

LES FONDATIONS ROUTIÈRES LIÉES AU CIMENT

Qualités et applications

Les revêtements de sols – routes, trottoirs, espaces publics, parkings, sols industriels, ... – nécessitent généralement une fondation, particulièrement, lorsqu'ils sont sollicités par le passage fréquent ou occasionnel de véhicules.

Cette fondation a pour rôle :

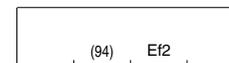
- de transmettre et de répartir sur la couche inférieure les charges appliquées au revêtement;
- de faciliter la mise en œuvre des couches supérieures en réalisant une surface de pose unie sur laquelle l'accès reste aisé en toutes circonstances.

Après un rappel des principes à prendre en considération pour garantir la qualité d'une fondation liée au ciment, ce dossier décrit **cinq types de fondations**, à savoir :

- la fondation en empièvements traités au ciment;
- la fondation en sable-ciment;
- la fondation en béton maigre;
- la fondation en béton maigre poreux;
- la fondation en béton sec compacté.

Ce sont des considérations relatives au dimensionnement (trafic, nature du sol), à la disponibilité des matériaux et au prix, qui guideront le choix entre ces différents types de fondation.

La stabilisation au ciment permet aussi la réutilisation, en fondation, de matériaux considérés autrefois comme des déchets et généralement voués à la décharge. Des expériences prometteuses ont été effectuées avec d'anciens bétons concassés, des granulats issus du raclage ou de la démolition de revêtements hydrocarbonés, des cendres volantes, des schistes houillers brûlés. Ce dossier ne développe pas ces options et nous renvoyons le lecteur au Code de Bonne Pratique « Le recyclage des matériaux dans les travaux de voiries communales et provinciales » [1].



BB/SIB _____



I. PRINCIPE DE BASE - CRITÈRES DE QUALITÉ

La réussite d'une fondation liée au ciment est fortement dépendante de l'attention portée d'une part à la teneur en eau et au compactage du mélange et d'autre part à la protection contre la dessiccation des matériaux après leur mise en œuvre. En effet, un défaut de cure et/ou de compactage a des conséquences néfastes sur la résistance mécanique du matériau et entraîne aussi une augmentation de l'érodabilité de la fondation. La qualité de ces deux facteurs constitue donc une condition nécessaire pour une bonne résistance à l'érosion de la surface de la fondation.

Pour éviter la remontée de fissures dans les revêtements souples (« *reflective cracking* »), la préfissuration de la fondation peut être envisagée. Des techniques de préfissuration des fondations liées au ciment sont développées.

1. Teneur en eau optimale et compactage efficace et rapide

Lorsque la compacité d'un mélange est étudiée en laboratoire en fonction de sa teneur en eau, il est fait appel à l'essai Proctor. Cet essai, complètement normalisé, consiste à placer dans un moule de dimensions déterminées, un échantillon humidifié de manière homogène à une teneur en eau w_1 donnée et à compacter cet échantillon par couche au moyen d'une dame de poids défini, tombant d'une hauteur standardisée à raison de 25 ou 55 coups par couche. La masse volumique sèche obtenue est ensuite mesurée et portée en graphique en fonction de la teneur en eau w_1 . En procédant de la même manière pour une teneur en eau différente w_2 , il est constaté que la masse volumique sèche obtenue croît avec la teneur en eau.

En fait, lorsque de l'eau est ajoutée à un sol sec, c'est-à-dire à un sol de cohésion nulle, la succion (la capillarité) est très élevée, le sol est avide d'eau et des ponts vont se constituer entre certains grains du sol : la cohésion va augmenter. En continuant à imbiber le sol, sa cohésion continue à se développer car le nombre de ponts de liaison augmente. Cette amélioration se poursuit jusqu'au moment où la quantité d'eau ajoutée devient trop élevée et prend trop de place entre les grains. Il s'ensuit une diminution de la succion et donc une diminution de la cohésion et de la masse volumique sèche.

La courbe ainsi obtenue est appelée courbe Proctor. Son maximum définit l'optimum Proctor (*figure 1*). C'est à partir de cet optimum que sont définies les spécifications du compactage sur chantier.

La forme de la courbe Proctor est liée à la granulométrie du matériau. Une granulométrie étalée donne une courbe Proctor à pente raide et inversement.

Plus la courbe est pointue, plus il sera nécessaire d'avoir une teneur en eau très proche de l'optimum pour obtenir la densité désirée. Plus la courbe est plate, plus il sera facile d'obtenir la densité désirée sans trop se préoccuper de la teneur en eau. Des teneurs en eau élevées seront néanmoins préjudiciables à la résistance mécanique.

La courbe décrivant l'évolution de la résistance à la compression en fonction de la teneur en eau est quant à elle toujours plus ou moins parallèle à la courbe Proctor mais avec un optimum en eau légèrement décalé vers la gauche de 0,5 à 1 % en général (*figure 1*).

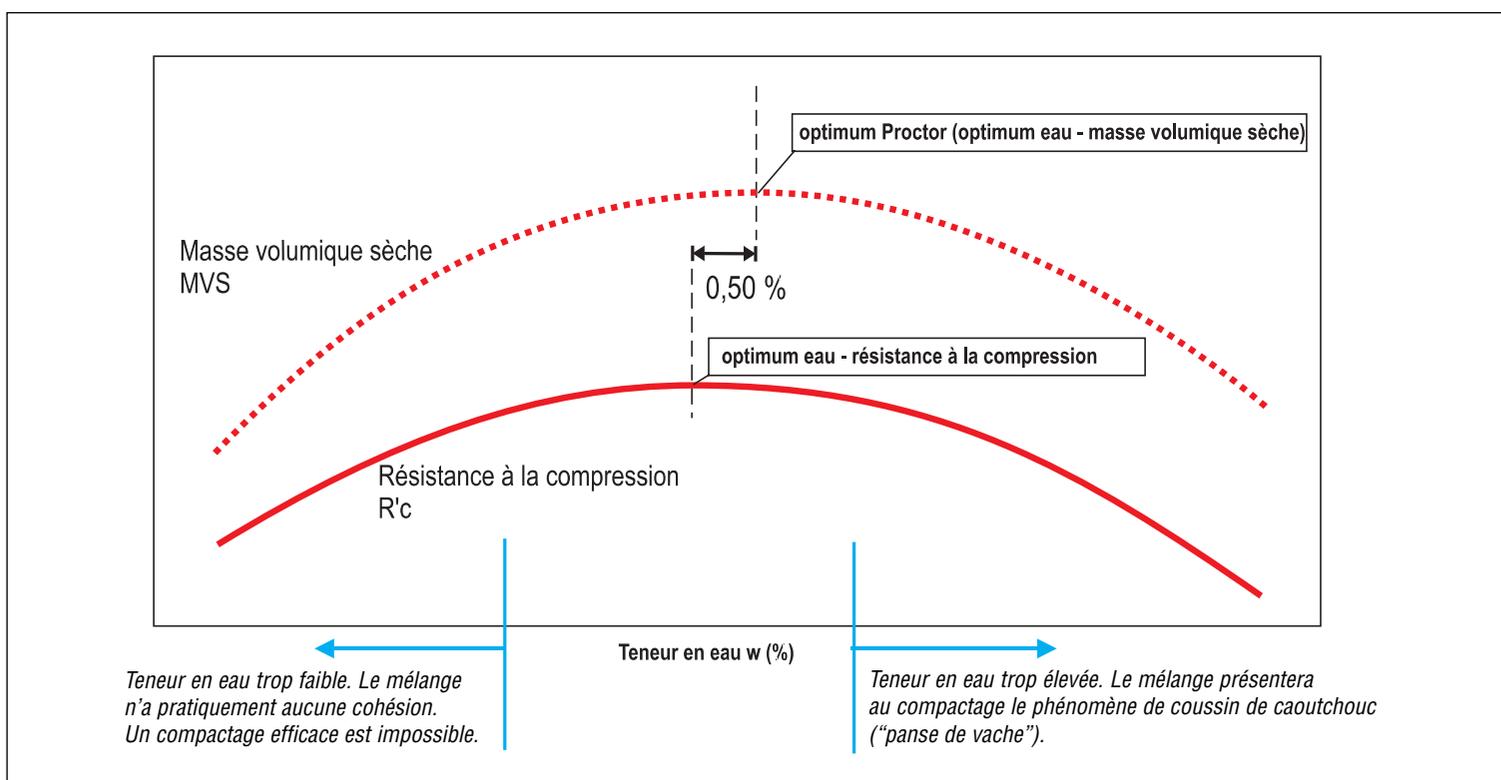
L'analyse d'une telle courbe montre clairement que la teneur en eau de compactage de la fondation traitée au ciment doit être très proche de l'optimum Proctor. L'idéal est de ne pas s'écarter de plus de 2 % au-dessous et 1 % au-dessus de l'optimum Proctor.

L'influence de la teneur en eau sur le compactage et la résistance à la compression est illustrée à la *figure 2*.

Il s'agit de résultats de laboratoire avec un sable de concassage 0/4 compacté selon la méthode Proctor normal(*) à différentes teneurs en eau et à une teneur en ciment CEM III/A 32,5 N LA de 135 kg/m³ de mélange mis en place (compacté). La masse volumique optimale est obtenue pour une teneur en eau voisine de 10 % et un écart de plus de 1 % par rapport à cet optimum eau provoque rapidement des chutes importantes de la masse volumique. Une petite variation de la masse volumique entraîne également de grosses variations de la résistance à la compression.

* Il existe un essai Proctor "normal" et un essai Proctor "modifié". Les deux variantes se distinguent par la forme du moule et l'énergie de compactage.

Fig. 1 - Relation existant entre la masse volumique sèche, la résistance à la compression et la teneur en eau d'un sol



Outre le rôle de l'eau évoqué ci-dessus, d'autres paramètres influencent également le compactage sur chantier dont notamment :

- le nombre de passes N qu'effectue l'engin : il est constaté que la densité augmente avec le nombre de passes N jusqu'à une certaine valeur puis ensuite, reste constante;
- la pression de contact Ps de l'engin : l'influence de Ps prédomine sur celle de N, il y a donc intérêt à augmenter Ps plutôt que N;
- l'épaisseur de la couche meuble à compacter : plus la couche est épaisse, plus le gradient de compactage sera grand. Toutefois, il faut savoir que la mise en place des matériaux en couches successives entraîne un risque de création de surfaces horizontales plus ou moins lisses préjudiciables à la bonne tenue des ouvrages;
- la vitesse v de progression de l'engin, le nombre de passes N doit augmenter lorsque v augmente.

Le délai de compactage des fondations traitées au ciment est également très important. Les Cahiers des Charges-type imposent que les matériaux traités au ciment soient compactés dans les 2, voire les 3 heures qui suivent la préparation. Dans tous les cas, le compactage doit absolument être terminé en un minimum de temps. Ces propos sont illustrés au *tableau 1*.

Il s'agit de résultats de laboratoire obtenus avec un sable de concassage 0/7 compacté selon la méthode Proctor normal et une teneur en ciment CEM III/A 42,5 N LA de 120 kg/m³ de mélange mis en place (compacté). Les éprouvettes sont compactées immédiatement après le gâchage du mélange (au temps t₀) ou 2 heures après le gâchage (au temps t₀ + 2).

Lorsque le compactage est réalisé 2 heures après la fabrication, les pertes de résistance peuvent atteindre 25 % par rapport aux éprouvettes immédiatement compactées. A noter que ces résultats peuvent être améliorés par l'adjonction au mélange d'un retardateur de prise. Des résultats sont présentés plus loin pour des empièvements traités au ciment.

Sable de concassage 0/7 120 kg/m ³ de ciment CEM III/A 42,5 N LA			
Compactage au temps	t ₀		t ₀ + 2h
Teneur en eau (%)	8	12	12
Masse volumique sèche (MVS) (kg/m ³)	2135	2030	2000
Résistance à la compression (N/mm ²)	à 7 jours (R'c 7d)	10,1	5,2
	à 56 jours (R'c 56d)	16,4	9,7

Tableau 1 - Influence du délai de compactage sur la résistance à la compression [Source : CRIC]

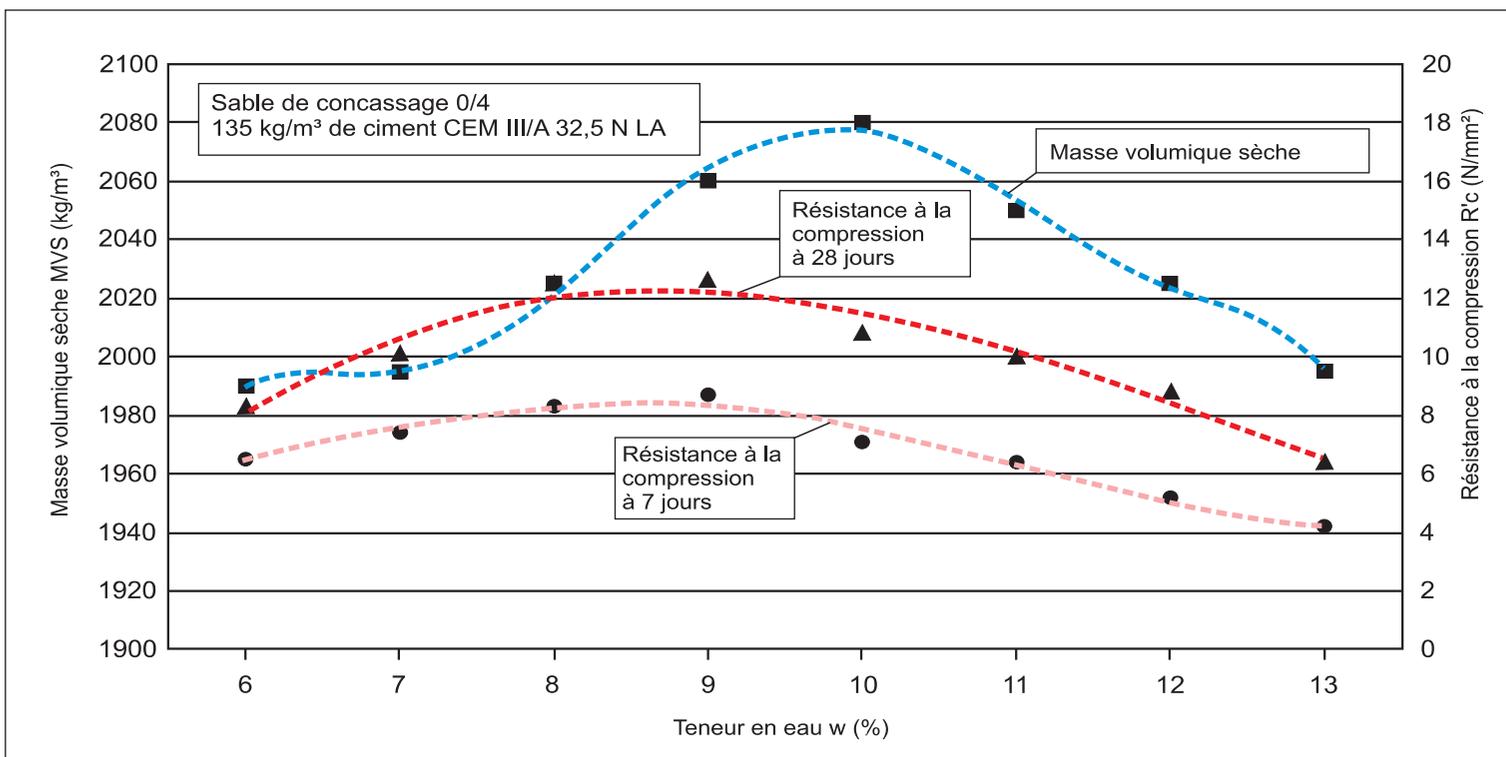


Fig. 2 - Evolution de la masse volumique sèche et de la résistance à la compression en fonction de la teneur en eau d'un sable stabilisé au ciment [Source : INTER BETON]

2. Protection de la fondation contre la dessiccation

La qualité des bétons durcis, en particulier leur durabilité, est fortement dépendante de la protection du béton frais contre la dessiccation. Tout départ d'eau a un effet négatif sur la résistance, la durabilité et le comportement au retrait (risque de fissuration). Les bétons routiers sont, de par leur grande surface exposée, très sensible à l'évaporation. La protection contre la dessiccation des fondations liées au ciment doit être assurée dans tous les cas et avoir lieu le plus rapidement possible après leur mise en œuvre. En général, celle-ci se réalise en deux phases:

- la 1^{ère} phase consiste en un arrosage modéré à l'eau de la surface du matériau traité. Cet arrosage s'effectue immédiatement après le dernier passage du ou des engins de compactage ;
- la 2^{ème} phase s'effectue au plus tard en fin de journée. Elle consiste à appliquer une émulsion de bitume suivie d'un épandage de sable.

Pour les empièvements, les sables stabilisés au ciment ainsi que les fondations des trottoirs et des éléments linéaires, cette protection peut être remplacée par le maintien humide de la surface pendant 72 heures.

Dans le cas des bétons maigres poreux, ceux-ci doivent être protégés par une feuille de plastique aussitôt après la fin du compactage ; leur surface très ouverte les rend particulièrement sensibles à l'évaporation et ne permet pas d'appliquer une émulsion de bitume qui risquerait de colmater les vides.

Exemple de fondation en béton sec compacté sur la E25 à Houffalize. Après compactage, le béton a été protégé contre la dessiccation par la pulvérisation d'une émulsion bitumineuse suivie d'un sablage. Les joints de retrait sont sciés sur une profondeur au moins égale à un tiers de l'épaisseur de la fondation.



3. Maîtrise de la fissuration d'une fondation liée au ciment

L'apparition de fissures thermiques et de retrait remontant à la surface des revêtements souples est souvent citée comme un désavantage des fondations liées au ciment. L'expérience belge a néanmoins montré que ce phénomène est bien maîtrisé en respectant les règles suivantes :

- la réalisation de fondations d'au moins 20 cm d'épaisseur ;
- la protection de la fondation contre la dessiccation le plus rapidement possible ;
- l'apport d'une couche de revêtement de forte épaisseur (au moins 10 cm d'enrobé bitumineux).

Toutefois, un seul hiver particulièrement rigoureux peut faire remonter une fissure à travers la couche bitumineuse, même si celle-ci est épaisse. Dès lors, une précaution supplémentaire consiste à réduire les sollicitations appliquées à l'enrobé en maîtrisant le pas de la fissuration de l'assise traitée. C'est la technique de la préfissuration. Elle consiste à provoquer et à localiser les fissures de retrait par la réalisation de joints. Plusieurs techniques sont possibles :

- le rainurage. Une simple plaque vibrante, munie sur sa face inférieure d'une lame, entaille un joint sur une profondeur supérieure à la moitié de l'épaisseur de la couche. Les rainures sont créées avant le compactage final ;
- le procédé du joint actif. Il s'applique au moment de la mise en œuvre des matériaux, avant compactage, et consiste à créer une discontinuité transversale dans la couche par insertion d'un joint sinusoïdal suivant un pas donné. L'élément de joint est placé transversalement par rapport à l'axe de la voie, sa hauteur est d'environ les deux tiers de l'épaisseur de la couche, et il est placé au fond de celle-ci. L'espacement des joints actifs ne doit pas dépasser 3 mètres ;
- le procédé *Viafrance*. Celui-ci consiste à créer à intervalles réguliers (tous les 2 à 3 mètres) une amorce de fissuration exécutée transversalement dans la partie supérieure de la couche traitée et compactée et simultanément d'introduire dans cette amorce une feuille de plastique assurant le maintien de la discontinuité ;
- le procédé *Craft* (Création automatique de fissures transversales). Il consiste à créer à intervalles réguliers (tous les 2 à 3 mètres), et avant compactage final, un sillon transversal dans la couche traitée, d'y projeter ensuite une émulsion de bitume de type cationique et de le refermer alors au moment du compactage final.

Le sciage de joints effectué sur une profondeur d'un tiers de la fondation compactée et ce au plus tard après 24 heures peut également être envisagé. Il s'agit de la technique habituellement utilisée pour la réalisation de joints de retrait dans un revêtement en béton riche.

L'entre-distance des joints ne peut dans ce cas dépasser les 5, voire 4 mètres, dans le cas du béton sec compacté possédant une teneur en ciment élevée.



II. LES CINQ FONDATIONS LIEES AU CIMENT

Les matériaux liés au ciment ont une rigidité beaucoup plus grande que les matériaux granulaires (sables, empièvements); elle est d'ailleurs proportionnelle à leur résistance mécanique.

L'intérêt de la stabilisation d'une fondation au ciment est d'en augmenter la rigidité, la stabilité et la durabilité pour améliorer le comportement de la structure sous l'action des charges, de l'eau et du gel. La rigidité provoque un effet de dalle qui réduit drastiquement les contraintes engendrées par des charges dans le revêtement et sur le sol; cette réduction est d'autant plus grande que la couche de fondation est peu déformable.

L'emploi des fondations stabilisées au ciment augmente fortement la durée de vie des revêtements de sols et des routes par rapport aux structures à fondations en matériaux non liés.

Le choix de la fondation, la détermination de son épaisseur nécessitent un calcul de dimensionnement qui dépend entre autre :

- du pouvoir porteur du sous-sol ;
- des caractéristiques mécaniques du matériau de fondation (résistance à la traction par flexion, module d'élasticité) ;
- des caractéristiques mécaniques de la (des) couche(s) de revêtement ;
- de la durée de vie projetée ;
- des charges, de leur configuration et de leur fréquence.

Les ordres de grandeurs des différentes caractéristiques qu'il faut prendre en compte dans un dimensionnement, tels le module d'élasticité, la résistance à la traction par flexion, ... sont repris dans le *tableau A*.

Etant donné la grande capacité de répartition des charges sur le sol des fondations liées, 1 cm de matériau granulaire lié au ciment et de résistance relativement élevée (béton sec compacté) est considéré, dans le cadre de revêtements fortement sollicités, par la *Portland Cement Association (PCA)* comme équivalent à 1,65 cm de matériau de fondation non liée. Pour d'autres types de fondation, des valeurs intermédiaires sont proposées au *tableau B*.

Tableau A

	Teneur en ciment		Résistance à la compression à 90 jours (N/mm ²)	Résistance à la traction (N/mm ²)	Module d'élasticité (N/mm ²)
	(%)	(kg/m ³)			
Empièchement non lié	-	-	-	-	500
Sable-ciment	6 à 10	100 à 180	4 à 6	0,8	5.000
Empièchement traité au ciment	3 à 4	50 à 80	5 à 10	1	8 à 10.000
Béton maigre	4 à 6	90 à 130	> 10	1,5	15 à 25.000
Béton sec compacté	9 à 12	200 à 250	> 20 voire 30	2 à 3	30 à 35.000

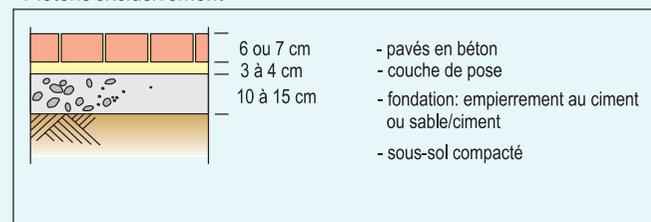
Tableau B

Type de fondation	Facteur correctif moyen pour la détermination de l'épaisseur
Béton sec compacté (200 kg de ciment)	1
Béton maigre	1,10
Empièchement traité au ciment	1,20
Sable-ciment	1,30
Empièchement non lié	1,65

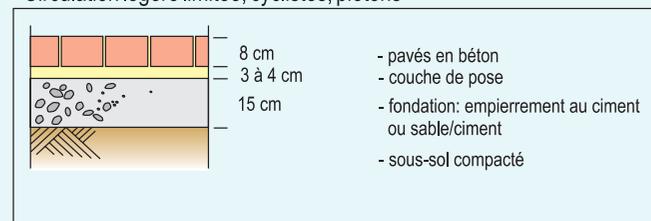
EXEMPLES DE STRUCTURES RECOMMANDEES POUR DES PAVAGES EN BETON

(allées, entrées de garages, parkings, etc. en fonction du trafic)

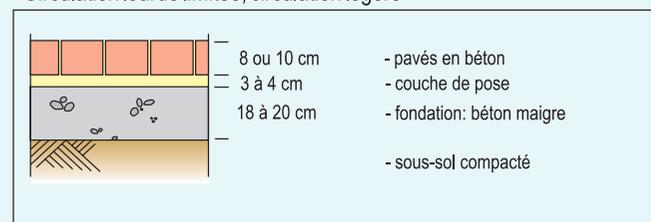
- Piétons exclusivement



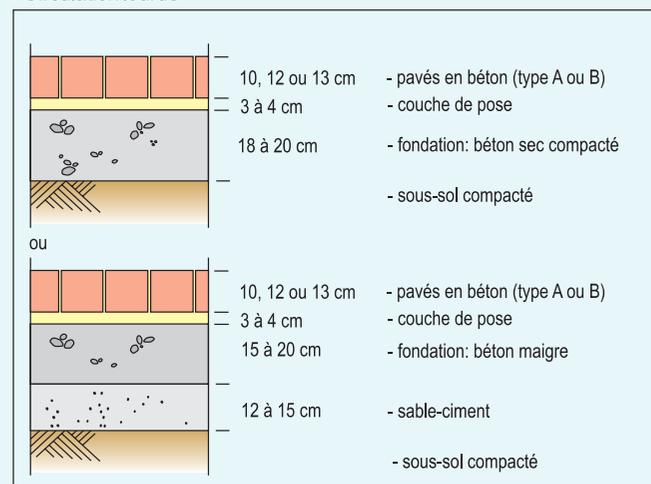
- Circulation légère limitée, cyclistes, piétons



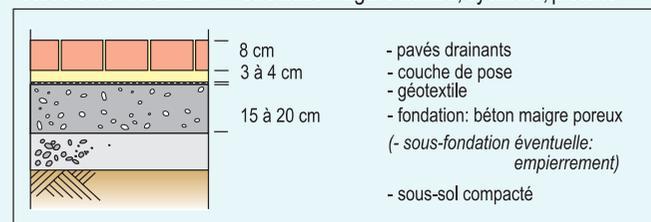
- Circulation lourde limitée, circulation légère



- Circulation lourde



- Revêtement drainant – Circulation légère limitée, cyclistes, piétons



1. La fondation en empierements traités au ciment

Les empierements au ciment (ou graves-ciment) sont fabriqués en centrale de malaxage par mélange de pierres concassées de différents calibres, de sable, de ciment et d'eau. Des fuseaux granulométriques sont imposés dans les *Cahiers des Charges-type*. Ceux-ci sont illustrés ci-dessous au *tableau 2* et aux *figures 3* et *4*.

Les empierements au ciment se différencient des bétons maigres par un fuseau granulométrique spécifié et une teneur en ciment plus faible, comprise entre 2,5 et 4 % de la masse sèche du squelette inerte, soit entre 50 et 80 kg/m³ d'empierement compacté. Les teneurs en ciment les plus faibles sont à réserver aux empierements de type II (D_{max} plus élevé). La quantité totale d'eau du mélange, y compris l'humidité du sable et des pierrailles, est au maximum de 5 % de la masse des constituants, c'est-à-dire voisine de 100 l/m³.

Les caractéristiques des empierements, à savoir l'absence totale de plasticité, une excellente granularité et un angle de frottement interne élevé obtenu par l'utilisation de pierres concassées, permettent de garantir une mise en œuvre aisée et une stabilité immédiate de la couche de fondation. La mise en œuvre des empierements se fait par finisseuse ou niveleuse. Du fait qu'il s'agit d'un matériau à angle de frottement interne élevé, le compactage se fait essentiellement par rouleau vibrant, mais en surface, il peut être terminé par un compacteur à pneus à forte charge par roue et à pression élevée.

Bien que les empierements au ciment ne permettent pas toujours le carottage d'éprouvettes (étant donné leur pauvreté relative en ciment), les résistances à la compression sur carottes de 100 cm² et de 10 cm de hauteur y sont de l'ordre de 5 à 10 N/mm² à 90 jours d'âge. Le module d'élasticité, lui, est sensiblement voisin de 10 000 N/mm².

Ouverture des mailles (mm)	Passant (%)	
	Type I	Type II
40		100
31,5	100	80 à 100
20	80 à 100	60 à 90
6,3	40 à 70	40 à 70
2	20 à 45	20 à 45
0,5	5 à 25	5 à 25
0,063	0 à 8	0 à 8

Tableau 2 - Fuseaux granulométriques des empierements

Fig. 3 - Fuseau granulométrique des empierements de type I

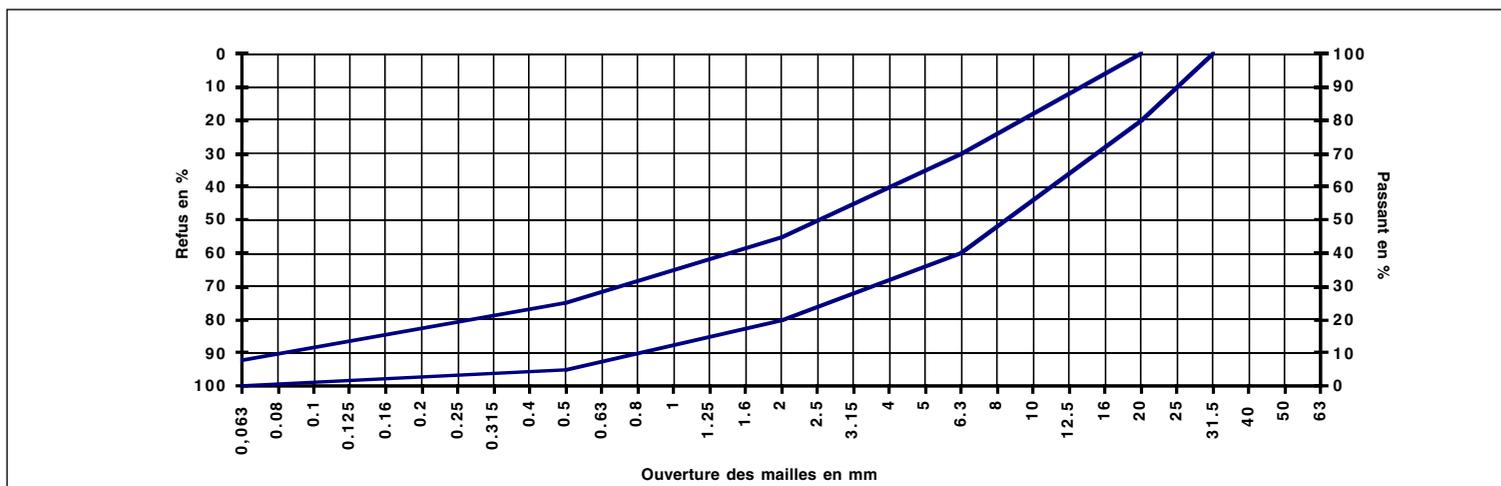


Fig. 4 - Fuseau granulométrique des empierements de type II





Le compactage énergique de l'empierrement traité au ciment doit avoir lieu le plus rapidement possible après la fabrication du mélange.

Applications des empierements traités au ciment :

Compte tenu de leurs sujétions de compactage très énergique, de composition granulométrique stricte et de contrôle délicat, les empierements au ciment s'indiquent pour des chantiers routiers d'une certaine ampleur. De plus, ils ne sont pas disponibles partout sous la forme de matériaux prêts à l'emploi.

Conseils pratiques :

- La courbe granulométrique de l'empierrement doit être continue, un bon sable à granulométrie étalée sera utilisé et sa teneur en fines sera limitée à 15 %.
- Le malaxage de la faible quantité de ciment aux matériaux inertes doit être réalisé dans un malaxeur discontinu.
- La teneur en eau doit être limitée, elle est en général d'au maximum 5 % de la masse sèche du mélange.
- Le compactage doit être très énergique pour atteindre la couche dans toute sa profondeur et doit être terminé le plus rapidement possible après la préparation du mélange (dans les 2 heures).
- Il est recommandé de ne pas travailler par temps froid ($\leq 1^{\circ}\text{C}$ à 8 heures du matin ou $\leq -3^{\circ}\text{C}$ durant la nuit).
- La protection contre la dessiccation de l'empierrement traité au ciment fraîchement compacté doit toujours être réalisée, et ce, le plus rapidement possible après la mise en œuvre.

PRESCRIPTION D'UN EMPIEREMENT TRAITÉ AU CIMENT :

Conformément aux exigences des *Cahiers des Charges-type* régionaux en vigueur (SB 250, CCT RW99, CCT 2000).

A défaut, en reprenant les données ci-après :

- l'empierrement sera constitué d'un mélange de pierres concassées et de sable dont la courbe granulométrique continue correspond au fuseau de type I (voir figure 3 ci-dessus) ;
- la teneur en ciment sera de 80 kg/m^3 ;
- la teneur en eau sera inférieure ou égale à 5 % par rapport à la masse sèche du mélange ;
- si nécessaire, l'utilisation d'un retardateur de prise sera spécifiée.

2. La fondation en sable-ciment

Les fondations en sable-ciment sont des mélanges homogènes de sable, de ciment et d'eau. Pour des questions d'homogénéité du mélange, il est recommandé d'utiliser au minimum 100 kg de ciment par m³ de sable-ciment compacté. Le CCT RW 99 décrit deux types de fondation en sable-ciment :

- sable-ciment de type I : squelette inerte constitué de 100 % de sable ;
- sable-ciment de type II : squelette inerte constitué de minimum 65 % de sable et maximum 35 % de pierres.

Le type II permet d'obtenir un mélange moins sensible aux variations de teneur en eau avec des résistances mécaniques tout aussi élevées, comme le montrent les résultats du *tableau 3*. Il s'agit de résultats obtenus sur chantier au départ de sable de concassage calcaire 0/4 à 20 % de fines $\leq 63 \mu\text{m}$ (sable-ciment de type I) ou au départ d'un mélange 0/32 (sable-ciment de type II).

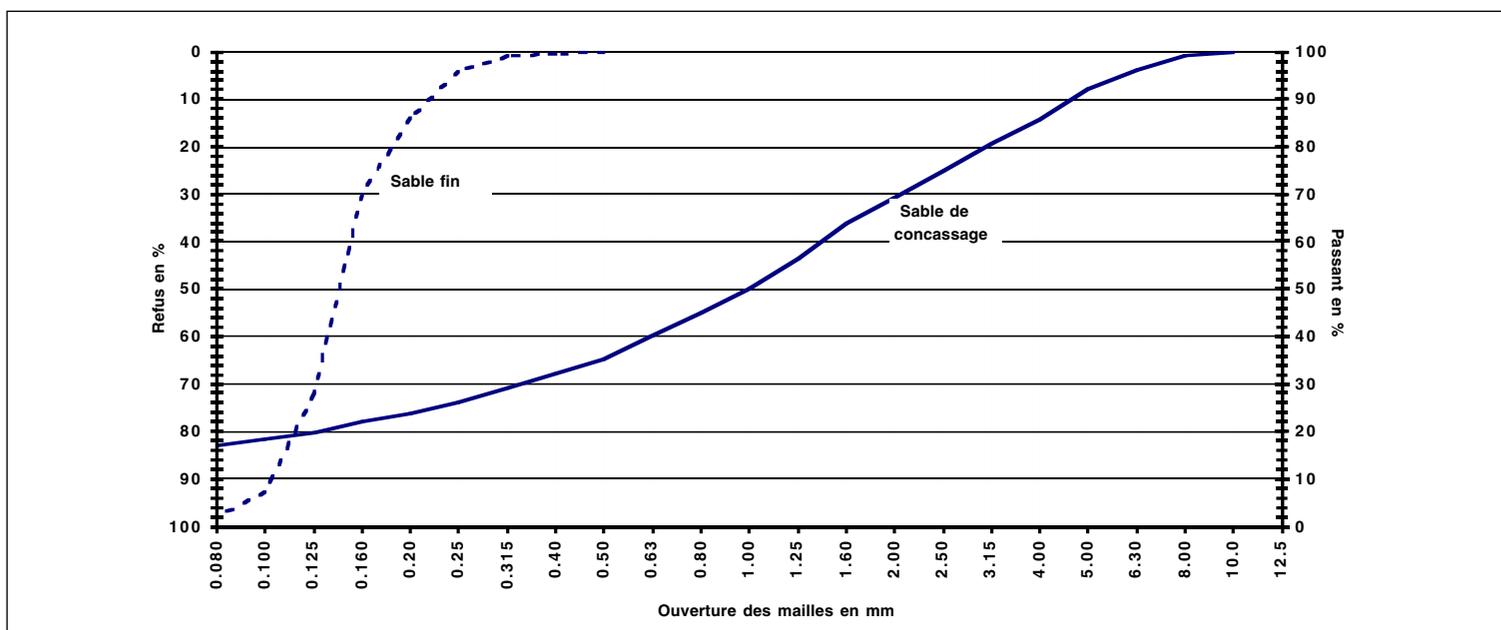
La fondation en sable-ciment est généralement mise en œuvre à la niveleuse et doit être compactée énergiquement par rouleaux vibrants et/ou à pneus. Il s'agit également d'un matériau facilement utilisable pour de petits ouvrages et pouvant être mis en œuvre manuellement.

Les résistances mécaniques obtenues sont fortement dépendantes du respect de la teneur en eau correspondant à l'optimum Proctor, du degré de compactage mais aussi de la granulométrie du sable utilisé. A même teneur en ciment, les sables fins (de sablière par exemple) développent des résistances à la compression plus faibles que les sables de concassage ayant une granulométrie étalée et une teneur en fines importante. Un exemple est donné ci-après. Les caractéristiques granulométriques de deux sables sont résumées au *tableau 4* tandis que les courbes granulométriques sont présentées à la *figure 5*.

Le *tableau 5* donne les résistances obtenues sur éprouvettes Proctor normal compactées à une teneur en ciment CEM III/A 42,5 N LA de 130 kg par m³ de mélange mis en place et une teneur en eau constante de 8 % (exprimée par rapport à la masse totale sable + ciment).

Pour un même sable de concassage non lavé, la teneur en fines ($\leq 63 \mu\text{m}$) intervient également. Il est recommandé de ne pas utiliser un sable dont la teneur en fines est supérieure à 20 %. Des teneurs en fines trop élevées risqueraient, de plus, de provoquer le phénomène de panse de vache au compactage. A même teneur en ciment et teneur en eau optimale, les meilleures résistances sont obtenues pour une teneur en fines voisine de 14 à 16 %. Le *tableau 6* reprend les résistances obtenues sur éprouvettes Proctor normal compactées à une teneur en ciment CEM III/A 42,5 N LA de 120 kg/m³ et une teneur en eau correspondant à l'optimum Proctor normal. Le *tableau 6* reprend également la teneur en fines ($\leq 63 \mu\text{m}$) des sables.

Fig. 5 - Courbe granulométrique d'un sable fin et d'un sable de concassage



Matériau	Sable-ciment de type I (100 % de sable 0/4)		Sable-ciment de type II (65 % de sable 0/4 et 35 % de concassé 2/32)
	Teneur en ciment CEM III/A 42,5 N LA (kg/m ³)	120	150
Teneur en eau (%)	9,8	8,6	7,6
Résistance à la compression sur éprouvettes cylindriques de 100 cm ² et 10 cm de hauteur (N/mm ²)			
à 56 jours (R'c 56d)	16,3	19,4	17,7

Tableau 3 – Exemples de résultats avec sable-ciment de type I et II
[Source : CRIC]

	Teneur en fines ($\leq 80 \mu\text{m}$) (%)	Calibre 0/D
Sable fin	2	0/0,315
Sable de concassage	17	0/5

Tableau 4 - Caractéristiques granulométriques des sables.

130 kg/m ³ de CEM III/A 42,5 N LA 8 % d'eau		
Résistance à la compression (N/mm ²)	Sable fin 0 / 0,315	Sable de concassage 0/5
à 7 jours	3,1	10,1
à 28 jours	5,4	(par extrapolation) $\pm 14,5$
à 56 jours	(par extrapolation) $\pm 6,0$	16,4

Tableau 5 - Influence de la granularité du sable sur la résistance à la compression [Source : CRIC]

120 kg/m ³ de CEM III/A 42,5 N LA				
Teneurs en fines (%)	8,4	14,1	16,9	18,7
Teneurs en eau optimale (%)	5,8	8,0	8,5	8,2
Résistance à la compression (N/mm ²)				
à 7 jours	7,2	10,4	9,8	10,0
à 56 jours	10,9	18,5	17,4	16,4
Résistance à la traction par fendage (N/mm ²)				
à 56 jours	1,45	2,55	2,35	2,25

Tableau 6 - Influence de la teneur en fines des sables de concassage sur les résistances mécaniques [Source : CRIC]

Applications des sables-ciment :

Les sables-ciment fabriqués en centrale permettent de construire de manière simple des couches de fondation pour des revêtements supportant des trafics légers. Ce type de matériau, disponible dans toutes les centrales à béton, peut être livré par petites quantités pour des chantiers de revêtement où la construction se fait par phases. Le sable-ciment est aussi utilisé comme couche de pose des pavages et dallages en béton et comme matériau de remblai pour tranchées.

Conseils pratiques :

- Un sable à granulométrie étalée (0/2 à 0/4) et non lavé (de 10 à 20 % de fines $\leq 0,063$ mm) permet d'obtenir de meilleurs taux de compacité et résistances.
- La teneur en ciment doit être d'au minimum 100 kg par m³ de mélange compacté.
- Le compactage doit être terminé le plus rapidement possible après la préparation du mélange.
- Il est recommandé de ne pas travailler par temps froid (≤ 1 °C à 8 heures du matin ou ≤ -3 °C durant la nuit).
- La protection contre la dessiccation du sable-ciment compacté doit toujours être réalisée et ce, le plus rapidement possible après la mise en œuvre.

PRESCRIPTION D'UN SABLE-CIMENT :

Conformément aux exigences des *Cahiers des Charges-type* régionaux en vigueur (SB 250, CCT RW99, CCT 2000).

A défaut, en reprenant les données ci-après :

- le sable-ciment sera mélangé de façon homogène en centrale ;
- la teneur en ciment sera d'au minimum 100 kg par m³ de mélange compacté ;
- la résistance à la compression à 7 jours sur éprouvettes Proctor normal sera d'au minimum 3 N/mm².

3. La fondation en béton maigre

Le béton maigre est constitué d'un mélange de ciment, d'eau, de sable et de granulats. Il est comparable à un béton classique dont les teneurs en ciment et en eau auraient été réduites. Le béton maigre est un matériau très rigide; son module d'élasticité est généralement voisin de 25 000 N/mm². Le rapport de son module d'élasticité à celui de la couche sous-jacente est donc, en général, très grand, ce qui entraîne l'apparition de contraintes de traction importantes à la base du béton maigre sous l'action du trafic. Un dimensionnement adéquat est donc nécessaire pour conserver des contraintes de traction inférieures à la résistance à la traction du béton maigre. Les contraintes verticales sur la couche support sont, par contre, beaucoup plus faibles et bien réparties; ce qui justifie l'emploi de béton maigre sur des sols peu portants et pour les routes à trafic intense.

La teneur en ciment est d'au minimum 100 kg par m³ de mélange mis en place et la teneur en eau n'excède pas 8 % de la masse du mélange sec. Les bétons maigres dont les teneurs en ciment sont plus faibles ont donné des bétons érodables et fortement gélifs.

Du fait des critères de composition assez larges des bétons maigres, il est possible d'utiliser pratiquement tous les types de matériaux pierreux disponibles sur le marché, qu'ils soient concassés ou roulés, pour autant que la teneur en éléments fins ($\leq 63 \mu\text{m}$) du mélange n'excède pas 5 % (ciment non compris). Il est donc recommandé de ne pas utiliser de sable dont la teneur en fines est supérieure à 10 %.

Des teneurs en fines trop élevées demandent beaucoup d'eau de mouillage et diminuent donc considérablement les performances mécaniques et la durabilité du béton maigre.

Les résistances mécaniques les plus élevées sont obtenues pour les bétons maigres à granularité continue dont la courbe granulométrique est comprise dans les fuseaux qui ont été définis lors du 13^{ème} Congrès belge de la Route à Bruges. Ceux-ci sont donnés ci-après au *tableau 7* et aux *figures 6* et *7*.

Ouverture des mailles (mm)	Passant (%)	
	BM 0/20	BM 0/32
40	—	100
31,5	—	92 à 100
20	93 à 100	64 à 87
16	84 à 95	56 à 81
8	55 à 77	38 à 64
4	35 à 61	27 à 53
2	24 à 50	20 à 43
1	16 à 39	14 à 34
0,5	10 à 28	8 à 25
0,25	6 à 21	5 à 18
0,125	3 à 13	2 à 12
0,063	0 à 5	0 à 5

Tableau 7 - Fuseaux granulométriques recommandés pour les bétons maigres 0/20 et 0/32 (13^{ème} Congrès belge de la Route)

Fig. 6 - Fuseau granulométrique recommandé pour du béton maigre 0/20 (13^{ème} Congrès belge de la Route)

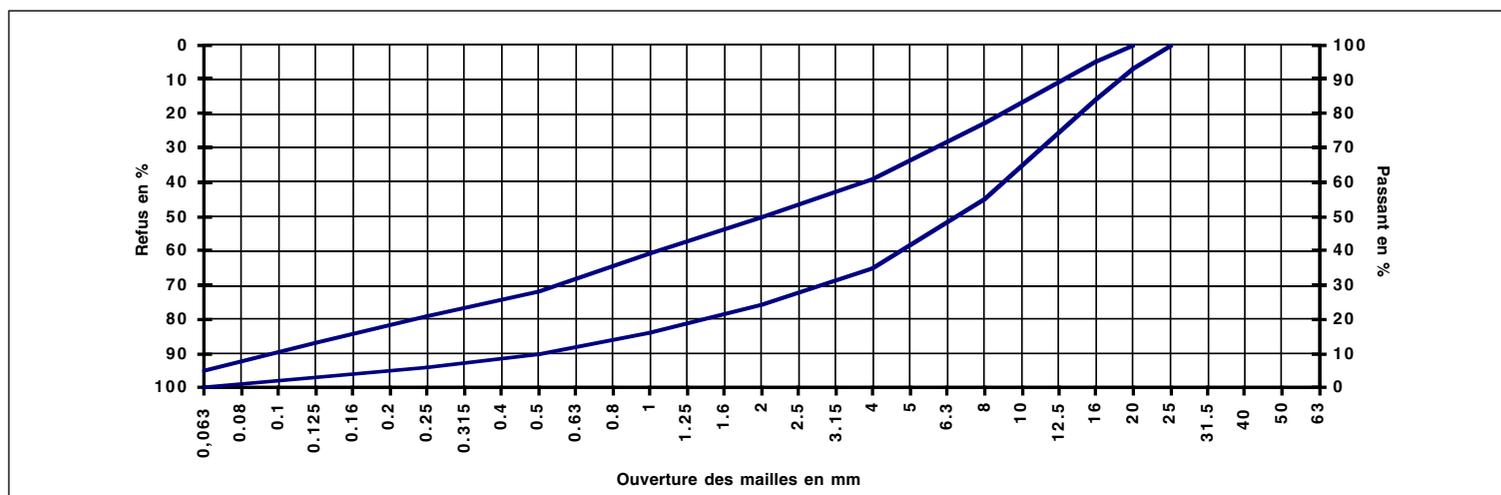
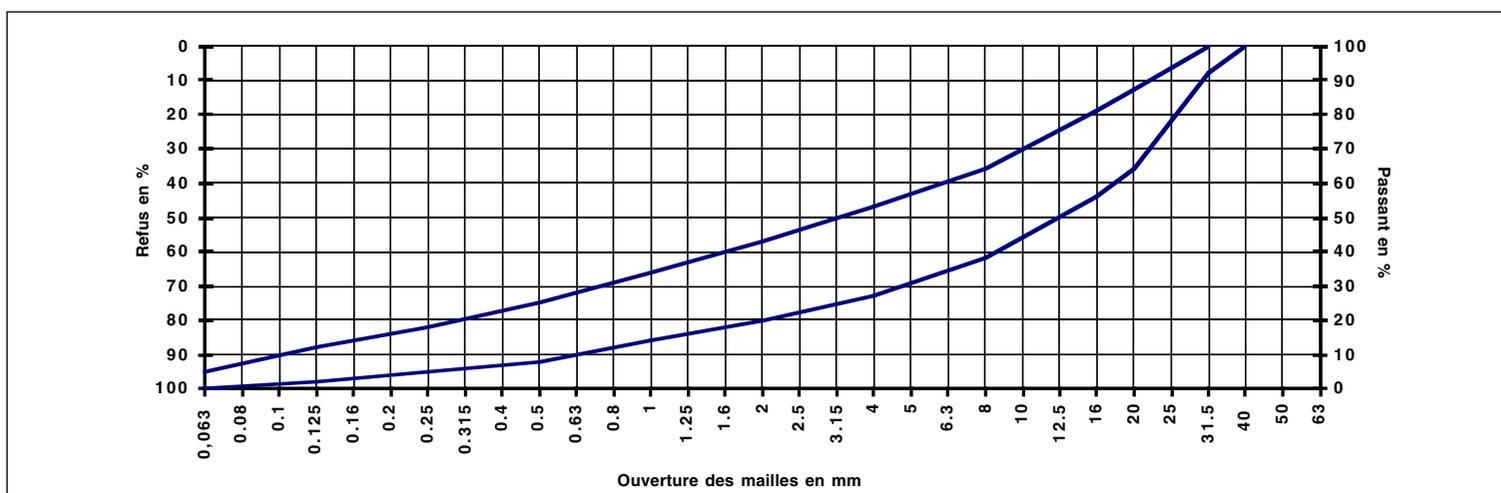


Fig. 7 - Fuseau granulométrique recommandé pour du béton maigre 0/32 (13^{ème} Congrès belge de la Route)



Les bétons maigres sont généralement mis en œuvre à la finisseuse ou au moyen d'une niveleuse et de rouleaux. Une courbe granulométrique proche de la courbe supérieure des fuseaux correspond à un béton maigre assez ouvrable destiné à être mis en œuvre à la finisseuse. En cas de compactage intense au moyen de rouleaux vibrants ou à pneus, il faut préférer une composition dont la courbe granulométrique est plus proche de la courbe inférieure des fuseaux. Le béton maigre peut aussi être mis en œuvre au moyen de machines à coffrages glissants équipées d'aiguilles vibrantes (mise en œuvre par pervibration) comme pour les bétons de revêtements. Dans ce cas, la teneur minimale en éléments inférieurs à 0,063 mm (ciment compris) doit être au moins de 220 à 250 kg/m³ afin de conférer au béton l'ouvrabilité nécessaire. Ceci peut être obtenu par ajout de cendres volantes ou de fines provenant du concassage de matériaux pierreux.

Dans le but d'une comparaison, le *tableau 8* donne les compositions et les caractéristiques mécaniques de trois bétons maigres différents : l'un « classique », c'est-à-dire à consistance terre-humide, dont la mise en œuvre s'effectue à la niveleuse et au rouleau; les deux autres, contenant un ajout (respectivement de cendres volantes et de filler) pour une mise en œuvre à la slipform. La teneur en ciment retenue est de 100 kg/m³. La courbe granulométrique du squelette inerte de ces compositions entre dans les fuseaux repris ci-contre. Les résistances mécaniques sont supérieures à 10 N/mm² à 56 jours d'âge. Néanmoins, l'ajout d'eau pour obtenir la plasticité nécessaire pour une mise en œuvre à la machine à coffrages glissants a un effet négatif sur celles-ci dans le cas d'ajout de fines de concassage.

Mise en œuvre	à la niveleuse et au rouleau	à la machine à coffrages glissants	
		avec cendres volantes	avec filler
Concassé 20/32 (kg/m ³)	500	315	
Concassé 7/20 (kg/m ³)	500	475	
Concassé 2/7 (kg/m ³)	400	395	
Sable de concassage 0/2 lavé (kg/m ³)	600	795	
Cendres volantes (kg/m ³)	–	140	–
Filler calcaire (kg/m ³)	–	–	140
Ciment CEM III/A 42,5 N LA (kg/m ³)	100	100	100
Eau (l/m ³)	105	170	185
Total (kg/m ³)	2 205	2 390	2 405
Consistance : slump (mm)	–	15	20
Vébé (sec)	–	5	7
Résistance à la compression (N/mm ²) sur cube de 20 cm, à 7 jours	8,2	5,7	3,9
sur cube de 20 cm, à 56 jours	15,0	15,0	9,8
sur carottes de 100 cm ² , h=10 cm, à 56 jours	13,6	18,9	10,5
Module d'élasticité statique (N/mm ²)	33 500	30 500	28 000

Tableau 8 - Composition et performances mécaniques de 3 bétons maigres
[Source : CRIC]

Applications du béton maigre :

Le béton maigre est utilisé en couche de fondation sous tous les types de revêtements car il est peu affecté par les variations de portance des sols. L'effet de dalle en fait le matériau de prédilection pour la traversée de zones de sols peu portants. Il constitue la fondation par excellence des revêtements destinés à supporter un trafic modéré à important. Matériau d'emploi simple, disponible partout et en toutes quantités, le béton maigre permet de réaliser facilement des accès privés et des aires de formes les plus diverses. Le béton maigre est le seul matériau utilisé pour la fondation et le contrebutage de tous les types d'accessoires de chaussée (bande de contrebutage, filets d'eau, bordures,...) car il résiste aux sollicitations intenses auxquelles sont soumis ces éléments

Conseils pratiques :

- La courbe granulométrique du béton doit être continue. Un bon sable à granulométrie étalée et dont la teneur en fines ne dépassera pas 10 % doit être utilisé.
- La teneur en ciment doit être d'au minimum 100 kg/m³.
- Le compactage doit être terminé le plus rapidement possible après la préparation du mélange (dans les 2 heures).
- Il est recommandé de ne pas travailler par temps froid (≤ 1 °C à 8 heures du matin ou ≤ -3 °C durant la nuit).
- La protection contre la dessiccation du béton maigre fraîchement compacté doit toujours être réalisée le plus rapidement possible après la mise en œuvre.

PRESCRIPTION D'UN BÉTON MAIGRE :

Conformément aux exigences des *Cahiers des Charges-type* régionaux en vigueur (SB 250, CCT RW99, CCT 2000).

Ou, selon les directives de la norme NBN B15-001 : le béton sera au minimum de classe de résistance C12/15, de classe de consistance S1 et le diamètre maximal des granulats sera limité à 20 mm.

A défaut, en reprenant les données ci-après :

- le béton maigre sera constitué de granulats, de sable, de ciment et d'eau mélangés de façon homogène en centrale ;
- la teneur en ciment sera d'au minimum 100 kg par m³ de béton compacté ;
- la teneur en eau ne dépassera pas 8 % de la masse sèche du mélange ;
- la résistance à la compression à 28 jours sur cubes de 15 cm de côté sera d'au minimum 15 N/mm² ;
- si nécessaire, l'utilisation d'un retardateur de prise sera spécifiée.

4. La fondation en béton maigre poreux

Le béton maigre poreux est un béton fortement perméable à l'eau, obtenu à partir d'un squelette granulométrique discontinu. Il est principalement utilisé pour éviter des problèmes de stagnation d'eau entre un revêtement en béton ou un pavage et leur fondation. Le colmatage dans le temps du massif drainant n'est pas à craindre à cause de sa porosité élevée. Les sels de déverglaçage sont quant à eux dissous par les pluies. De même, le risque de gel du matériau n'existe pas compte tenu de sa grande porosité et de son caractère fortement connexe. En effet, les vides de 0,5 à 2 cm³ sont reliés entre eux par des canaux de section importante, de l'ordre de 0,1 à 0,5 cm². Il faut cependant éviter que le massif ne soit saturé en eau lors d'un gel brusque.

Les *Cahiers des Charges-type* proposent ou, selon le cas, imposent la composition du béton poreux. Celle-ci est reprise au *tableau 9*.

granulat 6/20	1130 kg/m ³
granulat 2/6	565 kg/m ³
ciment	200 kg/m ³ au minimum
eau	environ 100 l/m ³

Tableau 9 - Composition du béton maigre poreux

Les matériaux utilisés dans cette composition sont identiques à ceux des bétons maigres conventionnels, mais le granulat est limité à 20 mm et la fraction sable est absente. De plus, les matériaux provenant du recyclage ou de la démolition d'anciens revêtements hydrocarbonés sont déconseillés, voire interdits.

La teneur en ciment doit être supérieure ou égale à 200 kg/m³ de façon à obtenir des résistances mécaniques comparables aux bétons maigres classiques, tout en permettant une perméabilité optimale pour assurer une évacuation rapide de l'eau. Sur ce point, les *Cahiers des Charges-type* prescrivent, soit un critère de porosité efficace, soit un critère de coefficient de perméabilité (voir encadré).

Cette perméabilité peut être contrôlée sur chantier en versant une quantité de 10 litres d'eau à la surface du béton. L'eau doit s'infiltrer immédiatement sans s'étaler au-delà d'un rayon d'un mètre. Ce contrôle peut avoir lieu 2 jours après la pose de la fondation. A titre informatif, le *tableau 10* reprend des résultats de laboratoire obtenus sur plusieurs compositions de béton maigre poreux.

Concassé calcaire 7/20 (kg/m ³)	1130	1130	1130	1130	—
Concassé calcaire 2/7 (kg/m ³)	565	565	565	565	—
Gravier roulé 4/28 (kg/m ³)	—	—	—	—	1695
Ciment CEM III/A 42,5 N LA (kg/m ³)	200	200	200	250	200
Eau (l/m ³)	85	95	105	85	95
Total (kg/m ³)	1980	1990	2000	2030	1990
Masse volumique humide du béton frais compacté (kg/m ³)	1955	1965	1960	1985	1950
Porosité efficace (%)	12	10	9	9	5
Perméabilité (x 10 ⁻⁴ m/s)	38	33	18	125	
Résistance à la compression sur éprouvettes cylindriques de 100 cm ² et 10 cm de hauteur, à 28 jours (R'c 28d) (N/mm ²)	11,9	14,8	15,3	14,2	19,1

Tableau 10 - Composition et performances mécaniques de bétons maigres poreux [Source : UCL]

POROSITÉ EFFICACE D'UN BÉTON MAIGRE POREUX

La porosité efficace est le pourcentage de vides accessibles à l'eau lorsqu'un échantillon de béton est soumis à une immersion complète.

La mesure s'effectue sur des éprouvettes cylindriques prélevées dans la fondation (généralement sur les carottes destinées à l'essai de compression). Dans un premier temps, les éprouvettes sont conservées sous eau durant un minimum de 72 heures. On détermine ensuite le volume absolu de l'éprouvette par pesée hydrostatique ainsi que son volume apparent par mesure géométrique.

La porosité efficace se calcule par la formule :

$$\eta = 100 \left(\frac{V_s - V_a}{V_s} \right)$$

avec : η = porosité efficace en %

V_a = volume absolu de l'éprouvette

V_s = volume apparent de l'éprouvette

Le *CCT RW99 : 2004* prescrit comme critère de porosité efficace moyenne, un minimum de 8,0 % et individuelle, un minimum de 6,5 %.

COEFFICIENT DE PERMÉABILITÉ D'UN BÉTON MAIGRE POREUX

La capacité d'infiltration d'un sol est exprimée par son coefficient de perméabilité k . Un sol est très perméable lorsque k est au moins équivalent à 10⁻⁴ m/s. Des sols ayant une bonne perméabilité ont une valeur k comprise entre 10⁻⁴ et 10⁻⁶ m/s. Des sols à perméabilité moyenne voire mauvaise possèdent un coefficient de perméabilité inférieur à 10⁻⁶ m/s, et les sols dont la valeur du coefficient k est inférieure à 10⁻⁸ m/s sont pour ainsi dire imperméables.

Comme pour la mesure de la porosité efficace, les essais sont généralement réalisés sur les carottes destinées aux essais de compression. L'essai consiste à soumettre la carotte de béton à un gradient hydraulique. Le temps nécessaire à récolter une certaine masse d'eau est mesuré, soit en maintenant le gradient hydraulique constant (mesure à niveau constant) si la perméabilité est grande, soit à gradient hydraulique variable (mesure à niveau variable) si la perméabilité est faible.

Cette méthode d'essai a été mise au point par le Laboratoire du Génie Civil de l'Université Catholique de Louvain. Le lecteur trouvera plus de détails sur cette méthode dans les *Cahiers des Charges-type*.

Le *Standaardbestek 250* ainsi que le *CCT RW99 : 2004* prescrivent un coefficient de perméabilité supérieur à 4.10⁻⁴ m/s.

En ce qui concerne la mise en œuvre, le réglage peut être effectué à l'aide d'une niveleuse et le compactage doit être fait d'une manière intensive à l'aide d'un rouleau à pneus par exemple, pour s'assurer qu'il atteigne la couche en profondeur, et terminé par un rouleau lisse non vibrant de manière à garantir une bonne planéité de la surface de la fondation.

La protection du béton maigre poreux contre la dessiccation est réalisée par la pose d'une feuille de plastique.

Sous un revêtement en pavés, le béton maigre poreux sera recouvert d'une membrane tissée avant la mise en œuvre de la couche de pose.

Aspect d'un béton maigre poreux. A remarquer sa grande porosité obtenue par un squelette inerte ne contenant pas de sable.



Applications des bétons maigres poreux :

Le béton maigre poreux est principalement utilisé pour drainer les eaux et assurer la continuité drainante d'une structure.

Il permet, en outre, de drainer les eaux de surface provenant des joints transversaux non scellés ou du joint longitudinal des revêtements en béton de ciment. Il évite enfin la stagnation d'eau sous un revêtement (piège à eau), pouvant, avec le temps, éroder la fondation.

Compte tenu de leurs sujétions de compactage très énergique, de composition granulométrique stricte et de contrôle délicat, les bétons maigres poreux nécessitent beaucoup de rigueur au niveau de la prescription, de la fabrication, de la mise en œuvre et du contrôle.

Conseils pratiques :

- Une composition de béton sans sable permet d'obtenir un béton plus drainant. De même, les granulats seront propres : teneur en éléments $\leq 0,063 \text{ mm} \leq 2 \%$.
- La teneur en ciment doit être d'au minimum 200 kg/m^3 .
- Le compactage doit être énergique pour atteindre la couche dans toute sa profondeur et doit être terminé le plus rapidement possible après la préparation du mélange (dans les 2 heures).
- Il est recommandé de ne pas travailler par temps froid ($\leq 1 \text{ }^\circ\text{C}$ à 8 heures du matin ou $\leq -3 \text{ }^\circ\text{C}$ durant la nuit).
- La protection du béton maigre poreux contre la dessiccation doit être réalisée immédiatement après compactage.

PRESCRIPTION D'UN BÉTON MAIGRE POREUX :

Conformément aux exigences des *Cahiers des Charges-type* régionaux en vigueur (SB 250, CCT RW99, CCT 2000).

A défaut, les éléments ci-après sont repris :

- le béton maigre poreux sera constitué de granulats, de ciment et d'eau mélangés de façon homogène en centrale ;
- la composition du béton ne contiendra pas de sable ;
- la teneur en ciment sera d'au minimum 200 kg/m^3 ;
- la teneur en eau sera voisine de 100 l/m^3 ;
- après compactage, un seau d'eau versé en surface du béton drainant s'infiltrera immédiatement sans s'étaler au-delà d'un rayon d'un mètre.

5. La fondation en béton sec compacté

Le béton sec compacté (BSC) est mis en place pratiquement de la même manière que le béton maigre, mais il possède une teneur en ciment supérieure (min. 200 kg/m³) et un calibre de granulat limité à 20 mm. Il offre l'avantage déterminant d'une mise en service presque immédiate grâce à la stabilité du squelette granulaire après compactage. Outre comme couche de fondation (généralement du BSC 20), le béton sec compacté peut aussi être employé comme revêtement routier (BSC 30), dans le cas de routes agricoles par exemple.

La tendance générale consiste à limiter la dimension maximale des granulats à 20 mm et même parfois moins, avec le triple objectif d'éviter la ségrégation, de rendre le malaxage, la mise en œuvre et le compactage plus facile, et d'améliorer l'uni de surface.

Le tableau 11 et les figures 8 et 9 reprennent les limites de fuseaux granulométriques recommandés, et ce, pour deux dimensions maximales différentes du squelette inerte : 0/16 mm et 0/20 mm.

Pour satisfaire aux exigences de résistance à la compression, la quantité de ciment est de minimum 200 ou 250 kg/m³ respectivement pour des bétons secs compactés, de résistance à la compression moyenne de 20 N/mm² (BSC 20) et de 30 N/mm² (BSC 30) mesurée sur carottes de 100 cm² à 90 jours d'âge. Un ajout de cendres volantes est autorisé afin d'améliorer l'ouvrabilité et de diminuer le risque de fissuration. Cet ajout est limité à un maximum de 5 % de la masse des granulats secs.

La teneur en eau idéale est déterminée à partir d'un essai Proctor modifié; elle est généralement comprise entre 4 et 7 % de la masse des matériaux secs.

Ouverture des mailles (mm)	Passant (%)	
	BSC 0/16	BSC 0/20
25	-	100
20	100	84 à 100
16	87 à 100	73 à 100
10	67 à 86	56 à 81
5	45 à 67	36 à 59
2	29 à 45	23 à 42
0,400	10 à 23	8 à 20
0,080	1 à 12	0 à 11

Tableau 11 - Fuseaux granulométriques des bétons secs compactés 0/16 et 0/20

Le béton sec compacté est mis en œuvre en une seule couche à la niveleuse ou au finisseur. Il est conseillé d'utiliser du matériel permettant d'assurer un bon pré-compactage du mélange. Ainsi, des finisseurs munis d'un système à double dameur ou encore, en Espagne, des machines à coffrages glissants munies de puissantes plaques vibrantes sont utilisés.

Le compactage doit être intense de manière à atteindre une masse volumique sèche supérieure à 97 % de l'optimum Proctor modifié. Il est recommandé d'utiliser un compacteur vibrant à jante lisse de 10 tonnes au moins en combinaison avec un rouleau à pneus d'une masse au moins égale à 17 tonnes.

Fig. 8 - Fuseau granulométrique du béton sec compacté 0/16

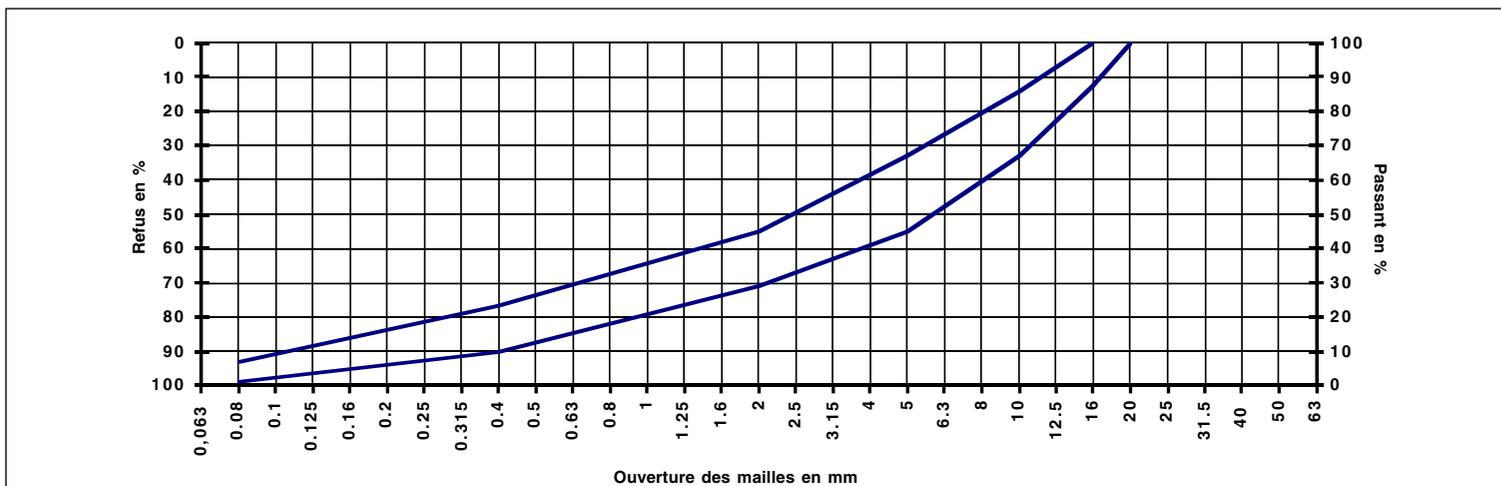
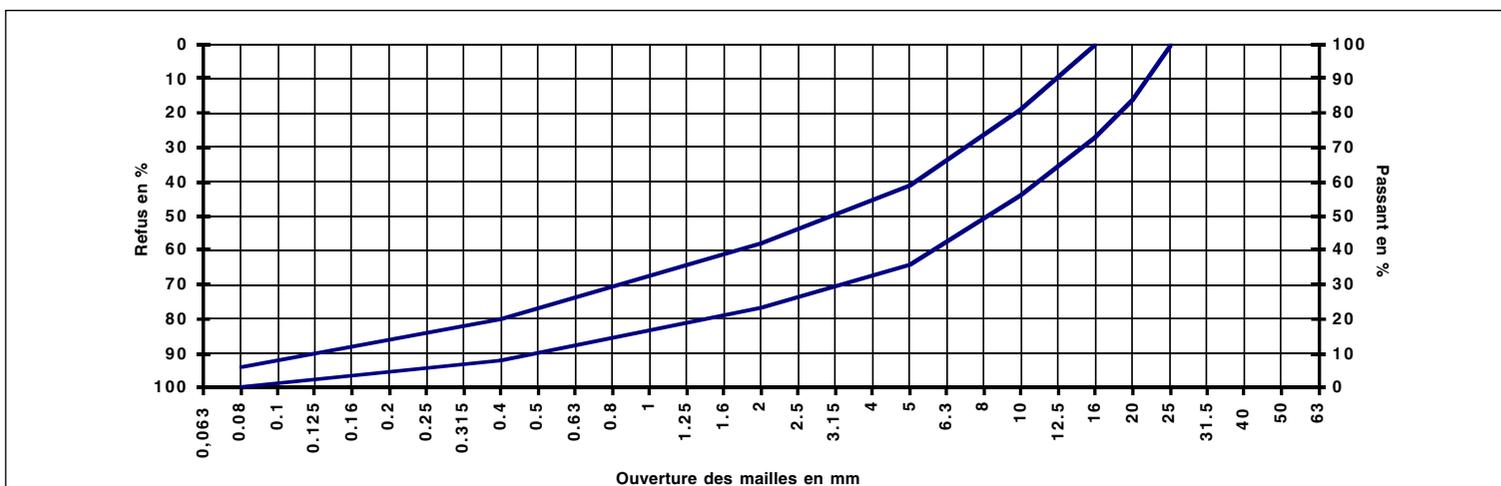


Fig. 9 - Fuseau granulométrique du béton sec compacté 0/20



Pour éviter une fissuration irrégulière, il faut obligatoirement entailler ou scier des joints, dont l'entre-distance est d'au maximum 5 voire 4 mètres. Ces joints ont une profondeur minimale égale au tiers de l'épaisseur de la dalle et sont réalisés, dans la mesure du possible, aux même endroits que les joints du béton du revêtement routier.

Ce type de fondation permet une mise en service de toute la circulation de moins de 3,5 tonnes immédiatement après compactage et protection contre la dessiccation. Il faut toutefois que le matériau compacté possède une stabilité suffisante, ce qui est facilement obtenu à partir de granulats concassés.

Le *tableau 12* donne, à titre d'exemple, des résultats obtenus sur éprouvettes Proctor modifié. Il s'agit d'un béton à base de granulats calcaires dont le squelette inerte entre dans le fuseau 0/20 présenté ci-avant. La teneur en eau est très faible, ce qui permet d'obtenir des masses volumiques et des résistances à la compression très élevées (Optimum Proctor de l'ordre de 5 % d'eau). Les résultats montrent bien qu'il est très important de maîtriser la teneur en eau, de manière à garantir des résistances élevées.

Composition des bétons (kg/m ³)						
- Concassé calcaire 7/20		835		815		
- Concassé calcaire 2/7		520		510		
- Sable de concassage calcaire lavé 0/2		730		710		
- Ciment CEM III/A 42,5 N LA		200		240		
Masse volumique sèche		2 285		2 275		
Essai Proctor modifié, compactage à différentes teneurs en eau (W) Détermination de la masse volumique sèche (MVS) et de la résistance à la compression (R _c)						
	W (%)	MVS (kg/m ³)	R _c à 7d (N/mm ²)	W (%)	MVS (kg/m ³)	R _c à 7d (N/mm ²)
	1,8	2 190	5,1	1,6	2 170	5,1
	3,6	2 200	12,1	3,2	2 195	12,2
	4,2	2 235	22,2	4,1	2 235	24,5
	5,2	2 285	24,6	4,7	2 270	34,1
	7,1	2 255	21,6	7,1	2 225	29,6

Tableau 12 - Composition et performances mécaniques de bétons secs compactés [Source : UCL]

Mise en place d'un béton sec compacté BSC 30 comme revêtement routier d'une voirie agricole (Diepenbeek).



Applications des bétons secs compactés :

Le béton sec compacté peut être considéré comme un hybride, entre les couches de base traitées au ciment et certains bétons riches posés à la *slipform*. Il est mis en œuvre au moyen du même matériel que celui utilisé pour les couches de base et de façon identique à celles-ci. Il s'agit d'un matériau très sec permettant ainsi son compactage au rouleau. Par contre, sa teneur en ciment, ainsi que les résistances obtenues, sont relativement élevées. En conséquence, les bétons secs compactés sont capables de supporter le trafic circulant directement sur leur surface, possibilité que n'offrent pas les autres types de fondations traitées au ciment. Il convient bien dans les zones urbaines où les fondations et revêtements sont mis en œuvre par courts tronçons successifs. En effet, la bonne portance procurée par le béton sec compacté dès sa mise en œuvre permet de ne pas trop perturber le trafic des riverains pendant la durée des travaux.

Conseils pratiques :

- La courbe granulométrique du béton doit être continue, un bon sable à granulométrie étalée doit être utilisé.
- Le D_{max} du granulat est limité à 20 mm pour éviter une ségrégation éventuelle, pour faciliter la mise en œuvre et pour favoriser l'uni de surface.
- La teneur en ciment doit être au minimum de 200 kg/m³.
- La teneur en eau doit être limitée, elle est en général de l'ordre de 5 % de la masse sèche du béton.
- Le compactage doit être très énergique pour atteindre la couche dans toute sa profondeur et être terminé le plus rapidement possible après la préparation du mélange (dans les 2 heures).
- Il est recommandé de ne pas travailler par temps froid (≤ 1 °C à 8 heures du matin ou ≤ -3 °C durant la nuit).
- La protection contre la dessiccation du béton fraîchement compacté doit toujours être réalisée et ce, le plus rapidement possible après la mise en œuvre.

PRESCRIPTION D'UN BÉTON SEC COMPACTÉ :

Conformément aux exigences des *Cahiers des Charges-type* régionaux en vigueur (SB 250, CCT RW99, CCT 2000).

A défaut, les éléments ci-après seront repris :

- le béton sec compacté sera constitué de granulat, de sable, de ciment et d'eau mélangés de façon homogène en centrale ;
- la teneur en ciment sera d'au minimum 200 kg par m³ de béton compacté (BSC 20) voire de 250 kg/m³ (BSC 30) ;
- la teneur en eau ne dépassera pas 7 % de la masse sèche du mélange ;
- la résistance à la compression à 28 jours sur cubes de 15 cm de côté sera d'au minimum 20 N/mm² (BSC 20) voire de 30 N/mm² (BSC 30).

EXEMPLE DE MISE EN ŒUVRE D'UNE FONDATION EN SABLE-CIMENT (Autoroute A8)



Fabrication d'un mélange homogène de sable ciment en centrale.



Mise en œuvre du sable-ciment à la nivelleuse et au rouleau vibrant.

Réglage des profils en long et en travers par laser. Contrôle de l'uni de surface à la règle de 3 m.





EXEMPLE DE MISE EN ŒUVRE D'UNE FONDATION EN BETON MAIGRE POREUX (Rue Ducale, Bruxelles)

Afin d'éviter des hétérogénéités importantes, le béton maigre poreux doit être bien réglé avant compactage.



Compactage énergétique au rouleau lisse (non vibrant pour la dernière passe).



Protection contre la dessiccation au moyen d'une feuille plastique.

LE DÉLAI DE MANIABILITÉ ET L'UTILISATION DE RETARDATEURS DE PRISE

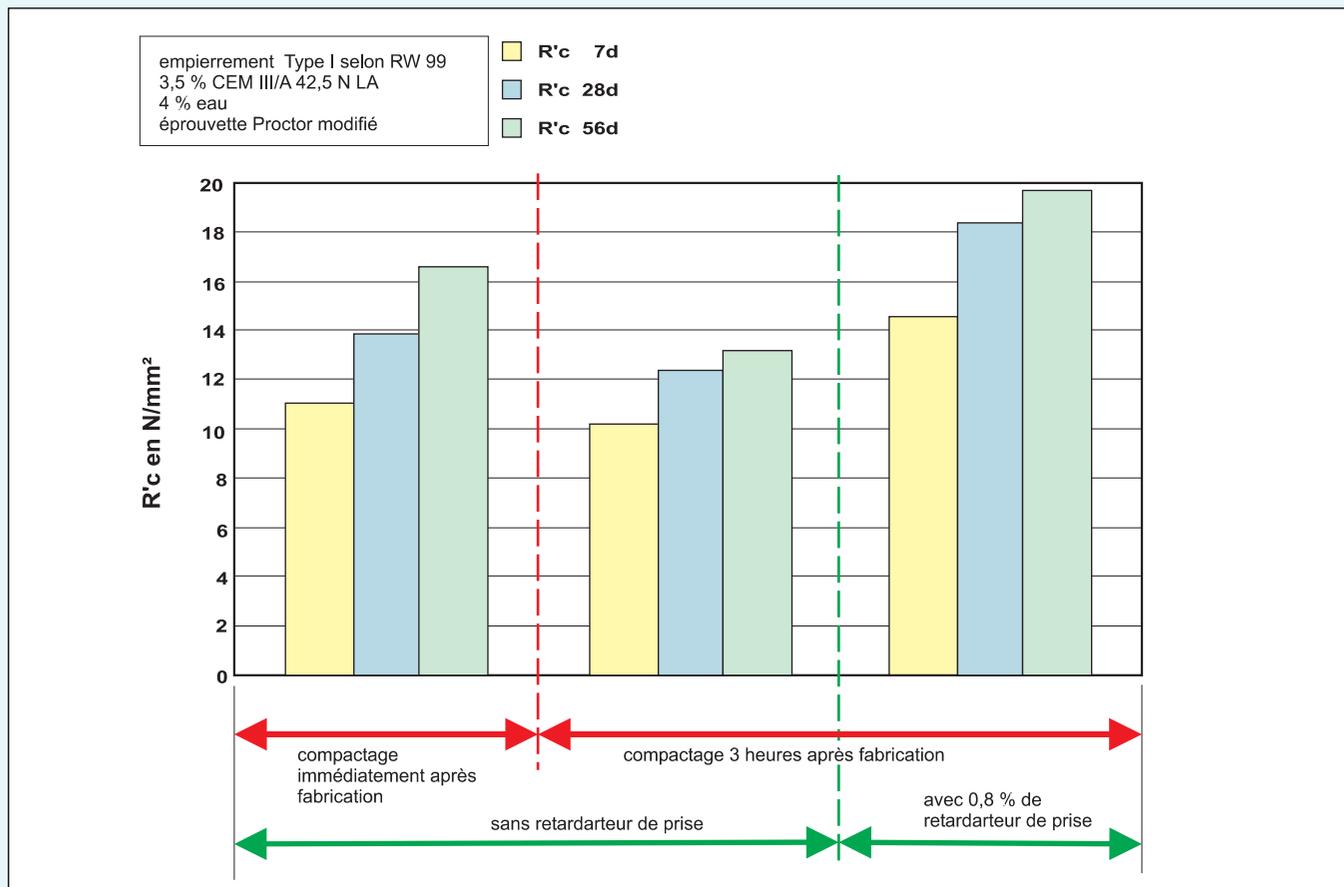
L'incorporation d'un retardateur de prise au matériau traité avec du ciment lors du malaxage a pour but d'allonger le délai de maniabilité disponible pour la mise en œuvre. Cette incorporation est facile et peu coûteuse. De plus, les retardateurs de prise ont un effet secondaire plastifiant qui rend le compactage plus facile, ce qui permet, soit d'obtenir des compacités plus élevées, soit de réduire la teneur en eau de compactage. Ces deux facteurs sont favorables à l'augmentation des résistances, tous les autres facteurs restant identiques.

L'utilisation d'un retardateur de prise permet d'augmenter de plusieurs heures le délai pour transporter, répandre, compacter et régler le matériau. Il permet la réalisation d'un compactage très intense et d'un uni de surface parfait. L'intérêt de l'utilisation de retardateurs de prise dans les matériaux traités au ciment est maintenant couramment reconnu en France.

La figure ci-après donne les résultats d'une étude de laboratoire. Un empierrément dont le squelette inerte entre parfaitement dans le fuseau de « Type I » a été traité avec 3,5 % de ciment CEM III/A 42,5 N LA.

La teneur en eau du mélange est invariablement de 4 % (par rapport à la masse sèche du mélange). Des éprouvettes Proctor modifiées ont été compactées soit immédiatement après fabrication du mélange, soit 3 heures après, ces mélanges étant, dans ce cas, conservés dans un sac parfaitement hermétique. Dans le cas du compactage retardé, des mélanges ont été réalisés sans et avec retardateur de prise. Après compactage, les éprouvettes sont parfaitement protégées contre la dessiccation. Les résultats donnent les résistances à la compression après 7 jours, 28 jours et 56 jours d'âge. Préalablement aux essais de résistance à la compression, les faces des éprouvettes Proctor ont été enduites au mortier.

Exemple de résultats : empierrément de « Type I » traité au ciment avec et sans retardateur de prise
[Source: CRIC]



CONTRÔLE EN COURS DE ET/OU APRÈS EXÉCUTION

Les différents contrôles possibles *en cours d'exécution* d'une fondation traitée au ciment sont :

- la conformité du matériel de mise en œuvre ;
- la propreté du fond de coffre ;
- l'examen des épaisseurs probables de la fondation par rapport au niveau du fond de coffre ;
- l'observation des conditions atmosphériques ;
- la composition du mélange par vérification des données reprises sur le bon de livraison de la centrale à béton ;
- l'homogénéité du mélange au déversement (absence de ségrégation) ;
- la teneur en eau du mélange. Ce contrôle peut être effectué par séchage jusqu'à masse constante d'une certaine quantité de matériau sur un réchaud à gaz ou dans un four à micro-ondes. La teneur totale en eau w du mélange encore frais, exprimée en pour cent de la masse sèche, est donnée par la formule :

$$w = \frac{\text{masse humide} - \text{masse sèche}}{\text{masse sèche} - \text{tare}} \times 100$$

Afin de convertir cette donnée en quantité d'eau en kg/m^3 , il y a lieu de déterminer la masse volumique humide (MVH) du matériau, en kg/m^3 , obtenue après un compactage optimal. Ce compactage peut être réalisé par la méthode Proctor dans un moule de volume connu ou en compactant jusqu'à refus le matériau au marteau électrique dans un cube de volume également connu. Le compactage d'une éprouvette cubique au marteau électrique se fera de préférence en 2 couches d'égale épaisseur. La masse volumique sèche (MVS) du mélange, en kg/m^3 , est obtenue par la formule :

$$MVS = \frac{MVH}{1 + \frac{w}{100}}$$

La différence « MVH – MVS » donne la quantité d'eau du mélange en kg/m^3 . A noter que les éprouvettes Proctor ou les cubes compactés au marteau électrique peuvent ensuite être utilisés pour un contrôle de la résistance à la compression du matériau ;

- l'efficacité du compactage : le nombre de passe des compacteurs est déjà significatif ;
- le niveau de surface. Les profils en long et en travers doivent être respectés avec une tolérance locale de 1 cm ;
- l'uni de surface. Les irrégularités de surface ne dépassent pas 1 cm (contrôlées à la règle de 3 m) ;
- la protection contre la dessiccation par humidification suivie de l'application éventuelle d'une émulsion ou la pose d'une membrane imperméable ;
- éventuellement, la préfissuration de la fondation (emplacement et profondeur des joints).

Les différents contrôles possibles *après exécution* d'une fondation traitée au ciment sont :

- la résistance à la compression sur carottes de 100 cm^2 prélevées dans l'ouvrage ou sur éprouvettes compactées pendant les travaux de mise en œuvre ;
- l'épaisseur de la fondation en mesurant la hauteur des carottes prélevées pour la vérification des résistances à la compression.



Fabrication d'éprouvettes pour contrôle de la qualité du béton maigre. Compactage en deux couches au marteau électrique.

(Couverture:) Mise en œuvre d'une fondation en sable-ciment sur l'autoroute A8.

(Dernière page:) Revêtement en pavés de béton drainant : afin d'assurer la continuité drainante de la structure, il y a lieu d'utiliser un béton maigre poreux comme fondation.

BIBLIOGRAPHIE



ce bulletin est publié par :
FEBELCEM - Fédération de
l'Industrie Cimentière Belge
rue Volta 8 - 1050 Bruxelles
tél. 02 645 52 11
fax 02 640 06 70
<http://www.febelcem.be>
e-mail: info@felbelcem.be

auteur :
Ir Cl. Ployaert

photos :
P. Van Audenhove
sauf mention contraire

éditeur responsable :
J.P. Jacobs

dépôt légal :
D/2004/0280/06

- [1] *Le recyclage des matériaux dans les travaux de voiries communales et provinciales - Code de bonne pratique*
Ministère de la Région wallonne (DGPL), Faculté des Sciences Agronomiques de Gembloux et Institut Scientifique de Service Public
Mars 2002
- [2] *Fondations stabilisées au ciment - Classification, Fabrication, Domaines d'emploi*
Bulletin n° 11
Bruxelles : Fédération de l'Industrie Cimentière (FIC), 1983
- [3] ARQUIE G.
Théorie générale de l'influence de la teneur en eau sur les résultats de compactage
Bulletin de Liaison des Laboratoires des Ponts et Chaussées
n° 64, mars-avril 1973, réf. 1297, p. 145-158
Paris
- [4] *La maîtrise de la fissuration des graves-ciment*
Supplément Routes n° 57
Paris : CIMbéton, septembre 1996
- [5] *Cahier des Charges-type RW 99 : 2004*
Ministère de la Région wallonne – MET
- [6] *Standaardbestek 250*
Ministerie van de Vlaamse Gemeenschap – LIN
- [7] *Cahier des Charges-type 2000*
Ministère de la Région de Bruxelles-Capitale – AED
- [8] DEBROUX R. ; JASIENSKI A. ; PLOYAERT CL.
Foundation Materials - Cement - Stabilised Quarry Sand
8ème Symposium International de la Route en Béton - Thème II
Lisbonne, septembre 1998
- [9] PETIT J.
Les fondations routières en béton maigre - Spécifications, nouvelles méthodes de mise en œuvre, dimensionnement
RR CRIC 50-f-1980
- [10] PETIT J.
Nouvelles perspectives pour les fondations routières en béton maigre.
La technique routière, vol. XXIV n°1/1979
- [11] JOFRE C.
Emploi du béton compacté dans les chaussées
Association internationale permanente des Congrès de la Route
Comité Technique AIPCR des Routes en Béton 07.05B
1993

