

VOIRIES ET AMÉNAGEMENTS URBAINS EN BÉTON

TOME **2**

Mise en œuvre





VOIRIES ET AMÉNAGEMENTS URBAINS EN BÉTON

TOME **2**

Mise en œuvre

*Ce guide a été mis à jour par Joseph Abdo
et réédité en 2009*

Les contributions à la version originale de l'ouvrage :

<i>Joseph ABDO</i>	CIMBÉTON
<i>Roland DALLEMAGNE</i>	VICAT
<i>Bernard DARBOIS</i>	CIMBÉTON
<i>Claude DERACHE</i>	CIMENTS CALCIA
<i>Arnaud DE CHALAIN</i>	CIMENTS CALCIA
<i>Patrick GUIRAUD</i>	LAFARGE CIMENTS
<i>Emmanuel HAAG</i>	CIMENTS D'ORIGNY
<i>Jacques MARZIN</i>	LAFARGE CIMENTS

Avant-propos

● Ce guide a un objectif bien précis : réunir l'ensemble des renseignements nécessaires à l'entreprise routière afin de lui épargner de multiples et laborieuses recherches dans des ouvrages disparates.

Mais, pour réaliser un tel ouvrage, apte à répondre aux besoins et aux souhaits d'une large gamme d'utilisateurs, nous avons été amenés à nous écarter des sentiers traditionnels et à mettre l'accent sur :

- les schémas et les illustrations,
- les données concrètes,
- les conseils pratiques,
- les tableaux de valeurs chiffrées,
- etc.

Ainsi conçu, cet ouvrage est beaucoup plus qu'un aide-mémoire. Il est aussi tout autre chose qu'une mosaïque de monographies. Il sera constamment à la disposition de l'entreprise qui pourra s'en servir pour étudier un dossier et préparer ses documents ou organiser une réunion de travail.

Elle trouvera dans ce document tous les renseignements dont elle aura besoin pour préparer une étude ou une soumission, pour évaluer et comparer des solutions techniques, réaliser... les projets de voiries et d'aménagements urbains en béton.

Sommaire

● I - Recommandations préliminaires pour la préparation d'une soumission par l'entreprise	11
1 - INTRODUCTION	12
2 - RECOMMANDATIONS PRÉLIMINAIRES	12
2.1 - Examen du D.C.E.	13
2.2 - Visite du chantier	13
2.3 - Choix du matériel	14
2.4 - Identification des sources d'approvisionnement en matériaux : qualité et quantité	16
2.5 - Étude de l'organisation du chantier	16
2.5.1 - Le stockage des produits	
2.5.2 - La fabrication et le transport du béton	
2.5.3 - L'organisation de la mise en œuvre	
2.6 - Étude et organisation des contrôles	17

● 2 - Le béton routier : formulation, fabrication et transport	19
---	-----------

1 - INTRODUCTION	20
2 - FORMULATION DES BÉTONS ROUTIERS	21
2.1 - Objectif	21
2.2 - Caractéristiques visées	21
2.2.1 - Résistances mécaniques	
2.2.2 - Résistance au gel et aux fondants	
2.2.3 - Consistance du béton	
2.3 - Constituants du béton : caractéristiques	25
2.3.1 - Les ciments courants	
2.3.2 - Les granulats	
2.3.3 - L'eau	
2.3.4 - Les adjuvants	

2.3.5 - Les colorants	
2.3.6 - Les additions	
2.3.7 - Les fibres	
2.4 - Composition du béton	30
2.4.1 - Principe	
2.4.2 - Étude de formulation	
2.4.3 - Synthèse	
3 - FABRICATION DES BÉTONS ROUTIERS	33
3.1 - Intérêt de l'utilisation du béton prêt à l'emploi	33
3.1.1 - Simplification de l'organisation du chantier	
3.1.2 - Sécurité sur le plan technique	
3.1.3 - Avantages économiques	
3.1.4 - Le pompage	
3.1.5 - Les livraisons	
3.2 - Comment passer une commande de béton routier ?	35
3.2.1 - Cas des bétons de catalogue	
3.2.2 - Cas des bétons spécifiques	
3.3 - Épreuves d'étude et de convenance	36
Annexe 1 : Commande et livraison du béton prêt à l'emploi	38

● 3 - Travaux de terrassements	39
1 - INTRODUCTION	40
2 - CAS DE RENFORCEMENT D'UNE VOIRIE EXISTANTE	40
2.1 - Renforcement d'une structure souple	41
2.2 - Renforcement d'une structure rigide	41
2.3 - Le dimensionnement	41
3 - CAS DE RÉFECTION D'UNE VOIRIE EXISTANTE	43
3.1 - Décaissement de l'ancienne structure	43
3.2 - Réorganisation éventuelle des réseaux enterrés	43
3.3 - Travaux éventuels de purge et de comblement	44
3.4 - Compactage de la plate-forme	44
4 - CAS DE CONSTRUCTION D'UNE VOIRIE NEUVE	44
4.1 - Les travaux préparatoires	44
4.1.1. - Tracé de la route	
4.1.2 - Dégagement de l'emprise de la route	

4.1.3 - Décapage de la terre végétale	
4.2 - Les terrassements	45
4.2.1 - Exécution des déblais	
4.2.2 - Exécution des remblais	
4.2.3 - Réalisation de la plate-forme support de la chaussée	
4.3 - Traitement des sols en place	47
4.3.1 - Définition	
4.3.2 - Objectif	
4.3.3 - Les différents types de traitements	
4.3.4 - Exécution des travaux	
4.3.5 - Traitements - types	
4.3.6 - Conditions de mise en œuvre	
5 - CONCLUSION	52

● 4 - Mise en œuvre du béton routier	53
1 - INTRODUCTION	54
2 - PRÉPARATION DU CHANTIER	55
2.1 - Protection du chantier	55
2.2 - Protection des ouvrages existants	55
2.3 - Préparation de la plate-forme support de chaussée	55
2.4 - Coffrages : types, pose et vérification	56
2.5 - Calepinage en pavés	57
2.6 - Préparation autour des points singuliers	58
3 - MISE EN ŒUVRE DU BÉTON	59
3.1 - Prise en compte des conditions atmosphériques	59
3.2 - Bétonnage	59
3.2.1 - Mise en œuvre à l'aiguille et/ou à la règle vibrantes	
3.2.2 - Mise en œuvre au Striker	
3.2.3 - Mise en œuvre au vibro-finisher	
3.2.4 - Mise en œuvre à la machine à coffrage glissant	
3.3 - Bétonnage bicouche	63
4 - LE TALOCHAGE	63
5 - LA CONFECTION DES JOINTS	64
5.1 - Exécution des joints moulés	64
5.2 - Exécution des joints sciés	64

6 - LE TRAITEMENT DE SURFACE	65
6.1 - Le brossage ou balayage	66
6.2 - Le striage	67
6.3 - La désactivation	68
6.4 - Le bouchardage	69
6.5 - Le béton imprimé	69
6.6 - Le cloutage	70
7 - LA CURE DU BÉTON	71
8 - CONCLUSION	72
Annexe 2 : Les bétons : caractéristiques et mise en œuvre	73

● 5 - Éléments pour déterminer le coût de construction d'un revêtement en béton 75

1 - INTRODUCTION	76
2 - MÉTHODE DE DÉTERMINATION DU COÛT DE CONSTRUCTION D'UN REVÊTEMENT EN BÉTON	76
2.1 - Cas d'une mise en œuvre à l'aiguille et/ou à la règle vibrantes, ou au Striker	77
2.2 - Cas d'une mise en œuvre au vibro-finiisseur	78
2.3 - Cas d'une mise en œuvre à la machine à coffrage glissant	79
3 - COÛT ADDITIONNEL POUR DES TRAITEMENTS DE SURFACE SPÉCIFIQUES	81
3.1 - Cas du béton désactivé	81
3.2 - Cas du béton imprimé	83
3.3 - Cas du béton bouchardé	85
4 - COÛT ADDITIONNEL POUR LA CONFECTION DES JOINTS	86
4.1 - Cas des joints sciés	86
4.2 - Cas d'un calepinage en pavés	87
5 - CONCLUSION	88

● 6 - Travaux d'exploitation 89

1 - INTRODUCTION	90
2 - LE REVÊTEMENT EN BÉTON FACE AUX EXIGENCES EN MATIÈRE D'EXPLOITATION	90
2.1 - Facilité de nettoyage	91

2.2 - Facilité d'intervention sur les réseaux enterrés	91
2.3 - Aptitude à recevoir des interventions ponctuelles	96
2.4 - Aptitude à recevoir des traitements ponctuels	96
2.5 - Aptitude à recevoir une signalisation horizontale	96
2.6 - Aptitude aux travaux d'élargissement	97
3 - LE REVÊTEMENT EN BÉTON FACE AUX EXIGENCES EN MATIÈRE DE CARACTÉRISTIQUES SUPERFICIELLES	97
3.1 - Régénération de l'adhérence	98
3.1.1 - <i>Le grenailage</i>	
3.1.2 - <i>Le rabotage</i>	
3.1.3 - <i>Le bouchardage</i>	
3.1.4 - <i>Les enduits superficiels</i>	
3.2 - Rectification de l'uni : technique de rabotage	100
3.3 - Amélioration du confort acoustique : technique de rechargement en couche mince collée de béton poreux	100
4 - LE REVÊTEMENT EN BÉTON FACE AUX EXIGENCES DE DURABILITÉ	101
4.1 - Le regarnissage des joints	101
4.2 - La réparation des défauts localisés	102
4.3 - Le renforcement de la structure à la fin de sa période de service	102
5 - CONCLUSION	103



Chapitre

1

Recommandations préliminaires pour la préparation d'une soumission par l'entreprise

1 - Introduction

2 - Recommandations préliminaires

1. Introduction

Le code des marchés publics de travaux fixe de façon précise les procédures d'Appel d'Offres à l'issue de laquelle la maîtrise d'ouvrage, conseillée par le maître d'œuvre, décide du choix de l'entreprise pour la réalisation d'une voirie ou d'un aménagement urbain en béton.

Sur la base d'un dossier appelé « Dossier de Consultation des Entreprises » : D.C.E. (Règlement de Consultation R.C. - Cahier des Clauses Administratives Particulières C.C.A.P. - Cahier des Clauses Techniques Particulières C.C.T.P. - Bordereau de Prix Unitaire - B.P.U. - Détail Estimatif - D.E., plans, etc), définissant les travaux à réaliser pour assurer la conformité de l'ouvrage par rapport au projet, les entreprises font des propositions de prix en explicitant les moyens et les méthodes respectant les règles de l'art qu'elles se proposent d'utiliser pour la réalisation de l'ouvrage.

A l'issue de la consultation, le maître d'ouvrage, conseillé par le maître d'œuvre, choisit la proposition la mieux-disante. Il est donc de l'intérêt de l'entreprise de procéder à une étude préliminaire du projet, de bien penser à l'organisation du chantier en tenant compte des conditions particulières du site et de présenter sa soumission en explicitant les points particuliers du projet nécessitant la démarche d'organisation présentée.

2. Recommandations préliminaires

Nous donnons ci-après quelques recommandations permettant à l'entreprise de bien préparer sa soumission pour un projet de voirie ou d'aménagement urbain en béton.

2.1 - Examen du D.C.E.

Un examen approfondi des documents du D.C.E. et des textes réglementaires auxquels le D.C.E. se réfère est donc indispensable pour l'entreprise. L'attention peut ainsi être attirée sur certains points particuliers qui ont une grande influence sur l'organisation et le déroulement des travaux. Citons à titre d'exemples :

- la nature des travaux et les caractéristiques dimensionnelles du projet : longueur, largeur, épaisseur, etc.,
- les délais,
- les prescriptions du Cahier des Clauses Techniques Générales - C.C.T.G. - auxquelles le C.C.T.P. se réfère,
- les spécifications des normes auxquelles le C.C.T.P. se réfère,
- la nature de la finition (nature des joints, nature du traitement de surface, etc.),
- le cas échéant, les exigences en matière de mise en œuvre (bétonnage par demi-chaussée, etc.).



2.2 - Visite du chantier

Une visite du site du futur chantier permet à l'entreprise de déceler les aléas éventuels et par conséquent d'en tenir compte dans le schéma prévisionnel d'organisation du chantier et dans la soumission.

En particulier, l'entreprise doit veiller, lors de l'inspection du site, à relever les éléments suivants :

- reconnaissance visuelle du site (type des sols, appréciation de la portance du sol, écoulement des eaux, topographie du terrain, etc.),
- gabarit des accès,
- largeur disponible pour le passage des engins et des machines de mise en œuvre (obstacles existants : réseaux enterrés, lignes aériennes PTT et EDF, poteaux, haies, façades, petits ouvrages d'art, etc.),
- possibilités de raccordement au réseau électrique (intensité, puissance, etc.) au réseau téléphonique et de branchement à une alimentation d'eau (débit, etc.),
- identification des itinéraires de transport (pour approvisionnement du chantier en matériaux et pour la mise à la décharge) ; l'entreprise veillera dans ce cas à

tenir compte des limitations de tonnage imposées sur certaines routes ou traversées de village,

- prise de contact avec les autorités locales (mairie, services techniques, etc.) et avec les concessionnaires des réseaux (EDF, GDF, PTT, Eau, ...).

2.3 - Choix du matériel

Le choix du matériel de fabrication, de transport et de mise en œuvre doit se faire en tenant compte de l'importance et des caractéristiques géométriques du chantier à réaliser, des conditions locales, du rendement escompté, du type et des caractéristiques mécaniques exigées du béton.

L'examen des documents du D.C.E. et la visite du site du futur chantier vont apporter à l'entreprise l'éclairage nécessaire pour optimiser son choix en matière de matériel et aussi en matière d'organisation du chantier.

Néanmoins, quelques règles de principe méritent d'être rappelées :

- la fabrication du béton sur le site ne peut se justifier économiquement que pour des chantiers de superficies importantes (> à 20 000 m²). Dans la plupart des cas, il est conseillé à l'entreprise de faire appel à une Centrale de Béton Prêt à l'emploi, de préférence certifiée NF, qui offre un bon nombre d'avantages et de garanties qui sont :
 - conformité des bétons aux normes en vigueur,
 - qualité du béton parfaitement maîtrisée et une grande régularité,
 - simplifie considérablement l'organisation du chantier,
 - proximité : réseau BPE couvre l'ensemble du territoire (on n'est jamais à plus de 30 km d'une centrale BPE),
 - disponibilité,
 - assistance technique à la mise en œuvre,
 - formulation : trois types de bétons
 - « **béton à propriétés spécifiées – BPS** », béton pour lequel les propriétés requises et la caractéristiques supplémentaires sont spécifiées au producteur,

- « **béton à composition prescrite – BCP** », béton pour lequel la composition et les constituants à utiliser sont spécifiés au producteur,
 - « **béton à composition prescrite dans une norme – BCPN** », béton à composition prescrite dont la composition est définie dans une norme applicable là où le béton est utilisé.
- le choix du matériel de transport (déblais, granulats pour couche de forme) et des engins de chantier doit prendre en compte les éléments recueillis lors de la visite du site. Il faut donc s'assurer que le choix du matériel est compatible avec :
 - le tonnage maximal autorisé,
 - l'itinéraire affecté et balisé,
 - le choix du matériel de mise en œuvre doit se faire en fonction de l'importance du chantier et en tenant compte des éléments recueillis lors de la visite du site (largeur disponible, topographie du terrain, etc.), des caractéristiques physiques et mécaniques exigées du béton et des rendements imposés.



Le tableau 1 donne des éléments de comparaison entre les différents matériels utilisés pour la mise en œuvre des voiries et aménagements urbains en béton.

Tableau 1 : Comparaison des différents procédés de mise en œuvre des voiries et aménagements urbains en béton

Technique Paramètre	Aiguille et/ou règle vibrante	Vibro-finisser	Machine à coffrage glissant
Coffrage	OUI	OUI	–
Surlargeur nécessaire de la plate-forme	0,50 m	0,50 m	1,50 m
Nombre de machines	Petit matériel	1, 2 ou 3	1
Affaissement au cône	5 à 10 cm	3 à 7 cm	1 à 3 cm
Mode de vibration	Règles et aiguilles vibrantes	Poutre vibrante	Aiguilles vibrantes
Rendement journalier	150 à 300 m ²	600 à 750 m ²	1 500 à 3 000 m ²
Personnel de chantier	1 chef d'équipe 5 ouvriers	1 chef d'équipe 8 ouvriers	1 chef d'équipe 5 ouvriers

2.4 - Identification des sources d'approvisionnement en matériaux : qualité et quantité

Une étude est nécessaire pour identifier les sources potentielles d'approvisionnement en matériaux (granulats, béton, produits pour joints, désactivant éventuel, produits de cure, etc.). Lors de cette étape, il faut s'assurer de :

- la qualité des matériaux proposés qui doivent répondre aux exigences du CCTP et si elles existent, aux normes auxquelles il se réfère,
- la capacité des fournisseurs à répondre aux cadences exigées par le chantier.

La consultation sur les prix, avec les fournisseurs identifiés, va permettre à l'entreprise d'établir sa soumission. Lors de cette consultation, il est important de bien préciser pour les produits demandés :

- les spécifications ou exigences demandées
- le lieu de livraison
- le planning des livraisons
- etc.



2.5 - Étude de l'organisation du chantier

Elle doit concerner :

2.5.1 - Le stockage des produits

Il faut prévoir un lieu de stockage pour les matériaux tels que produits pour joints, produits de cure, désactivant, carburant, petit outillage, etc.

2.5.2 - La fabrication et le transport du béton

La centrale de BPE doit comporter un nombre de trémies au moins égal à celui

des granulats à mélanger (gravillons et sables). La capacité de la centrale doit être compatible avec les cadences prévues lors de la mise en œuvre.

Le nombre de toupies, leur charge utile, doivent être adaptés à :

- la cadence de mise en œuvre,
- à la distance et durée du transport, compte tenu de l'itinéraire entre le lieu de fabrication et le chantier,
- les possibilités d'approvisionnement devant le matériel de mise en œuvre (latéral, frontal, par pompage du béton, etc.).

2.5.3 - L'organisation de la mise en œuvre

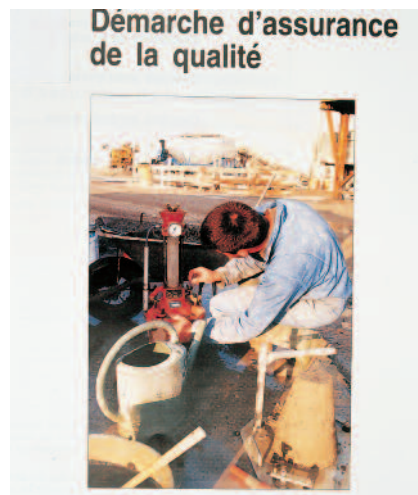
Elle doit porter sur les différentes phases d'exécution, leur enchaînement et leur planification. Elle doit prendre en compte les conditions climatiques (froid, chaleur, pluie, vent).

Ce schéma d'organisation est indispensable car il permet à l'entreprise de déterminer les besoins en personnel pour exécuter le chantier dans les délais impartis.



2.6 - Étude et organisation des contrôles

Outre le contrôle extérieur assuré par un représentant du maître d'œuvre, l'entrepreneur doit organiser soigneusement les contrôles prévus à sa charge dans le CCTP et repris dans le Plan d'Assurance de la Qualité, en général de type C.





Chapitre

2

Le béton routier : formulation, fabrication et transport

1 - Introduction

2 - Formulation des bétons routiers

3 - Fabrication des bétons routiers

1. Introduction

Le béton routier doit satisfaire les exigences des normes NF EN 206-1 « Béton – Partie 1 : spécifications, performances, production et conformité et son annexe nationale », NF EN 13877-1 « Chaussée en béton – Partie 1 : matériaux » et NF P 98-170 « Chaussées en béton de ciment – exécution et contrôles ». Le choix des constituants et la définition de leur proportion dans le mélange doivent être déterminés afin d'obtenir des performances adaptées au mode de mise en œuvre et aux sollicitations particulières auxquelles les matériaux de chaussées sont soumis.

Les caractéristiques physiques des bétons routiers doivent être adaptées au matériel de mise en œuvre utilisé.

Les sollicitations particulières auxquelles le béton routier est soumis sont :

- celles dues au trafic qui imposent au béton des caractéristiques mécaniques minimales (résistance en fendage minimale et résistance élevée à « l'usure » superficielle),
- celles dues aux agents atmosphériques (vent, chaleur, froid, etc.) qui imposent, au stade de la fabrication du béton, l'adjonction obligatoire d'un adjuvant entraîneur d'air qui conférera au revêtement béton une résistance élevée au gel en présence de sels de déverglaçage. Au stade de la mise en œuvre, il faut prévoir les mesures de protection obligatoires comme la cure du béton qui empêche l'évaporation de l'eau.

Pour satisfaire à l'ensemble de ces exigences, il est nécessaire de procéder à des études préalables portant sur la composition et la formulation des bétons. Une telle étude se justifie dans le cas d'un grand chantier routier ou lorsqu'on envisage de mettre en place une formule de référence régionale. L'étude peut être simplifiée en fonction des connaissances locales en matière de granulats et de ciment. Elle peut exceptionnellement se limiter à la vérification des caractéristiques mécaniques du béton.

Les centrales de béton prêt à l'emploi proposent des compositions de bétons routiers conformes aux spécifications des normes NF EN 13877-1 et NF P 98-170.

2. Formulation des bétons routiers

2.1 - Objectif

L'objectif de l'étude de formulation d'un béton routier est triple :

- rechercher les proportions optimales des différents constituants,
- vérifier la compatibilité des constituants entre eux,
- adapter la composition du béton aux conditions et moyens de mise en œuvre.

Cette démarche doit satisfaire les caractéristiques techniques définies dans le CCTP.

2.2 - Caractéristiques visées

Les caractéristiques à obtenir dépendent de la nature de l'ouvrage à réaliser, des conditions et des moyens de mise en œuvre.

2.2.1 - Résistances mécaniques

La première caractéristique visée est, bien entendu, la résistance mécanique du béton. Elle est définie par la résistance caractéristique* atteinte à 28 jours.

** Selon la norme béton NF EN 206-1, la résistance caractéristique f_{ck} applicable à un lot de béton se définit comme suit : c'est la résistance pour laquelle :*

- on ne peut pas trouver plus de 5 % de valeurs (moyenne de 3 éprouvettes) inférieures à cette résistance caractéristique,
- on ne peut trouver aucune valeur inférieure à une valeur minimale fixée ($= f_{ck} - 4$)

Elle est mesurée par l'un des essais suivants :

- l'essai de fendage, conformément à la norme NF EN 12390-6 « Essai sur béton durci – Partie 6 : résistance en traction par fendage des éprouvettes »
- l'essai de compression, conformément à la norme NF P 12390-3 « Essai sur béton durci – Partie 3 : résistance à la compression des éprouvettes ».

On privilégiera l'essai de fendage pour caractériser le béton, destiné aux couches de roulement et l'essai de compression pour le béton destiné aux couches de fondation.



Les bétons routiers sont classés suivant leur résistance caractéristique, mesurée à 28 jours.

Les mesures sont effectuées sur des éprouvettes de dimensions conformes à la norme NF EN 390-1 « Essai sur béton durci – Partie 1 : formes dimension et autres exigences relatives aux éprouvettes et aux moules ».

La norme NF P 98-170 prévoit six classes de résistance. Le tableau 2 précise les conditions de choix selon la nature des travaux à réaliser (couche de roulement*, couche de fondation).

Tableau 2 : classification des bétons routiers

Catégorie de béton (NF P 98 170)	Résistance caractéristique à 28 jours (MPa)	Classe de résistance en compression (NF EN 206-1)	Classe de résistance en fendage
6 – aéroport	38	C40/50	S3,3
5 – couche de roulement	32	C35/45	S2,7
4 – couche de roulement	29	C30/37	S2,4
3 – couche d'assise	25	C25/30	S2,0
2 – couche d'assise	20	C20/25	S1,7
1 – couche d'assise	16	C16/20	S1,4

* Dans le cas d'une voirie béton, la couche de roulement est équivalente aux couches de base et de surface.

2.2.2 - Résistance au gel et aux fondants

La seconde caractéristique visée concerne la résistance du béton vis-à-vis du gel et des fondants. Elle est réalisée sous deux conditions :

- que le béton ait une résistance suffisante,
- qu'il y ait des bulles d'air de petites dimensions bien réparties et suffisamment rapprochées.

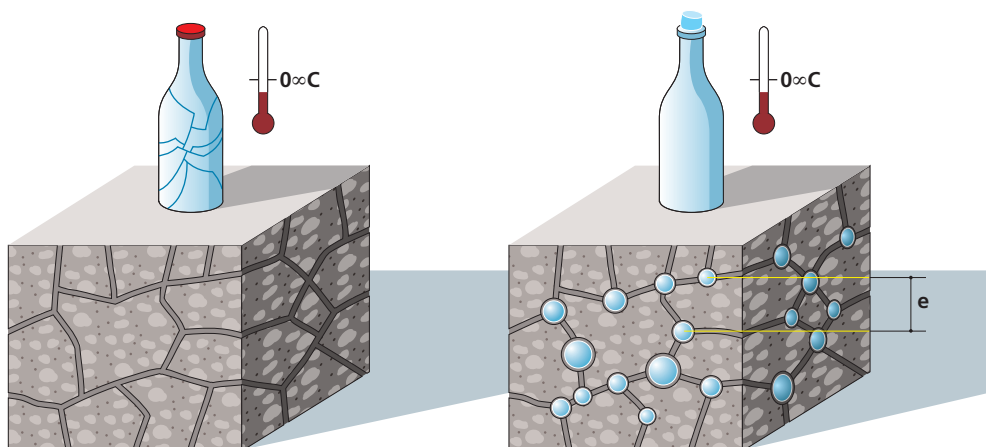


Fig.1 : La création d'un réseau réparti de micro-bulles d'air, accroît considérablement la résistance au gel du béton en diminuant les tensions internes dans les capillaires.

Or, en l'absence d'adjuvant entraîneur d'air, les bulles d'air se créent spontanément dans tous les processus d'agitation, en premier lieu pendant le malaxage mais aussi à un moindre degré pendant le transport. Il peut s'en créer aussi pendant la vibration du béton. Mais, en l'absence d'adjuvant entraîneur d'air, la plupart des bulles disparaissent rapidement. Dès que deux petites bulles se rencontrent, elles fusionnent pour en former une plus grosse et ces grosses bulles, sous l'effet de la poussée d'Archimède, remontent à la surface où elles éclatent.

Il subsiste, néanmoins, des bulles d'air dans le béton en place. On peut considérer que dans un béton bien composé et bien mis en place, même en l'absence d'entraîneur d'air, il existe un certain volume d'air (en général, inférieur à 3 %) qui dépend à la fois de la teneur en eau du béton et de sa consistance.

Cependant, ni la quantité, ni la forme, ni la dimension de ces bulles et par conséquent leur distance moyenne, ne peuvent suffire pour garantir cette résistance lorsque le béton est souvent au contact de l'eau, dans un état saturé ou voisin de la saturation (cas de voiries en béton). Il est donc indispensable d'augmenter la teneur en air occlus ou, ce qui revient au même, de maintenir séparées les bulles d'air créées au moment du malaxage, les empêcher de fusionner et de disparaître. C'est le rôle de l'adjuvant entraîneur d'air dont le mécanisme d'ac-

tion n'est pas de créer des bulles d'air, mais plutôt de stabiliser celles qui ont pris naissance au moment du malaxage et de les maintenir sous forme d'un réseau homogène de petites bulles d'air.

Il convient d'utiliser un adjuvant entraîneur d'air lors de la fabrication d'un béton routier. Le dosage doit être déterminé afin que la teneur en air occlus du béton soit comprise entre 4 et 6 %. En effet, en dessous de 4 %, le béton peut être dans la plupart des cas, insuffisamment protégé et au delà de 6 %, l'excès d'air provoque une baisse des résistances mécaniques. La mesure ou le contrôle de cette teneur en air occlus est possible à l'aide de l'aéromètre à béton, conformément à la norme NF P 18-353 « Adjuvants pour bétons, mortiers et coulis – Mesure du pourcentage d'air occlus dans un béton frais à l'aéromètre à béton » ou conformément à la norme NF EN 12350-7 « Essai sur béton frais – Partie 7 : teneur en air, méthode de la compressibilité »

2.2.3 - Consistance du béton

La troisième caractéristique visée est liée au mode de mise en œuvre du béton. C'est la consistance du béton. Le choix de cette consistance est, du ressort de l'entreprise exécutant les travaux. Elle est déterminée en fonction du type de matériel de mise en œuvre. Elle est mesurée par l'affaissement au cône d'Abrams, conformément à la norme NF EN 12350-2 « Essai sur béton frais – Partie 2 : affaissement ». La consistance du béton, étant un paramètre qui fluctue dans le temps et en particulier sous les effets de la température ambiante, doit être mesurée au moment de la mise en œuvre.



Toutefois, pour assurer la constance des caractéristiques mécaniques du béton en place, le marché peut spécifier la régularité de cette consistance en stipulant une plage acceptable de variation (± 2 cm pour l'essai d'affaissement au cône).

D'autre part, lorsque le béton est mis en œuvre à la machine à coffrages glissants, il faut que sa consistance soit comprise dans une fourchette de valeurs bien définies, de telle sorte que le béton ne s'affaisse pas à la sortie du moule (absence d'affaissement des bords du revêtement).

Le tableau 3 donne les fourchettes de valeurs de la consistance du béton, pour différents procédés de mise en œuvre.

Tableau 3 : Fourchettes de valeurs de la consistance des bétons routiers	
Procédé de mise en œuvre	Consistance du béton par essai au cône
Tiré à la règle et vibré	10-15 cm ± 3 cm
Vibration superficielle	5-10 cm ± 2 cm
Machine à coffrages glissants	3-5 cm ± 1 cm

2.3 - Constituants du béton : caractéristiques

Le béton destiné aux voiries et aménagements urbains est donc constitué de gravillons, de sable, de ciment, d'eau et d'un agent entraîneur d'air. D'autres éléments peuvent y être incorporés : des éléments fins actifs ou non, des adjuvants (en plus de l'agent entraîneur d'air), des fibres, des colorants, etc.

Chacun de ces constituants a un rôle bien défini pour la mise en œuvre et pour l'obtention des caractéristiques finales du béton. Celles-ci sont la traduction des performances potentielles de chaque constituant ; d'où l'importance du choix préalable. Pour chaque constituant, il est ainsi nécessaire de rappeler sa fonction, de préciser la réglementation qui le concerne et d'indiquer ses conditions particulières d'emploi.

Dans la suite, les abréviations suivantes seront utilisées :

- C : dosage de ciment en kg / m³ de béton,
- E : dosage de l'eau en litre / m³ de béton,
- S : dosage des sables en kg / m³ de béton,
- G : dosage des gravillons en kg / m³ de béton,
- K : dosage des cailloux en kg / m³ de béton.

2.3.1 - Les ciments courants

Le marquage CE + NF atteste que les ciments courants sont conformes à la norme NF EN 197-1.

2.3.1.1 - Choix du ciment

Le choix du ciment est fait à partir de sa nature, de sa teinte et de sa classe de résistance.

2.3.1.1.1. - Nature

Les ciments CEM I, CEM II/A ou B et CEM III/A ou B sont les plus utilisés pour la confection du béton routier.

L'utilisation du CEM III/C et du CEM V/A est également possible. Il faut toutefois attirer l'attention sur l'allongement du temps de prise, nécessitant une cure renforcée.

L'intérêt d'utiliser ces ciments dans un béton routier est de pouvoir obtenir des mortiers clairs (cas du CEM III/C et du CEM III/A ou B) et des mortiers foncés (cas du CEM V/A).



2.3.1.1.2. - Teinte

Le ciment gris convient dans la majorité des cas.

Le ciment blanc est choisi pour confectionner un béton blanc ou pour obtenir une matière très claire contrastant avec la teinte des granulats dans le cas du béton désactivé. Le ciment gris ou blanc peut aussi être teinté pour donner des bétons colorés.

Gris ou blanc, les ciments font l'objet, en usine, d'un suivi de la régularité de leur teinte.

2.3.1.1.3. - Classe de résistance

Compte tenu des résistances mécaniques généralement demandées à un béton routier, les ciments de classe 32,5 conviennent le plus souvent. On pourra éventuellement retenir la classe 42,5. Dans ce cas, l'ouverture à la circulation peut se faire au bout de quelques jours (véhicules légers : 2 j - poids lourds : 7 j).

Dans le cas où une remise en service rapide est prévue, on choisira un ciment de classes 32,5 R ou 42,5 R ayant des vitesses de durcissement élevées (la vitesse de prise ne doit pas être réduite).

Les ciments de classes 52,5 N ou 52,5 R sont adaptés aux voiries à fort trafic ou à des remises en service rapides de la voirie (avant 48 heures).

Pour des chantiers soumis à des contraintes particulières (mise en circulation très rapide : quelques heures), des ciments spéciaux (ciment alumineux fondu - norme NF P 15-315 et ciment prompt naturel - norme NF P 15-314) peuvent être utilisés.

2.3.1.2 - Dosage du ciment

Les dosages du ciment les plus couramment utilisés en technique routière, sont donnés dans le tableau 4.

Tableau 4 : Dosage du ciment selon la nature et la destination du béton	
Nature et destination du béton	Dosage ciment (Kg/m ³ de béton)
Bétons pour couche de roulement	300 - 330
Bétons maigres de fondation	180 - 220
Bétons drainants de surface	330 - 360
Bétons poreux de fondation	200 - 250

2.3.2 - Les granulats

Les granulats (sable, gravillons, cailloux et éventuellement fillers) constituent la partie principale du squelette granulaire du béton routier.

Ils doivent répondre aux spécifications figurant dans la norme NFP 98-170 et dans les normes NF EN 12620 « Granulats pour béton » et XP P 18-545 « Granulats, éléments de définition, conformité et codification ».



2.3.2.1 - Choix des granulats

Dans la gamme des résistances mécaniques visées pour le béton routier, le choix des granulats est large tant pour la nature de la roche d'origine que pour les caractéristiques physico-chimiques et mécaniques.

2.3.2.1.1. - Nature minéralogique

Leur nature minéralogique peut être très variée. Les matériaux éruptifs, sédimentaires, calcaires ou siliceux, roulés ou concassés conviennent.

2.3.2.1.2. - Caractéristiques physico-chimiques

Les granulats pour béton doivent répondre aux spécifications de la norme XP P 18-545. Ces spécifications concernent notamment la granularité, la forme et la propreté des granulats.

2.3.2.1.3. - Caractéristiques mécaniques

Si les caractéristiques mécaniques des granulats interviennent peu sur la résistance du béton en raison des valeurs visées, ces caractéristiques sont importantes à d'autres titres :

Le tableau 5 donne la correspondance entre les caractéristiques normalisées, par référence à la norme XPP 18-545, à retenir pour les granulats et les conditions d'emploi dans les voiries dont le trafic est inférieur à t_3 .

Tableau 5 : Caractéristiques des granulats pour chaussées en béton			
Usages	Caractéristiques	Classes de trafic	
		trafic \leq T3 (1)	trafic $>$ T3 (1)
Béton de fondation ou béton drainant	Intrinsèques des gravillons	Code D	
	De fabrication des gravillons	Code III bis	
	De fabrication des sables	Code a bis	
Béton de roulement (2)	Intrinsèques des gravillons	Code C	Code B
	De fabrication des gravillons	Code III bis	
	De fabrication des sables	Code a bis	

Code	Los Angeles – LA (3)	Micro Deval – M_{DE} (3)	Polishing Surface Value – PSV
B	LA 20	M_{DE} 15	PSV 50
C	LA 25	M_{DE} 20	–
D	LA 30	M_{DE} 25	–

(1) La classe de trafic T3 correspond à un nombre maximum de 150 PL/jour et par sens.

(2) Il est possible d'utiliser des granulats ayant des caractéristiques inférieures aux spécifications minimales requises pour couche de roulement, sous réserve que l'une des fractions des gravillons présente dans la composition du béton respecte ces exigences et que cette fraction granulaire soit d'au moins 450 kg de matériaux par m^3 de béton.

(3) Pour les applications qui le justifient, l'utilisateur peut appliquer une compensation maximale de 5 points entre les caractéristiques LA et MDE. Elle se traduit par exemple de la façon suivante :

- un granulat de LA = 25 est jugé conforme au code B s'il possède un $M_{DE} \leq 10$
- un granulat de $M_{DE} = 20$ est jugé conforme au code B s'il possède un LA ≤ 15

- pour éviter la production de fines pendant les phases de stockage, de transport, de manutention et de malaxage,
- pour assurer le transfert des charges au droit des discontinuités du revêtement en béton (joints),
- pour résister à l'usure superficielle du revêtement en béton sous l'effet du trafic. Cette caractéristique dépend, en outre, du traitement de surface prévue sur le revêtement :
 - en cas de brossage ou de striage ou de béton imprimé, la résistance à l'usure doit être assurée par le sable,
 - en cas de désactivation et de bouchardage, c'est la résistance du gravillon qui intervient.

2.3.3 - L'eau

L'eau doit être conforme à la norme NF EN 1008 «Eau pour béton ». L'eau potable convient.

2.3.4 - Les adjuvants

Ils sont conformes à la norme NF EN 934-2 « Adjuvants pour béton ».

L'emploi d'un entraîneur d'air est **obligatoire** pour assurer la protection du béton vis à vis du gel et des sels de déverglaçage. La teneur en air occlus doit être comprise entre 4 et 6 %.

L'emploi d'un adjuvant autre que l'entraîneur d'air doit faire l'objet lors de l'étude de formulation d'une étude de compatibilité avec les autres constituants conformément à la norme NF P 98-170.

2.3.5 - Les colorants

Les colorants sont des superfines (1 à 5 μm) utilisées dans le but de modifier la teinte du béton dans lequel elles sont dispersées. Ils peuvent être soit des pigments de synthèse, soit des pigments à base d'oxydes métalliques naturels.

Ils se présentent soit sous forme liquide, soit en poudre. Leur dosage, exprimé en pourcentage du poids du ciment, doit être compris entre 3 et 6 % quand ils sont associés à un ciment gris, et 3 % quand ils sont associés au ciment blanc.



2.3.6 - Les additions

Les additions sont incorporées au béton en vue d'optimiser la formulation.

Elles sont conformes aux normes en vigueur et peuvent être des :

- laitiers vitrifiés moulus de haut fourneau conformes à la norme NF EN 15167,
- cendres volantes pour béton, conformes à la norme NF EN 450,
- additions calcaires, conformes à la norme NF P 18-508,
- fumées de silice, conformes à la norme NF EN 13263,
- additions siliceuses conformes à la norme NF P 18-509.

L'incorporation d'additions fera l'objet, lors de l'étude, d'une vérification de compatibilité avec les autres constituants.

2.3.7 - Les fibres

Le but est d'améliorer :

- la cohésion du béton frais,
- les caractéristiques du béton (résistance à l'usure et à la fissuration de retrait).

Leur dosage doit être conforme aux indications du fabricant.

L'incorporation des fibres, dans le béton, doit faire l'objet - lors de l'étude de formulation - d'une vérification de compatibilité avec les autres constituants.

Les fibres peuvent être soit des fibres « polyester », soit des fibres « polypropylène » soit des fibres métalliques, etc.

2.4 - Composition du béton

2.4.1 - Principe

Pour formuler un béton, il importe de préciser les caractéristiques recherchées et les niveaux visés par ces caractéristiques. L'étude de base concerne les bétons denses, c'est à dire ceux pour lesquels on recherche la compacité maximale. On adapte ensuite la composition pour obtenir les propriétés spécifiques souhaitées. Cette procédure est appliquée lorsque la nature des constituants a déjà été fixée.

2.4.2 - Étude de formulation

Une étude de formulation se déroule en plusieurs phases :

2.4.2.1 - Détermination du squelette granulaire

On fixe un dosage en ciment (le plus souvent 330 kg/m^3) et une teneur en eau efficace (environ 165 l/m^3).

Le rapport gravillons/cailloux $\frac{\mathbf{G}}{\mathbf{K}}$ est le plus souvent fixé par des considérations économiques. Il est généralement compris entre 0,6 et 1. Son influence sur les caractéristiques du béton est relativement faible.

On réalise ensuite les essais conduisant à définir la proportion des classes granulaires pour l'obtention de la meilleure consistance du béton.

Pour cela, on se fixe un rapport pondéral sable/gravillons + cailloux $\left(\frac{\mathbf{S}}{\mathbf{G} + \mathbf{K}}\right)$ soit empiriquement en fonction de l'expérience, soit à l'aide des méthodes classiques telles que Faury, Bolomey, Dreux, etc. Puis on fait varier le rapport $\left(\frac{\mathbf{S}}{\mathbf{G} + \mathbf{K}}\right)$ autour de cette valeur en conservant la somme $(\mathbf{S} + \mathbf{G} + \mathbf{K})$ constante.

Pour chaque nouvelle formule, on mesure la consistance. La meilleure composition est celle qui donne la consistance optimale. La consistance peut être estimée par la mesure de la maniabilité au maniabilimètre LCL ou par l'affaissement au cône d'Abrams. Cette étape correspond au cadran 1 de la figure 2.

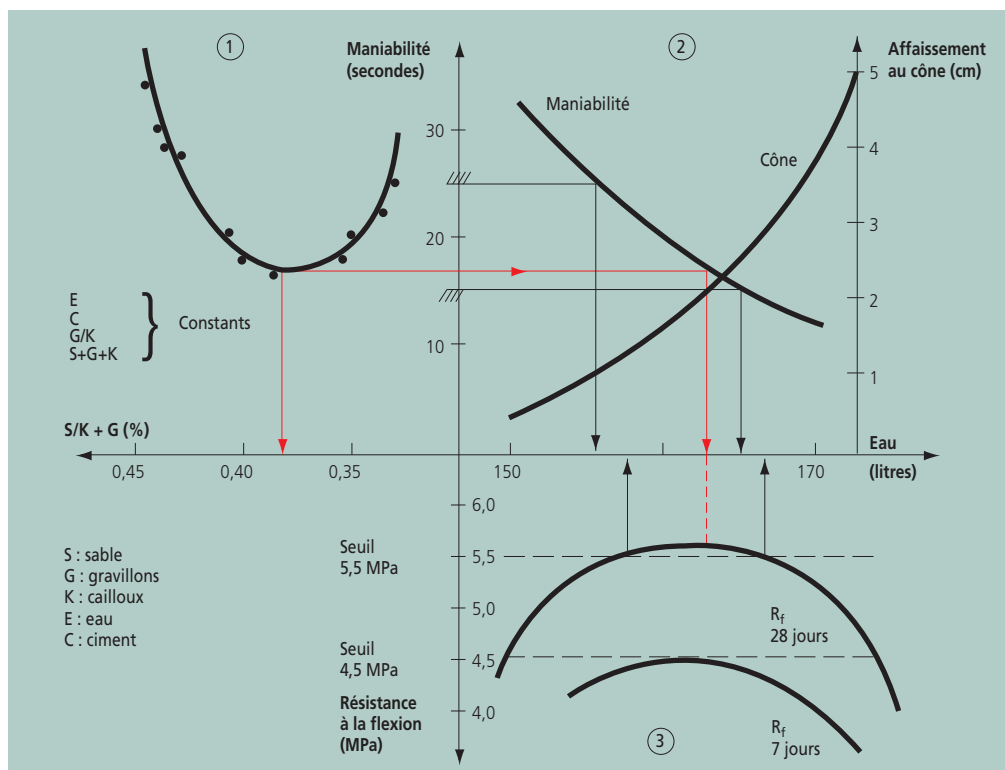


Fig. 2 : Représentation graphique des résultats d'une étude de formulation d'un béton routier.

2.4.2.2 - Ajustement des caractéristiques du béton frais

Cette seconde phase a pour but d'ajuster les caractéristiques du béton frais, c'est à dire la consistance et la teneur en air occlus, aux valeurs visées.

On fixe le rapport $\frac{S}{G + K}$ à la valeur optimale définie ci-avant, et on conserve le dosage en ciment. On ajuste la quantité d'agent entraîneur d'air pour avoir la teneur en air occlus comprise entre 3 et 6 %. Ensuite, on fait varier la teneur en eau autour de la valeur retenue pour la première phase. On retient la fourchette des valeurs qui permettent d'obtenir la maniabilité et la teneur en air occlus exigées. Cette étape correspond au cadran 2 de la figure 2. A ce stade, l'emploi d'un plastifiant peut être envisagé. Dans l'affirmative, une étude avec et sans plastifiant sera nécessaire.

2.4.2.3 - Vérification des résistances mécaniques

Cette troisième phase consiste à mesurer le niveau des résistances mécaniques atteint pour la teneur en eau moyenne retenue et pour les teneurs en eau extrêmes. On s'assure que, dans au moins l'un de ces cas, la résistance prescrite est atteinte. Si la résistance mécanique, n'est pas atteinte, il y a lieu de refaire les essais de la phase 2 et de la phase 3, en agissant sur un ou plusieurs des paramètres suivants :

- utilisation (ou augmentation du dosage) d'un plastifiant réducteur d'eau et réduction en conséquence de la quantité d'eau afin de conserver la consistance souhaitée,
- augmentation du dosage en ciment sans toutefois dépasser 360 kg/m³,
- choix d'un ciment de classe de résistance plus élevée,
- utilisation de granulats offrant une meilleure consistance (granulats roulés par exemple).

2.4.3 - Synthèse

A partir des différentes catégories de matériaux, il est possible d'obtenir une grande variété de bétons aux caractéristiques différentes.

Variant en fonction de la nature des granulats, des adjuvants, des colorants, etc., le béton s'adapte aux exigences de chaque réalisation, par ses performances comme par son esthétique.

L'étude de la formulation dépend du volume du chantier à réaliser. Dans le cas de voiries et d'aménagements urbains, l'étude peut être limitée à la vérification des caractéristiques mécaniques du béton obtenu. L'expérience ainsi que les connaissances locales en matière de granulats et de ciment suffisent, en général, pour élaborer des bétons routiers conformes aux réglementations.

La composition d'un béton routier varie en fonction de la nature des granulats, disponibles localement.

Une étude simplifiée en laboratoire est parfois utile, avant d'entamer les travaux pour trouver les proportions optimales des différents constituants qui confèrent au béton des caractéristiques mécaniques données.

Mais la plupart des centrales B.P.E. proposent des compositions de bétons routiers conformes aux réglementations qui présentent les avantages suivants :

- conformité aux normes en vigueur,
- qualité et régularité du béton, contrôlées,
- formulation : 3 types de béton (voir le paragraphe 2.3 page 15).

3. Fabrication des bétons routiers

Compte tenu de la spécificité des bétons routiers, il est préférable de confier sa fabrication aux Centrales de Béton Prêt à l'Emploi.

3.1 - Intérêt de l'utilisation du béton prêt à l'emploi

3.1.1 - Simplification de l'organisation du chantier

Le B.P.E. facilite l'organisation des chantiers.

Il évite :

- le montage d'une centrale de chantier ;



- les contrôles fastidieux en quantité et qualité des différents matériaux ;
- les stockages encombrants ;
- les manutentions pénibles ;
- les nuisances diverses (bruit, poussières, etc.).

Il permet :

- d'organiser rationnellement les chantiers :
 - possibilité de plusieurs postes simultanés de bétonnage ;
 - élimination des transferts intermédiaires.

3.1.2 - Sécurité sur le plan technique

Avant la fabrication

- Les formules de béton sont élaborées par des spécialistes qui sont à la fois des Techniciens du béton et des hommes de chantier.
- Les granulats utilisés dans la fabrication du béton sont réceptionnés méthodiquement et régulièrement contrôlés, les caractéristiques intrinsèques des ciments sont vérifiées, les adjuvants font l'objet de contrôles de réception.

Pendant la fabrication

- Les centrales à béton sont équipées de matériels modernes permettant :
 - un dosage précis des constituants ;
 - une limitation des erreurs humaines en confiant les cycles de fabrication à des automatismes éprouvés ;
 - de répondre rapidement à toute modification de commande demandée par l'entrepreneur.

Après la fabrication

- Les services de contrôle effectuent des prélèvements réguliers des produits finis en centrale et sur chantier.
- Un autocontrôle permanent des fabrications permet à la centrale de maîtriser la qualité de sa production.

3.1.3. - Avantages économiques

- Connaissance précise et sans aléas du prix du béton.

- Suppression des pertes de matériaux sur chantier.
- Rationalisation des achats.
- Connaissance exacte des cubes livrés et des dosages.
- Diminution des contrôles de réception.

3.1.4. - Le pompage

Le Producteur de Béton Prêt à l'Emploi peut proposer la manutention du béton au moyen de pompe à béton.

Cette technique moderne de manutention permet :

- **des gains appréciables de productivité :**
 - réduction des délais d'exécution,
 - allègement des investissements en matériels de chantier et des charges du personnel affecté à leur conduite et leur entretien ;
- **de mettre en place le béton dans les endroits inaccessibles à des engins traditionnels.**

3.1.5. - Les livraisons

- Le Producteur de Béton Prêt à l'Emploi met au service des entreprises un parc important de camions-malaxeurs qui permet d'assurer des livraisons ponctuelles et régulières.
- Les cadences de livraison sont toujours adaptées aux moyens du chantier à approvisionner.
- Les camions-malaxeurs sont souvent équipés de radios permettant une liaison continue entre le camion et la centrale et dans certains cas avec le chantier.

3.2 - Comment passer une commande de béton routier ?

Il est indispensable, au moment de la consultation ou de la commande, de préciser qu'il s'agit de la fourniture d'un béton **routier** répondant à des **spécifications bien définies** dans la norme NF P 98-170. Ce qui correspond, selon la norme NF EN 206-1, à un béton à propriétés spécifiées BPS, de classe d'exposition XF_i, non armé et dont les caractéristiques mécaniques répondent aux classes de résistance définies dans le tableau 2 page 22.

Dans le cas où une mise en œuvre par pompage est nécessaire, il convient de préciser la distance et la configuration (nombre de coudes nécessaires).

En fonction des données locales et de l'expérience acquise dans le domaine de la voirie béton, deux cas sont envisagés :

3.2.1 - Cas des bétons de catalogue

L'étude de composition du béton n'est pas nécessaire lorsqu'on dispose, au niveau local, d'informations préalables suffisantes provenant de chantiers antérieurs pour lesquels des constituants de caractéristiques identiques ont été utilisés. Une vérification de l'adéquation des paramètres techniques, entre le chantier projeté et la référence existante, est nécessaire.



Les informations préalables sont :

- l'identification des constituants disponibles : caractéristiques physico-chimiques et mécaniques en regard des exigences du projet.
- le dossier « béton » de(s) chantier(s) antérieur(s) rappelant :
 - la composition du béton,
 - les moyens de fabrication et de mise en œuvre,
 - la référence du (des) chantier(s),
 - les résultats obtenus.

3.2.2 - Cas des bétons spécifiques

En l'absence de chantiers antérieurs pouvant servir de références, la composition du béton est définie par une étude de formulation, tenant compte des moyens de mise en œuvre (pompage éventuel). Les informations à communiquer, au moment de la consultation ou de la commande, sont conformes aux exigences du CCTP.

3.3 - Épreuves d'étude et de convenance

La réalisation d'une épreuve de convenance de fabrication et l'exécution d'une planche de référence sont indispensables.

L'épreuve de convenance de fabrication doit être réalisée avant le démarrage des travaux et, dans certains cas, avant l'attribution du marché. Elle permet au maître d'œuvre de vérifier que la (ou les) centrale(s) dispose(nt) des moyens de stockage et des équipements conformes à la norme NF P 98-730. Cette épreuve n'est pas nécessaire lorsque la centrale est titulaire du droit d'usage de la marque NF.

La réalisation d'une planche de référence avec les moyens de transport prévus et le matériel de mise en œuvre de l'entreprise doit également permettre de définir la procédure d'exécution du chantier. Cette épreuve peut être réalisée lors des premiers coulages mais leur acceptation par le maître d'œuvre est alors conditionnée par l'obtention de résultats probants.

Dans le cas d'une utilisation de granulats spéciaux, non disponibles de façon courante à la centrale, la procédure citée ci-dessus doit être complétée par les points suivants :

- Un échantillon représentatif sera soumis à l'approbation du maître d'ouvrage et du maître d'œuvre. (Le choix sera porté sur la teinte, la forme, la granulométrie). Cet échantillon sera conservé par le maître d'ouvrage.
- Après acceptation du choix du ou des granulats, une planche d'essai d'environ 1 m² avec l'épaisseur retenue dans le projet sera réalisée en laboratoire à partir de la composition retenue, en présence du maître d'œuvre. La planche d'essai sera conservée par le maître d'ouvrage.
- Après accord du maître d'ouvrage et du maître d'œuvre sur la planche d'essai, la centrale pourra alors réceptionner le ou les granulats spéciaux.

ANNEXE 1

COMMANDE ET LIVRAISON DU BÉTON PRÊT À L'EMPLOI

Afin d'apporter aux Responsables du chantier le maximum de satisfaction sur le plan de la qualité du produit et du service, il est indispensable que les entreprises précisent de manière détaillée leurs besoins au moment de la commande.

1 - Commande du béton

Le passage des commandes doit s'effectuer le plus longtemps possible à l'avance et, dans tous les cas, au moins 24 heures avant le jour du coulage.

Cette précaution permet au Producteur d'adapter ses moyens aux exigences de l'entreprise et, par conséquent, de lui assurer un service de qualité.

Lors de la commande, les renseignements suivants doivent être communiqués :

- **les nom et adresse de l'entreprise;**
- **l'adresse exacte du chantier et le numéro de téléphone** - toute précision est utile et ne peut que faciliter la localisation du chantier;
- **les moyens d'accès aux chantiers** - leur connaissance exacte permet au producteur de Béton Prêt à l'Emploi de déterminer le type de véhicule le mieux adapté;
- **l'heure de coulage** - cette précision permet au Producteur de Béton Prêt à l'Emploi d'établir l'heure de fabrication compte tenu de son estimation des délais de transport;
- **la quantité exacte de béton;**
- **les caractéristiques du béton** : classe d'exposition XF₂ ou XF₄ conformément à la norme NF EN 206-1 ; non armé, et de classe de résistance telle que définie dans le tableau 2 page 22 et de consistance adaptée aux besoins de la mise en œuvre;
- **les temps de déchargements approximatifs et les moyens de déchargements;**
- **les cadences souhaitées** - c'est le volume de béton mis en place dans un temps déterminé (10 m³/heure par exemple).

2 - Livraison - Bons de livraison

Tout transport de béton est accompagné d'un bon de livraison qui comporte obligatoirement les mentions ci-après :

- Quantité de béton livré.
- Type du béton commandé.
- Toute autre prescription fixée à la commande.

UNITÉ DE MESURE DU BÉTON PRÊT À L'EMPLOI

L'unité de mesure adoptée dans l'industrie du Béton Prêt à l'Emploi est le **m³ de béton compacté à refus**.



Chapitre

3

Travaux de terrassement

1 - Introduction

**2 - Cas de renforcement d'une voirie
existante**

3 - Cas de réfection d'une voirie existante

4 - Cas de construction d'une voirie neuve

5 - Conclusion

1. Introduction

La réalisation des terrassements a pour but de donner à la route les caractéristiques géométriques stipulées dans le CCTP. Ces travaux consistent à modeler le terrain naturel en fonction des caractéristiques géométriques définies par les plans d'exécution (tracé en plan, profil en long et profil en travers).

D'ampleur très faible dans le cas des chantiers de renforcement de voiries existantes, les terrassements constituent des travaux à part entière dans le cas de la construction neuve des voiries et aménagements urbains.

Ils sont certes limités dans le cas des voiries à très faible trafic ($t \leq t_5$), mais peuvent constituer des ouvrages importants dans le cas de voiries dont le trafic est compris entre t_5 et t_3 ($t_5 < t \leq t_3$).

Les terrassements représentent une phase délicate d'un chantier, car ils impliquent en permanence une adaptation à la qualité des terrains rencontrés qui plus est, sont tributaires des conditions climatiques régnant au moment de l'exécution des travaux.

En fonction de la nature du chantier à réaliser, trois cas sont envisagés :

- cas de renforcement d'une voirie existante,
- cas de réfection d'une voirie existante,
- cas de construction d'une voirie neuve.

2. Cas de renforcement d'une voirie existante

Les travaux de terrassements sont, dans ce cas, réduits, mais dépendent de la structure de la voirie existante.

2.1 - Renforcement d'une structure souple

En règle générale, le revêtement en béton est réalisé directement sur la voirie existante, sans couche intermédiaire. Pour assurer une bonne adhérence (ou collage) entre le béton et l'enrobé bitumineux existant, il est recommandé de procéder à un nettoyage du support avant le coulage du béton.

En outre, l'existence sur l'ancien revêtement de déformations importantes, pouvant par conséquent entraîner de fortes variations d'épaisseur du béton, conduit le plus souvent à envisager de réaliser au préalable les travaux suivants :

- rabotage du revêtement existant dans le cas de déformations transversales (ornières de 3 cm ou plus),



- reprofilage de l'ancienne chaussée dans le cas de déformations longitudinales (ondulations courtes).

2.2 - Renforcement d'une structure rigide

La technique de renforcement consiste à fragmenter l'ancienne chaussée en morceaux d'un mètre carré environ et à mettre en place entre l'ancien et le nouveau revêtement une couche d'interposition (le plus souvent constituée de sable bitume) permettant le rattrapage éventuel des dénivellations de l'ancien revêtement.

2.3 - Le dimensionnement

Comme il ne s'agit pas d'un sol naturel, la détermination de la portance s'effectue par mesure de la déflexion de la voirie à renforcer. Elle permet de déterminer la classe « C » de la structure à renforcer. Exprimée en 1/100 mm, la déflexion correspond au déplacement vertical de la voirie, à un instant donné, sous le passage d'un jumelage chargé à 6,5 tonnes. On définit ainsi six classes de déflexion C_1 , C_2 , C_3 , C_4 , C_5 et C_6 telles qu'elles sont définies dans le tableau 6.

Tableau 6 : Classification de la déflexion

Classes de déflexion	C1	C2	C3	C4	C5	C6
Valeur de la déflexion en 1/100 mm	0-50	50-75	75-100	100-150	150-200	200-300

Connaissant la classe de déflexion de la structure à renforcer et le trafic, on peut déterminer l'épaisseur du renforcement en béton. Les tableaux 7 et 8 donnent respectivement le dimensionnement dans le cas d'un ancien revêtement souple et dans le cas d'un ancien revêtement béton.

Tableau 7 : Renforcement en béton sur un ancien revêtement souple. Epaisseur du béton pour une période de service de 20 ans.

Classes de déflexion	Classes de trafic				
	t_6	t_5	t_4	t_3^-	t_3^+
C ₆	17	18,5	20	21,5	23
C ₅	16	17,5	19	20,5	22
C ₄	15	16,5	18	19,5	21
C ₃	14	15,5	17	18,5	20
C ₂	13	14,5	16	17,5	19
C ₁	12	13,5	15	16,5	18

Tableau 8 : Renforcement en béton sur un ancien revêtement en béton. Epaisseur du béton pour une période de service de 20 ans.

Classes de déflexion	Classes de trafic				
	t_6	t_5	t_4	t_3^-	t_3^+
C ₆	16	17	18	19	20
C ₅	15	16	17	18	19
C ₄	14	15	16	17	18
C ₃	13	14	15	16	17
C ₂	12	14	14	15	16
C ₁	12	12	14	14	15

3. Cas de réfection d'une voirie existante

Les travaux de terrassements sont, dans ce cas, réduits. Leur exécution suit le processus suivant :

- décaissement et évacuation des matériaux de l'ancienne structure,
- réorganisation éventuelle des réseaux enterrés,
- travaux éventuels de purge et de comblement,
- compactage de la plate-forme.

3.1 - Décaissement de l'ancienne structure

Le décaissement se fera sur une épaisseur bien déterminée, fixée par le maître d'œuvre et correspondant au dimensionnement de la nouvelle structure.

Le décaissement doit être conduit de façon à préserver la plate-forme de toute venue d'eau naturelle en cours de travaux. Les matériaux de l'ancienne chaussée seront évacués et stockés en un lieu désigné par le maître d'œuvre.



3.2 - Réorganisation éventuelle des réseaux enterrés

Ces travaux doivent être conduits avec beaucoup de soin afin d'éviter le décompactage de la plate-forme. Les tranchées seront remblayées selon les règles définies par le Guide Technique « Remblayage des tranchées et réfection des chaussées » - SETRA / LCPC - Mai 1994

De nouveaux matériaux autocompactants traités au ciment ont été développés ces dernières années dans le but d'optimiser les travaux de remblayage de tranchées. Différents produits sont actuellement distribués par les centrales de BPE. Ils se mettent en place dans la tranchée par déversement sans aucun compactage.

3.3 - Travaux éventuels de purge et de comblement

L'homogénéité de la plate-forme est contrôlée visuellement. Il est recommandé de purger les zones ne remplissant pas les conditions de portance requises et de les combler avec des matériaux présentant des qualités similaires à celles de la plate-forme.

Le contrôle de la portance de la plate-forme peut être réalisé, à l'aide de l'essai CBR (cas des petits chantiers), soit à l'essai de plaque (cas de grands chantiers).

3.4 - Compactage de la plate-forme

Le compactage est obligatoire et notamment pour les zones purgées et comblées par un matériau d'apport. Il sera réalisé conformément au Guide de « Remblayage des tranchées et réfection des chaussées » - SETRA / LCPC - Mai 1994

4. Cas de construction d'une voirie neuve

Les travaux de terrassements pour la construction d'une chaussée neuve comprennent :

- les travaux préparatoires,
- les terrassements.

4.1 - Les travaux préparatoires

Ils sont de trois types :

4.1.1 - Tracé de la route

Dans le cas de la voirie à faible trafic, un tracé qui suit au maximum le terrain naturel est recommandé. Mais pour des considérations liées à la sécurité et au confort de l'utilisateur, ceci n'est malheureusement pas toujours possible. Des travaux de terrassements en déblai et en remblai sont donc nécessaires.

Pour permettre la réalisation des travaux de terrassements dans de bonnes conditions, il convient d'effectuer des travaux de piquetage permettant d'une part de matérialiser le tracé de la route et d'autre part de déterminer sur le terrain la hauteur ainsi que la limite des zones de déblai et de remblai.

4.1.2 - Dégagement de l'emprise de la route

Ces travaux comprennent l'abattage des arbres, le dessouchage, les démolitions diverses, les déplacements des réseaux, etc.

4.1.3 - Décapage de la terre végétale

Ces travaux consistent à enlever la couche superficielle du terrain naturel sur une épaisseur bien déterminée (de l'ordre de 15 à 20 cm), de façon que les débris d'arbres (racines, branches, feuilles) et la terre végétale, soient entièrement enlevés.

Des pentes transversales de 2 à 4 % seront prévues afin de permettre l'évacuation des eaux de pluie et de ruissellement. Ces travaux peuvent être réalisés à l'aide d'un bouteur ou, en cas de défaut, à l'aide d'une pelle mécanique.

4.2 - Les terrassements

L'objet des terrassements est double :

- modifier le terrain naturel pour l'amener au niveau prévu par le projet,
- préparer une plate-forme support de la chaussée répondant aux critères de qualité nécessaire d'ordres géométrique et mécanique.

Les travaux comprennent :

- l'exécution des déblais,
- l'exécution des remblais,
- l'exécution de la plate-forme support de la chaussée.



4.2.1 - Exécution des déblais

Les techniques requises dépendent des sols rencontrés :

- **les terrains « meubles »** : peuvent être extraits par tranches verticales au moyen de chargeuses ou de pelles, le transport est alors effectué par des camions.
- **les terrains défonçables** : ne peuvent être extraits tels quels par le matériel cité ci-dessus. Ils exigent d'être préalablement ameublés par le passage d'un engin équipé de dents « ripper ». Cet engin est une « défonceuse » (1 ou 2 dents) ou une « scarificatrice » (plus de 2 dents).
- **les terrains rocheux compacts** : exigent, en général, d'être fragmentés par l'usage de l'explosif. Ce travail est très délicat. Il doit être conduit par des spécialistes.

4.2.2 - Exécution des remblais

L'objectif principal est d'obtenir un remblai stable qui supporte la chaussée sans tassements qui seraient préjudiciables à sa bonne tenue.

Pour atteindre cet objectif, il convient de respecter les règles ou dispositions particulières de mise en œuvre et qui se résument comme suit :

- exécuter le remblai par couches successives au moyen de boteurs,
- densifier chaque couche par un compactage méthodique,
- apporter un soin particulier à l'exécution de sa partie supérieure qui recevra la chaussée.



Quant au choix des matériaux pour la construction d'un remblai, ceux qui sont insensibles à l'eau seront réservés en priorité pour réaliser la partie supérieure du remblai de manière à lui conférer une bonne portance. Les matériaux sensibles à l'eau seront utilisés en corps de remblai après traitement aux liants hydrauliques.

4.2.3 - Réalisation de la plate-forme support de la chaussée

En déblai comme en remblai, la couche supérieure des terrassements doit posséder des qualités suffisantes pour recevoir la chaussée. Les matériaux qui la composent doivent être de bonne qualité et leur compactage particulièrement soigné pour leur conférer une portance satisfaisante.

Par ailleurs, un bon réglage de la surface et des pentes transversales de 2 à 4 % doit être obtenu afin de permettre l'évacuation des eaux de pluie et de ruissellement. Le réglage de la surface est réalisé par une niveleuse.



Mais il arrive souvent que le sol, mis à nu par les terrassements, soit dans un état tel qu'il n'autorise même pas la circulation des camions de chantier. Il doit donc être amélioré ou protégé de manière à constituer un support convenable permettant en premier lieu la construction de la chaussée et à plus long terme un bon fonctionnement de celle-ci.

Pour améliorer et/ou protéger le sol en place, plusieurs solutions existent et en particulier la technique de traitement des sols en place aux liants hydrauliques et/ou à la chaux qui constitue une solution largement répandue.

4.3 - Traitement des sols en place

4.3.1 - Définition

Traiter un sol avec un liant hydraulique, c'est le mélanger intimement avec cet élément d'apport pour lui conférer des propriétés nouvelles. Il s'agit d'un traitement qui utilise les affinités chimiques du sol et du liant hydraulique. Il est complété par un traitement mécanique « le compactage ».

Cette technique a connu un très fort développement, depuis une trentaine d'années, dû essentiellement à deux phénomènes :

- le premier phénomène est lié à des impératifs économiques associés à un souci écologique croissant. En effet, alors que les profils géométriques des projets routiers deviennent de plus en plus contraignants et demandent des mouvements de terre importants dans des sols parfois difficilement réutilisables, les gisements naturels de matériaux nobles, inégalement répartis, s'épuisent. Il convient donc d'épargner les ressources existantes, d'autant plus que le coût du transport est élevé. A ces impératifs économiques, il convient

- d'adjoindre un souci fort louable de préservation de l'environnement poussant à limiter la constitution de décharges de matériaux impropres à la réutilisation,
- le second phénomène auquel est lié le développement du traitement des sols en place repose sur les progrès technologiques réalisés ces dernières années en la matière. Nous sommes loin actuellement des conditions matérielles de la première expérience réalisée en France en 1962, les perfectionnements énormes apportés aux matériels d'épandage et de malaxage et l'augmentation du parc de matériel de traitement ainsi que sa diversification (200 machines et plusieurs ateliers compacts de traitement des sols existent actuellement en France) ont permis d'améliorer sensiblement les rendements et la qualité du travail réalisé.

Aujourd'hui, la technique du traitement des sols aux liants hydrauliques s'étend à un nombre de plus en plus élevé de sols tels les limons, les argiles, les marnes, les matériaux sableux, sableux-graveleux et graveleux, les craies, les calcaires tendres, etc.

4.3.2 - Objectif

Le traitement des sols a pour objet de rendre utilisable un sol qui ne présente pas les caractéristiques requises pour servir sans préparation, à supporter une route, un parking ou une plate-forme industrielle. Le traitement aux liants hydrauliques des sols en place permet d'éviter l'apport de matériaux extérieurs au chantier. C'est donc une solution économique et écologique.

Il a deux raisons d'être :

- soit améliorer des sols trop humides, qu'il s'agisse du sol en place pour permettre la progression du chantier ou qu'il s'agisse de sols à réutiliser en remblai. Dans ce cas, on cherche un effet rapide pour obtenir un niveau de portance suffisant permettant la circulation des engins et la mise en œuvre possibles, mais sans chercher à obtenir des performances mécaniques forcément élevées par la suite,
- soit réaliser des plates-formes rigides et stables aux intempéries pour la circulation de chantier et la mise en œuvre de la fondation. Dans ce cas, on recherche une résistance mécanique pour la plate-forme.

4.3.3 - Les différents types de traitement

Selon l'utilisation prévue (en couches de forme, en remblais ou en PST) et en fonction du type de sol à stabiliser, il existe plusieurs types de traitements des sols en place qui ne diffèrent que par la nature du liant utilisé. En France, on utilise presque exclusivement les traitements suivants :

- le traitement à la chaux,
- le traitement au ciment ou aux liants hydrauliques routiers,
- le traitement mixte à la chaux puis au ciment ou aux liants hydrauliques routiers.

4.3.4 - Exécution des travaux

Elle suit le processus suivant :

- la préparation du sol à traiter,
- l'épandage du liant,
- le malaxage,
- le compactage,
- le réglage,
- la protection : le produit de cure.

Dans certains cas particuliers où le matériau à traiter est trop sec, il peut être nécessaire de procéder à un arrosage avec malaxage, avant épandage du liant, pour réhumidifier le sol. Inversement, on peut procéder à un malaxage sans liant pour profiter des conditions atmosphériques favorables à une évaporation lorsqu'on est en présence de sols humides ou très humides.

4.3.5 - Traitements - types

La recherche de la meilleure adéquation (technique et économique) entre produits de traitements et matériaux à traiter pour une application donnée (remblai, PST, couche de forme) implique de reconnaître ces matériaux à partir des paramètres significatifs vis-à-vis des phénomènes intervenant dans la technique du traitement des sols, conformément à la GTR et à la norme NF P 11-300.

Le tableau 9 donne, en fonction de l'état hydrique du sol et de la nature du sol (argileux ou non), l'ordre et l'organisation de ces différentes phases élémentaires d'exécution.

Tableau 9 : Traitements - types de sols

Sol normal non argileux (1)		Traitements préalables dans le cas de	
Teneur en eau légèrement supérieure à l'optimum Proctor normal	Teneur en eau inférieure à l'optimum Proctor normal	Sol argileux (2)	Sol gorgé d'eau
1. Ouverture au scarificateur ou au ripper si le sol est très compact.	1. Ouverture au scarificateur ou au ripper si le sol est très compact.	1. Ouverture du sol au scarificateur ou au ripper	1. Ouverture du sol au scarificateur ou au ripper
2. Passage du malaxeur sur l'épaisseur de la couche à stabiliser.	2. Epandage du ciment. Poids au m2 indiqué par le laboratoire.	2. Epandage de chaux grasse. Poids au m2 indiqué par le laboratoire et répandage de l'eau si nécessaire.	2. Epandage de chaux vive. Poids au m2 indiqué par le laboratoire.
3. Laisser sécher le sol durant la journée.	3. Malaxage du ciment. Nombre de passages du malaxeur à déterminer sur chantier, réglage au grader et léger compactage	3. Malaxage de la chaux. Nombre de passages du malaxeur à déterminer sur chantier.	3. Malaxage de la chaux vive.
4. Refermer le sol en fin de journée.	4. Passage du malaxeur sur 0,10 m environ de profondeur..	4. Compactage.	4. Compactage.
5. Le lendemain, réouverture du sol au malaxeur. Après mesure de la teneur en eau, recommencer si besoin les opérations 2, 3 et 4.	5. Répandage de l'eau. Nombre de litres au m2 indiqué par le laboratoire chantier. Remalaxage.	5. Laisser agir la chaux pendant 24 à 48 heures	Poursuite avec un traitement type d'un sol non argileux (colonne 1 ou 2)
6. Épandage du ciment. Poids au mètre carré fourni par le laboratoire	6. Compactage. Nombre de passages à déterminer sur chantier pour atteindre 95% de l'Optimum Proctor	Poursuite avec un traitement type d'un sol non argileux (colonne 1 ou 2)	
7. Malaxage du ciment. Nombre de passages du malaxeur à déterminer sur chantier et réglage au grader.	7. Réglage au grader du sol malaxé et compacté.		
8. Compactage. Nombre de passages à déterminer sur chantier pour atteindre 95% de l'Optimum Proctor	8. Produit de cure dans les plus brefs délais.		
9. Réglage au grader du sol malaxé et compacté.			
10. Produit de cure dans les plus brefs délais.			

(1) D'après la GTR et la norme NF P 11-300, les sols non argileux sont les sols de classes B_1 ; B_2 ; D_1 ; C_1B_1 ; C_1B_2 ; B_3 ; B_4 ; D_2 ; D_3 ; C_1B_3 ; C_1B_4 ; C_2B_3 ; C_2B_4 et éventuellement les sols de classes B_5 ; C_1A_1 ; C_1B_5 et C_2B_5 si ces derniers sont très peu argileux ($VB_s < 0,5$).

(2) D'après la GTR et la norme NF P 11-300, les sols argileux sont les sols de classes A_2 ; B_6 ; C_1A_2 ; C_1B_6 ; C_2A_2 ; C_2B_6 ; C_2A_1 ; A_3 ; C_1A_3 ; C_2A_3 ; A_1 ; B_5 ; C_1A_1 ; C_1B_5 et C_2B_5 .

4.3.6 - Conditions de mise en œuvre

Les conditions de mise en œuvre doivent être conformes aux recommandations du Guide Technique «Traitement des sols à la chaux, aux liants hydrauliques et pouzzolaniques» (GTS – SETRA / LCPC – 2000)

4.3.6.1 - L'épandage du liant

Pour réduire et maîtriser la dispersion du liant hydraulique, il est préférable de retenir - dans le cas de chantiers importants - un épandeur à dosage volumétrique, asservi à la vitesse d'avancement. Le contrôle de la régularité de l'épandage et de la quantité des liants est réalisé par la méthode dite « à la bêche ».



4.3.6.2 - Le malaxage

Pour assurer une bonne homogénéité du matériau et une profondeur homogène du malaxage, il est judicieux de retenir un malaxeur à rotor horizontal ou un atelier compact de reconditionnement. D'autre part, le malaxage foisonnant énormément les matériaux, il faut veiller - lorsqu'on traite par bandes jointives - à mordre suffisamment (20 cm) dans la partie déjà foisonnée, pour ne pas laisser de matériau non malaxé en bordures de bandes.



4.3.6.3 - Le compactage

L'atelier de compactage ainsi que le nombre de passes nécessaires seront définis sur une planche d'essais de compactage.

Le compactage doit suivre sans tarder la fin du malaxage



4.3.6.4 - Le réglage

Le réglage définitif doit se faire par rabotage sur toute la largeur à régler et en aucun cas par comblement des points bas par les matériaux provenant de l'écrêtage des bosses. Cette opération doit suivre immédiatement le compactage. Elle se fait le plus souvent à la niveleuse. Les matériaux provenant du rabotage doivent être évacués



4.3.6.5 - La couche de protection

Elle est destinée à protéger la couche traitée des intempéries, de l'évaporation de l'eau et du trafic. Elle doit être réalisée dans les plus brefs délais après la fin du réglage.



5. Conclusion

Les travaux de construction des chaussées et des couches de formes représentent une part importante du coût global de réalisation des projets routiers. Cette importance justifie une recherche d'optimisation globale, visant à minimiser les coûts.

L'optimisation des solutions techniques consiste d'abord en un choix judicieux de tracé en plan et de profil en long des terrassements pour limiter au maximum les mouvements de terre en fonction de la qualité des matériaux exigés.

Optimiser, c'est aussi déterminer le couple couche de forme/chaussée le mieux adapté. Sachant que la couche de forme peut jouer un rôle structural, on a donc intérêt à privilégier ses performances par les techniques de traitement en place aux liants hydrauliques.



Chapitre

4

Mise en œuvre du béton routier

- 1 - Introduction**
- 2 - Préparation du chantier**
- 3 - Mise en œuvre du béton**
- 4 - Le talochage**
- 5 - La confection des joints**
- 6 - Le traitement de surface**
- 7 - La cure du béton**
- 8 - Conclusion**

1. Introduction

Les revêtements béton sont mis en place par vibration. Celle-ci présente de nombreux avantages sur le compactage :

- moindre sollicitation du squelette granulaire, ce qui permet l'utilisation de granulats moins durs, donc moins onéreux,
- moindre sollicitation du sol support, le béton peut donc être mis en place sur des sols de faible portance,
- compacité homogène de la couche de béton quelle qu'en soit l'épaisseur.

Ces avantages constituent un atout supplémentaire pour le béton.

D'autre part, le mode de mise en œuvre n'est pas la seule différence entre le béton et les autres matériaux de chaussées. Les principales propriétés mécaniques du béton - rigidité, résistance, retrait - bien qu'issues des mêmes phénomènes physiques que celles des matériaux compactés traités aux liants hydrauliques, sont en pratique suffisamment différentes pour induire des dispositions constructives et des matériels d'exécution spécifiques.

Quelle que soit la taille du chantier et quelle que soit la technique de construction, la mise en œuvre d'un revêtement en béton s'articule en plusieurs phases :

- la préparation du chantier,
- la mise en œuvre du béton,
- la finition (traitement de surface et cure),
- les joints.

2. Préparation du chantier

Pour réaliser un revêtement en béton dans de bonnes conditions, des dispositions doivent être prises avant et pendant l'exécution des travaux.

2.1 - Protection du chantier

La protection du chantier se fait par balisage de manière à empêcher le passage des véhicules, des piétons, etc. sur le béton frais. Il faut, le cas échéant, prévoir l'aménagement de passages pour piétons et de passerelles d'accès aux habitations.



2.2 - Protection des ouvrages existants

Les ouvrages contigus au chantier, tels que façades d'immeubles, candélabres, calepinage en pavés, bordures, etc., doivent être protégés.

Deux possibilités existent :

- soit par application d'un produit de protection qui facilite le nettoyage ultérieur,
- soit par la mise en place d'un film plastique de protection.



2.3 - Préparation de la plate-forme support de chaussée

Il importe de soigner la préparation de la plate-forme destinée à recevoir le béton. Pour cela, il faut :

- débarrasser la plate-forme de toutes traces de boue, de matières organiques, etc.,
- évacuer les eaux superficielles,

- soigner le compactage de la plate-forme. La présence d'un petit rouleau vibrant sur le chantier est indispensable. Le compactage est effectué, avant la pose des coffrages, sur une largeur égale à celle du revêtement augmentée - le cas échéant - de 50 cm de chaque côté,
- vérifier le profil de la plate-forme : une tolérance de 2,5 cm, mesurée à la règle de 3 mètres posée dans n'importe quelle direction, est admise,
- éliminer, le cas échéant, les ornières formées par les véhicules ou engins appelés à circuler sur la plate-forme. Il est recommandé de les combler avec une couche granulaire et de la compacter. Tout comblement avec une couche de sable doit être proscrit, et ceci quelle que soit son épaisseur.

***Nota :** Dans le cas d'un chantier de renforcement en béton, l'attention doit être attirée sur la nécessité de bien préparer l'assise des coffrages ou les chemins de roulement de la machine à coffrages glissants (voir § 3.2.4).*

2.4 - Coffrages : types, pose et vérification

Les coffrages sont constitués par des éléments en bois ou en tôle d'acier d'une hauteur égale à celle de la dalle à exécuter. Chaque élément de coffrage doit pouvoir être fixé au sol par des fiches dont l'espacement est inférieur à 1 mètre. Les éléments sont assemblés bout à bout par un système d'éclissage rigide.

Le montage correct des coffrages exige tout d'abord une implantation du tracé du projet. Le repérage s'effectue au moyen de piquets solidement enfoncés dans le sol et disposés à intervalles de 5 mètres environ.

Les points correspondant au niveau supérieur des coffrages sont visualisés sur les piquets. On les relie ensuite par un cordeau qui détermine le niveau des coffrages et de leur emplacement.

Les coffrages seront posés directement sur la plate-forme support.

On enfonce ensuite les fiches dans le sol et on procède à l'assemblage des éléments soit à l'aide d'éclisses, soit à l'aide des broches de liaison. On ne doit observer ni écart en hauteur ni écart en plan supérieur à 1 cm par rapport à l'alignement théorique.

Une dernière opération consiste à enduire soigneusement d'huile, les faces intérieures des coffrages afin d'éviter de provoquer des arrachements du béton lors du décoffrage.

A l'exception des chantiers dont la mise en œuvre est effectuée à l'aide d'une machine à coffrages glissants, l'utilisation des coffrages est indispensable pour la mise en œuvre du béton.



2.5 - Calepinage en pavés

Le calepinage offre les avantages suivants :

- il peut faire office de joints de retrait/flexion,
- il peut servir de coffrages pour le coulage du béton,
- il facilite la mise en œuvre du béton en permettant le déplacement des ouvriers sur le chantier,
- il rompt la monotonie des surfaces trop importantes,
- il renforce les contrastes et règle les rythmes des couleurs soigneusement choisies par le concepteur,
- il reprend les lignes des bâtiments (façades, toitures, etc.),
- il facilite, le cas échéant, l'accessibilité aux réseaux enterrés.



Le calepinage doit être posé sur un lit de mortier ou de béton (patins de calepinage), dosé à 300 kg de ciment/m³ (minimum).

Le patin doit être à bord franc (sans chanfrein) et déborder le moins possible du pavé (figure 3).

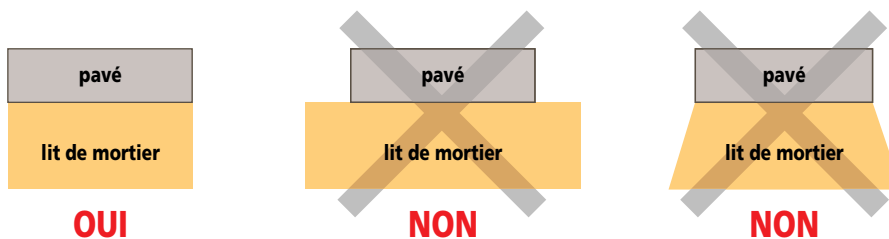


Fig. 3 : Disposition d'un calepinage en pavés.

Le calepinage doit être réalisé quelques jours avant les travaux de bétonnage pour permettre au lit de pose d'acquies une résistance suffisante.

2.6 - Préparation autour des points singuliers

Lorsque des points singuliers (regards, avaloirs, etc.) sont prévues dans le revêtement en béton, le projet précise, la réalisation :

- d'un joint de dilatation tout autour de l'obstacle,
- d'un joint transversal de retrait dans le revêtement sur un des côtés de l'émergence si celle-ci est de forme rectangulaire, dans l'axe si elle est de forme circulaire.

Au moment de la préparation du chantier, il convient donc de :

- Réaliser les réservations aux endroits prévus pour les émergences, les éléments n'étant placés qu'après durcissement du béton. Les dimensions des coffrages ainsi réalisés doivent tenir compte de l'épaisseur du joint de dilatation (1 à 2 cm). Une attention particulière doit être observée quant au respect des niveaux.
- Réaliser, le cas échéant, le calepinage en pavés, qui fait office de joint de retrait transversal, tel qu'il a été décrit ci-dessus.

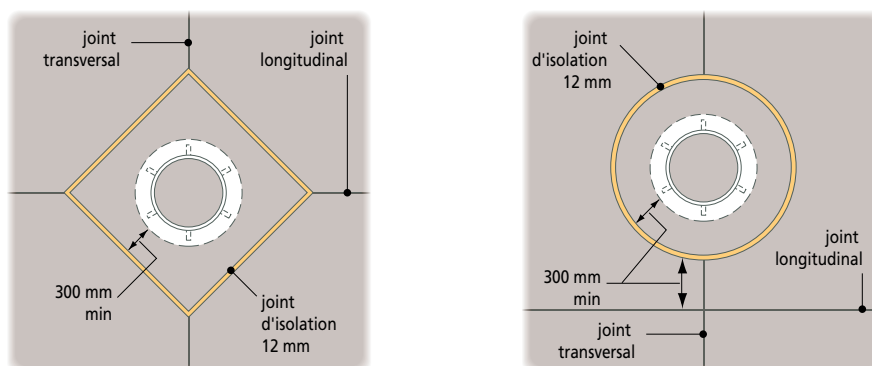


Fig. 4 : Dispositions d'un joint de dilatation autour d'un couvercle de regard

3. Mise en œuvre du béton

La mise en œuvre du béton est une opération très importante, dont dépendent en grande partie la réussite d'un aménagement et sa pérennité dans le temps. Il convient donc d'y apporter un soin particulier et de prendre en compte tous les paramètres techniques et climatiques qui peuvent influencer lors du déroulement de cette opération.

3.1 - Prise en compte des conditions climatiques

L'entreprise devra se tenir informée des conditions météorologiques afin de prendre les dispositions nécessaires en cas de pluie, vent, forte chaleur ou gel. Dans le cas d'un chantier important, l'entrepreneur devra installer, à une hauteur de 1 m au-dessus du sol, en un point du chantier accepté par le maître d'œuvre, un enregistreur de température et d'hygrométrie.

Les conditions atmosphériques ont une action sur la vitesse d'évaporation de l'eau du béton.

L'entreprise devra prendre des précautions en fonction des conditions climatiques telles que celles définies dans le tableau 10 :

Tableau 10 : Précautions en fonction des conditions atmosphériques				
Température ambiante / Hygrométrie	De 5 à 20°C	De 20 à 25°C	De 25 à 30°C	> 30°C
De 60 à 100%	Conditions normales de bétonnage			Cure renforcée
De 50 à 60%	Cure renforcée		Cure renforcée et arrosage maintenu de la plate-forme	Bétonnage à partir de 12 heures
De 40 à 50%	Cure renforcée		Bétonnage à partir de 12 heures	Cure renforcée et arrosage maintenu de la plate-forme
< 40%	Arrosage maintenu de la plate-forme		Cure renforcée et arrosage maintenu de la plate-forme	Pas de bétonnage sans mesures spéciales

3.2 - Bétonnage

La vibration du béton est une opération **obligatoire**. Réalisée avec soin, elle confère au béton une grande compacité, des caractéristiques mécaniques élevées et par conséquent une grande durabilité.

Il existe deux modes de vibration,

- la vibration externe : le béton est vibré en surface (règle vibrante, vibrofinisseur),
- la vibration interne ou pervibration : le béton est vibré à l'aide d'aiguilles vibrantes immergées dans le matériau (cas des aiguilles vibrantes et des machines à coffrage glissant).

Durant cette opération, il est important de considérer les éléments suivants :

- en cas de mise en œuvre par vibration externe, le béton est d'abord étalé puis vibré à l'aiguille notamment le long des coffrages avant le passage de la règle,
- en cas de mise en œuvre à la machine à coffrage glissant : la fréquence de vibration doit être réglée en fonction de la consistance du béton. Celle-ci, mesurée au cône d'Abrams, doit se situer dans une fourchette de 2 à 5 cm.

On veillera tout particulièrement à ce que l'approvisionnement en béton assure un niveau constant du matériau dans la chambre de pervibration.

Différents procédés de mise en œuvre du béton existent.

Le choix de l'un ou de l'autre de ces procédés se fait en tenant compte du type de chantier à réaliser, de la géométrie du projet, de l'emprise disponible de part et d'autre du revêtement, etc.

Les procédés de mise en œuvre sont les suivants :

- mise en œuvre à l'aiguille et à la règle vibrante,
- mise en œuvre au rouleau Striker,
- mise en œuvre au vibrofinisseur,
- mise en œuvre à la machine à coffrage glissant.

3.2.1 - Mise en œuvre à l'aiguille et/ou à la règle vibrantes

C'est la méthode la plus simple.

L'approvisionnement en béton se fait par camions-toupies. Le béton est d'abord étalé manuellement, puis vibré à l'aiguille, notamment le long des coffrages avant le passage de la règle vibrante. On réalise ainsi de 50 à 100 mètres linéaires de chaussée par jour.

Les joints sont le plus souvent moulés dans le béton frais, cette solution étant la plus économique. Ils peuvent également être sciés dans le béton durci.

Après le moulage des joints, on procède au traitement de la surface du béton et à la cure.

Équipement nécessaire à l'entreprise :

- coffrage : 200 m,
- aiguilles vibrantes : 2 à 3,
- règle vibrante,
- petits matériels de striage ou balayage et cure,
- une petite machine de sciage du béton.



3.2.2 - Mise en œuvre au Striker

Le rouleau Striker est un nouveau matériel destiné à la mise en œuvre d'une voirie en béton. Il est constitué d'un tube en acier entraîné en rotation par un moteur thermique et hydraulique. Il prend appui sur des coffrages et est tiré manuellement par deux ouvriers. Le poids du tube et la rotation en sens inverse au déplacement permet de conférer au béton d'une part une compacité optimale garantissant des résistances mécaniques élevées, et d'autre part une homogénéité du béton sur toute l'épaisseur de la dalle permettant l'obtention d'une mosaïque homogène dans le cas du béton désactivé.



3.2.3 - Mise en œuvre au vibro-finisser

Le vibro-finisser est muni de trois poutres. Il se déplace sur des rails qui servent en même temps de coffrage. L'écartement réglable de cette machine peut assurer la mise en place du béton sur une largeur allant de 1 à 5 mètres.

L'approvisionnement en béton, par camions-toupies, peut être frontal ou latéral. Le déversement et la répartition du béton doivent être réalisés de manière à obtenir une couche uniforme devant la machine.

Le béton est réglé, vibré et lissé successivement par les trois poutres du vibro-finiisseur, qui permet de réaliser 200 à 250 mètres linéaires de chaussée par jour.

L'exécution des joints, du traitement de surface (striage ou balayage, cure) se fait de la même manière que pour la mise en œuvre à la poutre et à l'aiguille vibrantes.

Équipement nécessaire à l'entreprise :

- 500 m de coffrages rails,
- un vibro-finiisseur,
- petits matériels de striage ou balayage et cure,
- une petite machine de sciage du béton.



3.2.4 - Mise en œuvre à la machine à coffrage glissant

La mise en œuvre à la machine à coffrage glissant présente de nombreux avantages :

- économie de main d'œuvre
- dans la mesure où le volume de travaux est suffisant pour assurer le plein emploi de la machine, des économies d'échelle substantielles permettent d'obtenir des coûts très compétitifs
- meilleure qualité dans la réalisation des ouvrages
- rapidité d'exécution des chantiers, qui réduit considérablement la gêne créée pour les usagers des voies sur lesquelles les travaux sont exécutés.

Le principe général de fonctionnement de ces machines est le suivant.

Le béton est introduit dans un moule à la forme voulue. Il est puissamment vibré par des aiguilles vibrantes placées à l'intérieur du moule, ce qui assure son serrage et la tenue de l'ouvrage dès sa sortie du coffrage. Le moule est tracté et guidé par un ensemble châssis automoteur, lui-même guidé en nivellement et en direction par fil.

Les matériels proposés sur le marché en France diffèrent par la conception de l'ensemble tracteur et par la conception de la fixation du moule à l'élément tracteur.

On peut distinguer :

- les machines portées par deux, trois ou quatre chenilles, le moule étant placé entre chenilles ou à l'extérieur de celles-ci,
- les machines portées par deux ou quatre chenilles ne travaillant qu'en déporté, caractérisées par un poids élevé nécessaire pour assurer leur stabilité,
- les machines portées par trois chenilles à géométrie variable.

Certaines machines sont équipées d'une fraise qui règle parfaitement le sol afin de permettre au moule de glisser sur une surface plane (ce qui élimine les pertes de béton et maintient la pression dans le moule à un niveau élevé). Dans cette catégorie de machines, certaines exécutent le fraissage et le moulage de l'ouvrage en une seule opération, d'autres nécessitent deux passages.



3.3 - Bétonnage bicouche

Cette technique peut être envisagée pour des raisons économiques (granulats d'un coût élevé). Le bétonnage bicouche nécessite un bon collage entre les deux couches, qui peut être obtenu par une adhérence frais sur frais. L'épaisseur minimale de la couche supérieure doit être 3 fois la dimension maximale (D_{max}) du granulats du béton utilisé dans cette couche.



4. Le talochage

Après la vibration du béton, la surface du revêtement peut présenter quelques irrégularités (cavités apparentes, vaguelettes, etc.). Un lissage à l'aide d'une taloche ou d'une lisseuse - manuelle ou mécanisée - est donc fortement recommandé.



5. La confection des joints

La réalisation correcte des joints est une condition essentielle à la pérennité de la voirie. Pour la réalisation des joints de construction ou d'arrêt de bétonnage, il convient de retailler la dalle à 90° afin d'obtenir un bord franc, et de la solidariser avec la coulée de béton suivante, à l'aide de goujons de 30 mm de diamètre, placés dans le sens longitudinal, à mi-hauteur de la dalle et espacés de 0,75 mètre.

L'exécution des joints transversaux de retrait/flexion s'effectue de deux manières :

5.1 - Exécution des joints moulés

Les joints moulés doivent être exécutés aussitôt après la mise en œuvre du béton. Ils doivent avoir une profondeur minimale égale au quart de l'épaisseur de la dalle béton.



Ils sont réalisés par enfoncement dans le béton frais d'une languette ou profilé en plastique, en contre-plaqué ou en bois aggloméré, d'épaisseur comprise

entre 3 et 5 mm, qui demeurera dans le béton après son durcissement.

Après achèvement du joint, la surface du béton doit être rectifiée par talochage de part et d'autre du joint sur environ 50 cm.

5.2 - Exécution des joints sciés

Le sciage des joints doit être exécuté lorsque le béton de la dalle a suffisamment durci pour éviter que la scie ne laisse des traces à la surface du béton, donc obli-

gatoirement après l'opération de cure du béton frais.

Il est capital de bien choisir le moment du sciage. Ce délai varie entre 6 et 48 heures, après le bétonnage, en fonction des caractéristiques du béton et des conditions climatiques. Ces joints sont réalisés à l'aide d'une machine à disques diamantés réglée sur une profondeur de l'ordre du quart ou du tiers de l'épaisseur de la dalle. La largeur de sciage est d'environ 3 à 4 mm.



6. Le traitement de surface

Après la mise en œuvre du béton, la surface du revêtement présente un aspect uni, plein et plan. On cherche alors à lui conférer de bonnes qualités antidérapantes. De telles qualités résultent d'une combinaison adéquate de micro et de macrorugosité.



Le passage d'une toile de jute humidifiée permet d'enlever la laitance de surface et de mettre en relief les grains de sable. On obtient ainsi une texture de

type « papier de verre » qui présente une bonne microrugosité.

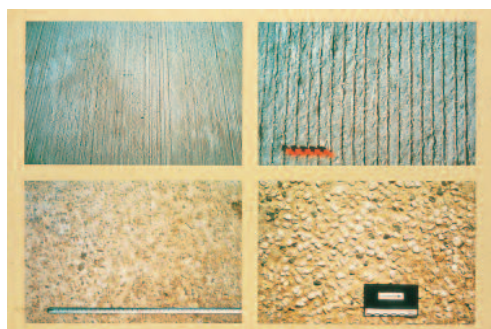
Pour améliorer le drainage, plusieurs techniques de traitement de surface ont été mises au point, répondant aux exigences de sécurité et d'adhérence. On peut citer à ce propos, le broissage, le striage et le rainurage.

Depuis quelques années, de nouvelles exigences sont apparues, du fait du développement des voies de communication par route. Aujourd'hui, le projeteur doit prendre en considération, avec des degrés de préoccupation adaptés, d'autres paramètres tels que :

- le bruit à l'extérieur et à l'intérieur des véhicules ;
- les projections d'eau par temps de pluie ;
- la résistance au roulement (consommation de carburant) ;
- l'usure des pneus.

Le concepteur doit faire ses choix en fonction d'un certain nombre de critères parfois contradictoires, pour arriver à un compromis conduisant à la technique optimale.

Devant ces nouvelles données, d'autres techniques de traitement de surface des revêtements en béton se sont développées : désactivation, bouchar dage, béton imprimé et hydrosablage.



Le choix du projeteur, parmi ces différentes techniques, doit se faire en tenant compte des critères suivants :

- la fonction de la voirie et des aménagements urbains ;
- la nature du site ;
- l'importance du trafic ;
- le coût.

6.1 - Le brossage ou balayage

Ce type de traitement de surface est le plus utilisé sur les voiries à faible trafic. Il vise à créer, à la surface du béton frais, une macrotexture fine, constituée par des canaux fins qui assurent, en cas de pluie, d'une part un drainage accéléré de la surface de revêtement, d'autre part une réduction sensible de l'épaisseur du film d'eau entre le pneu et la chaussée. Il en résulte une bonne adhérence à grande vitesse et un drainage superficiel efficace.

Le brossage est réalisé, en général, dans le sens transversal. Certains pays utilisent aussi le brossage



longitudinal qui présente l'avantage d'un moindre bruit de roulement, mais offre par contre un moins bon drainage superficiel. On applique le brossage au moyen d'un balai ou d'une brosse dure, soit manuellement, soit de façon mécanisée. Si le brossage transversal est réalisé manuellement, il est souhaitable de disposer d'une passerelle enjambant le revêtement et qui sert de guide au personnel qui l'emprunte pour exécuter son travail. En outre, il faut veiller à ce que l'outil n'attaque pas trop brutalement la surface du béton frais, sous peine de créer des empreintes, des ondulations et des déchaussements des granulats du béton.

Cette technique apporte à la chaussée des caractéristiques de surface convenables pour les voiries à faible trafic ; en particulier :

- l'adhérence mesurée à l'essai « hauteur de sable » donne des valeurs comprises entre 0,5 et 1 mm selon le type de brosse utilisé ; ce qui est un résultat intéressant pour les voiries à faible trafic ;
- le drainage est efficace, ce qui réduit les projections d'eau et améliore la visibilité et la sécurité des usagers.

Une cure est ensuite réalisée sur le béton pour éviter la dessiccation de surface.



6.2 - Le striage

Le striage est une technique de traitement de surface qui vise à créer une macrotexture grossière constituée par des canaux d'une profondeur d'environ 5 mm, espacés de 15 à 30 mm. Ces canaux assurent, en cas de pluie, un drainage plus efficace qu'avec la technique du brossage. Il en résulte une nette amélioration de l'adhérence de la chaussée. Par contre, on constate une augmentation du bruit de roulement.

Le striage est réalisé, en général, dans le sens transversal, soit manuellement, soit de façon mécanisée.

Quand le striage est effectué à l'aide d'une machine, le mouvement transversal est combiné avec celui de la progression longitudinale, de telle sorte que les stries soient perpendiculaires à l'axe de la chaussée.

Dans le mode manuel, le striage du béton est obtenu à l'aide de râteliers



dont les dents, en plastique ou en acier, sont distantes d'environ 20 à 50 mm. La profondeur des stries est de l'ordre de 3 à 5 mm. Il est souvent utilisé pour les voiries à faible trafic.

Comme dans le cas du brossage, si le striage transversal est effectué manuellement, il est souhaitable de disposer d'une passerelle pour les raisons citées plus haut. En outre, il faut veiller à ce que l'outil n'attaque pas trop brutalement la surface du béton frais, sous peine de créer des arrachements de granulats qui dégradent les qualités d'uni du revêtement.

Les mesures à l'essai « hauteur de sable » donnent des valeurs comprises entre 0,75 et 1,25 mm, en fonction du matériel employé et de la qualité de la mise en œuvre.

Une cure est ensuite réalisée sur le béton pour éviter la dessiccation de surface.

6.3 - La désactivation

Cette technique consiste à éliminer le mortier superficiel du revêtement en béton de façon à faire apparaître les granulats et à conférer à la surface des caractéristiques particulières d'adhérence et/ou d'aspect.

On pulvérise à la surface du béton, immédiatement après sa mise en place, un produit retardateur de prise, le « désactivant », qui s'oppose à la prise superficielle du mortier durant un délai déterminé (plusieurs heures) qui est fonction des conditions atmosphériques régnant au moment de l'exécution des travaux. La surface du béton est ensuite lavée au jet d'eau haute pression afin d'éliminer la laitance de surface, qui n'a pas fait prise, et de mettre à nu la face supérieure des gravillons.

En fonction du dosage utilisé, l'action du désactivant peut être plus ou moins profonde pour répondre à l'effet attendu : adhérence et aspect. La rugosité

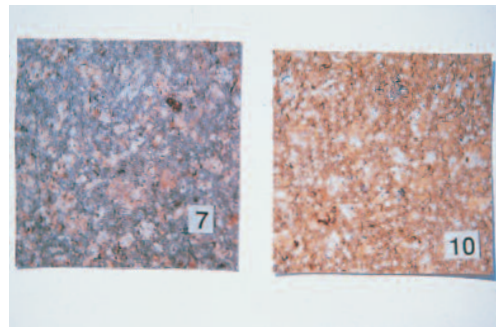


géométrique obtenue, mesurée par l'essai « hauteur de sable », est voisine de 2 mm. Une cure est ensuite réalisée sur le béton pour éviter la dessiccation de surface.

6.4 - Le bouchardage

Cette technique consiste à attaquer la surface du béton durci avec un marteau spécial, la « boucharde », dont la surface de frappe est hérissée de dents pyramidales (« pointes de diamant »). Le procédé est simple : le béton - dont la composition est spécialement étudiée - est coulé en place, réglé, vibré, puis taloché et protégé par un produit de cure suivant le processus classique de mise en œuvre.

Quand il a suffisamment durci (environ 7 jours), il est alors bouchardé avec un appareil pneumatique qui porte les bouchardes. Les reliefs en forme de pointes de diamant, en frappant la surface, font éclater le mortier du béton et fracturent légèrement les granulats. Cette technique permet, par un choix judicieux des granulats et une formulation adéquate, d'obtenir des aspects de surface imitant les pierres naturelles en granit.



6.5 - Le béton imprimé

Cette technique consiste à imprimer, à l'aide de matrices ou de moules spéciaux, des dessins ou motifs à la surface d'un béton frais.

Sur un support préalablement nivelé et compacté, le béton est coulé en place entre les coffrages, vibré puis taloché. Le marquage périphérique ainsi que les obstacles (regards, arbres, etc.) et le traçage des bordures sont exécutés à l'aide d'outils spéciaux (quarts-de-rond, trusquins). La surface du béton ainsi préparée est ensuite saupoudrée de 2 ou 3 couches d'un produit colorant et anti-usure, incorporé en surface du béton par talochage et lissage. Après la mise en place d'un film pour les dessins lisses ou de la poudre de démoulage pour les dessins « structurés », les moules spéciaux sont appliqués et retirés au fur et à mesure,

Chapitre 4 • Mise en œuvre du béton routier

imprimant à la surface le motif choisi. Après quelques jours de séchage, la surface du béton subit un nettoyage au jet d'eau à haute pression, suivi de la pulvérisation d'un produit de protection (résine ou cire).



6.6 - L'hydrosablage

Cette technique consiste à attaquer un revêtement béton durci (24 à 48 heures après le bétonnage) avec un jet de sable projeté à l'eau haute pression. Le sable (quartz cristal 00), entraîné par l'eau à haute pression, permet de dégrainer plus ou moins les granulats qui, selon leur dureté, sont plus ou moins arrondis par cette technique. Les granulats sombres sont éclaircis par ce traitement. Cette technique est adaptée à la réalisation d'aménagements urbains piétonniers ou faiblement circulés, mais aussi aux voiries circulées sous réserve de prévoir dans le béton des granulats répondant aux spécifications requises en matière de dureté et de résistance au polissage.



7. La cure du béton

Pour éviter la dessiccation de la surface de la dalle de béton sous l'effet des agents atmosphériques (vent, pluie, soleil, variation de l'hygrométrie ...), on procède immédiatement après la mise en œuvre du revêtement, à la protection du béton. Celle-ci peut être réalisée soit par la mise en place d'un film en polyane, soit par la pulvérisation d'un produit de cure.



Cette pulvérisation peut être faite soit à l'aide d'une machine automatique, soit, plus simplement avec des pulvérisateurs manuels de type agricole.

Le produit de cure est, en général, de couleur blanche pour en contrôler la bonne répartition. Il forme à la surface du béton un film imperméable qui assure une protection efficace et empêche l'évaporation de l'eau.

Le tableau 11 précise, pour chaque technique de traitement de surface, les dispositions à prendre pour assurer une bonne protection du béton.

Tableau 11 : Dispositions à prendre pour assurer une bonne protection du béton pour chaque technique de traitement de surface

Technique de traitement	Protection	Produit de cure
Brossage		Cure immédiatement après le traitement
Striage		Idem
Désactivation		Cure avant et après désactivation, sauf si le désactivant fait office d'un produit de cure
Bouchardage		Cure avant bouchardage
Béton imprimé		Cure après le traitement (empreinte) mais avant la protection (cire)
Hydrosablage		Cure avant hydrosablage

8. Conclusion

Les techniques de mise en œuvre des voiries et aménagements urbains en béton sont simples. Pour assurer une durabilité accrue, il faut veiller à appliquer les règles de l'art stipulées dans le CCTP et qui ont été présentées dans ce chapitre.

ANNEXE 2

Tableau 12 - Les bétons : caractéristiques et mise en œuvre.

Tableau 12 : Les bétons - caractéristiques et mise en œuvre			
Paramètre		Technique	Béton préfabriqué
CARACTÉRISTIQUES	Type de ciments		Tous les CEMENTS NORMALISÉS norme NF EN 197-1
	Nature et caractéristiques des granulats		Tous les granulats non gélifs. Dimension du plus gros granulats ≤ 40 mm
	Dosage du ciment		de 300 à 350 Kg/m ³
	Dosage en eau		$\frac{E}{C} \leq 0,45$
	Adjuvants	Entraîneur d'air	Teneur en air occlus : 4 à 6%
Autres		Plastifiant	
EXEMPLE DE FORMULATION	<ul style="list-style-type: none"> • Ciment • Granulats 		CEM II/A 32,5 330 Kg 0/4 580 Kg 4/20 685 Kg 20/40 660 Kg
	<ul style="list-style-type: none"> • Dosage en eau • Entraîneur d'air • Autres adjuvants 		E/C : 0,45 (soit 150 l) Air occlus : 5% (soit 0,20 Kg/m ³) Plastifiant : 0,5% du poids du ciment (soit 1,65 Kg/m ³)
MISE EN ŒUVRE	Bétonnage		<ul style="list-style-type: none"> • Vibration obligatoire • Multiples possibilités de mise en œuvre : de la règle vibrante à la machine à coffrage glissant
	Utilisation préférentielle de la technique		Toutes les catégories de voiries et aménagements urbains
	Rendement journalier		<ul style="list-style-type: none"> • de 50 à 100 mètres à la règle vibrante • de 500 à 600 mètres à la machine à coffrage glissant
JOINTS	• Joints transversaux de retrait		Oui
	• Espacement		3 à 5 mètres
	• Garnissage des joints		Le cas échéant
FINITION	Produit de Cure		Oui

Éléments pour déterminer le coût de construction d'un revêtement en béton

- 1 - Introduction
- 2 - Méthode de détermination du coût de construction d'un revêtement en béton
- 3 - Coût additionnel pour des traitements de surface spécifiques
- 4 - Coût additionnel pour la confection des joints
- 5 - Conclusion

1. Introduction

Dans le chapitre précédent, il a été présenté la mise en œuvre d'un revêtement en béton. Ceci a permis d'analyser les différents procédés de construction dont peut disposer l'entreprise pour réaliser un tel ouvrage.

Devant la diversité des solutions, tant en ce qui concerne les moyens de vibration, de traitement de surface et de confections des joints, les choix doivent tenir compte des contraintes techniques et économiques.

Le premier chapitre a développé l'aspect technique de ces choix, l'étude économique n'ayant été abordée que d'une façon succincte et générale.

L'objectif de ce chapitre est de **développer l'aspect économique comme critère de choix** pour l'entreprise. Les points suivants vont être successivement traités :

- Méthode de détermination du coût de construction d'un revêtement « standard » en béton, c'est à dire avec un traitement de surface par brossage ou striage et des joints moulés.
- Coût additionnel pour des traitements de surfaces spécifiques (par désactivation, par impression, par bouchardage, etc.).
- Coût additionnel pour confection des joints (par sciage, par calepinage en pavés, etc.).

2. Méthode de détermination du coût de construction d'un revêtement en béton

Le coût de construction d'un revêtement en béton de ciment est fonction, du procédé de mise en œuvre (mise en œuvre manuelle, au vibro-finisser ou à la

machine à coffrage glissant) et des conditions particulières inhérentes au projet (topographie, caractéristiques géométriques du projet).

Pour donner à l'entreprise les moyens d'apprécier, dans le cadre d'un projet réel, la technique ou le procédé de mise en œuvre le plus avantageux économiquement, il est donné, sous forme de tableaux, une série d'indications permettant d'évaluer pour chaque procédé de mise en œuvre, le prix unitaire de construction d'un revêtement en béton (au mètre carré de voirie) en fonction du rendement journalier « r » (en mètres linéaires par jour), de la largeur de la voirie « l » en mètres), de l'épaisseur de la dalle « e » (en cm), du nombre d'heures de travail journalier « h », des taux horaires de la main-d'œuvre « T » (en euros / heure), des prix des fournitures (béton, joint, produit de cure) et des coûts d'amortissement du matériel de mise en œuvre.

Les prix obtenus par cette méthode sont des **coût de fabrication, hors taxes**. Ils ne tiennent pas compte des travaux de terrassement ni des travaux de préparation de la plate-forme. Ils donnent une idée précise du prix unitaire de construction d'un revêtement en béton mis en œuvre directement sur la plate-forme. Ce qui est, en général, le cas. Si, dans certains cas, il s'avère nécessaire de placer une couche de fondation, il faudrait alors tenir compte du montant de ces travaux dans l'évaluation du prix unitaire de la chaussée.

2.1 - Cas d'une mise en œuvre à l'aiguille et/ou à la règle vibrantes ou au striker

Le tableau 13 présente la méthode d'évaluation du coût de construction d'un revêtement en béton réalisé à l'aiguille et/ou à la règle vibrante mais aussi au striker. Il comprend le coût de la main-d'œuvre, de la fourniture et de l'amortissement du matériel. Il inclut toutes les opérations nécessaires pour parachever un revêtement en béton, sur la base d'un traitement de surface par brossage ou striage et sur la base d'une confection des joints par moulage.

Légende des notations

r : rendement journalier (mètre carré par jour)

h : nombre d'heures de travail par jour

T_1, T_2, T_3 : taux horaires

e : épaisseur du revêtement béton (cm)

p_b : prix du mètre cube de béton (€)

p_j : prix du mètre linéaire de joint à mouler (€)

$(l_j)_{tot}$: longueur totale des joints moulés

$S_{rev.}$: surface du revêtement béton

p_c : prix du kilogramme de produit de cure (€)

p_m : prix du matériel (coffrages + aiguille et règle vibrantes ou striker) (€)



Tableau 13 : Coût de construction d'un revêtement en béton <i>(euros par mètre carré)</i> Cas d'une mise en œuvre à l'aiguille et/ou à la règle vibrante ou au striker	
Coût de la main-d'œuvre <i>"C_{M-0}"</i>	<ul style="list-style-type: none"> • 1 chef d'équipe : $T_1 \cdot \frac{h}{r}$ • 1 ouvrier spécialisé : $T_2 \cdot \frac{h}{r}$ • 4 ouvriers : $4 \cdot T_3 \cdot \frac{h}{r}$
	$C_{M-0} = \frac{h}{r} (T_1 + T_2 + 4T_3)$
Coût de la fourniture "C_{F0}"	<ul style="list-style-type: none"> • Béton : $\frac{1}{100} e \cdot p_B$ • joint : $\frac{(l_j)_{tot} \times p_J}{S_{rev}}$ • produit de cure : $0,2 \cdot p_C$ (à raison de 0,2 Kg au mètre carré)
	$C_{F0} = \left(\frac{1}{100} e \cdot p_B + \frac{(l_j)_{tot} \times p_J}{S_{rev}} + 0,2 p_C \right)$
Coût d'amortissement du matériel (aiguille, règle vibrante, striker, coffrage) <i>C_A</i> (ou location)	Hypothèse de calcul : <ul style="list-style-type: none"> • Prix du matériel : p_m (€) • Durée de l'amortissement : D (ans) • Taux annuel d'utilisation du matériel (en%) : τ • Rendement journalier : r
	$C_A = \frac{100}{365} \times \frac{p_m}{D \cdot r \cdot \tau}$
Coût de revient "C" au mètre carré	$C = C_{M-0} + C_{F0} + C_A$

2.2 - Cas d'une mise en œuvre au vibro-finisser

Le tableau 14 présente la méthode d'évaluation du coût de construction d'un revêtement en béton réalisé avec un vibro-finisser. Il comprend le coût de la main-d'œuvre, de la fourniture et de l'amortissement du matériel. Il inclut toutes les opérations nécessaires pour parachever un revêtement en béton, sur la base d'un traitement de surface par brossage ou striage et sur la base d'une confection des joints par moulage.

Légende des notations

- r' : rendement journalier (mètre carré par jour)
- h : nombre d'heures de travail par jour
- T_1, T_2, T_3 : taux horaire
- e : épaisseur du revêtement béton (cm)
- p_b : prix du mètre cube de béton (€)
- $(l_j)_{tot}$: longueur totale des joints moulés
- $S_{rev.}$: surface du revêtement béton
- p_j : prix du mètre linéaire de joint à mouler (€)
- p_c : prix du kilogramme de produit de cure (€)
- p'_m : prix du matériel (rails + vibro-finisser) (€)



Tableau 14 : Coût de construction d'un revêtement en béton <i>(euros par mètre carré)</i> Cas d'une mise en œuvre au vibro-finisser	
Coût de la main-d'œuvre <i>"C_{M-0}"</i>	<ul style="list-style-type: none"> 1 chef d'équipe : $T_1 \cdot \frac{h}{r'}$ 2 ouvriers spécialisés : $2 T_2 \cdot \frac{h}{r'}$ 6 ouvriers : $6 \cdot T_3 \cdot \frac{h}{r'}$ $C_{M-0} = \frac{h}{r'} (T_1 + 2 T_2 + 6 T_3)$
Coût de la fourniture "C_{F0}"	<ul style="list-style-type: none"> Béton : $\frac{1}{100} e \cdot p_B$ joint : $\frac{(l_j)_{tot} \times p_j}{S_{rev}}$ produit de cure : $0,2 \cdot p_c$ (à raison de 0,2 Kg au mètre carré) $C_{F0} = \left(\frac{1}{100} e \cdot p_B + \frac{(l_j)_{tot} \times p_j}{S_{rev}} + 0,2 p_c \right)$
Coût d'amortissement du matériel (vibro-finisser) <i>C_A</i> (ou location)	Hypothèse de calcul : <ul style="list-style-type: none"> Prix du matériel : p'_m (€) Durée de l'amortissement : D' (ans) Taux annuel d'utilisation du matériel (en%) : τ' Rendement journalier : r' $C_A = \frac{100}{365} \times \frac{p'_m}{D' \cdot r' \cdot \tau'}$
Coût de revient "C" au mètre carré	$C = C_{M-0} + C_{F0} + C_A$

2.3 - Cas d'une mise en œuvre à la machine à coffrage glissant

Le tableau 15 présente la méthode d'évaluation du coût de construction d'un revêtement en béton réalisé avec une machine à coffrage glissant. Il comprend

le coût de la main-d'œuvre, de la fourniture et de l'amortissement du matériel. Il inclut toutes les opérations nécessaires pour parachever un revêtement en béton, sur la base d'un traitement de surface par broissage ou striage et sur la base d'une confection des joints par moulage.



Tableau 15 : Coût de construction d'un revêtement en béton

(euros par mètre carré)

Cas d'une mise en œuvre à la machine à coffrage glissant

<p>Coût de la main-d'œuvre "C_{M-0}"</p>	<ul style="list-style-type: none"> • 1 chef d'équipe : $T_1 \cdot \frac{h}{r''}$ • 2 ouvriers spécialisés : $2 T_2 \cdot \frac{h}{r''}$ • 3 ouvriers : $3 T_3 \cdot \frac{h}{r''}$ $C_{M-0} = \frac{h}{r''} (T_1 + 2 T_2 + 3 T_3)$
<p>Coût de la fourniture "C_{F0}"</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Béton : $\frac{1}{100} e \cdot p_B$ • joint : $\frac{(l_j)_{tot} \times p_J}{S_{rev}}$ • produit de cure : $0,2 \cdot p_C$ (à raison de 0,2 Kg au mètre carré) $C_{F0} = \left(\frac{1}{100} e \cdot p_B + \frac{(l_j)_{tot} \times p_J}{S_{rev}} + 0,2 p_C \right)$
<p>Coût d'amortissement du matériel (machine à coffrage glissant) C_A (ou location)</p>	<p>Hypothèse de calcul :</p> <ul style="list-style-type: none"> • Prix du matériel : p''_m (€) • Durée de l'amortissement : D'' (ans) • Taux annuel d'utilisation du matériel (en%) : τ'' • Rendement journalier : r'' $C_A = \frac{100}{365} \times \frac{p''_m}{D'' \cdot r'' \cdot \tau''}$
<p>Coût de revient "C" au mètre carré</p>	$C = C_{M-0} + C_{F0} + C_A$

Légende des notations

- r'' : rendement journalier (mètre carré par jour)
 h : nombre d'heures de travail par jour
 T_1, T_2, T_3 : taux horaire
 e : épaisseur du revêtement béton (cm)
 p_b : prix du mètre cube de béton (€)
 p_j : prix du mètre linéaire de joint à mouler (€)
 $(l_j)_{tot}$: longueur totale des joints moulés
 $S_{rev.}$: surface du revêtement béton
 p_c : prix du kilogramme de produit de cure (€)
 p''_m : prix du matériel (machine à coffrage glissant) (€)

3. Coût additionnel pour des traitements de surface spécifiques

La méthode de calcul du coût de construction d'un revêtement en béton, développée dans le paragraphe précédent, a été présentée avec l'hypothèse d'un traitement de surface par brossage ou striage, dit « standard ».

Le but ici est de donner quelques éléments économiques permettant à l'entreprise de chiffrer le coût additionnel dû à un traitement non standard, tel la désactivation, l'impression ou le bouchardage.

3.1 - Cas du béton désactivé

La désactivation du béton nécessite deux étapes :

- la pulvérisation d'un produit retardateur de prise de surface qui se fait soit à l'aide d'un pulvérisateur type agricole (cas de petits chantiers) soit à l'aide d'un engin autotracté (cas de grands chantiers).
- le lavage du revêtement à l'eau haute pression qui se fait à l'aide d'un appareil de lavage à haute pression (cas de petits chantiers) ou le brossage/lavage de la surface du revêtement qui se fait à l'aide d'un engin portant une brosse rotative et muni d'une rampe de jet d'eau.



Le coût additionnel du béton désactivé par rapport à un revêtement en béton strié ou brossé provient d'un :

- coût additionnel de main-d'œuvre : deux interventions (pulvérisation et lavage) pour le béton désactivé au lieu d'une seule pour le béton brossé ou strié.
- coût additionnel de fourniture relatif au béton (dans le cas d'un choix spécifique de granulats - aspect et couleurs), et au produit retardateur de prise de surface,
- coût additionnel d'amortissement et d'exploitation du matériel spécifique à la technique du béton désactivé (pulvérisateur, appareil de lavage à haute pression, brosse rotative, etc.) qui, en fait, est faible.

Tableau 16 : Coût additionnel pour béton désactivé (€/m²)

Procédé de mise en œuvre Désactivation	Aiguille et règle vibrantes ou striker	Vibro-finisser	Machine à coffrage glissant
Coût additionnel Main-d'œuvre ΔC_{M-0}	• 1 ouvrier : $T_3 \cdot \frac{h}{r}$	• 2 ouvriers : $2T_3 \cdot \frac{h}{r}$	• 2 ouvriers : $2T_3 \cdot \frac{h}{r''}$
	$\Delta C_{M-0} = T_3 \cdot \frac{h}{r}$	$\Delta C_{M-0} = 2T_3 \cdot \frac{h}{r}$	$\Delta C_{M-0} = 2T_3 \cdot \frac{h}{r''}$
Coût additionnel Fourniture ΔC_{F0}	• Δ béton • Désactivant : $\frac{1}{4} \times p_d$ (1 litre pour 4m ²)	• Δ béton • Désactivant : $\frac{1}{4} \times p_d$ (1 litre pour 4m ²)	• Δ béton • Désactivant : $\frac{1}{4} \times p_d$ (1 litre pour 4m ²)
	$\Delta C_{F0} = \frac{1}{4} \times p_d + \Delta \text{béton}$	$\Delta C_{F0} = \frac{1}{4} \times p_d + \Delta \text{béton}$	$\Delta C_{F0} = \frac{1}{4} \times p_d + \Delta \text{béton}$
Coût additionnel d'amortissement matériel ΔC_A	Hypothèse de calcul : • Prix du matériel : p_{mat} • Durée Amortissement : D • Taux annuel d'utilisation : τ	Hypothèse de calcul : • Prix du matériel : p'_{mat} • Durée Amortissement : D' • Taux annuel d'utilisation : τ'	Hypothèse de calcul : • Prix du matériel : p''_{mat} • Durée Amortissement : D'' • Taux annuel d'utilisation : τ''
	$\Delta C_A = \frac{100}{365} \times \frac{p_{mat}}{D \cdot r \cdot \tau}$	$\Delta C_A = \frac{100}{365} \times \frac{p'_{mat}}{D' \cdot r' \cdot \tau'}$	$\Delta C_A = \frac{100}{365} \times \frac{p''_{mat}}{D'' \cdot r'' \cdot \tau''}$
Coût additionnel Total ΔC	$\Delta C = \Delta C_{M-0} + \Delta C_{F0} + \Delta C_A$	$\Delta C = \Delta C_{M-0} + \Delta C_{F0} + \Delta C_A$	$\Delta C = \Delta C_{M-0} + \Delta C_{F0} + \Delta C_A$

Le tableau 16 présente, pour chaque procédé de mise en œuvre, la méthode d'évaluation du coût additionnel relatif à la technique du béton désactivé. Ce qui permet à l'entreprise d'opter pour un choix adéquat du matériel à utiliser pour réaliser le projet.

Légendes de notations

r, r', r'' : rendements journaliers (m^2/j) respectivement pour mise en œuvre manuelle (aiguille et règle vibrante), vibro-finisher et machine à coffrage glissant. Il est à noter que le rendement de l'atelier «désactivation» est le même que celui de l'atelier de mise en œuvre.

h : nombre d'heures de travail par jour

T_3 : taux horaire d'un ouvrier

p_d : prix d'un litre de désactivant (€)

3.2 - Cas du béton imprimé

La technique du béton imprimé nécessite la réalisation de plusieurs opérations par une main-d'œuvre spécialisée et l'utilisation de produits et du matériel très spécifiques en plus de ceux utilisés en technique « standard ». Elle se déroule en plusieurs étapes :

- le saupoudrage d'une poudre colorante à la surface du béton, préalablement mis en place et taloché,
- le lissage,
- l'application d'une poudre de démoulage,
- l'application et le retrait des moules spéciaux,
- le nettoyage au jet d'eau,
- la protection finale du béton (résine, cire).

Le coût additionnel du béton imprimé, justifié par l'apport esthétique qu'il procure au revêtement par rapport à un revêtement en béton strié ou brossé, provient d'un :

- coût additionnel de main-d'œuvre : six interventions pour le béton imprimé au lieu d'une seule pour le béton strié ou brossé ; ceci se traduit par un coût additionnel de 3 ouvriers spécialisés,
- coût additionnel de fourniture relatif à plusieurs produits : poudre colorante, poudre de démoulage, produit de protection,
- coût additionnel d'amortissement du matériel spécifique à la technique du béton imprimé, tels les moules spéciaux.



Le tableau 17 présente la méthode d'évaluation du coût additionnel relatif à la technique du béton imprimé qui est à l'heure actuelle réalisé d'une façon manuelle (règle ou aiguille vibrante).

Légendes de notations

- r : rendement journalier (mètre carré par jour) pour mise en œuvre manuelle (aiguille et règle vibrante)
- h : nombre d'heures de travail par jour
- T₂ : taux horaire d'un ouvrier spécialisé
- p_{p.c.} : prix de la poudre colorante (€/kg)
- p_{p.d.} : prix de la poudre de démoulage (€/kg)
- p_{pro.} : prix du produit de protection (€/litre)

Tableau 17 : Coût additionnel pour béton imprimé (€/m²)	
Procédé de mise en œuvre	Manuel, aiguille et règle vibrante
Béton imprimé	
Coût additionnel Main-d'œuvre ΔC_{M-0}	<ul style="list-style-type: none"> 3 ouvriers spécialisés (qui font partie de l'équipe de base) $\Delta C_{M-0} = 3T_2 \cdot \frac{h}{r}$
Coût additionnel Fourniture ΔC_{F0}	<ul style="list-style-type: none"> Poudre colorante 4 kg/m² Poudre de démoulage 1 kg/m² Poudre de protection 0,2 litre/m² $\Delta C_{F0} = (4 \cdot p_{pc} + p_{pd} \times 0,2 p_{pro})$
Coût additionnel d'amortissement matériel (moules spéciaux) ΔC_A	Hypothèse de calcul : <ul style="list-style-type: none"> Prix des moules spéciaux : p_{moule} Durée Amortissement : D Taux annuel d'utilisation : τ $\Delta C_A = \frac{100}{365} \times \frac{p_{moule}}{D \cdot r \cdot \tau}$
Coût additionnel Total ΔC	$\Delta C = \Delta C_{M-0} + \Delta C_{F0} + \Delta C_A$

3.3 - Cas du béton bouchardé

Cette technique engendre un coût additionnel relatif à l'amortissement du matériel de bouchardage et un coût additionnel de main-d'œuvre. Mais il n'y a pas de coût additionnel de fourniture.

Le tableau 18 présente la méthode d'évaluation du coût additionnel relatif à la technique du béton bouchardé.



Tableau 18 : Coût additionnel pour béton bouchardé (€/m²)	
Procédé de mise en œuvre	Quelle que soit la technique de bétonnage utilisée
Béton bouchardé	
Coût additionnel Main-d'œuvre ΔC_{M-0}	<ul style="list-style-type: none"> • 1 ouvrier spécialisé $\Delta C_{M-0} = T_2 \cdot \frac{h}{r_{\text{bouchardage}}}$
Coût additionnel Fourniture ΔC_{F0}	<p>R A S</p> $\Delta C_{F0} = 0$
Coût additionnel Amortissement matériel de bouchardage ΔC_A (ou location)	<p>Hypothèse de calcul :</p> <ul style="list-style-type: none"> • Pris du matériel de bouchardage : p_{bouch} • Durée Amortissement : D • Taux annuel d'utilisation : τ • Rendement journalier : r_{bouch} $\Delta C_A = \frac{100}{365} \times \frac{p_{\text{bouch}}}{D \cdot \tau \cdot r_{\text{bouchardage}}}$
Coût additionnel Total ΔC	$\Delta C = \Delta C_A + \Delta C_{M-0}$

Légendes de notations

$r_{\text{bouchardage}}$: rendement journalier de la machine de bouchardage (mètre carré par jour)

h : nombre d'heures de travail par jour

T_2 : taux horaire d'un ouvrier spécialisé

4. Coût additionnel pour la confection des joints

La méthode de calcul du coût de construction d'un revêtement en béton, développée dans le paragraphe 2 de ce chapitre, a été présentée avec l'hypothèse de réalisation de joints moulés. Le but ici est de donner quelques éléments économiques permettant à l'entreprise de chiffrer le coût additionnel dû à la réalisation d'autres types de joints, tels les joints sciés ou les joints en pavés.

4.1 - Cas des joints sciés

Le sciage des joints se traduit, en principe, par un coût additionnel de main-d'œuvre (1 ouvrier spécialisé) et un coût additionnel relatif à l'amortissement du matériel de sciage et la consommation de disques diamantés (fourniture).



Le tableau 19 présente la méthode d'évaluation du coût additionnel relatif au sciage des joints.

Légendes de notations

r_{sciage} : rendement journalier (mètre linéaire de joint scié par jour)

$(l)_{\text{tot}}$: longueur totale des joints sciés (mètre)

P_{disque} : prix unitaire du disque diamanté (F)

$S_{\text{rev.}}$: surface du revêtement béton (m^2)

$(l)_{\text{disque}}$: longueur du joint scié réalisée avec un disque diamanté (mètre par disque)

Tableau 19 : Coût additionnel de sciage de joints (€/m² de revêtement)

Procédé de mise en œuvre	Pour tous procédés de bétonnage
sciage joints	
Coût additionnel Main-d'œuvre ΔC_{M-0}	<ul style="list-style-type: none"> • 1 ouvrier spécialisé $\Delta C_{M-0} = T_2 \cdot \frac{h}{r_{\text{sciage}}} \times \frac{(l_j)_{\text{tot}}}{S_{\text{rev}}}$
Coût additionnel Fourniture ΔC_{F0}	<ul style="list-style-type: none"> • Disque diamanté : $\frac{(l_j)_{\text{tot}} \times p_{\text{disque}}}{S_{\text{rev}} \times (l_j)_{\text{disque}}}$ $\Delta C_{F0} : \frac{(l_j)_{\text{tot}} \times p_{\text{disque}}}{S_{\text{rev}} \times (l_j)_{\text{disque}}}$
Coût additionnel d'amortissement matériel de sciage ΔC_A (ou location)	Hypothèse de calcul : <ul style="list-style-type: none"> • p_{sciage} : Prix du matériel de sciage • Durée Amortissement : D • Taux annuel d'utilisation : τ $\Delta C_A = \frac{100}{365} \times \frac{p_{\text{sciage}}}{D \cdot \tau \cdot r_{\text{sciage}}} \times \frac{(l_j)_{\text{tot}}}{S_{\text{rev}}}$
Coût additionnel Total ΔC	$\Delta C = \Delta C_{M-0} + \Delta C_{F0} + \Delta C_A$

4.2 - Cas d'un calepinage en pavés

Le calepinage en pavés se traduit par un coût additionnel de main-d'œuvre (un ouvrier spécialisé pour la pose de pavés) et un coût additionnel de fourniture de pavés. Il n'y a donc pas de coût additionnel d'amortissement de matériel.



Le tableau 20 présente la méthode d'évaluation du coût additionnel relatif à un calepinage en pavés.

Légendes de notations

$r_{\text{pavés}}$: rendement journalier pour la pose des pavés (m² de pavés / jour)

$p_{\text{pavés}}$: prix d'un mètre carré de pavés

$S_{\text{pavés}}$: surface pavée totale

$S_{\text{rev.}}$: surface du revêtement béton

Tableau 20 : Coût additionnel d'un calepinage en pavés
(€/m² de revêtement)

Procédé de mise en œuvre	Pour tous procédés de bétonnage
calepinage pavés	
Coût additionnel Main-d'œuvre ΔC_{M-0}	<ul style="list-style-type: none"> • 1 ouvrier spécialisé $\Delta C_{M-0} = T_2 \cdot \frac{h}{r_{\text{pavés}}} \times \frac{S_{\text{pavés}}}{S_{\text{rev}}}$
Coût additionnel Fourniture ΔC_{F0}	Pavés : $\frac{P_{\text{pavés}} \times S_{\text{pavés}}}{S_{\text{rev}}}$ $\Delta C_{F0} : \frac{P_{\text{pavés}} \times S_{\text{pavés}}}{S_{\text{rev}}}$
Coût additionnel Amortissement matériel ΔC_A	R A S $\Delta C_A = 0$
Coût additionnel Total ΔC	$\Delta C = \Delta C_{M-0} + \Delta C_{F0}$

5. Conclusion

Tous les calculs présentés dans ce chapitre sont donnés pour faciliter la compréhension de la méthode d'évaluation du coût de construction d'une voirie ou d'un aménagement urbain en béton. Les prix obtenus correspondent à des prix de revient hors taxe.

Travaux d'exploitation

- 1 - Introduction**
- 2 - Le revêtement en béton face
aux exigences en matière d'exploitation**
- 3 - Le revêtement en béton face
aux exigences en matière
de caractéristiques superficielles**
- 4 - Le revêtement en béton face
aux exigences de durabilité**
- 5 - Conclusion**

1. Introduction

Les voiries en béton, bien conçues et bien réalisées, nécessitent peu d'entretien pendant la période de service prévue. C'est un de leurs principaux avantages. Malgré cela, des difficultés de conception ou de réalisation peuvent conduire à des défauts localisés : le diagnostic, la prévision de l'évolution des dégradations et l'entretien sont des préoccupations habituelles des maîtres d'œuvre et d'ouvrage.

D'autre part, durant la longue période de service des voiries en béton, la circulation peut évoluer d'une façon non prévue tant en nature qu'en intensité, mais surtout, les exigences des usagers et des riverains évoluent aussi et enfin les besoins en matière d'exploitation des réseaux sont nombreux et difficiles à prévoir.

Enfin les voiries âgées, même en bon état, nécessitent parfois une adaptation à de nouvelles exigences. Sans qu'il s'agisse d'entretien au sens courant du terme, ces adaptations utilisent les techniques mises au point et validées pour les opérations d'entretien.

2. Le revêtement en béton face aux exigences en matière d'exploitation

L'un des rôles premiers de la couche de roulement est de protéger l'assise de la chaussée et de participer à la résistance globale de la structure en vue d'apporter les qualités de surface nécessaires au confort et à la sécurité des usagers. Par rapport à cette exigence générale, valable pour tous les revêtements, les revêtements urbains doivent avoir des qualités complémentaires, par exemple la

facilité de nettoyage, l'aptitude à recevoir une signalisation horizontale efficace et durable, l'aptitude à recevoir des interventions ponctuelles (réservations) ou des traitements ponctuels (salage ou sablage) sans altérer leur durabilité et enfin leur aptitude à subir des interventions pour accéder aux réseaux enterrés.

2.1 - Facilité de nettoyage

Contrairement aux matériaux bitumineux, le béton présente une résistance élevée aux attaques des hydrocarbures (huiles, gasoil, kérosène, etc.). De ce fait, le béton est un matériau parfaitement adapté pour l'aménagement des zones de stationnement (parkings, feux rouges, stations d'essence, etc.).

Même si les salissures sont plus visibles sur un revêtement clair que sur un revêtement sombre, nettoyer un revêtement en béton est aujourd'hui facile. Les matériels classiques de nettoyage des rues (balayeuses, appareil de lavage à haute pression, aspiratrices avec projection d'eau sous pression) sont, dans la plupart des cas, suffisants pour redonner au revêtement en béton sa propreté et son éclat originels.

D'autre part, certains fabricants commercialisent des produits de protection contre les salissures de toute nature (huile, carburant, aliments, mousse). Ces produits doivent être pulvérisés sur des revêtements neufs dans des zones sensibles (aires de stationnement ou zones d'arrêt par exemple). Ils empêchent l'incrustation des salissures dans la porosité du béton ce qui facilitera leur élimination par simple lavage à l'eau. Ces produits peuvent être soit des résines acryliques (aspect incolore) ou polyuréthanes (aspect mouillé) qui forment à la surface du revêtement un film transparent et résistant à l'abrasion, soit des produits hydrofuges - oléofuges (aspect incolore) dont la fonction est de remplir la porosité de surface du béton. Ces produits ont une durée d'action et de protection limitée (environ 3 à 5 ans). Il convient donc de les renouveler périodiquement.

Enfin, d'autres produits de nettoyage sont commercialisés pour traiter des surfaces béton souillées, non protégées à l'origine. Ce sont des décapants spécialement étudiés pour ne pas altérer les caractéristiques de surface du béton.

2.2 - Facilité d'intervention sur les réseaux enterrés

Ces interventions sont malheureusement courantes sur les voiries en zone urbaine (obligation de réaliser un passage pour un concessionnaire, création de

réseau sous chaussée existante). Avec le béton, on réalise des réparations de meilleure qualité qu'avec des produits bitumineux.

Dans certains cas, on pourra éviter de réaliser une tranchée; en effet, il existe des solutions annexes qui permettent la pose de canalisations diverses de faible diamètre sans provoquer de dégâts dans le corps de chaussée. Il s'agit des techniques de fonçage horizontal (poussée par vérins) ou l'emploi d'une technique plus récente, celle des micro tuneliers. Ces procédés sont en développement en France depuis quelques années mais ils ne résolvent pas tous les problèmes.

Ainsi l'accès à des réseaux existants, pour réparation par exemple, ne peut se faire qu'en réalisant une tranchée. Cette opération, qui est toujours une agression et une blessure faites dans les corps de chaussées, doit être commode : facilité et durée des opérations d'ouverture et de remise en état, disponibilité du matériau en faible quantité, et l'aspect ou la tenue des réfections doit être bonne dans le temps.

Dans le cas d'un revêtement en béton, ces interventions ne posent aucun problème.

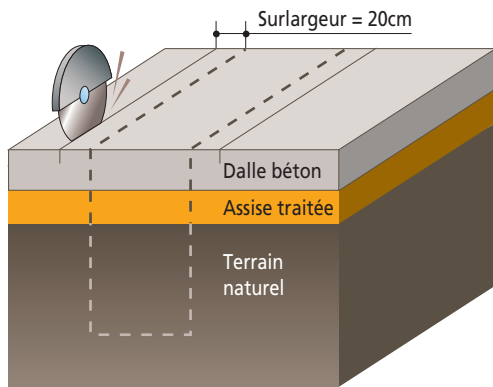
Pour les travaux neufs, tout se joue au moment de la conception. Il convient de :

- préparer soigneusement le projet,
- prévoir des fourreaux sous la voirie,
- avoir recours, le cas échéant, à des bandes de pavés autobloquants.

Pour les réparation, celles-ci sont généralement plus aisées et plus durables dans les revêtements en béton que les revêtements souples. En effet, on dispose maintenant des méthodes et des matériels pour effectuer les ouvertures de tranchées (scies, trancheuses) et reconstituer une voirie de qualité.

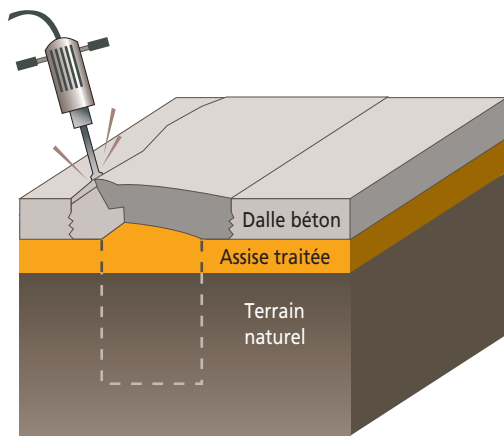
Les différents documents existants (guides, normes, directives, etc.) répondent déjà à bon nombre de questions relatives à cette opération, tels les méthodes de confection de remblayage, etc.

Cependant, il nous a paru utile dans ce guide de présenter les opérations de façon chronologique, et les précautions à prendre pour effectuer des interventions sous un revêtement en béton avec l'assurance d'obtenir un résultat satisfaisant.



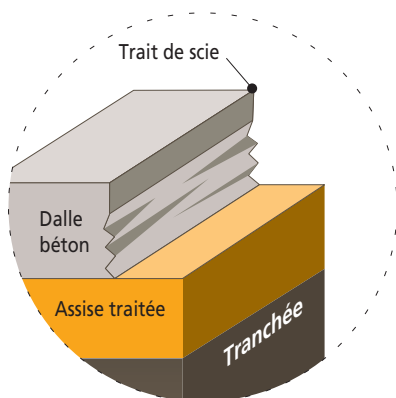
a) après avoir préalablement tracé l'emplacement futur de la tranchée et sa dimension en majorant la largeur de 2 x 20 cm, sciage à la monolame de la dalle sur une profondeur au moins égale au 1/4 ou 1/3 de l'épaisseur avec un minimum de 5 cm. (fig. 5)

Fig. 5 : Sciage du béton.



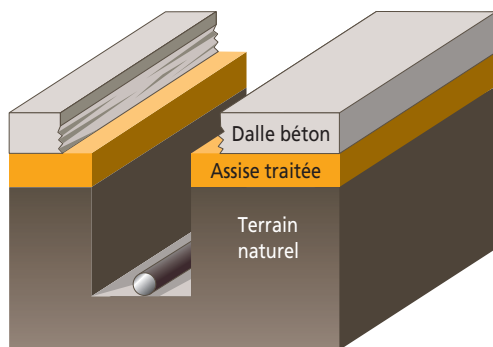
b) démolition au marteau-piqueur ou brise-roche de la zone sciée en réalisant la cassure du flanc du revêtement suivant un angle avoisinant 90° (fig. 6) ;

Fig. 6 : Démolition au marteau-piqueur.



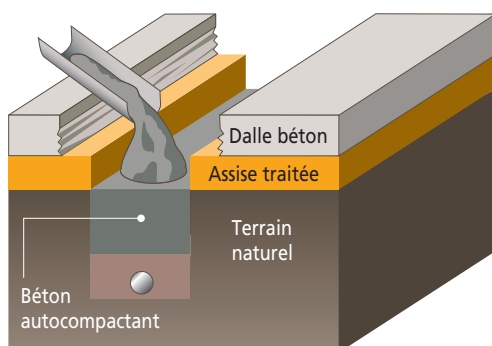
c) vue de détail du profil de la dalle après sciage, démolition puis enlèvement des matériaux (plus les surfaces de démolition sont rugueuses et riches en aspérités et meilleur sera l'accrochage du futur béton) (fig. 7) ;

Fig. 7 : Aspect de la dalle béton.



d) aspect de la tranchée terminée dans sa totalité après pose de la canalisation ou réparation du réseau, avant remblayage, compactage et fermeture (fig. 8) ;

Fig. 8 : Aspect de la tranchée.



e) suivant la largeur de la tranchée et le trafic supporté et l'urgence de remise en circulation, il est recommandé d'utiliser des matériaux de remblayage ne nécessitant pas de compactage : matériaux autocompactants (fig. 9) ;

Fig. 9 : Remblayage de la tranchée.



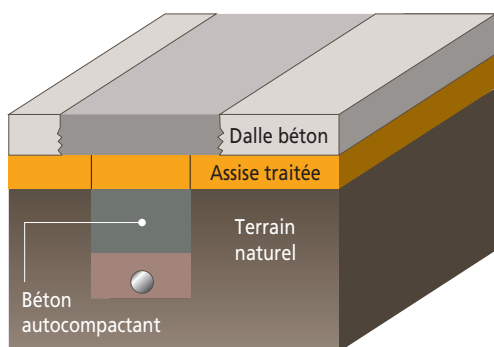


Fig. 10 : Aspect final de la réparation.

f) humidification impérative des faces de contact du béton ancien, coulage et mise en œuvre du béton frais par pervibration ;

g) aspect de la réparation terminée après réglage, talochage, striage, balayage ou désactivation puis protection par répandage du produit de cure (fig. 10).

La fabrication du béton destiné à la réparation sera confiée à un fournisseur de béton prêt à l'emploi. Plusieurs paramètres sont déterminants pour le choix du béton. Sa formule doit se rapprocher le plus possible de celle du béton existant, en ayant pour souci de réaliser un béton présentant de bonnes résistances mécaniques, un retrait minimal, une plasticité faible mais suffisante pour permettre une mise en place par pervibration et enfin une teinte du béton qui, une fois durci, sera semblable à celle du béton originel. Il est utile de conserver comme exemple un échantillon du béton de démolition qui permettra au fournisseur de choisir parmi ses formules, celles dont la teinte sera la plus proche à partir du choix des ciments stockés en centrale.

Donc, en résumé :

- Emploi d'un ciment (type R) pour les problèmes de remise en circulation. Ne pas négliger le problème de la teinte.
- Eau : utiliser un rapport E/C le plus faible possible afin de limiter le retrait et augmenter les résistances (utiliser si possible un béton de consistance ferme).
- Incorporation d'un plastifiant réducteur d'eau à titre de compensation afin d'obtenir un béton suffisamment malléable.
- Incorporation d'un entraîneur d'air pour la protection contre le gel.

Avant bétonnage, le nettoyage des faces brutes de démolition devra être effectué avec soin par lavage et/ou brossage, toute trace d'argile ou d'impuretés étant néfaste à la bonne adhérence des deux bétons.

Le bétonnage terminé après pervibration et talochage, on réalisera un traitement de surface (brossage, striage, désactivation, etc.) identique à l'ancien béton afin d'harmoniser l'ensemble et de rendre la réparation la plus discrète possible. Comme pour une dalle neuve, une protection contre la dessiccation par pulvérisation de produit de cure ou par film de polyéthylène sera impérative.

Nota : La mise en place se fera impérativement par pervibration, à l'aiguille, la règle vibrante est déconseillée dans ce cas de figure.

2.3 - Aptitude à recevoir des interventions ponctuelles

Le béton se prête facilement à recevoir tout genre de réservation. En effet, il est tout à fait commode de scier un revêtement en béton ou de le carotter. Les matériels sont disponibles dans la plupart des centres de location de matériel T. P.



2.4 - Aptitude à recevoir des traitements ponctuels

Le béton routier, de par sa résistance intrinsèque et sa formulation est apte à recevoir tous les traitements ponctuels que doit subir un revêtement routier. On peut citer en particulier :

- résistance du béton au gel grâce à l'emploi de l'entraîneur d'air
- résistance du béton au sel de déverglage,
- résistance aux agressions des matériels de déneigement (lame des chasse-neige)

Grâce à cette qualité du béton, des pays aux hivers rigoureux (Canada, Etats-Unis, Allemagne, Scandinavie) utilisent massivement les revêtements béton.

2.5 - Aptitude à recevoir une signalisation horizontale

La couleur claire du béton nécessite l'utilisation de produits adaptés en matière de signalisation horizontales. Ce sont des peintures commercialisées sur le

marché à des prix compétitifs. Spécialement colorées pour contraster avec la teinte claire des revêtements béton, elles sont aussi efficaces et durables que les produits utilisés sur les revêtements bitumineux.

2.6 - Aptitude aux travaux d'élargissement

Le béton, de par sa plasticité et sa moulabilité est le matériau le plus adapté à faire des travaux d'élargissement de voiries existantes. Deux cas se présentent :

- dans le cas de l'élargissement d'une chaussée bitumineuse existante, le béton est coulé contre l'enrobé après sciage de celui-ci sur une profondeur d'au moins 12 cm
- dans le cas de l'élargissement d'une chaussée béton existante et si des fers de liaison existent en attente, ils doivent être dépliés et nettoyés avant coulage du béton de la nouvelle voie. S'il n'y a pas de fers en attente, des fers de liaison sont scellés dans des réservations horizontales (réalisées dans le revêtement existant) avec des mortiers de scellement aux liants hydrauliques ou aux résines, spécifiques à cet usage.

3. Le revêtement en béton face aux exigences en matière de caractéristiques superficielles

Le revêtement doit présenter un uni longitudinal et transversal convenable. Là encore, c'est nettement plus difficile en ville qu'en rase campagne car de nombreux événements ponctuent et perturbent les profils (carrefours, raccordements, regards, bouche à clés, tranchées, etc.). Aujourd'hui, on demande, en plus, aux revêtements d'être silencieux, de favoriser la réduction des projections d'eau par temps de pluie, d'offrir une faible résistance au roulement. Différentes techniques existent :

3.1 - Régénération de l'adhérence

Dans le domaine des revêtements béton, les techniques les plus utilisées sont :

- la technique de grenailage
- la technique de rabotage
- la technique de bouchardage
- la technique des enduits superficiels

3.1.1 - Le grenailage

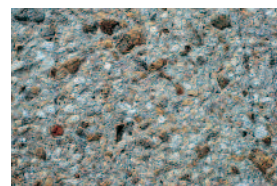
Cette technique - bien que très ancienne - n'a été utilisée en France qu'en 1987 de manière opérationnelle et industrielle sur chantiers autoroutiers sous circulation.



Le procédé consiste à projeter sur la chaussée des billes d'acier qui sont, après rebond, récupérées par aspiration et recyclées. Le choc des billes avec la surface du béton à trois effets principaux :

- il nettoie la surface de la chaussée, fonction recherchée à l'origine pour le dégommeage des pistes d'aéroports et la préparation des supports pour les travaux de renforcement en béton mince collé ;
- il dégage en surface le mortier de scellement des granulats, augmentant ainsi la macrorugosité ;
- il ravive les arêtes des granulats constitutifs du revêtement, améliorant ainsi sa microrugosité.

Cette technique présente l'avantage de régler le problème d'adhérence avec un coût très compétitif (2 à 3 €/m²). On peut constater, en effet, une nette augmentation de l'adhérence mesurée à l'essai « hauteur de sable » et une amélioration du coefficient de frottement longitudinal.



3.1.2 - Le rabotage

La technique du rabotage est destinée à corriger les irrégularités de surface et/ou à restaurer la rugosité des revêtements en béton existants.

L'utilisation du rabotage peut apporter des gains acoustiques importants : 5 à 6 dB (A). L'action combinée sur la macrotexture et sur la mégatexture du revêtement est à l'origine de ces bons résultats.

Cette technique présente néanmoins quelques inconvénients :

- rendement relativement faible ;
- coût relativement élevé (matériel sophistiqué, usure des disques diamantés) qui font que cette technique est, pour le moment, d'utilisation restreinte).



Le coût varie entre 8 et 12 €/m² en fonction de la taille du chantier et de la dureté des granulats du béton.

Cependant, cette technique reste une bonne alternative aux rechargements en produits bitumineux et présente l'avantage de régler certains problèmes de mégatexture, voire même d'uni (ondes courtes), tout en apportant à la chaussée d'excellentes qualités au niveau de l'adhérence (bonne rugosité), et ce, avec une bonne durabilité.

3.1.3 - Le bouchardage

(voir Chapitre IV - paragraphe 6.4)

3.1.4 - Les enduits superficiels

On distingue :

3.1.4.1 - Les enduits superficiels au bitume

Cette technique consiste à répandre, sur le revêtement en béton, un enduit à base de produits bitumineux tel qu'une monocouche de liant au bitume élastomère avec simple ou double gravillonnage.

3.1.4.2 - Les enduits superficiels à la résine époxy

En Autriche, on réalise depuis 1989 des enduits superficiels à la résine époxy avec des granulats 3-4 mm pour, d'une part, améliorer l'adhérence et, d'autre part, pour réduire le niveau sonore d'anciens revêtements en béton. C'est une technique prometteuse présentant un meilleur compromis entre le gain acoustique, l'amélioration de l'adhérence et de la drainabilité du revêtement.

Il est possible d'obtenir des gains acoustiques de l'ordre de 6 à 8 (dBA). La technique d'enduisage, caractérisée par une faible épaisseur, ne permet pas de corriger les défauts d'uni. Il convient donc de bien évaluer la surface à traiter avant d'envisager cette technique.

3.1.4.3 - Les enduits superficiels au ciment

Les enduits superficiels à la résine époxy sont très performants (bon accrochage sur le support et sur les gravillons) mais relativement onéreux. On a donc essayé de leur substituer des enduits superficiels au ciment avec ajouts de polymères (dont le rôle est d'augmenter l'adhésivité et la résistance au gel).

L'ancien revêtement en béton est nettoyé et humidifié sous haute pression, le mortier de ciment 0/1 modifié au polymère est mis en œuvre sur 1,7 mm d'épaisseur, les gravillons 3/4 sont répandus et insérés par compactage et un produit de cure est ensuite pulvérisé.

3.2 - Rectification de l'uni - Technique de rabotage

(Voir Chapitre VI - paragraphe 3.1.2)

3.3 - Amélioration du confort acoustique : technique de rechargement en couche mince collée de béton poreux

En vue de répondre aux nouvelles exigences en matière de confort et de sécurité de l'utilisateur, une initiative a été prise pour étudier la faisabilité technique d'un béton drainant en couche de roulement mince collée sur une ancienne chaussée en béton, dont on attend une diminution du bruit de roulement et une réduction des projecteurs d'eau par temps de pluie par analogie avec celles constatées sur les enrobés drainants.

Dans son principe, la technique est simple. Elle consiste à mettre en œuvre une couche mince en béton drainant (convenablement formulé) sur l'ancienne chaussée préalablement nettoyée et grenillée



et après répandage d'une barbotine de ciment servant de couche d'accrochage. Une protection thermique sera effectuée pour protéger le béton drainant, aux jeunes âges, des effets des gradients thermiques.

Une expérience a été réalisée, en 1989, rue Léon Bollée dans le XIII^{ème} arrondissement, à l'initiative de la mairie de Paris, avec un béton drainant 6/10 amélioré par de la fumée de silice et exécuté en couche mince (5 cm d'épaisseur) collée sur une chaussée existante en béton, avec de bons résultats.



4. Le revêtement en béton face aux exigences de durabilité

L'un des avantages prépondérants des revêtements en béton est leur durabilité et l'entretien réduit qu'ils nécessitent, à condition, comme pour toute technique routière, d'être bien conçus et bien construits.

Bien que les voiries en béton ne nécessitent que peu de travaux d'entretien, il ne faut pas pour autant les négliger. C'est en effectuant rationnellement cet entretien que l'on peut minimiser les coûts tout en prolongeant la durée de vie de la voirie.

Les techniques d'entretien courant du béton concernent :

- le regarnissage des joints (quant il sont garnis),
- la réparation des défauts localisés et des fissures, le cas échéant,
- le renforcement de la structure à la fin de sa période de service.

4.1 - Le regarnissage des joints

Cette opération a pour but de rétablir l'étanchéité des joints. Elle consiste principalement à dégarnir le joint, puis à rescier ce joint (ou à le scier pour les joints moulés réalisés initialement dans le béton frais) pour éventuellement le porter à la bonne largeur (minimum 8 mm) et mettre le béton à nu pour assurer un bon accrochage du produit de remplissage. Une fois le joint lavé et séché, et après si nécessaire application d'un primaire d'accrochage, un fond de joint est placé et le mastic d'étanchéité est coulé.

4.2 - La réparation des défauts localisés

Avant la réfection de l'étanchéité des joints, ces petits défauts (cassures, épaufrures des joints), sont réparés à l'aide de mortier de résine époxy.

4.3 - Le renforcement de la structure à la fin de sa période de service

L'objectif d'une chaussée est d'assurer le passage des véhicules pour un certain temps qui est la durée de service de la structure pendant laquelle les entretiens évoqués ci-dessus ont suffi à assurer le confort et la sécurité des usagers. Au-delà de cette durée, un entretien structurel du revêtement est parfois nécessaire.

Deux cas se présentent :

- Dans le cas d'un ancien revêtement en béton, le renforcement de la structure peut être réalisé avec une couche de béton mince collé. Cette technique consiste en une préparation très sérieuse du support (la chaussée existante) par grenailage, sablage ou éventuellement par fraisage, puis application d'un coulis de ciment d'accrochage, suivie de la mise en œuvre du béton en 5 à 10 cm d'épaisseur. Les nouveaux joints sont sciés au droit des joints existants. Il s'agit donc d'un rechargement comparable à un rechargement en enrobés. Cette technique augmente le potentiel structurel du revêtement en augmentant son épaisseur et améliore du même coup l'uni et l'adhérence. La chaussée doit être en bon état du point de vue transfert de charge, érosion de surface de la fondation et taux de fissuration. Il s'agit en fait d'un renforcement à caractère préventif ou d'une adaptation de la structure à de nouvelles charges de services (cas des aéroports par ex.). Dans le cas d'un revêtement peu dégradé, le renforcement en béton mince collé aboutit à une structure mieux adaptée au trafic constaté.
- Dans le cas d'un ancien revêtement bitumineux, le renforcement de la structure peut se faire avec un béton de ciment mince collé (B.C.M.C.). Cette technique consiste à nettoyer l'ancien revêtement par grenailage, fraisage suivi de

la mise en œuvre du béton sur une épaisseur comprise entre 5 et 10 cm. Les joints, réalisés par sciage, sont disposés transversalement et longitudinalement en créant un maillage carré dont le côté est compris entre 1 m et 3 m. Ces bétons sont de préférence fibrés. Cette technique très utilisée aux Etats-Unis est connue sous le nom de « Ultra Thin Whitetopping ».



5 - Conclusion

Grâce à leurs qualités mécaniques, les revêtements en béton sont durables et ne nécessitent que peu de travaux d'entretien et d'exploitation. Toutes les techniques décrites dans ce chapitre sont bien connues et parfaitement maîtrisées. Elles sont, en outre, rapides, faciles et économiques. A la fin d'une période de service, pour adapter la structure béton à l'évolution du trafic, il est possible aujourd'hui d'effectuer des travaux de renforcements progressifs, en particulier les couches minces collées en béton. A chaque problème, il y a une solution adaptée.

CIM *Béton*

CENTRE D'INFORMATION SUR LE CIMENT ET SES APPLICATIONS

7, place de la Défense • 92974 Paris-la-Défense Cedex • Tél. : 01 55 23 01 00 • Fax : 01 55 23 01 10
E-mail : centrinfo@cimbeton.net • internet : www.infociments.fr