbes ou désherbage, influence des opérations de nettoyage sur les matériaux utilisés (pierre naturelle et joints) et, si possible, adaptation des produits de nettoyage aux matériaux présents sur place (voir aussi la NIT 197 [51]).

Enfin, il est aussi indiqué de vérifier la sensibilité aux salissures des produits en pierre naturelle (voir aussi § 2.1.4 dans le chapitre 2 et § 3.3.5 dans le chapitre 3) et plus particulièrement de ne pas utiliser de types de pavé trop poreux à des endroits à risque de salissures très élevé. Cela demanderait trop d'énergie (pression, chaleur) pour éliminer les éléments salissants ayant pénétré dans les pierres à porosité ouverte élevée.

D'autre part, pour réduire la sensibilité aux salissures des revêtements en pierre naturelle, un traitement de surface (p.ex. avec des silanes, des siloxanes ou du téflon) peut être appliqué, qui ralentit l'infiltration de l'huile ou d'autres substances graisseuses dans les vides de la pierre. L'efficacité de ce traitement varie par contre énormément en fonction du produit utilisé et de la nature et de l'intensité du trafic sur le revêtement (voir la NIT 140 [52]). Dans la plupart des cas, une répétition périodique s'avère nécessaire.

5.4 Maîtrise des mauvaises herbes

5.4.1 Les mauvaises herbes sur les revêtements modulaires en pierre naturelle

La prévention et la maîtrise des mauvaises herbes sur les revêtements reste un thème d'actualité, d'autant plus que l'usage d'herbicides dans les espaces publics en Belgique est depuis peu très restreint, voire totalement interdit, comme le précise le *Code de bonne pratique pour la gestion et la maîtrise des mauvaises herbes sur les revêtements modulaires par voie non chimique* – R 84/12 [43]. Étant donné que les joints sont les endroits les plus sensibles à l'accumulation de saletés et à l'apparition des mauvaises herbes, ce problème se pose surtout sur les revêtements modulaires tels que les pavages en pierre naturelle ayant parfois des joints larges, non liés. Aussi, il est important d'en tenir compte lors de la conception et de l'exécution de revêtements modulaires en pierre naturelle ou de faire certains choix en fonction d'un risque ultérieur d'apparition de mauvaises herbes.



Figure 5.12 – Mauvaises herbes

Une étude a démontré qu'il n'existe pas de lien évident entre le **type de matériau** (p.ex. béton, terre cuite ou pierre naturelle) des pavés (à largeur de joint comparable) d'une part et l'apparition des mauvaises herbes d'autre part. Le **type de pavé** (format, forme, dimensions) détermine toutefois la largeur de joint et le pourcentage de joints dans la surface du revêtement. De cette façon, le type de pavé (ainsi que le matériau de jointolement utilisé) peut exercer une influence sur l'apparition des mauvaises herbes. Ci-dessous sont décrits les points d'attention principaux relatifs à la gestion des mauvaises herbes sur les revêtements en pierre naturelle ainsi que le désherbage qui doit avoir lieu si nécessaire. Pour plus de détails, il est fait référence à la publication *Code de bonne pratique pour la gestion et la maîtrise des mauvaises herbes sur les revêtements modulaires par voie non chimique* – R 84/12 [43] du CRR.

5.4.2 Points importants lors de la conception

Il s'agit en premier lieu de limiter au maximum le risque d'apparition des mauvaises herbes, pour éviter des problèmes a posteriori. Ainsi, la circulation piétonne, cyclable ou motorisée est le premier et peut-être le meilleur moyen pour prévenir l'apparition des mauvaises herbes. Le revêtement doit dès lors être adapté à l'usage escompté vu que l'intensité d'utilisation sera aussi déterminante pour le risque d'apparition des mauvaises herbes à un endroit donné (voir figure 5.13 à gauche). La gestion des mauvaises herbes est donc un point d'attention important, surtout pour les revêtements modulaires de catégorie de trafic III ou IV (voir tableau 3.2). Le risque d'apparition de mauvaises herbes sur un parking de 200 m² avec moins de dix véhicules entrant et sortant par jour sera si élevé qu'il est indiqué de prendre des mesures supplémentaires pour prévenir l'apparition des mauvaises herbes. Une alternative peut consister à opter pour un aspect plus vert (p.ex. des joints «verts», voir figure 5.13 à droite).

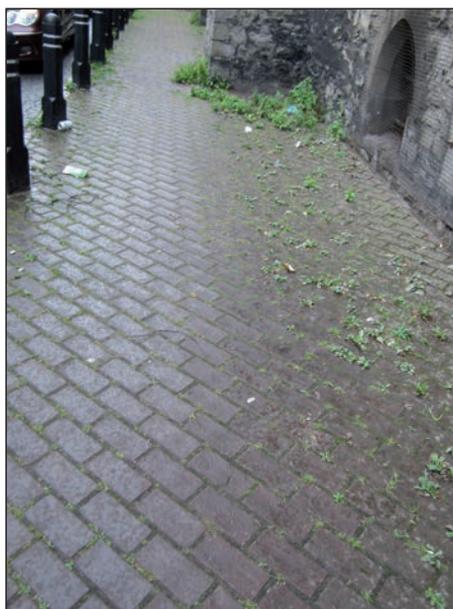


Figure 5.13 – Influence de l'intensité d'utilisation sur la croissance des mauvaises herbes (à gauche) et gestion des mauvaises herbes adaptée (à droite)

En outre, la pollution des joints avec de la matière organique (terre, feuilles, etc.) doit être évitée autant que possible, car cela constitue un substrat idéal pour la croissance des mauvaises herbes. A cet égard, les zones vertes adjacentes ou un environnement boisé comportent un risque accru d'apparition des mauvaises herbes. Il est possible d'intervenir en adaptant le jointolement, en prévoyant une séparation physique entre la zone verte et le revêtement, et en prévoyant un entretien régulier des joints souples par rejointolement.

Des problèmes de croissance indésirable de la végétation peuvent survenir rapidement aux endroits à haut risque d'apparition des mauvaises herbes (zone verte adjacente, peu d'utilisation intensive, etc.),

surtout dans le cas d'un concept flexible avec des **matériaux non liés**, que ce soit pour le jointoiement ou pour la couche de pose. Il peut alors être indiqué d'adapter les choix pour ces matériaux (voir § 5.4.3) et/ou d'en tenir compte pour l'entretien nécessaire a posteriori.

Enfin, dès la conception du revêtement, il faut prendre en compte la future gestion, pour veiller au passage aisé des machines destinées à la lutte non chimique contre les mauvaises herbes:

- il faut tenir compte de la largeur de travail des machines (d'habitude entre 1,2 et 1,6 m): distance minimale entre les obstacles, le moins d'obstacles possible ou des obstacles amovibles, etc.;
- il faut créer le moins possible de différences de niveau, créer des transitions aisées entre la chaussée et la piste cyclable ou le trottoir, utiliser des caniveaux arrondis et des bordures avec angles biseautés, etc.



Figure 5.14 – Attention dès la conception pour un entretien mécanique ultérieur: distance suffisante entre les obstacles ou obstacles amovibles, passage aisé entre la chaussée et la piste cyclable ou le trottoir, filet d'eau entre le parking et la chaussée, etc.

5.4.3 Choix du jointoiement et de la couche de pose

Pour des pavages mis en œuvre selon le concept «souple» à des endroits à haut risque d'apparition des mauvaises herbes (environnement boisé, peu d'usage intensif et joints larges, non liés), ce risque doit être pris en compte lors du choix du type de jointoiement et de la couche de pose.

Si les règles pour la couche de pose sont suivies et que l'on opte pour une couche de pose ouverte (gros granulats d/D avec $d > 0$, p.ex. gravillons 2/4 ou 2/6,3) ou pour une couche de pose avec une quantité limitée de matériau fin, les mauvaises herbes pousseront moins vite qu'avec une couche de pose plus fermée (voir figure 5.15).

Pour le choix du jointoiment, il faut tenir compte de la largeur des joints. La granulométrie maximale est de 1 mm pour des joints étroits ou de 0,8 fois la largeur de joint pour des joints plus larges (10-15 mm), avec une fraction fine (< 63 µm) limitée. La limitation de la teneur en particules fines à maximum 4 %, voire 3 % a aussi un impact positif sur le risque d'apparition des mauvaises herbes.



Figure 5.15 – Influence du matériau de couche de pose sur l'apparition des mauvaises herbes dans un jointoiment de calcaire pollué 0/6,3 – A gauche: couche de pose ouverte de porphyre 2/6,3; à droite: couche de pose fermée de calcaire 0/6,3)

Dans le cas de joints et/ou d'ouvertures encore plus larges à des endroits où le risque d'apparition des mauvaises herbes est plus élevé, l'application de matériaux de jointoiment innovants, mais suffisamment drainants tels que le sable grossier 0/4 enrichi en sel ou le sable lié à la résine époxy peut être indiquée pour prévenir l'apparition des mauvaises herbes dans les joints larges, perméables. Une alternative peut consister à appliquer le concept rigide, avec des matériaux de jointoiment imperméables, totalement liés.

5.4.4 Désherbage non chimique

Les alternatives les plus courantes de techniques de désherbage non chimiques (brossage, brûlage, traitement à l'air chaud, traitement à la vapeur, etc.), ainsi que leur applicabilité, leur efficacité et leur utilisation intégrée sont décrites en détail au chapitre 4 du *Code de bonne pratique pour la gestion et la maîtrise des mauvaises herbes sur les revêtements modulaires par voie non chimique* – R 84/12 [43].

Pour le choix de la technique, la nature du revêtement jouera aussi un rôle. Par exemple, les brosses de désherbage en métal ne sont pas recommandées sur des revêtements en pierre naturelle à joints larges (> 6 mm) non liés vu le risque d'enlever le matériau de jointoiment non lié en brossant. Cette technique n'est pas davantage applicable sur la pierre naturelle sensible aux éraflures. En raison du risque de décoloration, le brûlage est aussi à déconseiller sur des revêtements polis en pierre naturelle.



Figure 5.16 – Différentes techniques de désherbage non chimiques

Pour les revêtements liés en pierre naturelle, il suffit généralement de balayer régulièrement la surface pour en enlever les mauvaises herbes et autres salissures. Pour les revêtements modulaires avec joints non liés par contre, en fonction de la situation initiale, de la flore présente et du risque d'apparition des mauvaises herbes, différentes techniques doivent être combinées/intégrées pour obtenir de manière durable, non chimique l'aspect esthétique voulu.

5.5 Entretien préventif

L'entretien préventif est nécessaire pour maintenir la fonctionnalité et le niveau de service du revêtement, ainsi que pour garantir le confort et la sécurité de l'utilisateur dans le temps. En règle générale, les revêtements en pierre naturelle doivent être inspectés régulièrement pour pouvoir programmer des mesures d'entretien. La fréquence des inspections dépend de la structure (voir tableau 3.4) et de la charge de trafic (plus particulièrement du type et de l'intensité du trafic). Un complément d'information peut être trouvé dans la méthode de mesure *Inspection visuelle pour la gestion du réseau routier - MF 89/15* [53], notamment aussi pour les revêtements modulaires. Pour les revêtements modulaires en pierre naturelle, au moins deux inspections visuelles doivent être réalisées chaque année.

L'entretien préventif vise à combattre ou à prévenir une dégradation précipitée du revêtement. Il peut consister à :

- remplir les joints vides;
- réparer des affaissements locaux;
- remplacer des éléments endommagés;
- rétablir les caractéristiques de surface, et en particulier la rugosité du revêtement (p.ex. dans le cas de dallages).

5.5.1 Entretien des joints

Si des joints sont endommagés sur toute leur profondeur, il convient d'enlever et de remplacer complètement le matériau de jointoiment, jusqu'au niveau de la couche de pose. S'ils ne sont que partiellement évidés/creusés, il ne faut pas remplacer intégralement le jointoiment, mais la profondeur de la partie réparée doit être au moins égale à la moitié de l'épaisseur de l'élément (pavé ou dalle).



Figure 5.17 – Dégradation locale aux joints dans un revêtement modulaire en pierre naturelle (Photo: Febenat)

5.5.1.1 Joints non liés

En cas d'expulsion de sable ou de gravillons des joints, il est important d'en rechercher les causes. Cette perte est probablement liée à la charge de trafic ou à l'intensité du nettoyage (fréquence plus élevée ou pression d'aspiration). L'afflux d'eau, associé ou non avec des effets de pompage (voir § 5.2.4.1), peut également jouer un rôle.

Si la qualité de l'ancien matériau de jointoiment en est la cause, ce matériau doit bien entendu être remplacé par du nouveau sable ou par des gravillons de jointoiment de qualité appropriée (voir § 2.4.2 dans le chapitre 2) et/ou par d'autres matériaux de jointoiment compatible avec la structure en place et la charge de trafic réelle (p.ex. sable polymère ou mortier époxy).

5.5.1.2 Matériaux liés

Dans le cas d'un mortier de jointoiment lié, il est primordial d'entretenir à temps et de résoudre rapidement les problèmes locaux pour prévenir des dégradations encore plus graves à long terme. Il est conseillé de contrôler les joints régulièrement – *tous les six mois et au moins une fois après l'hiver* – et de rejointoyer et/ou de rectifier si nécessaire. Dans ce cadre, le joint vide doit être suffisamment nettoyé (par soufflage et/ou avec de l'eau sous haute pression) avant d'appliquer le nouveau mortier afin d'obtenir une bonne adhérence entre le nouveau et l'ancien matériau ainsi qu'avec les faces latérales des éléments.

En l'absence d'entretien, des dégradations et des fissures éventuelles se propageront avec le temps et finiront par causer des mouvements au droit des éléments.

5.5.2 Remplacement d'éléments en pierre naturelle

Il est important de remplacer rapidement des éléments détachés, cassés ou effrités pour éviter des infiltrations d'eau, qui sont fatales à la stabilité du revêtement à plus long terme.

Le type et la forme des éléments doivent bien entendu être pris en considération. Pour des réparations urgentes et provisoires, on peut utiliser des produits bitumineux ou des matériaux liés au ciment (mortier de réparation, béton, etc.), mais ces produits n'offrent pas de solution à plus long terme.



Figure 5.18 – Réparer à temps les dégradations locales des revêtements modulaires en pierre naturelle en remplaçant des éléments détériorés (Photos: Febenat)

5.5.3 Traitement de surface in situ

Quand les caractéristiques de surface, et surtout la rugosité d'un revêtement en pierre naturelle, ne satisfont pas (plus), il est possible d'améliorer la texture de surface in situ à l'aide de diverses techniques telles que le bouchardage, le flammage ou le grenailage. Bien sûr, il est indiqué d'en tenir compte dès la conception et par exemple d'éviter des pierres peu résistantes au polissage aux endroits à trafic dense.

5.6 Entretien curatif

Des mesures d'entretien curatif peuvent être nécessaires dans le cas de dégradations (souvent de plus grande ampleur) à la suite:

- de l'absence d'entretien préventif (ou d'un entretien **insuffisant**);
- d'un sous-dimensionnement de la structure de chaussée par rapport à la charge de trafic;
- de dégradations locales avec perte de matériau (p.ex. effet de pompage).

Il peut s'agir de la réparation du revêtement: l'ensemble des éléments et la couche de pose, voire jusqu'à la fondation et/ou la sous-fondation. L'ampleur et surtout aussi la cause des dégradations, ainsi que les particularités du projet (*surtout le mode de pavage et la nature des matériaux utilisés*) détermineront le type et l'ampleur de l'entretien curatif. Cela peut par exemple mener à la réfection des zones qui présentent des instabilités dans la structure (affaissement dans la couche de pose, défaut dans la fondation, etc.) ou au repavage des zones qui avaient déjà subi des réparations provisoires.

Dans les deux cas, il est extrêmement important de d'abord rechercher les causes des dégradations (voir § 5.2) et de les éliminer. En outre, lors de la conception et de l'exécution de la réparation, les règles de base pour les nouveaux revêtements en pierre naturelle (voir chapitres 3 et 4) doivent être respectées.

Les travaux réalisés par les concessionnaires de réseau constituent un cas particulier. Quand un revêtement doit être partiellement retiré puis remis en place pour travailler sur les impétrants, les mêmes règles de bonne pratique (compactage, qualité de la couche de pose et remplissage des joints) doivent être respectées et l'attention nécessaire à la réparation doit être apportée, pour éviter par la suite des dégradations prématurées.

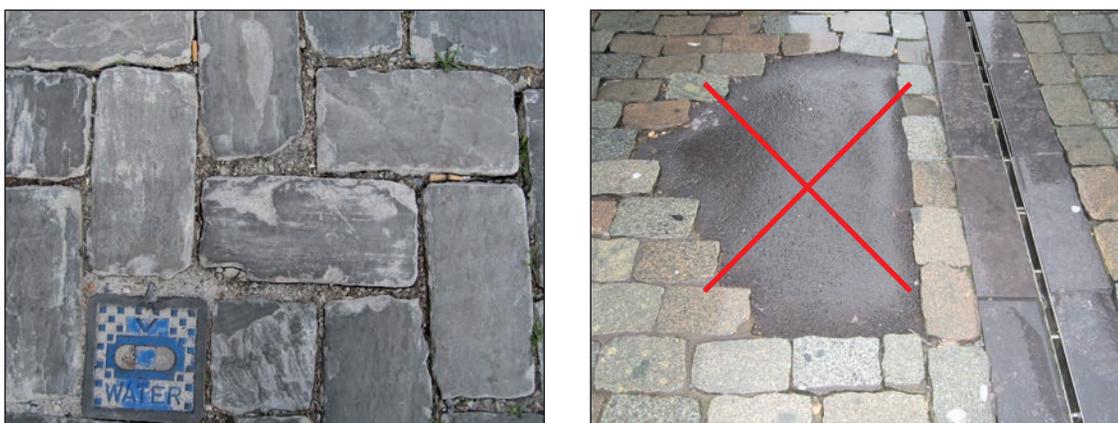


Figure 5.19 – En cas de travaux aux impétrants, les règles de base pour les revêtements en pierre naturelle doivent être également respectées

Dans le pire des cas, un entretien curatif peut aussi consister en une reconstruction (complète ou partielle) ou en une rénovation complète du revêtement en pierre naturelle, si les dégradations sont trop avancées.

5.7 Reconstruction ou rénovation

Pour la reconstruction d'un revêtement en pierre naturelle, il peut s'agir:

- **d'une reconstruction partielle:** reconstruction d'une zone dans le revêtement sur toute la largeur de la route (p. ex. en cas de réaménagement de l'espace public) ou reconstruction de la structure de chaussée dans son intégralité – jusqu'à la fondation – sur une largeur limitée du revêtement (p.ex. travaux aux impétrants, voir ci-dessus);
- **d'une rénovation complète d'une structure de chaussée avec éléments en pierre naturelle.**



Figure 5.20 – Réutilisation d'anciens pavés en cas de reconstruction complète d'un pavage en pierre naturelle

Avant de planifier des travaux pour la reconstruction complète ou la rénovation d'un revêtement en pierre naturelle (que ce soit à l'identique ou pas), les phénomènes de dégradation et les causes des dégradations doivent bien entendu être analysés en profondeur et, le cas échéant, la structure de chaussée doit être adaptée afin d'obtenir un nouveau revêtement durable.

Dans certains cas, la réfection peut aussi se faire en réutilisant des éléments enlevés sur place. Les matériaux provenant de structures mises en œuvre selon le concept «flexible» seront plus faciles à récupérer après démolition. Dans le cas de revêtements modulaires liés, cela est bien évidemment beaucoup plus difficile, demandera plus de travail (tri, nettoyage des éléments, etc.) et entraînera des pertes de matériau. Un traitement curatif peut être nécessaire (p.ex. sciage de la surface de contact, flammage de la surface, etc.) avant de pouvoir réutiliser les pavés.

Actuellement, de plus en plus de produits **réutilisés** en pierre naturelle pour travaux routiers arrivent sur le marché. Cette tendance va probablement se poursuivre dans le contexte actuel d'une économie circulaire. Toutefois, le statut de ces matériaux reste incertain ou inexistant, étant donné que les normes produits ne sont pas d'application sur un produit qui présente déjà une certaine usure, qui a déjà subi d'éventuelles phases d'entretien ou de démontage. En outre, les essais prescrits par les normes ne sont parfois pas réalisables pour différentes raisons, propres à ces matériaux réutilisés. Toutefois, pour le contrôle de ces produits recyclés, il n'existe pas encore de protocole de contrôle généralement accepté ou officiel avec lequel on puisse garantir le même niveau de qualité qu'avec des éléments neufs.



Figure 5.21 – Pavage en pierre naturelle avant, pendant et après rénovation avec réutilisation de pavés en granit suédois



Bibliographie

- [1] **de Barquin, F.; Nicaise, D.; Bams, V. (2006)**
Pierres naturelles.
 Bruxelles : Centre Scientifique et Technique de la Construction (CSTC). (Note d'Information Technique CSTC (NIT), 228). NIT interactive et évolutive. Disponible en ligne www.cstc.be/homepage/index.cfm?cat=publications&sub=tv-nit&pag=228&lang=fr, dernière consultation 06/09/2017.
- [2] **Organisme impartial de contrôle de produits pour la construction; Belgian Construction Certification Association (2005)**
Classification des roches.
 Zellik; Bruxelles : COPRO; BCCA. (Prescriptions techniques (PTV), 844). Version 1.1., disponible en ligne www.copro.eu/fr/document/ptv-844-10-classification-des-roches, dernière consultation 06/09/2017.
- [3] **Bureau de Normalisation (2008)**
NBN EN 12440 – Pierres naturelles : critères de dénomination.
- [4] **Cohen, K.M.; Finney, S.C.; Gibbard, P.L. & Fan, J.-X. (2017)**
The ICS International Chronostratigraphic Chart.
 Episodes 36: 199-204.
 Disponible en ligne www.stratigraphy.org/index.php/ics-chart-timescale, dernière consultation 06/09/2017.
- [5] **de Barquin, F. (2001)**
La pierre bleue de Belgique dite petit granit d'âge géologique tournaisien.
 Bruxelles : Centre Scientifique et Technique de la Construction (CSTC). (Note d'Information Technique CSTC (NIT), 220).
- [6] **Bureau de Normalisation (2013)**
NBN EN 1341 – Dalles de pierre naturelle pour le pavage extérieur : exigences et méthodes d'essai.
- [7] **Bureau de Normalisation (2013)**
NBN EN 1342 – Pavés de pierre naturelle pour le pavage extérieur : exigences et méthodes d'essai.
- [8] **Bureau de Normalisation (2013)**
NBN EN 1343 – Bordures de pierre naturelle pour le pavage extérieur : exigences et méthodes d'essai.
- [9] **Organisme impartial de contrôle de produits pour la construction (2016)**
Dalles de pierre naturelle pour pavage extérieur.
 Zellik : COPRO. (Prescriptions techniques (PTV), 841). Version 1.11 du 2016-11-30, non publiée, en cours de révision.
 Version actuelle:
Organisme impartial de contrôle de produits pour la construction (2005)
Dalles de pierre naturelle pour pavage extérieur.
 Zellik : COPRO. (Prescriptions techniques (PTV), 841). Version 1.0, disponible en ligne www.copro.eu/fr/document/ptv-841-10-dalles-en-pierre-naturelle-pour-pavage-exterieur, dernière consultation 06/09/2017.

- [10] Organisme impartial de contrôle de produits pour la construction (2016)**
Pavés de pierre naturelle pour pavage extérieur.
Zellik : COPRO. (Prescriptions techniques (PTV), 842). Version 1.14 du 2016-11-30, non publiée, en cours de révision.
Version actuelle:
Organisme impartial de contrôle de produits pour la construction (2005)
Pavés de pierre naturelle pour pavage extérieur.
Zellik : COPRO. (Prescriptions techniques (PTV), 842). Version 1.0, disponible en ligne www.copro.eu/fr/document/ptv-842-10-paves-de-pierre-naturelle-pour-pavage-exterieur, dernière consultation 06/09/2017.
- [11] Organisme impartial de contrôle de produits pour la construction (2016)**
Bordures de pierre naturelle pour pavage extérieur.
Zellik : COPRO. (Prescriptions techniques (PTV), 843). Version 1.10 du 2016-11-30, non publiée, en cours de révision.
Version actuelle:
Organisme impartial de contrôle de produits pour la construction (2005)
Bordures de pierre naturelle pour pavage extérieur.
Zellik : COPRO. (Prescriptions techniques (PTV), 843). Version 1.0, disponible en ligne www.copro.eu/fr/document/ptv-843-10-bordures-de-pierre-naturelle-pour-pavage-exterieur, dernière consultation 06/09/2017.
- [12] Vlaamse Overheid – Agentschap Wegen en Verkeer (2016)**
Standaardbestek 250 voor de wegenbouw [versie 3.1a].
Brussel : Vlaamse Overheid (AWV). Disponible en ligne <http://wegenenverkeer.be/documenten>, dernière consultation 06/09/2017.
- [13] Service Public de Wallonie – Direction Générale Opérationnelle des Routes et des Bâtiments (2012 Version 2016 consolidée)**
CCT Qualiroutes : cahier des charges-type.
Namur : Service Public de Wallonie (SPW). Disponible en ligne <http://qc.spw.wallonie.be/fr/qualiroutes/index.html>, dernière consultation 06/09/2017
- [14] Région de Bruxelles-Capitale (2015)**
CCT 2015 : cahier des charges type relatif aux voiries en Région de Bruxelles Capitale.
Bruxelles : Région de Bruxelles-Capitale. Disponible en ligne <https://mobilite-mobiliteit.brussels/sites/default/files/cct2015fr.pdf>, dernière consultation 06/09/2017.
- [15] Bureau de Normalisation (2002)**
NBN EN 12670 – Pierre naturelle : terminologie.
- [16] Bureau de Normalisation (2007)**
NBN EN 1936 – Méthodes d'essai des pierres naturelles : détermination des masses volumiques réelle et apparente et des porosités ouvertes et totale.
- [17] Bureau de Normalisation (2008)**
NBN EN 13755 – Méthodes d'essai pour pierres naturelles : détermination de l'absorption d'eau à la pression atmosphérique.
- [18] Bureau de Normalisation (1999)**
NBN EN 1925 – Méthodes d'essai pour pierres naturelles : détermination du coefficient d'absorption d'eau par capillarité.

- [19] **Bureau de Normalisation (2005)**
NBN EN 14581 – Méthodes d'essai pour pierres naturelles : détermination du coefficient linéaire de dilatation thermique.
- [20] **Bureau de Normalisation (2007)**
NBN EN 1926 – Méthodes d'essai pour pierres naturelles : détermination de la résistance à la compression uniaxiale.
- [21] **Bureau de Normalisation (2007)**
NBN EN 12372 – Méthodes d'essai pour pierres naturelles : détermination de la résistance à la flexion sous charge centrée.
- [22] **Bureau de Normalisation (2003)**
NBN EN 14231 – Méthodes d'essai pour pierres naturelles : détermination de la résistance à la glissance au moyen du pendule de frottement.
- [23] **Bureau de Normalisation (2010)**
NBN EN 12371 – Méthodes d'essai pour pierres naturelles : détermination de la résistance au gel.
- [24] **Bureau de Normalisation (2004)**
NBN EN 14157 – [Méthodes d'essai pour] pierres naturelles : détermination de la résistance à l'usure.
- [25] **Bureau de Normalisation (2003)**
NBN EN 13373 – Méthodes d'essai pour pierres naturelles : détermination des dimensions et autres caractéristiques géométriques.
- [26] **Union européenne (2011)**
Règlement (UE) No 305/2011 du Parlement européen et du Conseil du 9 mars 2011 établissant des conditions harmonisées de commercialisation pour les produits de construction et abrogeant la directive 89/106/CEE du Conseil.
In : Journal officiel de l'Union européenne, 04/04/2011, L88, pp. 5-43. Disponible en ligne <http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:2011:088:0005:0043:FR:PDF>, dernière consultation 02/08/2017.
- [27] **Communautés européennes (1989)**
Directive du Conseil du 21 décembre 1988 relative au rapprochement des dispositions législatives, réglementaires et administratives des Etats membres concernant les produits de construction.
In : Journal officiel des Communautés européennes, 11/02/1989, L40, pp. 12-26. Disponible en ligne <http://eur-lex.europa.eu/legal-content/FR/TXT/PDF/?uri=CELEX:31989L0106&from=EN>, dernière consultation 02/08/2017.
- [28] **Organisme impartial de contrôle de produits pour la construction (2013)**
Règlement d'application d'usage et de contrôle de la marque ATG-BENOR dans le secteur des dalles, pavés et bordures en pierre naturelle.
Zellik : COPRO. (Règlement d'application, TRA 19), version 2.0.
Disponible en ligne www.copro.eu/fr/document/tra-19-20-reglement-dapplication-dusage-et-de-contrôle-de-la-marque-atg-benor-dans-le, dernière consultation 02/08/2017.
- [29] **Bureau de Normalisation (2002+A1:2008)**
NBN EN 13242 – Granulats pour matériaux traités aux liants hydrauliques et matériaux non traités utilisés pour les travaux de génie civil et pour la construction des chaussées.

- [30] BE-CERT (2014)**
Codification des granulats conformes aux normes NBN EN 12620, NBN EN 13043, NBN EN 13139 et NBN EN 13242.
Bruxelles : BE-CERT. (Prescriptions techniques (PTV), 411). Edition 2.1.
Document remplacé en janvier 2017 par:
BE-CERT (2017)
Codification des granulats conformes aux normes NBN EN 12620, NBN EN 13043, NBN EN 13139 et NBN EN 13242.
Bruxelles : BE-CERT. (Prescriptions techniques (PTV), 411). Edition 2.3, disponible en ligne www.be-cert.be/fr/documents/reglement-benor.html, dernière consultation 06/09/2017.
- [31] Bureau de Normalisation (2009+AC)**
NBN EN 12003 – Colles à carrelage : détermination de l'adhérence par cisaillement des colles réactives.
Document remplacé en mars 2017 par:
Bureau de Normalisation (2017)
NBN EN 12004-2 – Colles à carrelage. Partie 2, méthodes d'essai.
- [32] Bureau de Normalisation (1999)**
NBN EN 1542 – Produits et systèmes pour la protection et la réparation des structures en béton. Méthodes d'essais : mesurage de l'adhérence par traction directe.
- [33] Centre de recherches routières (2006)**
Code de bonne pratique pour le choix du revêtement bitumineux lors de la conception ou de l'entretien des chaussées.
Bruxelles : CRR. (Recommandations, ISSN 1376-9340, R 78). Disponible en ligne www.brrc.be/fr/article/r7806, dernière consultation 06/09/2017.
- [34] Centre de recherches routières (2010)**
Code de bonne pratique pour le traitement des sols à la chaux et/ou aux liants hydrauliques.
Bruxelles : CRR. (Recommandations, ISSN 1376-9340, R 81). Disponible en ligne www.brrc.be/fr/article/r8110, dernière consultation 06/09/2017.
- [35] Centre de recherches routières (2010)**
Stabilisation des sols pour couches de sous-fondation : guide pratique (2).
Bruxelles : CRR. (Recommandations, ISSN 1376-9340, R81-2). Disponible en ligne www.brrc.be/fr/article/r8110, dernière consultation 06/09/2017.
- [36] Bureau de Normalisation (2013)**
NBN EN 14227-1 – Mélanges traités aux liants hydrauliques : spécifications. Partie 1, mélanges granulaires traités au ciment.
- [37] Bureau de Normalisation (2013)**
NBN EN 14227-2 – Mélanges traités aux liants hydrauliques : spécifications. Partie 2, mélanges granulaires traités au laitier.
- [38] Bureau de Normalisation (2013)**
NBN EN 14227-3 – Mélanges traités aux liants hydrauliques : spécifications. Partie 3, mélanges granulaires traités à la cendre volante.
- [39] Bureau de Normalisation (2013)**
NBN EN 14227-5 – Mélanges traités aux liants hydrauliques : spécifications. Partie 5, mélanges granulaires traités aux liants hydrauliques routiers.

- [40] **Centre de recherches routières (2014)**
Code de bonne pratique pour la protection des routes contre les effets de l'eau.
 Bruxelles : CRR. (Recommandations, ISSN 1376-9340, R88). Disponible en ligne
www.brrc.be/fr/article/r8814, dernière consultation 06/09/2017.
- [41] **Centre de recherches routières (2009)**
Code de bonne pratique pour la conception et l'exécution des revêtements en pavés de béton.
 Bruxelles : CRR. (Recommandations, ISSN 1376-9340, R80). Disponible en ligne
www.brrc.be/fr/article/r7806, dernière consultation 06/09/2017.
- [42] **Centre de recherches routières (CRR) (2009)**
Revêtements des aménagements cyclables : recommandations pour la conception, la mise en œuvre et l'entretien. Bruxelles : Ministère de la Région de Bruxelles-Capitale. (Vademecum Vélo en Région de Bruxelles Capitale, 5). Disponible en ligne https://mobilite-mobiliteit.brussels/sites/default/files/vm-5-vademecum-revetements_fr_web.pdf, dernière consultation 06/09/2017.
- [43] **Centre de recherches routières (2012)**
Code de bonne pratique pour la gestion et la maîtrise des mauvaises herbes sur les revêtements modulaires par voie non chimique.
 Bruxelles : CRR. (Recommandations, ISSN 1376-9340, R84). Disponible en ligne
www.brrc.be/fr/article/r8412, dernière consultation 06/09/2017.
- [44] **Association française de normalisation (2007)**
NF P98-335 – Chaussées urbaines : mise en œuvre des pavés et dalles en béton, des pavés en terre cuite et des pavés et dalles en pierre naturelle.
- [45] **ASTM International (2004, Reapproved 2013)**
ASTM D1751-04 – Standard Specification for Preformed Expansion Joint Filler for Concrete Paving and Structural Construction (Nonextruding and Resilient Bituminous Types).
- [46] **ASTM International (2004, Reapproved 2013)**
ASTM D1752-04a – Standard Specification for Preformed Sponge Rubber Cork and Recycled PVC Expansion Joint Fillers for Concrete Paving and Structural Construction.
- [47] **Bureau de Normalisation (2005)**
NBN EN 14188-2 – Produits d'obturation et de scellement de joints. Partie 2, spécifications pour produits de scellement appliqués à froid.
- [48] **Bureau de Normalisation (2012)**
NBN EN 15651-4 – Mastics pour joints pour des usages non structuraux dans les constructions immobilières et pour chemins piétonniers. Partie 4, mastics pour chemins piétonniers.
 Document remplacé en août 2017 par:
European Committee for Standardization (2017+AC)
EN 15651-4:2017 – Sealants for non-structural use in joints in buildings and pedestrian walkways. Part 4, sealants for pedestrian walkways.
- [49] **van den Berk, Jan; van den Berk, Paulus (2015)**
van den Berk et les arbres.
 Sint-Oedenrode : Boomkwekerij Gebr. Van den Berk B.V. Deuxième édition.
- [50] **International Organization for Standardization (2006)**
ISO 14040 – Management environnemental. Analyse du cycle de vie : principes et cadre.

[51] De Bruyn, R.; Pien, A. (1995)

Le nettoyage des façades.

Bruxelles : Centre Scientifique et Technique de la Construction (CSTC).

(Note d'Information Technique CSTC (NIT), 197).

[52] Centre Scientifique et Technique de la Construction (1982)

Hydrofuges de surface : choix et mise en œuvre.

Bruxelles : CSTC. (Note d'Information Technique CSTC (NIT), 140).

Document remplacé en 2002 par:

Pien, A.; De Bruyn, R. (2002)

Hydrofugation de surface.

Bruxelles : Centre Scientifique et Technique de la Construction (CSTC).

(Note d'Information Technique CSTC (NIT), 224).

[53] Centre de recherches routières (2015)

Inspection visuelle pour la gestion du réseau routier.

Bruxelles : CRR. (Méthode de mesure, ISSN 1376-9324, MF 89). Disponible en ligne

www.brrc.be/fr/article/mf8915, dernière consultation 06/09/2017.



Autres documents utiles



Ouvrages de références

Tomasek, Mario Johannes (2014)

Natural stone pavings : theory and practice from planning to performing.

s.l. : Pavingtools Carola Tomasek.

Union des Syndicats de l'Industrie Routière Française (USIRF) (2010)

Pierres naturelles. Conception et réalisation de voiries et d'espaces publics.

Paris: Editions RGRA.

Centre d'Etudes sur les Réseaux, les Transports, l'Urbanisme et les Constructions Publiques (2008)

Les pierres naturelles en voirie urbaine : dimensionnement et mode de pose.

Paris : CERTU.



Normes produits

Bureau de Normalisation (2014)

NBN EN 197-2 – Ciment. Partie 2, évaluation de la conformité.

Bureau de Normalisation (2011)

NBN EN 197-1 – Ciment. Partie 1, composition, spécifications et critères des conformités des ciments courants.

Bureau de Normalisation (2002)

NBN EN 1008 – Eau de gâchage pour bétons : spécifications d'échantillonnage, d'essais et d'évaluation de l'aptitude à l'emploi, y compris les eaux des processus de l'industrie du béton, telle que l'eau de gâchage pour béton.

Norme d'essai

Bureau de Normalisation (2007)

NBN EN 12407 – Méthodes d'essai de pierres naturelles : examen pétrographique.

PTV

Organisme impartial de contrôle de produits pour la construction (2015)

Annexe aux prescriptions techniques pour produits de voirie en pierre naturelle : prescriptions techniques pour les roches sédimentaires carbonatées.

Zellik : COPRO. (Prescriptions techniques (PTV), 845). Ces prescriptions techniques sont des compléments aux PTV 841, PTV 842, PTV 843 et PTV 844. Version 1.0, disponible en ligne www.copro.eu/fr/document/ptv-845-10-annexe-aux-prescriptions-techniques-pour-produits-de-voirie-en-pierre-naturelle, dernière consultation 06/09/2017.

NIT

Pien, A.; De Bruyn, R. (2009)

Revêtements de sols intérieurs en carreaux céramiques.

Bruxelles : Centre Scientifique et Technique de la Construction (CSTC). (Note d'Information Technique CSTC (NIT), 237). Remplace NIT 137.

Publication CRR

Centre de recherches routières (2010)

Amélioration des sols pour terrassements et fond de coffre : guide pratique (3).

Bruxelles : CRR. (Recommandations, ISSN 1376-9340, R81-3). Disponible en ligne www.brrc.be/fr/article/r8110, dernière consultation 06/09/2017.

Autres documents à caractère public

Vlaams Ministerie van Mobiliteit en Openbare Werken - Agentschap Wegen en Verkeer - Afdeling Verkeerskunde (2010)

Toegankelijk Publiek Domein Vademecum.

Brussel : MOW. Disponible en ligne www.vlaanderen.be/nl/publicaties/detail/toegankelijk-publiek-domein-vademecum, dernière consultation 06/09/2017.

Ministère de la Région de Bruxelles Capitale; Confédération Belge pour la Promotion des Aveugles et Malvoyants (2008)

Vademecum personnes à mobilité réduite dans l'espace public.

Bruxelles : Ministère de la Région de Bruxelles Capitale.

Ministère de la région wallonne

Code wallon de l'aménagement du territoire, de l'urbanisme, du patrimoine et de l'énergie : CWATUPE.

Disponible en ligne <https://wallex.wallonie.be/index.php?doc=1423>, dernière consultation 06/09/2017.

Les membres ressortissants et les membres adhérents reçoivent gratuitement les nouvelles publications CRR. Toutes les publications peuvent être téléchargées gratuitement après enregistrement sur notre site web www.crr.be

Les non-membres peuvent commander une version papier au CRR.

Commander cette publication:

publication@brrc.be – Tél.: +32 (0)2 766 03 26

Référence: R 95 – Prix: 18,00 €

■ Autres publications dans la série «Recommandations»

Orientée sur la conception, l'exécution et l'entretien des routes, la série « Recommandations » rassemble les résultats de recherches de groupes de travail créés par le CRR en vue d'étudier des sujets bien déterminés.

Référence	Titre	Prix
R 88/14	Code de bonne pratique pour la protection des routes contre les effets de l'eau	18,00 €
R 84/12	Code de bonne pratique pour la gestion et la maîtrise des mauvaises herbes sur les revêtements modulaires par voie non chimique	20,00 €
R 83/12	Code de bonne pratique pour la conception, la mise en œuvre et l'entretien des complexes étanchéité-revêtement de ponts à tablier en béton	32,00 €
R 82/11	Code de bonne pratique pour les revêtements industriels extérieurs en béton	17,00 €
R 81/10	Code de bonne pratique pour le traitement des sols à la chaux et/ou aux liants hydrauliques (+ 4 Guides pratiques)	26,50 €

■ Autres séries CRR

- Synthèse
- Méthode de mesure
- Compte rendu de recherche



Centre de recherches routières

Votre partenaire pour des routes durables

Etablissement reconnu par application de l'Arrêté-loi du 30 janvier 1947
boulevard de la Woluwe 42
1200 Bruxelles
Tél.: 02 775 82 20
www.crr.be

Le Code de bonne pratique pour les revêtements modulaires en pierre naturelle constitue un ouvrage de référence pour la sélection des matériaux (tant des éléments en pierre naturelle, que des matériaux de jointoiement et de couche de pose), la conception et le dimensionnement de projets, la mise en œuvre et l'entretien des voiries en pierre naturelle. La fabrication d'un élément en pierre naturelle trouvant tout d'abord son origine dans des processus qui datent parfois de plusieurs centaines de millions d'années, une introduction du document consacrée à la géologie trouve tout son sens, d'autant plus que l'aspect et les caractéristiques de la pierre y sont fortement liés.

Ce document tient compte de l'évolution des techniques de pose et de mise en œuvre que l'on a pu observer ces dernières décennies suite à la mise sur le marché de matériaux moins traditionnels.

Le code de bonne pratique se veut un document technique de base pour toute personne impliquée dans un projet d'aménagement en pierre naturelle. Il s'adresse aux concepteurs, architectes, entrepreneurs, gestionnaires publics ou privés, ou fournisseurs de matériaux.

Mots-clés ITRD

2972 - REVETEMENT (CHAUSSEE) ; 4508 - PAVE ; 4053 - GEOLOGIE ; 0233 - RESSOURCES NATURELLES ; 4555 - MATERIAU ; 9011 - DIMENSIONNEMENT ; 2885 - AMENAGEMENT ; 3623 - MISE EN OEUVRE (APPL) ; 3847 - ENTRETIEN

Terme additionnel
PIERRE NATURELLE