

Matériaux Routiers

Polycopié pour parcours de
Travaux Publics et Génie Civil

Tarek CHIKER



Université de Jijel, Algérie

Matériaux Routiers

L'auteur du cours

Tarek CHIKER est Docteur, Enseignant-Chercheur à l'université de Jijel, Algérie. Il enseigne Matériaux de Construction, Matériaux Routiers, Matériaux Innovants, Management des Projets, Code des Marchés Publics, Pathologies des Ouvrages, Méthodologie de la Recherche et Anglais de Génie Civil.

Ses axes de recherche couvrent : Les matériaux cimentaires, Les solutions alternatives écologiques, les ciments verts, et les matériaux alkali-activés.

<https://orcid.org/0000-0003-0236-0619>

Matériaux Routiers

Polycopié pour parcours de
Travaux Publics et Génie Civil

Tarek CHIKER



Université de Jijel, Algérie

Copyrights© 2021 par Tarek CHIKER et l'Université de Jijel, Algérie

Matériaux Routiers

Contact/information :

<http://univ-jjel.dz/> or <https://orcid.org/0000-0003-0236-0619> or chiker_tarek@univ-jjel.dz

Manuscript and Cover design by Tarek CHIKER

January 2021

Ce cours est destiné pour les étudiants de Travaux Publics en graduation, Ingénieurs de site de constructions routières et Ingénieurs et cadres des administrations des projets de Travaux Publics.

Table de matières

L'AUTEUR DU COURS	III
TABLE DE MATIERES	VII
REMERCIEMENTS	XIII
CHAPITRE 1 GENERALITES	1
<i>Aperçu</i>	1
1.1. Introduction	1
1.2. Définitions.....	1
1.3. Histoire des chaussées et de ses matériaux	3
1.3.1. La Route Égyptienne.....	3
1.3.2. La Route de Babylon.....	5
1.3.3. La Route Perse	5
1.3.4. La route Romaine.....	5
1.3.5. La Route Turnpike Trusts en Angleterre	6
1.3.6. La Construction de la Route Britannique.....	7
1.3.7. Pavage des rues de Paris au XIIe	8
1.4. Généralités sur les matériaux	8
1.4.1. Classification des matériaux de construction.....	8
1.4.2. Propriétés générales des matériaux	9
1.5. Structure des chaussées	12
1.5.1. Les différentes structures de chaussées.....	13
Questions	14
CHAPITRE 2 GRANULATS	15

<i>Aperçu</i>	15
2.1. Introduction	15
2.2. Généralités.....	16
2.2.1. Termes et définitions.....	16
2.2.2. Utilisations des granulats	19
2.3. Origines et classifications.....	19
2.3.1. Classement des granulats par granularité.....	20
2.3.2. Classement des granulats par densité.....	21
2.3.3. Classement des granulats par origine et mode de préparation	22
2.3.4. Classement par nature géologique de gisement	23
2.4. Propriétés des granulats routiers	27
2.4.1. Granularité.....	28
2.4.2. Propreté	29
2.4.3. Angularité.....	30
2.4.4. Forme	30
2.4.5. Qualité de la roche	31
2.4.6. Classement de synthèse.....	33
Questions	33
CHAPITRE 3 LIANTS ROUTIERS.....	34
<i>Aperçu</i>	34
3.1. Introduction	34
3.2. Les liants hydrocarbonés	34
3.2.1. Types de bitumes.....	35
3.2.2. Constitution du bitume.....	38

3.2.2.1. Principales caractéristiques des bitumes routiers	39
3.2.3. Bitumes fluidifiés et fluxés	41
3.2.4. Émulsions de bitume	44
3.2.5. Bitumes modifiés	47
3.3. Liants hydrauliques et pouzzolaniques	48
3.3.1. Ciments	49
3.3.2. Ajouts minéraux	50
Questions	53
CHAPITRE 4 MATERIAUX DES COUCHES DE CHAUSSEES	54
<i>Aperçu</i>	54
4.1. Introduction	54
4.2. Généralités et rappels	56
4.2.1. Nomenclature	56
4.2.2. Les classes de trafic	59
4.3. Constitution des structures des chaussées	59
4.3.1. Les chaussées bitumineuses épaisses	59
4.3.2. Les chaussées à assise traitée aux liants hydrauliques	60
4.3.3. Les structures mixtes	60
4.3.4. Les chaussées en béton de ciment	60
4.3.5. Les structures souples	60
4.3.6. Les structures Inverses	60
4.4. Description des structures et classes des matériaux utilisés	60
4.4.1. Structures bitumineuses épaisses	60
4.4.2. Les structures à assise traitée aux liants hydrauliques	61

4.4.3. Les structures mixtes.....	63
4.4.4. Les structures en béton de ciment	64
4.4.5. Les structures souples	65
4.4.6. Les structures inverses	66
4.5. Récapitulatif sur la combinaison des matériaux.....	67
4.6. Descriptif du le sol support	67
4.7. Sur la couche de forme.....	69
4.8. Sur la couche d’assises	69
4.9. Sur la couche de roulement	70
4.9.1. Types	71
4.9.2. Mise en œuvre.....	73
Questions	74
CHAPITRE 5 LE BETON HYDRAULIQUE- GENERALITES, COMPOSITION ET MISE EN OUVRE.....	75
<i>Aperçu</i>	75
5.1. Généralités.....	75
5.1.1. Les ciments.....	75
5.1.2. Les mortiers.....	78
5.2. Composition du béton ordinaire	82
5.2.1. Critères généraux de la composition du béton	82
5.2.2. Méthode de Dreux-Gorisse	82
5.3. Mise en ouvre du béton	90
5.3.1. Phases de la mise en œuvre.....	90
5.3.2. L’approvisionnement du béton	90
5.3.3. La mise en place.....	90

5.3.4. Le serrage du béton	92
5.3.5. Traitement de surface	93
5.3.6. La cure du béton.....	93
Questions	94
CHAPITRE 6 OPTIMISATION DES ENROBES	95
<i>Aperçu</i>	95
6.1. Introduction	95
6.2. Généralités.....	97
6.2.1. C'est quoi un béton bitumineux ?	97
6.2.2. Les types de bétons bitumineux	97
6.3. Méthode de Marshall.....	98
6.3.1. Phase préparatoire de caractérisation	98
■ Exemple 1.....	101
■ Exemple 2.....	103
6.3.2. Les procédures de la méthode de Marshall	103
6.4. Mise en place.....	110
6.4.1. Condition climatique.....	110
6.4.2. Préparation des surfaces	110
6.4.3. Equipement	111
6.4.4. Échantillonnage.....	112
6.5. Contrôle de la qualité des travaux	112
6.5.1. Le contrôle de la qualité pendant les travaux.....	113
6.5.2. L'inspection finale	117
6.5.3. Les enregistrements des contrôles.....	117

6.5.4. Les points de contrôles de la qualité des travaux.....	118
Questions	118
ANNEXE 1 ASPECTS NORMATIFS DE L'UTILISATION DES GRANULATS - SELON NF P 18-554[16]	119
REPONSES TYPIQUES AUX QUESTIONS POSEES.....	121
REFERENCES.....	124

Remerciements

Je tiens à remercier mes étudiants de Génie Civil et Travaux Publics de l'Université de Jijel. L'ambiance offerte aux moments des travaux pratiques était accablante et magnifique. Les débats ouverts lors des sorties pédagogiques aux sites des travaux de construction ont été enregistrés dans les *devices* et à vos mémoires ! Les travaux de recherche avec nos Masters et nos doctorants sont passés en ambiance de bon enfant ! Bravo à vous tous. Je note toujours les questions évoquées avec vous !

Pour vous tous, lecteurs de ce document, MERCI et n'hésitez plus de me contacter pour l'importe quelle question, et pour vos commentaires !

J'apprécie bien le climat de calme et de compréhension offert par la direction de notre Laboratoire de recherche (LGCE de l'Université de Jijel).

Toujours reconnaissant de mes collaborateurs et amis du Laboratoire L2MGC de Cergy-Pontoise, France (Salima AGGOUN, Annelise COUSTURE, Lilian CHRITOPHOL, Noemie CHAUMON, El-Hadj KADRI...).

Ma vif reconnaissance pour mes collègues Professeurs Nasr Eddine CHIKH et Riad Benzaid pour la lecture et l'expertise du manuscrit, les commentaires constructifs et les recommandations lumineuses.

A ma petite famille pour les créneaux offerts de leurs moments !

CHAPITRE 1

Généralités

Aperçu

Ce chapitre est destiné à la présentation des aspects d'ordre général liés à l'ingénierie routière. En fait, le vocabulaire de ce domaine le plus fréquenté a été fourni ; l'histoire de la route, de la l'ère égyptienne à nos jours, a été présentée, tout en passant par les voies de Babylon, Perses, Romaine, Britannique et Françaises. En outre, on a parlé des classifications des matériaux de construction et de leurs propriétés générales. La dernière section traite et illustre les différentes structures des chaussées.

1.1. Introduction

De tout temps, l'homme a besoin de déplacer. L'idée du matelas pierreux a survécu de nombreux siècles. Elle s'est développée à l'époque des Romains pour donner naissance à la chaussée romaine: le dallage. Plus tard la route empierrée «macadam» a fait son apparition et avec elle, les premières spécifications en construction routière. Cependant le développement des véhicules lourds au début du XXème siècle, les premiers problèmes ont surgi et entre autre:

- Apparition de nids de poule,
- Poinçonnement du hérisson (bloc de moellons de 20 à 25 cm disposés en Hérisson posé à la main et cylindré par des rouleaux tri cycliques à jantes métalliques) ;
- Effondrement de la chaussée aux premières pluies.

Une mutation s'imposait alors pour obtenir une route moderne. Elle a été initiée par l'emploi de matériau à granulométrie continue et de calibre déterminé et aussi avec l'émergence des matériaux traités au ciment.

1.2. Définitions

La totalité de ces définitions est tiré d'un rapport de LCPC [1].

Agrégat : matériau grenu d'origine minérale, calibré, et utilisable avec ou sans liant.

Arase : derniers 30 cm (supérieurs) du remblai.

Asphalte : mélange naturel de matériaux calcaires imprégnés de bitume.

Asphalte coulé : mélange de granulats, de bitume et de fines.

Assainissement : ensemble d'ouvrages assurant la collecte, le traitement et l'évacuation des eaux usées.

Béton : mélange homogène de graviers ou gravillons dans un mortier de sable et de liant.

Béton bitumineux : mélange d'agrégats de bonne caractéristique à du bitume.

Bitume : fraction lourde obtenue lors de la distillation du pétrole, utilisée comme liant.

Centrale (poste) d'enrobage : usine (unité) de fabrication de mélanges hydrocarbonés (enrobés).

Chaussée : surface aménagée de la route pour la circulation des véhicules.

Chevêtre : pièce de bois dans laquelle s'emboîtent les solives d'un plancher.

Compacité : exprimée en pourcentages, elle est égale à 100 moins la teneur en vide (elle-même exprimée en pourcentages).

Colas : abréviation de Cold Asphalt, première émulsion de bitume inventée en 1927, qui donnera son nom à la société routière française créée en 1929.

Couches de chaussées : ensemble des couches constitutives d'une chaussée : on distingue les

- *couche de forme* : couche de matériaux destinée à homogénéiser et à améliorer la portance du sol support ;
- *couches d'assise* : couches de fondation et de base assurant, par des matériaux appropriés, la répartition des efforts dus aux charges sur le sol support ;
- *couches de surface* : couche de roulement (ou d'usure), en contact avec les pneumatiques, et couche de liaison assurant le lien entre la couche de roulement et la couche de base.

Coulage : action de couler.

Émulsion : dispersion d'un liquide dans un autre, non miscible, sous forme de fines gouttelettes, à l'aide d'un troisième composant appelé « émulsif ».

Émulsion de bitume : dispersion de bitume dans une phase aqueuse.

Enduit : film de liant hydrocarboné répandu sur une couche de chaussée.

Enrobage : opération consistant à envelopper (à chaud ou à froid) un granulat d'une mince pellicule de liant.

Enrobés bitumineux : granulats recouverts de bitume pour revêtement de chaussée (asphalte).

Épaisseur équivalente : épaisseur réelle multipliée par un coefficient d'équivalence caractéristique du matériau constituant la couche.

Fillers : poudre minérale, dont les grains sont inférieurs à 80 microns, destinée à augmenter la compacité d'un granulat, d'un enrobé ou d'un béton.

Fines : granulat composé d'éléments de très petites dimensions utilisé soit comme charge de remplissage pour augmenter la compacité (d'un béton ou d'un sol), soit comme constituant de liants hydrauliques. Dans ce dernier cas, le terme fillers est également utilisé.

Finisseur : engin assurant la mise en œuvre des matériaux enrobés (répandage, nivellement, lissage, précompactage).

Goudron : produit de distillation de la houille, de moins en moins utilisé en technique routière.

Granulats : sables, gravillons et graves de dimension inférieure à 80 mm, utilisés dans la composition des chaussées. Synonyme usuel : matériaux.

Grave : matériau provenant de gravières ou ballastières, reconstitué ou non.

Grave traitée : mélange de grave avec un liant hydraulique ou une émulsion de bitume. Grave ciment. Grave émulsion. Grave hydraulique.

Grave laitier (GL) : mélange de grave, de laitier et d'un activant.

Grave reconstituée humidifiée (GRH) : mélange de granulats triés, avec rajout d'eau.

Graviers : grains de 2 à 20mm, appelés communément «matériaux roulés ».

Gravière (ballastière) : site d'extraction et de fabrication de granulats d'origine alluvionnaire.

Hourdis : maçonnerie légère qui garnit un colombage, une armature en pans de bois.

Laitier : matériau provenant de la fusion du minerai de fer dans les hauts-fourneaux.

Liant : constituant hydraulique ou hydrocarboné permettant de lier des granulats entre eux pour réaliser des matériaux présentant de bonnes performances mécaniques.

Macadam: couche de faible épaisseur de pierres cassées utilisée autrefois comme couche de base.

Maître d'œuvre : le propriétaire ou la personne qui, sur un chantier de construction, a la responsabilité de l'exécution de l'ensemble des travaux.

Maître d'ouvrage : la personne morale pour le compte de laquelle sont exécutés les travaux (par ex. l'État, le Département, la Commune. . .).

Mastic : matière douée de plasticité, utilisée pour des remplissages, calfeutrages et rebouchages.

Matériau : produit minéral naturel ou artificiel intervenant dans la composition de la chaussée. Synonyme : granulats. Matériau « éconcassé », « criblé » (ou « trié »), et « roulé » (de forme arrondie, façonnée par un cours d'eau ou un glacier).

Norme ISO 9000 : normes internationales dénies en matière d'« assurance-qualité » et sanctionnées par une certification , délivrée en France par l'AFAQ.

Norme ISO 9001 concerne les activités de conception et de recherche-développement.

Norme ISO 9002 concerne les activités de production de biens et de services.

Norme ISO 14 001 : nouvelle norme élaborée par l'AFAQ pour évaluer la performance environnementale des sites industriels, à partir de critères quantitatifs et qualitatifs.

Partie supérieure des terrassements : dernier mètre supérieur du remblai.

Passivation : préparation de la surface d'un métal avant application de peinture .

Péetrographie : science qui décrit les roches et étudie leur structure et leur composition.

Plateforme (forme) : surface de terrain préparée sur laquelle on construit la chaussée et ses accotements.

Ragréage : action de rendre bien régulière une surface.

Revêtement : couche superficielle d'un ouvrage.

Revêtement anti-poinçonnement : résistant à la déformation permanente provoquée par le passage de charges importantes.

Revêtement anti-kérozène : résistant aux effets corrosifs des carburants aéronautiques.

Rhéologie : branche de la mécanique qui étudie le comportement des matériaux lié aux contraintes et aux déformations.

Terrassement : opération de déplacement des terres (déblais et remblais).

Techniques « à froid » : techniques d'enrobage de granulats avec des liants bitumineux à l'état liquide, à température ambiante (enrobés à froid – EAF). Certains enrobés à froid peuvent être « coulés » sur place sans compactage, en raison de leur formulation spéciale (enrobés coulés à froid – ECF)

1.3. Histoire des chaussées et de ses matériaux

1.3.1. La Route Égyptienne

Selon un article du *New York Times* [2], la plus ancienne route était construite en Egypte :

« Des géologues chercheurs en cartographiant les anciennes carrières de pierre égyptiennes ont identifié un tronçon de route de sept miles et demi recouvert de dalles de grès et de calcaire et même de rondins de bois pétrifié. Le trottoir, ont-ils conclu, a facilité le déplacement de traîneaux tirés par l'homme chargés de pierre de basalte d'une carrière voisine à un quai pour l'expédition par barge à travers le lac et sur le Nil vers des chantiers de construction ... avec une largeur moyenne de six et demi pieds, la voie traverse un terrain désertique de 43 miles au sud-ouest du Caire moderne. »

–*The New York Times*
By John Noble Wilford - May 8, 1994

Il y a environ 5000 ans, avant la roue, les humains et les matériaux ont été transportés par voie terrestre à pied ou par des animaux. Selon les historiens, les égyptiens lors de la construction des pyramides ont utilisé, pour le transport des pierres lourdes, des rouleaux en pierres couverts par une matière qui diminuait le frottement entre les pierres et le sol, ainsi que la réduction de l'intensité de la charge. Puis ils ont créé une surface dure sur laquelle marchent leurs rouleaux (1 km consomme 10 ans pour le construire) [3], comme illustre la Figure 1.1.

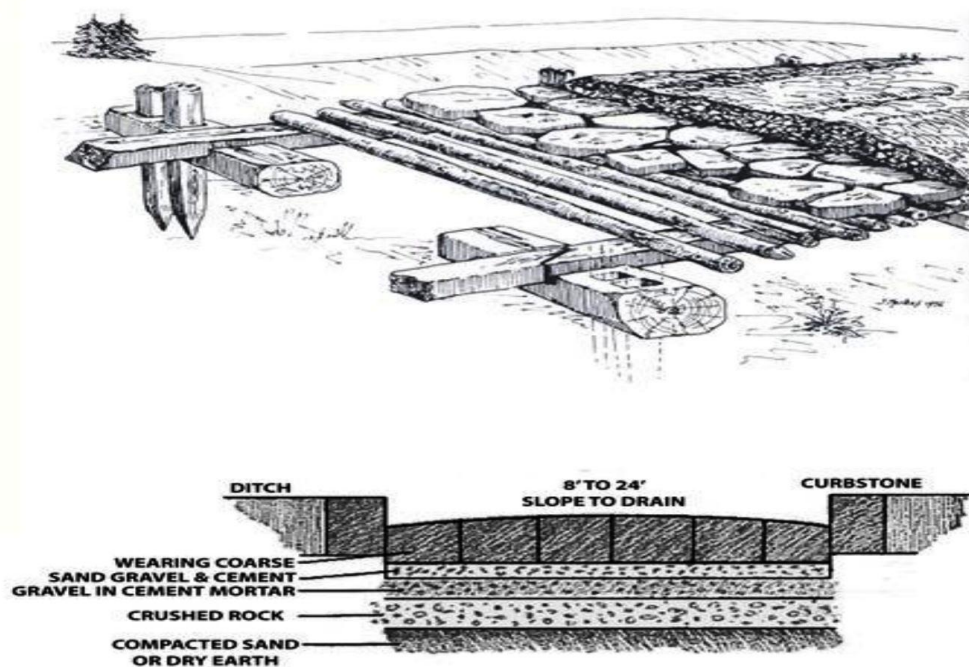


Fig 1.1. La route égyptienne [3]



Fig 1.2. Photo d'une ancienne route égyptienne
(<http://factsanddetails.com/world/cat56/sub404/item1928.html>)

1.3.2. La Route de Babylon

La voie du Babel a été construite environ 620 JC. Elle est marquée par la première utilisation du bitume dans une chaussée. le bitume était mis pour coller les pierres. La chaussée était sur 1 km de long et d'une largeur varie entre 10 à 20 m [3].

1.3.3. La Route Perse

La première route de long trajet ont été construite à l'ère du roi DARIUS I de Perse. C'était construit en 500 avant JC sur une période de 60 ans. Une de ses grandes caractéristiques est l'utilisation d'une ligne droite (Principe : la plus courte distance entre deux points). Elle comprenait également la première voie de contournement de la ville (la périphérie). Idée exploité et modernise plus tard par les romains [4].

1.3.4. La route Romaine

Pour la construction de leurs routes les Romains privilégient la ligne droite [5]. Cette technique est parfaitement adaptée aux régions de relief horizontal comme les plaines et les plateaux. Là où les pentes sont fortes, les Romains préfèrent le tracé à mi-pente. Les virages sont élargis afin de faciliter le passage des chariots (qui n'ont pas de train avant tournant). Les Romains installent leurs routes sur la crête des reliefs (les points les plus hauts) et évitent les fonds de vallée et les zones marécageuses où ils doivent construire la route sur un remblai. Les cours d'eau sont franchis par des gués le plus souvent empier-

rés ou par des ponts en bois ou en pierre. Il existait aussi des tunnels routiers équipés de puits d'aération.

La route est construite par tronçons sur lesquels travaillent plusieurs équipes utilisant des techniques différentes. Le raccordement des tronçons perturbe souvent le tracé rectiligne. Une partie des voies romaines ont été construites par les soldats durant la "paix romaine". Ailleurs, ce sont des entrepreneurs privés qui sont chargés des travaux (souvent ils emploient des esclaves).

Contrairement à une idée répandue, les voies romaines, sur la plus grande partie de leur tracé, n'étaient pas pavées. Ce n'est qu'aux abords des villes qu'elles étaient recouvertes de dalles ou de pavés de différentes tailles. Dans les passages difficiles, des rainures parallèles guidaient les chariots, par exemple sur les ponts ou dans les sections étroites, pentues ou sinueuses. L'écartement des roues et des rainures était standardisé à (environ) 1,43 m, du moins en plaine, écartement qui sera repris au XIXe siècle pour les rails de chemins de fer. En montagne, on constate des rainurages à écartement plus étroit, par exemple de 1,15 m, pour de plus petits véhicules, plus légers et plus maniables.

La voie romaine reposait sur une fondation de blocs et de pierres plates recouverte d'une couche épaisse de cailloux et de sable. Le revêtement était formé de dalles liées au ciment, sans joint de dilatation. Cette rigidité fragilise la partie superficielle soumise aux écarts de température qui dilatent la surface, ce qui favorise les fissures vite dégradées par les pluies stagnantes (pas de bombement de la surface).

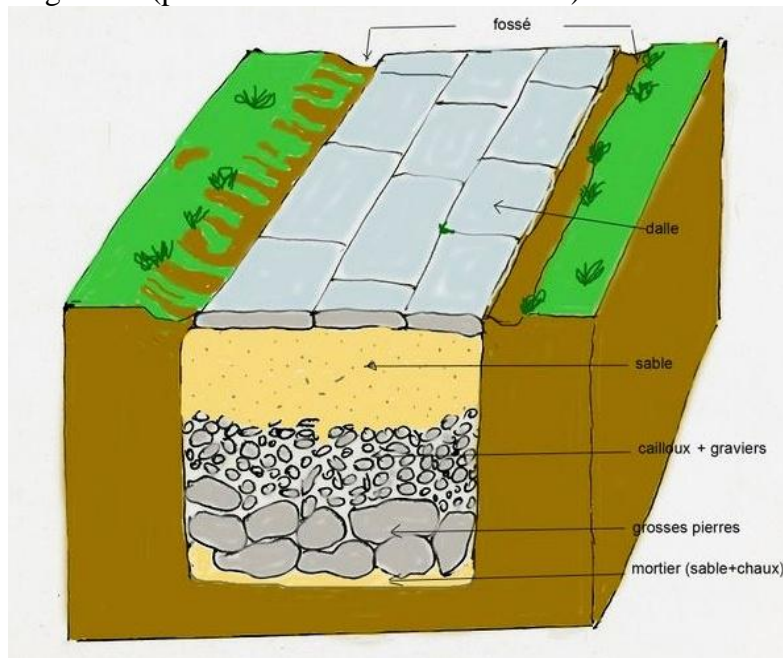


Fig 1.3.. Coupe d'une voie Romaine dallée [5]

1.3.5. La Route Turnpike Trusts en Angleterre

Un ancien organisme en Angleterre daté de 1707, les *Turnpike Trusts* étaient des organismes indépendants publics chargés de leur côté de collecter des commis-

sions sur le trafic routier pour améliorer les routes (le concept de public trust). Les commissions faisaient payer bien les usagers venant d'autres régions mais aussi les collectivités locales, qui devaient conserver les sommes, sous l'autorité d'un contrôleur et d'un trésorier, et réinvesties dans l'entretien et l'amélioration des routes. Plus de 20 000 miles de routes étaient sous le contrôle des Turnpike trusts avant les années 1830, pour des commissions annuelles de 1,5 million de Sterling [6].

1.3.6. La Construction de la Route Britannique

La science et le savoir-faire de la construction des routes a été presque complètement perdu de la période Romaine jusqu'à ce que l'avènement de Telford et Macadams dans le milieu du XVIIIe siècle. Figures ci-après illustrent leurs techniques. Les deux ingénieurs ont compris les principes de base nécessaires pour la durabilité et la capacité pour acheminer le trafic par tous les temps. Ils ont reconnu la nécessité d'un bon système de drainage, stabilité du sous-sol, construction en couches, un bon compactage pour assurer un verrouillage de particules de pierre concassée et de contrôle de la granulométrie et sa propreté.

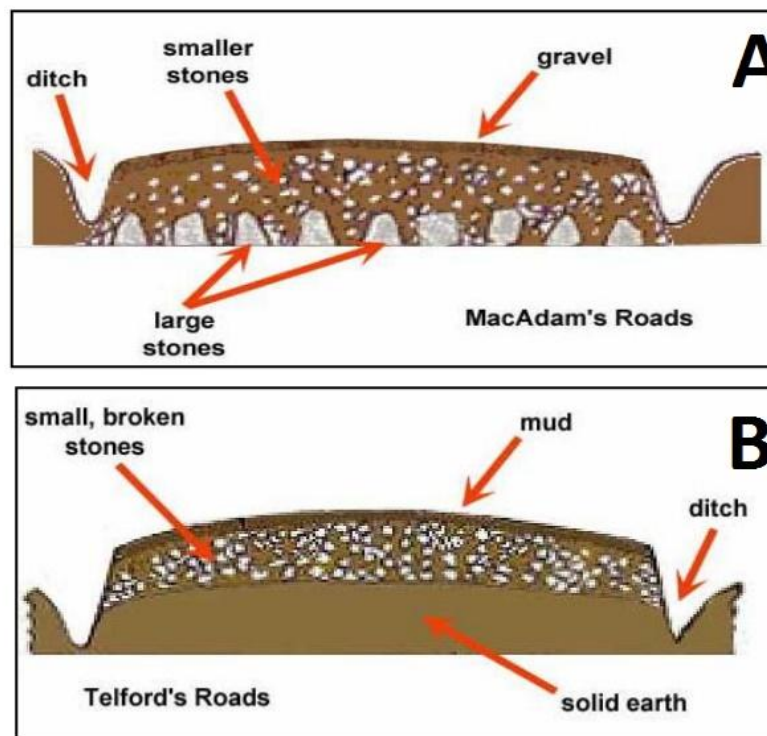


Fig 1.4. Ancienne Route Britannique A : Route MacAdam B : Route Telford [7]

La différence essentielle entre les deux méthodes réside dans leur approche de l'économie. Telford construit épaisse pour fournir une route plus durable. MacAdam pense qu'à condition que la couche de surface ait été rendue imperméable par attrition et compactage la couche de fondations pourrait être supprimée [7].

1.3.7. Pavage des rues de Paris au XIXe

Les rues des villes étaient dans une situation horrible, lorsque Philippe-Auguste, en 1184, frappé de l'état boueux de celles de Paris, entreprit pour la première fois de les faire paver. Les voies qui ont été pavées formaient ce qu'on appelait la croisée de Paris . C'était l'intersection des deux grandes voies qui joignaient du nord au sud la porte Saint-Denis à la porte Saint-Jacques, et de l'est à l'ouest la porte Baudet au château du Louvre. Cette partie du pavé de Paris a été toujours à la charge du roi. Si l'administration municipale en eut l'entretien jusqu'en 1318, elle reçut une indemnité qui la couvrit de la dépense [8].



Fig 1.5. Pavage des rues de Paris. 1908. © Jacques Boyer / Roger-Viollet
(<https://www.pariszigzag.fr/secret/histoire-insolite-paris/histoire-revetements-chaussee-parisienne>)

1.4. Généralités sur les matériaux

Les matériaux de construction sont considérés comme tous les matériaux utilisés pour la réalisation des ouvrages en béton armé ou en constructions métallique, ainsi qui sont largement utilisés dans le domaine de travaux publics (Route, ponts, aéro-drome.....etc.).

1.4.1. Classification des matériaux de construction

On distingue trois types de classification les plus couramment connus :

a) *Classification scientifique* :

Dans la science des matériaux, selon la composition et la structure, les matériaux sont classés comme suit :

- Métaux et alliages

- Polymères
- Céramiques

b) Matériaux de base et produits :

- Matériaux de base ou matière première (Argiles, pierres, bois, calcaire, métaux).
- Matériaux produits et composites (ciment (calcaire+argile), alliages, béton ...etc.)

c) Classification pratique :

Dans la construction, les matériaux sont classés selon le domaine d'emploi et selon leurs propriétés principales (Résistance, compacité,..):

- Les matériaux de résistance : Sont les matériaux qui ont la propriété de résister contre des sollicitations (poids propre, surcharge, séisme.....) : parmi les matériaux les plus fréquemment utilisées sont : Pierres, Terres cuites, Bois, Béton, Métaux ...etc.
- Les matériaux de protection : Sont les matériaux qui ont la propriété d'enrober et de protéger les matériaux de construction principaux contre les actions extérieurs, tels que : Enduits, Peintures, Bitumes... etc.

1.4.2. Propriétés générales des matériaux

Les propriétés principales des matériaux peuvent être divisées en plusieurs groupes tels que:

- Propriétés physiques: qui mesurent le comportement de matériaux à l'action de la température, l'humidité (la densité; la masse volumique, la porosité, l'absorption, la perméabilité, le retrait (le gonflement) etc..) ;
- Propriétés chimiques: qui caractérisent le comportement des matériaux dans un environnement réactif. (Corrosion chimique, l'attaque de l'acide, etc...)
- Propriétés mécaniques: qui reflètent le comportement des matériaux déformés par les forces. (La résistance en compression, en traction, en flexion, torsion etc...)
- Propriétés thermiques: (la dilatation, la résistance et comportement au feu, etc...)

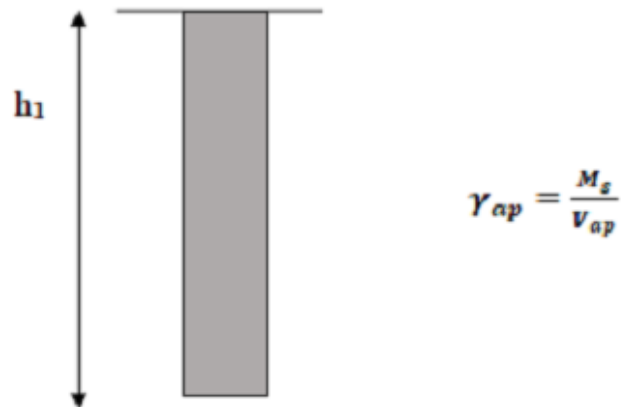
Les propriétés physiques

- La densité

La densité est le degré de remplissage de la masse d'un corps par la matière solide. Elle est calculée par le rapport de la masse volumique de ce matériau à celle de l'eau à une température de 20°C. Elle est exprimée sans unité.

- La masse volumique apparente

C'est la masse d'un corps par unité de volume apparent en état naturel (y compris les vides et les capillaires). Elle est exprimée en (gr/cm³; kg/m³; T/m³). On peut déterminer la masse volumique d'un matériau en utilisant la formule suivante :



Ou :

M_s : masse d'un corps sèche. V_{ap} : volume apparent.

- La masse volumique absolue

C'est la masse d'un corps par unité de volume absolu de la matière pleine (volume de matière seule sans tenir compte les vides et les pores). Elle est exprimée en (g/cm³, kg/m³ ou T/m³). La figure suivante explique la méthode de détermination de la masse volumique absolue d'une matière.

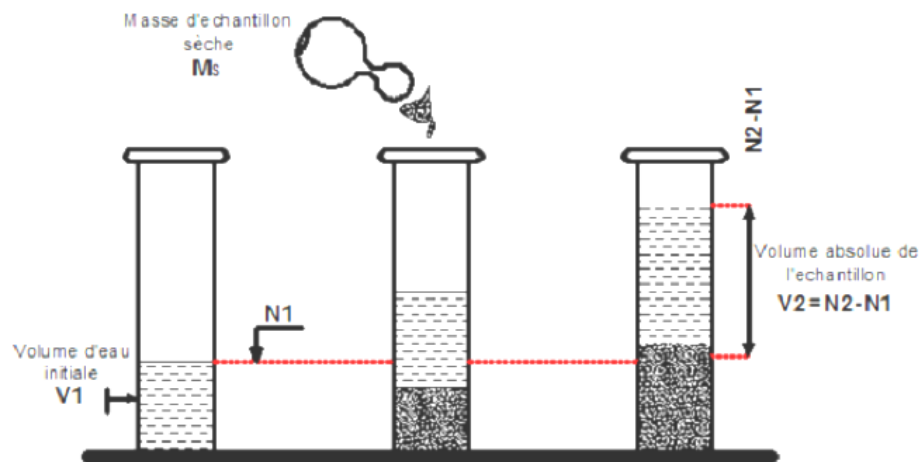


Fig.1.6. procédure de mesure de la masse volumique absolue

- Porosité et compacité

La porosité est le rapport du volume vide au volume total de la matière.

$$P = \frac{V_{vide}}{V_{total}} \times 100(\%)$$

La compacité est le rapport du volume solide au volume total de la matière.

$$c = \frac{V_{solide}}{V_{total}} \times 100(\%)$$

La porosité et la compacité sont liées par la relation suivante : $p + c = 1$. La porosité et la compacité sont souvent exprimées en pourcentage (%). La somme des deux est alors égale à 100%.

L'humidité

L'humidité est une des propriétés importante des matériaux de construction. C'est la teneur en eau réelle d'un matériau qui contient dans les pores. En général l'humidité est notée W et s'exprimée en pourcentage (%). On peut déterminer l'humidité de matériaux quelconques en utilisant la formule suivante :

$$W = \frac{G_h - G_s}{G_s} \times 100\%$$

Où :

G_s : la masse sèche d'échantillon (après passage à l'étuve)

G_h : la masse humide d'échantillon.

Le degré de l'humidité des matériaux dépend de beaucoup de facteurs, surtout de l'atmosphère où ils sont stockés, le vent, la température et de la porosité du matériau.

- Capacité d'absorption d'eau massique « Ab »

L'absorption d'eau par immersion est la différence entre la masse d'un échantillon saturé dans l'eau et sa masse à l'état sec. L'absorption d'eau se calcul comme suit :

$$Ab = \frac{M_{sat} - M_{sec}}{M_{sec}} \times 100$$

M_{sec} : masse sèche de l'échantillon après passage à l'étuve sous une température de 105°C.

M_{sat} : masse de l'échantillon saturé dans l'eau (Après 24 heures).

On peut déterminer le degré d'absorption par la formule suivante:

$$H_p = \frac{G_{ab} - G_s}{G_s} \%$$

Avec :

G_{ab} : la masse absorbante.

G_s : la masse sèche d'échantillon.

V₀ : le volume apparent du matériau

Les propriétés chimiques

Les propriétés chimiques déterminent la stabilité chimique d'un matériau qui est un pouvoir de ce matériau en service de résister à l'action chimique des acides ou à l'action des facteurs atmosphériques et environnementaux comme l'humidité, température, chlorures, sulfates,...etc.

Les propriétés mécaniques

Les propriétés mécaniques des matériaux sont caractérisées par la capacité de résister à toute sollicitation extérieure (compression traction, flexion, fluage, abrasion.....etc.). Elle est définie par la contrainte maximale de rupture d'un matériau sous un chargement extérieur (force, poids.....). On distingue principalement :

- La résistance en compression,
- La résistance en traction (directe ou par flexion),
- La résistance au choc,
- La résistance à l'usure...etc.

1.5. Structure des chaussées

On rappelle en premier temps la structure générale d'une chaussée moderne. Voir la Figure suivante. Les détails des matériaux de chaque couche seront éclairés dans le [Chapitre 4](#).

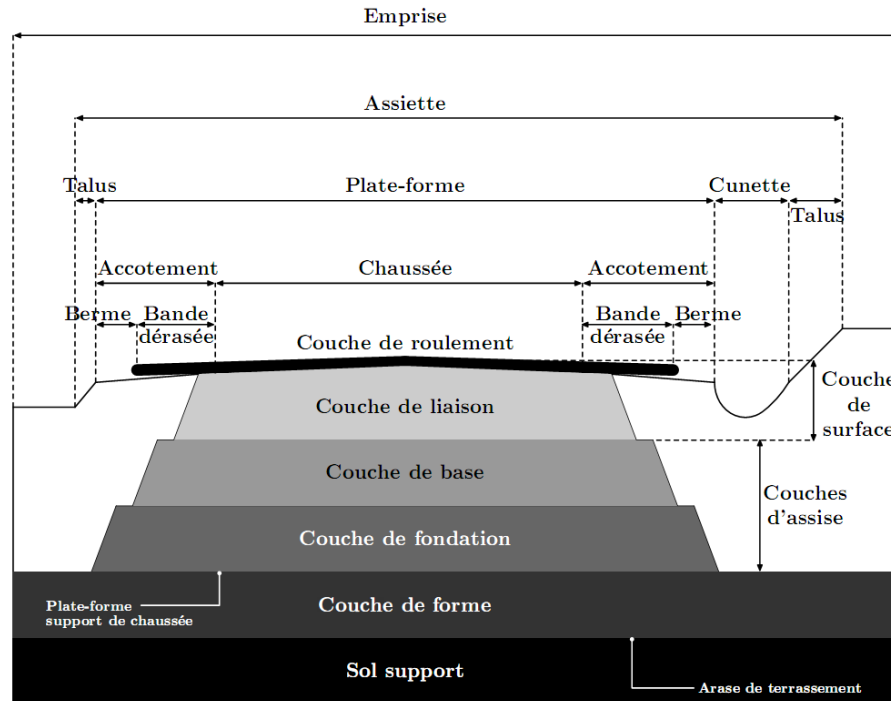


Fig.1.7. structure type d'une chaussée (www.wikiterritorial.cnfpt.fr)

1.5.1. Les différentes structures de chaussées

Selon le critère de fonctionnement mécanique de la chaussée, on distingue généralement trois types de structures:

- chaussée souples,
- chaussées semi-rigides,
- chaussées rigides.

1.5.1.1. Les chaussées souples

C'est une structure dans laquelle l'ensemble des couches, sont traitées aux liants hydrocarbonés. La couche de fondation et/ou la couche de base peuvent être constituées de grave non traitée. La structure type est illustrée sur la [Figure 1.8](#).

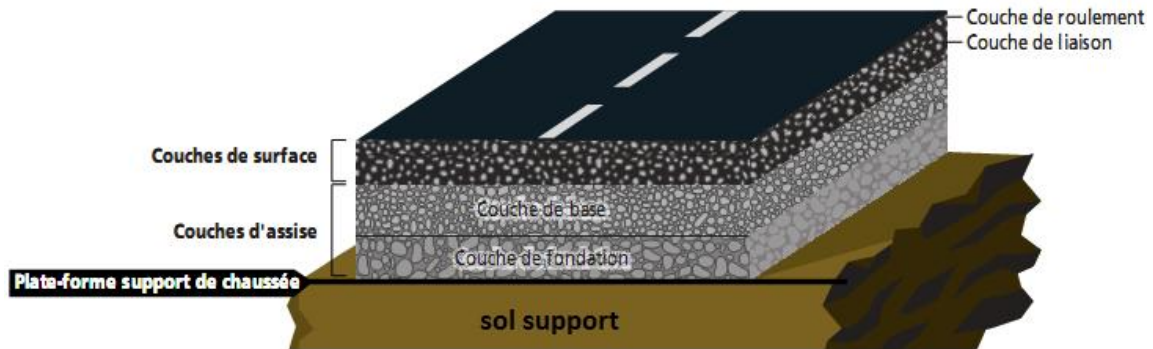


Fig.1.8. La chaussée souple [9]

1.5.1.2. Les chaussées semi-rigides

Elles comportent une couche de surface bitumineuse reposant sur une assise en matériaux traités aux liants hydrauliques disposés en une couche (base) ou deux couches (base et fondation). Dans le cas d'une chaussée neuve à faible trafic, la structure-type est illustrée sur la [Figure 1.9](#).

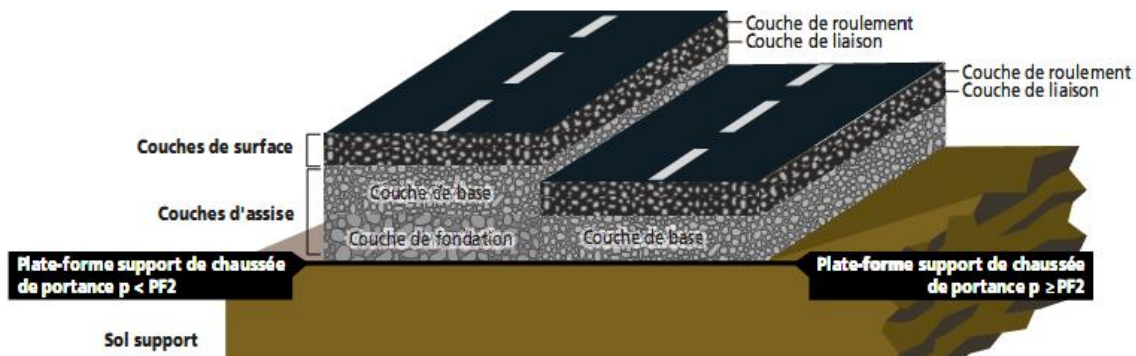


Fig.1.9. Structure type d'une chaussée semi-rigide [9]

1.5.1.3. Les chaussées rigides

Une chaussée rigide est constituée d'un revêtement en béton de ciment pervibré ou fluide. En générale, une chaussée en béton comporte, à partir du sol support, les couches suivantes (Figure 1.10) :

- une couche de forme,
- une couche de fondation,
- une couche de roulement en béton de ciment.



Fig 1.10. Structure type d'une chaussée rigide [9]

Note : Dans la chaussée rigide, la couche de surface et la couche de base sont confondues.

Questions

- 1.1. Pourquoi les routes des anciennes civilisations sont plus durables que celles des temps modernes ?
- 1.2. Quelle est la singularité de la route romaine ?
- 1.3. Que recommandes-tu pour une chaussée *granulat léger ou lourd* ?

CHAPITRE 2

Granulats

Aperçu

Dans ce deuxième chapitre l'auteur présente les généralités sur les granulats, les origines et classification et les propriétés des granulats à usage routiers (selon les normes Françaises). Il est utile de documenter les procédures des essais à priori afin de mieux comprendre la matière de ce chapitre.

2.1. Introduction

Les granulats sont des substances granulaires formées d'un ensemble d'éléments solides de dimensions comprises entre 0 et 100 mm; ces éléments sont obtenus par un processus d'élaboration si spécifique : sélection, tri, concassage, criblage etc. ... et sont utilisés dans la fabrication de différents éléments de construction et de Travaux Publics et dans les différentes couches de chaussées.

En technique routière, l'importance de la qualité des granulats a été longtemps sous estimée par les maitre d'ouvrages et les designers. Par la suite, la recherche et l'approfondissement des techniques a conduit, peu à peu, les ingénieurs routiers à prendre connaissance de cet ensemble de particules qui forment, de 90 à 95 % en poids des couches de roulement et de 100 % dans la majorité des cas, des fondations des routes. Ces matériaux granulaires sont soumis à de nombreuses sollicitations [10]:

- les pneus à crampons;
- l'action polissante des pneus ;
- le trafic lourd et intense;
- le gel et dégel;
- le sablage d'hiver;
- l'action du frottement de l'équipement de l'entretien d'hiver;
- l'action de l'équipement de chantier lors de la construction de routes ;
- Action des intempéries et de l'eau ;
- Actions divers de l'attaque de l'environnement (Acides, sulfates, chlorures...)
- Actions thermiques et mécaniques.

En termes technico-économiques, Il est primordial pour lutter contre l'usure des pavages et leur dégradation lors de la construction de routes, de connaître et de caractériser le mieux possible ces propriétés et leur comportement en service.

Aujourd'hui, la communauté de Génie Civil et Travaux Publics se concentre sur l'étude et l'identification de différentes propriétés et leur interconnexions possibles; caractéristiques dimensionnelles, caractères morphologiques, résistance mécanique, stabilité chimique, propreté. Chacune de ces propriétés doit pouvoir être mesurée par des essais conventionnels (*standards and codes*) définis par des modes opératoires précis. Les propriétés des granulats sont directement liées aux caractères propres des roches sources; d'autres au contraire dépendent essentiellement des conditions de gisement, d'exploitation et d'élaboration. Ces dernières peuvent être considérablement améliorées par des méthodes d'extraction, de fragmentation et de classement appropriés.

2.2. Généralités

2.2.1. Termes et définitions

Selon XP P18-545[11]

Granulat : matériau granulaire utilisé dans la construction. Un granulat peut être naturel, artificiel ou recyclé

Granulat naturel : granulat d'origine minérale n'ayant subi aucune transformation autre que mécanique

Granulat artificiel : granulat d'origine minérale résultant d'un procédé industriel comprenant des transformations thermiques ou autres

NOTE Les Machefers d'Incinération d'Ordures Ménagères (MIOM) sont considérés comme des granulats artificiels.

Granulat recyclé : granulat obtenu par traitement d'une matière inorganique précédemment utilisée dans la construction

Filler : granulat dont la plupart des grains passe au tamis de 0,063 mm et qui peut être ajouté aux matériaux de construction pour leur conférer certaines propriétés

Fines : fraction granulaire d'un granulat qui passe au tamis de 0.063 mm

Classe granulaire : désignation des granulats en termes de dimensions inférieure (d) et supérieure (D) de tamis, exprimée en d/D

NOTE Cette désignation admet que des grains puissent être retenus sur le tamis supérieur (refus sur D) et que d'autres puissent passer au travers du tamis inférieur (passant à d).

Sable : désignation des granulats pour lesquels :

Tableau 2.1. Dimensions limites normatives de d et D et utilisation

Granulats (sable) pour :	béton et mortier NF EN 12620 NF EN 13139	mélanges bitumineux NF EN 13043	matériaux traités et non traités NF EN 13242
D est inférieur ou égal à	4	2	6.3
d est égal à	0	0	0

Gravillons: désignation des granulats d/D dont :

Tableau 2.2. d/D pour les gravillons

Granulats pour	béton et mortier NF EN 12620	mélanges bitumineux et enduits NF EN 13043	matériaux traités et non traités NF EN 13242
D	$4 \leq D \leq 63$ mm (bétons) D = 4 mm (mortiers)	$2 \leq D \leq 45$ mm	$2 \leq D \leq 90$ mm
d	≥ 2 mm (= 2 mortiers)	≥ 2 mm	≥ 1 mm

Grave : granulats formés d'un mélange de gravillons et de sable

NOTE Les graves peuvent être produites par mélange de gravillons et de sable ou par fabrication directe.

Tableau 2.3. d/D pour grave

Granulats pour	béton NF EN 12620	mélanges bitumineux NF EN 13043	matériaux traités et non traités NF EN 13242
D	$4 < D \leq 45$ mm	$2 < D \leq 45$ mm	$6.3 < D \leq 90$ mm
d	0	0	0

Lot : quantité produite, quantité livrée, quantité livrée partiellement (chargement d'un wagon ou camion, cargaison de navire) ou quantité en stock produite en une fois dans des conditions présumées uniformes

NOTE Lorsque le processus de production est continu, il convient de traiter la quantité produite au cours d'une période donnée comme un lot.

Fournisseur : personne physique ou morale agissant en qualité de producteur, importateur, distributeur ou négociant de granulats

Fourniture : quantité de granulats correspondant à une seule et même commande constituée d'un ou plusieurs lots de livraisons

acquéreur: personne physique ou morale qui achète les granulats

production de référence: ensemble continu de lots fabriqués dans le but de répondre aux mêmes spécifications dans une période donnée dite de référence

prélèvement : quantité de matériau prélevé sur un lot en une seule opération de l'appareil d'échantillonnage

échantillon global : échantillon constitué par le mélange de prélèvements

sous-échantillon : il est obtenu à partir d'un prélèvement ou d'un échantillon global selon une procédure de réduction

prise d'essai : sous-échantillon utilisé dans sa totalité pour un seul essai

prélèvement contradictoire : prélèvement effectué en présence du fournisseur et de l'acquéreur sur le même lot

essais contradictoires : essais effectués par le fournisseur et l'acquéreur sur le même prélèvement contradictoire

caractéristiques intrinsèques : propriétés des granulats essentiellement liées à la nature et à la qualité de la roche exploitée. Entrent dans ce type de propriétés : masse volumique réelle, absorption d'eau, Los Angeles, micro-Deval, résistance au polissage, etc.

caractéristiques de fabrication : propriétés des granulats résultant essentiellement des conditions de fabrication. Entrent dans ce type de propriétés : granularité, aplatissement, angularité, qualité des fines, teneur en fines des gravillons, teneur en chlorure des granulats marins, etc.

catégorie : niveau d'une caractéristique d'un granulat, défini comme un intervalle entre deux valeurs ou comme une valeur limite

NOTE Il n'existe pas de relations entre les catégories des différentes caractéristiques.

Codes : des codes sont proposés pour les différents domaines d'utilisation des granulats. Ils peuvent associer des catégories EN de différentes caractéristiques pour simplifier l'écriture des spécifications des marchés ou la désignation des produits, mais ne se substituent pas à la désignation explicite par des catégories définies dans les normes NF EN Produits

Granularité : distribution dimensionnelle des grains, exprimée comme un pourcentage massique de matériau, passant au travers d'un ensemble spécifié de tamis

Propreté : propreté des sables et des graves : dans les normes NF EN Produits, cette caractéristique est désignée «qualité des fines».

2.2.2. Utilisations des granulats

Selon Mamlouk et Zaniewski [12], Les granulats sont principalement utilisés comme matériau sous-jacent pour les fondations et les chaussées, comme enrochement pour le contrôle de l'érosion, et comme ingrédients dans le ciment Portland et bétons bitumineux. Les matériaux sous-jacents agrégés, ou couche de base, peuvent ajouter de la stabilité à une structure, fournir une couche de drainage et protéger la structure des dommages causés par le gel. La stabilité est fonction du frottement interparticulaire entre les granulats et la quantité de matériau de «liant» d'argile et de limon dans les vides entre les grains. Cependant, l'augmentation de la teneur en argile et en limon bloquera les voies de drainage entre les particules d'agrégat, inhibant ainsi la capacité du matériau à agir comme couche de drainage.

Dans le béton de ciment Portland, 60% à 75% du volume et 79% à 85% du poids sont constitués de granulats. Les agrégats agissent comme une charge pour réduire la quantité de pâte de ciment nécessaire dans le mélange. De plus, les granulats ont une meilleure masse volumique que la pâte de ciment. Par conséquent, maximiser la quantité d'agrégat, dans une certaine mesure, améliore la qualité et l'économie du mélange cimentaire.

Dans le béton bitumineux, les granulats constituent 75% à 85% du volume et 92% à 96% de la masse. Le liant bitumineux ici agit comme un liant pour maintenir les agrégats ensemble, mais n'a pas assez de force pour maintenir les particules d'agrégat en position. Par conséquent, la résistance et la stabilité du béton bitumineux dépendent principalement de l'interface de frottement entre les agrégats et le liant. En raison de l'importance des propriétés des granulats sur les performances du béton bitumineux, la méthode de conception de mélange Superpave, introduite dans les années 1990 a défini deux ensembles d'exigences globales: source et consensus. Les propriétés et spécifications de la source sont établies par chaque agence propriétaire pour répondre aux conditions locales. Les propriétés de consensus ont été établies au niveau national avec l'intention que toutes les agences mettent en œuvre les méthodes d'essai et les critères dans leurs spécifications. Les propriétés de consensus pour Superpave sont:

- Agrégat grossier*
- Angularité
- Gras et allongé
- Agrégat fin*
- Équivalence sable
- Angularité globale fine

2.3. Origines et classifications

Les formations géologiques susceptibles de recéler des gisements de roche aptes à la confection de granulats sont extrêmement multiples compte tenu notamment de la diversité des produits naturels ou artificiels regroupés sous cette appellation technique.

Les granulats sont généralement classés selon différents critères [13] qui sont principalement : la granularité, la masse volumique, l'origine et le mode de préparation. Parallèlement, compte tenu de l'organisation de la profession des producteurs de granulats, on distingue généralement ces matériaux en fonction de critères géologiques simples liés à la nature des gisements :

- les gisements situés dans les formations détritiques meubles : granulats alluvionnaires ;
- les gisements de roches massives eux-mêmes habituellement divisés par la profession en gisements de granulats calcaires et gisements de granulats d'origine éruptive ou métamorphique.

2.3.1. Classement des granulats par granularité

La granularité ou distribution dimensionnelle des grains est définie par la norme NF P18-101 [14] qui distingue par granularité croissante :

- les fines (dimensions inférieures ou égales à 0,08 mm soit 80 μ m)
- les sables (plus petite dimension : $d = 0,08$ mm) (le max : $D = 6,3$ mm)
- les gravillons ($d = 1$ mm) ($D = 31,5$ mm)
- les cailloux ($d = 20$ mm) ($D = 80$ mm)
- les graves ($d = 6,3$ mm) ($D = 80$ mm)
- les enrochements (très variable).

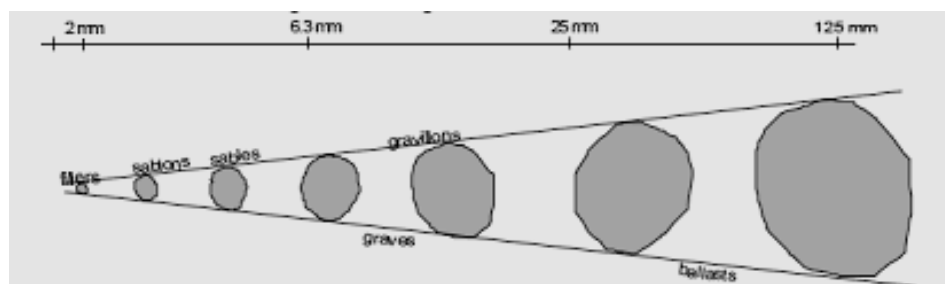


Fig.2.1. Tailles et classes granulaires (https://ft.univ-lemcen.dz/assets/uploads/pdf/departement/gc/tp/analyse_granulometrique.pdf)

Les coupures granulométriques entre les différents produits ne sont pas rigoureuses ; elles peuvent varier selon les techniques d'utilisation et les origines de production.

2.3.2. Classement des granulats par densité

Selon les normes [NF P 18-309\[15\]](#), [NF P 18-554\[16\]](#) et [NF P18-555\[17\]](#), d'après leur masse volumique les granulats sont dits :

- granulats légers ([Figure 2.2](#)) lorsque la masse volumique réelle du grain est inférieure à 2 g/cm^3
- granulats courants lorsqu'elle est comprise entre 2 et 3 g/cm^3 ;
- granulats lourds lorsqu'elle est supérieure à 3 g/cm^3 .

Les granulats lourds [\[18\]](#) Ces granulats se caractérisent par leur densité élevée.

- La barytine : matière opaque plus ou moins blanche à structure lamellaire. Sa densité moyenne est de 4,5.
- La magnétite : oxyde de fer dont la densité varie de 4 à 5.
- La limonite de densité 3,7.
- La pyrite de fer de densité 5.
- Les déchets ferreux dont la densité varie de 7,4 à 7,7.
- L'ilménite (densité 5) – la galène (densité 7,6) – le corindon (densité 4) – la serpentine – la pandermite – la colemanite – etc...

Les granulats lourds sont utilisés essentiellement pour la fabrication de bétons lourds.

Les granulats légers usuels [\[18\]](#) sont la ponce (lave volcanique de couleur gris clair rendue très légère par les nombreuses bulles de gaz emprisonnées lors du refroidissement), la pouzzolane (roche d'origine volcanique à structure alvéolaire de couleur brun-noir à rouge brique), l'argile ou le schiste expansés et le laitier expansé.

D'une masse volumique variable entre 400 et 800 kg/m^3 , ils permettent de formuler des bétons présentant une bonne isolation thermique et une faible masse volumique comprise entre 1200 et 2000 kg/m^3 .

Nota : On utilise aussi des composants légers qui sont d'origine aussi bien végétale et organique que minérale (bois, polystyrène expansé, liège, vermiculite). Ils sont particulièrement adaptés pour les bétons d'isolation, mais également pour la réalisation d'éléments légers : blocs coffrants, blocs de remplissage, dalles, ou rechargements sur planchers peu résistants.



Fig.2.2. L'argile expansée et formation de granulats légers
(<https://www.archiexpo.fr/prod/laterlite-spa/product-82422-1156711.html>)

2.3.3. Classement des granulats par origine et mode de préparation

Les granulats peuvent être classés en :

- *produits naturels*, lorsqu'ils n'ont subi aucune opération de transformation autre que mécanique ;
- *produits artificiels* subit d'autres manières de transformation ou de traitement (thermique, chimiques...etc.).

Les granulats naturels peuvent être préparés par une succession d'opérations mécaniques : concassage, criblage, lavage, etc. Le mode de préparation des granulats artificiels doit être précisé dans la désignation du produit (argile expansée, laitier bouleté, laitier expansé, etc.).

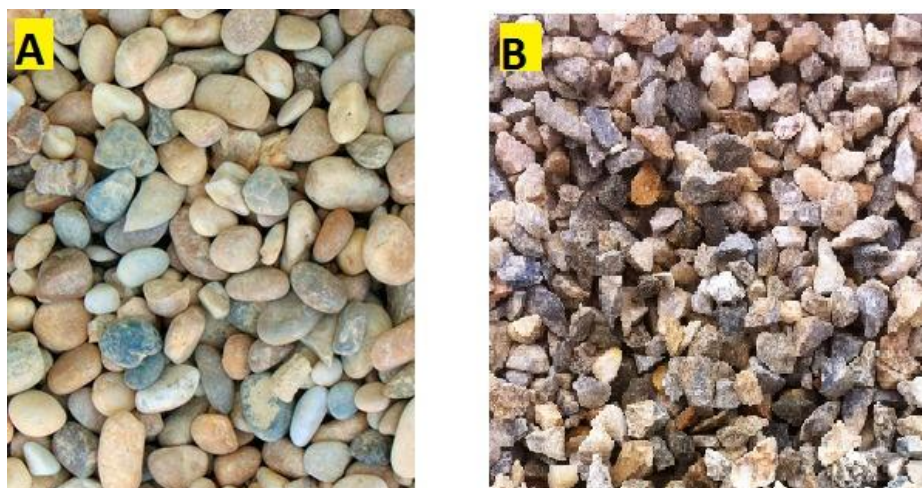


Fig.2.3. A : Granulats roulés et B : concassés

2.3.4. Classement par nature géologique de gisement

Les gisements de granulats naturels sont situés soit dans des formations détritiques meubles, soit dans des formations de roches massives.

2.3.4.1. Les formations détritiques meubles

Les matériaux issus de roches détritiques meubles présentent l'avantage de ne nécessiter en général qu'un simple lavage pour élimination des fines, un criblage pour tri granulométrique et parfois un concassage pour les plus gros éléments (cailloux).

En fonction des besoins, les utilisateurs peuvent exiger :

- soit des *matériaux roulés* ;
- soit des *matériaux concassés* ;
- soit un mélange roulés-concassés.

Pour des usages spéciaux ou pour corriger des courbes granulométriques déficitaires en éléments fins, les sables peuvent subir un broyage complémentaire.

Les alluvions des cours d'eau

Les phénomènes d'érosion et de transport facilitent un dépôt considérable dans les lits des rivières, dans les estuaires ou sur les plateaux continentaux marins. Zones à forte consommation de matériaux, les vallées offrent en outre intéressante possibilité économiques de transport par voie d'eau. Les alluvions constituent actuellement la principale source d'approvisionnement en granulats. D'âge principalement quaternaire, les alluvions peuvent être prélevées soit directement dans le lit vif (alluvions actuelles du lit mineur), soit dans leur lit fossile (alluvions récentes ou anciennes du lit majeur ou terrasses). Le plus souvent, les éléments détritiques, émoussés pendant leur transport sur parfois de très longues distances, sont constitués de grains assez fins et arrondis.

A l'intérieur des formations d'origine alluvionnaire, les matériaux sont également classés en 3 catégories qui reflètent la chimie de la roche :

- les *graves siliceuses* ;
- les *graves silico-calcaires* ;
- les *alluvions calcaires*.

Les *graves siliceuses* ne contiennent pas (ou peu) d'éléments calcaires mais ne sont pas homogènes pour autant : certaines sont constituées d'un mélange de silex (partie grossière) et de sables quartzeux très largement dominant dans les sables alors que la plupart des autres graves résultent de l'usure progressive d'éléments de roches magmatiques ou métamorphiques : galets et graviers de granites, diorites, gneiss, localement basaltes ou autres laves, etc. et de sables essentiellement quartzeux.

Les *graves silico-calcaires* regroupent dans cette catégorie des matériaux divers.

La partie siliceuse est constituée tantôt de débris de roches magmatiques ou métamorphiques, tantôt de silex (Seine en France). *La partie calcaire* est également très hétérogène, les bassins versants des cours d'eau concernés étant très variés. De façon générale, on constate cependant une évolution très nette de la composition pétrographique de ces graves d'une classe granulaire à l'autre et quel que soit le cours d'eau concerné.

Pour *les alluvions calcaires*, dans la plupart des cas, il s'agit le plus souvent de matériaux assez peu grossiers, le pourcentage en éléments supérieurs à 50 mm étant faible. Ces graves calcaires sont généralement utilisées pour la fabrication des bétons courants ; *il arrive cependant qu'elles soient utilisées en technique routière*. En effet, certaines graves calcaires présentent de plus fortes résistances mécaniques que certaines graves siliceuses.

Les formations sédimentaires d'origine continentale

D'âge principalement secondaire et tertiaire, la plupart de ces sables sont de granularité fine à moyenne à très large dominance quartzeuse. Si l'on excepte les *faluns miocènes* riches en coquilles fossiles, l'utilisation de ces sables "moyens" en tant que granulats ne pose pas de difficulté particulière. *Cependant, les sables "fins" posent des problèmes d'utilisation difficiles à résoudre*. L'étendue des gisements et les réserves considérables que constituent *certaines de ces sables les ont fait utiliser depuis longtemps comme remblais ou couches de forme*, mais non comme granulats. Des développements récents montrent que certains d'entre eux *peuvent également être utilisés après traitement (surtout au laitier) comme couches de base de chaussées à circulation moyenne*.

Les dunes et cordons littoraux

Ils peuvent se présenter en *lentilles de sable fin*, ou sous forme de *plages de galets de mer*. Leur possibilité d'exploitation est actuellement fortement limitée, voir interdite, par les contraintes d'environnement et de tourisme.

Les arènes

Ce sont les résidus d'altération sur place de roches magmatiques ou métamorphiques, les plus répandues et les plus exploitées étant les arènes d'origine granitique.

De nombreuses roches feldspathiques (granites, diorites, gneiss, migmatites), sont recouvertes d'une épaisseur d'arène qui peut atteindre 15 mètres dans certaines régions (Limousin, Bretagne). Les variations d'épaisseur sont très rapides, liées à la fracturation des roches. Les arènes, qui ont la granularité de sables plus ou moins grossiers passent progressivement à la roche altérée mais cohérente, puis à la roche saine. Les éléments de l'arène sont ceux de la roche mère. La composition minéralogique des arènes reflète donc celle des roches cristallines à partir desquelles elles se sont formées. Dans la fraction fine des arènes, on trouve fréquemment de l'illite, de la chlorite, des interstratifiés, de la montmorillonite, de la kaolinite. La présence de ces minéraux argileux explique les limites d'utilisation des arènes ; jusqu'à présent, elles

ont surtout été utilisées en remblais, couches de forme ou couches de fondation de routes à faible circulation. Compte tenu de l'extrême hétérogénéité des gisements, les matériaux arénisés sont généralement considérés comme sous-produit lors de la réalisation de découvertes de carrières de roches dures.



Fig.2.4. Granite et arène de granite (<https://www.crtv.cm/>)

Les moraines

Ce sont toujours des dépôts très hétérogènes qui ne sont guère exploitables lorsqu'ils ne sont pas repris par un cours d'eau puis redéposés en aval (dépôts fluvioglaciers). Dans ce cas, ils peuvent être sommairement assimilés à des dépôts alluvionnaires grossiers. La principale difficulté d'exploitation des moraines provient de leur hétérogénéité granulaire. En effet le même gisement renferme côte à côte des blocs énormes, dont l'exploitation relève souvent de l'explosif et des sables fins limoneux ou argileux parfois difficiles à éliminer.

Les formations périglaciaires alpines peuvent constituer d'immenses réserves en matériaux mais l'accès aux gisements est souvent rendu difficile par les accidents du relief montagnard et l'éloignement par rapport aux centres de consommation.



Fig.2.5. Dépôts fluvioglaciers (http://glaciers-climat.fr/Anatomie/Anatomie_des_glaciers.html)

Les éboulis de pentes (éluvions, colluvions parfois (appelées localement groise, grouine...etc).

La constitution de la plupart des *éboulis* correspond aux effets du gel et surtout de l'altérence gel-dégel, lors des différentes périodes glaciaires qui ont affecté nos régions durant le Quaternaire. Il existe donc des éboulis de nature très diverse sur presque tous les versants actuels. Les seuls éboulis exploitables en tant que granulats sont les *éboulis calcaires*. Les utilisations possibles dépendent des caractéristiques mécaniques des roches dont ils sont issus (En France par exemple : les plus intéressants sont les éboulis des calcaires durs de Provence, de certaines régions des Alpes et du Jura). De plus, les éboulis de craie sont utilisés comme remblais, et ne peuvent être considérés comme des granulats.

La granularité du matériau est difficilement prévisible pour les éboulis très épais, dans la mesure où ils sont constitués d'apports successifs correspondant à des périodes où l'intensité du gel a pu varier de façon importante et influencer le débit des roches.

L'exploitation des éboulis est limitée par des problèmes de sécurité de carrière ; la stabilité, souvent relative de ces éboulis, étant compromise par les extractions basales.

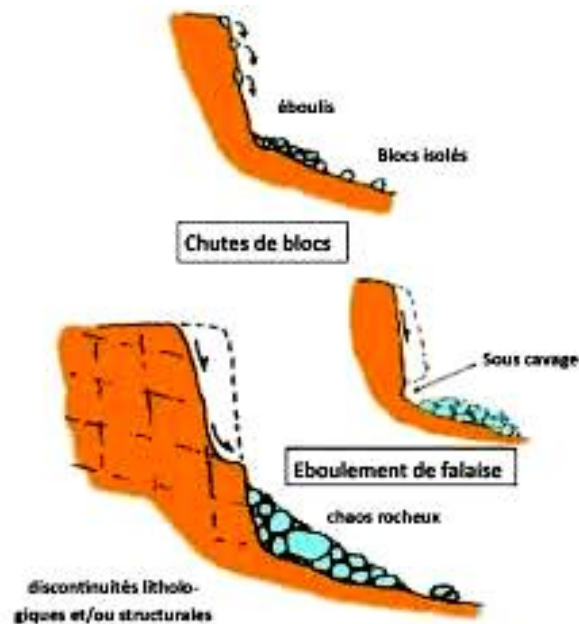


Fig.2.6. éboulement de façades et de pentes (mayotte.gouv.fr/)

Les dépôts marins

Les *granulats marins* peuvent être caractérisés soit par leur composition minéralogique, soit par leur origine. Dans ce dernier cas, on distingue :

- les *matériaux bioclastiques* qui résultent de la fragmentation, du remaniement et de la concentration de tests d'organismes marins après leur mort. On parle alors de sables biogènes ou de sables coquilliers ;

- les *matériaux lithoclastiques* qui résultent de l'altération de formations cristallines ou

sédimentaires variées, puis de leur transport par les cours d'eau et leur concentration à la faveur de contextes géomorphologiques variés, le plus souvent de vallées fossiles.

On parle aussi de *sables terrigènes*. Leurs origines sont de trois types principaux : origine fluviale, accumulations par les courants ou anciens cordons littoraux.

Les granulats marins dont il est traité dans ce mémento se réfèrent essentiellement aux sables et graviers siliceux du plateau continental.

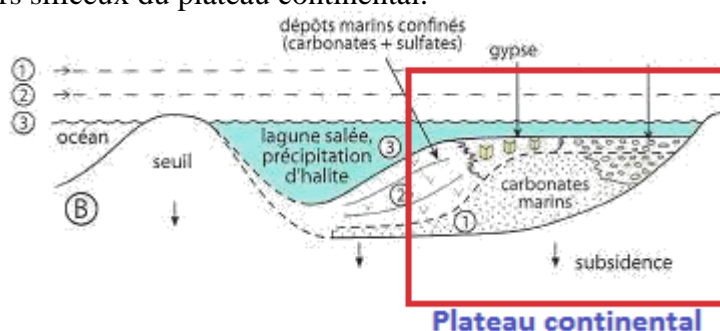


Fig.2.7. Exemple de dépôts marins (modifiée de : <https://www.svt-tanguy-jean.com/>)

2.3.4.2. Les formations de roches massives

Les gisements de roches compactes fournissent des matériaux pétrographiquement très diversifiés pouvant provenir :

- de formations sédimentaires consolidées (grès, calcaire, dolomie, meulière...)
- de formations métamorphiques en général non schisteuses: quartzite, gneiss, cornéenne, amphibolite, marbre, . . . ;
- de formations éruptives intrusives (granite, diorite, gabbro, ...) ou extrusives (basalte, tuf pyroclastique, . . .) non altérées.

Les agrégats d'origine éruptive ou cristallophylienne sont surtout produits dans les zones de socle où ils ne sont pas (ou peu) concurrencés par d'autres ressources (En France : Alpes, Massif armoricain, Massif central, Pyrénées, Vendée, Vosges,...).

2.4. Propriétés des granulats routiers

D'après Robert et Lafon [19], les granulats pour routes représentent le volume majeur du corps de chaussée (Figure 2.8).

Le Granulat et la Route:

- 100% des chaussées souples
- 95% des chaussées traitées (+5% liant, Bitume ou ciment)
- 90% des Bétons (ponts, dalles, poutrelles, bordures....)

Fig.2.8. Pourcentages volumétriques des granulats pour béton et routes

Selon la norme [XP 18-545 \[11\]](#) du 2004, les granulats routiers se divisent en plusieurs utilisations. Chaque utilisation doit répondre à des critères rigoureux afin d'être passibles.

Il est recommandé alors de se reporter à la norme proprement dite afin de bien sélectionner et contrôler les granulats dans un projet routier (de plus voir les directives de la note informative N° 24 de *Institut Des Routes des Rues et des Infrastructures pour la Mobilité* (iDRRIM) [\[20\]](#)).

Granulats pour chaussées : couches de fondation, de base et de liaison
Granulats pour chaussées : couches de roulement utilisant des liants hydrocarbonés ..
Granulats pour chaussées : bétons de ciment
Granulats pour bétons hydrauliques et mortiers
Granulats pour voies ferrées — Assises
Granulats pour voies ferrées : Ballasts et gravillons de soufflage
Granulats légers pour bétons hydrauliques et mortiers
Enrochements

Fig.2.9. Capture d'écran montrant les différents aspects d'utilisation des granulats routiers ([XP 18-545](#))

On résume ici, d'après *le document de techniques de l'ingénieur* de Berthier [\[21\]](#), les propriétés essentielles des granulats à usage routier. Les détails des propriétés exigées pour chaque couche seront traités dans le [chapitre 4](#) de ce document.

2.4.1. Granularité

Elle caractérise la répartition du granulat en tranches dimensionnelles. La granulométrie est réalisée par tamisage pour les éléments les plus gros et par sédimentométrie pour les éléments inférieurs à 80 μm . Les gravillons sont définies par leur plus petite et leur plus

grande dimension. On parle d'un d/D , avec une tolérance sur d et D de 15 % si $D > 1,58 d$ et de 20 % si $D = 1,58 d$.

Les graves et les sables sont des matériaux à granularité continue $0/D$, D étant supérieur à 6,3 mm pour les graves. La courbe granulométrique traduit la répartition pondérale des grains par classe granulaire. Le fuseau granulométrique est la zone entre les deux courbes granulométriques enveloppes. On distingue :

- le *fuseau de spécification* propre à la technique considérée, qui définit la zone dans laquelle doivent se situer les fuseaux de tolérance ;
- le *fuseau de régularité*, ou de *tolérance*, qui définit l'étendue de la zone dans laquelle doivent se situer 95 % des courbes obtenues au cours du contrôle ;
- le *fuseau de fabrication*, qui contient 95 % des courbes granulométriques du matériau fabriqué.

Généralement on fait recours à l'utilisation des fuseaux pour tester l'acceptabilité de la granularité, et du granulat pour le domaine ciblé (Exemple en [Figure 2.10](#)).

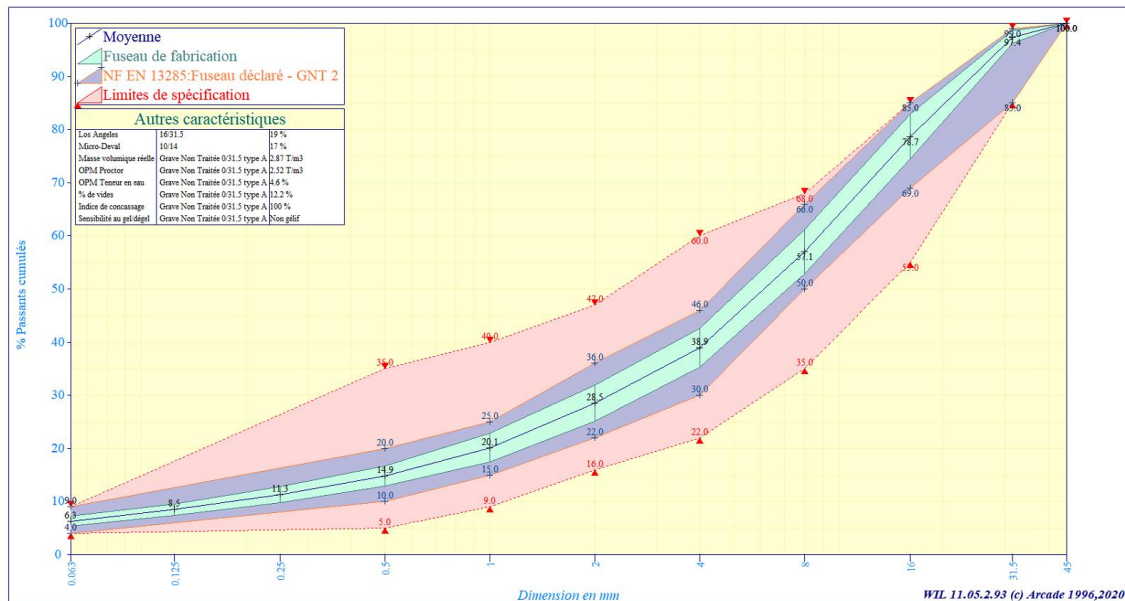


Fig.2.10. Exemple de fuseau de GNT 31.5 (Carrière Kleber Moreau 2021)

2.4.2. Propreté

Comme pour les sols, la propreté des granulats (sable généralement) est mesurée par l'essai d'équivalent de sable (NF EN 933-8[22], ASTM D2419[23], AASHTO T176[24]) et par l'essai au bleu de méthylène (NF EN 933-8+A1[25], ASTM C1777-20[26], ASTM C837-09[27] ...etc.).

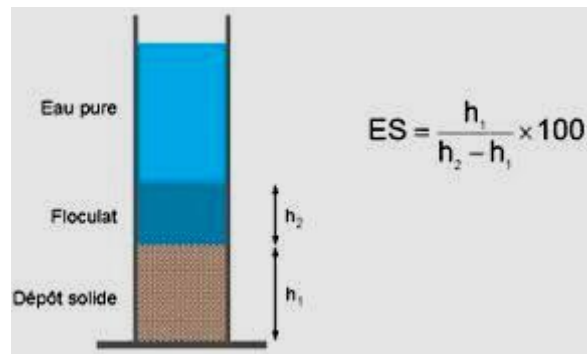


Fig. 2.11. Procédure de mesure de l'équivalent de sable (http://tice.inpl-nancy.fr/modules/sciences_techniques/Proprietes-Meca-Sols/chap2/grandeurs.html)

Le principe de *l'essai de bleu de méthylène* [28] est d'introduire dans une suspension de sol, des quantités croissantes de bleu de méthylène, par doses successives, jusqu'à ce que toutes les surfaces d'adsorption étant saturées, il apparaît un début d'excès. À partir de la quantité totale de bleu introduite et du poids du sol sec, on calcule la valeur qui correspond à 100g de sol qui est appelée la "valeur de bleu" de ce sol.

La valeur du bleu notée VBS est très utilisée dans la classification des sols pour les terrassements.

2.4.3. Angularité

Elle joue un *rôle primordial pour les gravillons de la couche de roulement*, en améliorant l'adhérence, et *pour ceux des assises de chaussée*, dont elle améliore la stabilité.

- Pour un granulat de roche massive, elle est égale à 100 %.
- Pour un granulat d'origine alluvionnaire, elle est définie par deux données :
 - l'indice de concassage IC , proportion en poids d'éléments supérieurs à la dimension D du granulat élaboré ;
 - le rapport de concassage RC , rapport entre d du matériau soumis au concassage et D du granulat obtenu.

2.4.4. Forme

La forme d'un granulat est définie par trois grandeurs géométriques (voir [Figure](#) ci-après):

- La longueur L , distance maximale de deux plans parallèles tangents aux extrémités du granulat,
- L'épaisseur E , distance minimale de deux plans parallèles tangents au granulat,
- La grosseur G , dimension de la maille carrée minimale du tamis qui laisse passer le granulat.

Le coefficient d'aplatissement **A** d'un ensemble de granulats est le pourcentage pondéral des éléments qui vérifient la relation:

Dans les mêmes conditions $L \leq G \leq E$, on peut déterminer aussi:

- l'indice d'allongement $\beta = \frac{G}{L} \leq 1$
- l'indice d'aplatissement $\alpha = \frac{E}{G} \leq 1$

Elle est définie, [Figure 2.11](#), par le pourcentage d'éléments tels que $G/E > 1,58$. Elle est mesurée par un double tamisage sur des tamis à mailles carrées qui trient suivant la grosseur, et sur des cribles à barres parallèles qui trient suivant l'épaisseur.

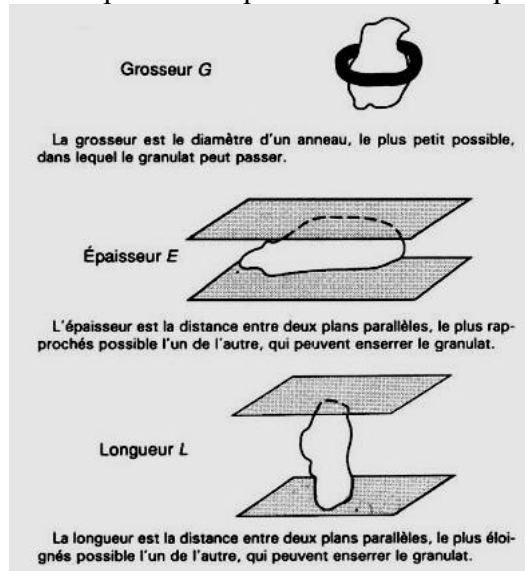


Fig. 2.11. Définitions relatives à la forme des granulats[21]

Pour le béton, la forme des granulats influence : La facilité de mise en œuvre et le compactage du béton ; et la compacité du mélange, donc le volume des vides à remplir par la pâte de ciment. L'état de surface des grains influence: La compacité du mélange ; et l'adhérence du granulat à la pâte de ciment.

Dans le domaine routier, la forme des granulats joue un rôle important à la fois pour les *granulats de la couche de roulement*, des gravillons plats ayant tendance à se coucher au moment du compactage, et *pour les matériaux d'assise*, des granulats plats ou allongés réduisant la compacité et la stabilité.

2.4.5. Qualité de la roche

On fait recours à trois essais pour y caractériser.

2.4.5.1. Résistance à l'usure

Elle est déterminée par *l'essai Deval humide* et par *l'essai Microdeval humide*. L'essai Deval humide est réalisé dans un cylindre de 20 cm de diamètre et de 34 cm de longueur dans lequel on introduit 50 pierres cassées et humidifiées de 40 / 70 mm pesant au total 5 kg. Le cylindre effectue 10 000 révolutions à 30 tr/min autour d'un axe faisant un angle de 32° avec l'axe du cylindre.

Le coefficient Deval = 20 000/P, où P est la masse en grammes des éléments inférieurs à 1,6 mm.

L'essai Microdeval est réalisé suivant le même principe sur les classes granulaires 4/6, 6/10 et 6/14. Le cylindre a, dans ce cas, 20 cm de diamètre et 15,4 cm de longueur. Aux 500 g de gravillons de la prise d'essai, on ajoute une charge abrasive constituée de billes d'acier sphériques de 10 mm de diamètre. Le cylindre tourne à 100 tr/min pendant 2 h. Si P est la fraction passant au tamis de 2 mm, le coefficient Microdeval est égal à :

$$MD = 100 \frac{P}{500}$$

Pour l'essai Microdeval humide (MDE) on rajoute 2,5 L d'eau dans le cylindre d'essai. Ce dernier essai tend à se substituer de plus en plus complètement à l'essai Deval car, contrairement à ce dernier, il est réalisé sur des fractions effectivement utilisées dans les chaussées.

2.4.5.2. Résistance à la fragmentation

Elle est appréciée par l'essai Los Angeles. Il consiste à placer dans un cylindre à axe horizontal de 70 cm de diamètre et 50 cm de longueur les granulats à essayer et des boules d'acier. On effectue 500 révolutions à 30 tr/min. Le poids et la granularité de la prise d'essai sont déterminés en fonction du diamètre maximal du granulat.

Après essai, les matériaux sont criblés au tamis de maille 1,6 mm et le poids de la fraction passante est rapporté au poids de la prise d'essai. Le rapport, multiplié par 100, est appelé *coefficient Los Angeles* (LA).

2.4.5.3. Résistance au polissage

L'essai permet de mesurer la résistance au polissage sous l'effet du trafic. On place pour cela le gravillon, inséré dans des plaquettes de mortier, à la périphérie d'un tambour sur laquelle roule librement une roue équipée d'un pneumatique. Un agent abrasif est interposé au cours de l'essai (sable siliceux pendant trois heures puis poudre d'émeri pendant les trois heures suivantes). On mesure ensuite le coefficient de frottement avec un appareil de type pendule équipé d'un patin en caoutchouc, qui permet de mesurer l'énergie absorbée par le frottement.

L'aptitude au polissage est mesurée par le coefficient de frottement résiduel. La circulaire de la direction des Routes sur les chaussées glissantes du 11 juin 1969 donne l'échelle de valeur figurant sur le [Tableau 2.1](#).

Tableau 2.1. Interprétation de l'essai de polissage accéléré des granulats

Coefficient de polissage	Appréciation	Interprétation
Inférieur à 0,35	Mauvais	En principe, un tel granulat ne doit pas être employé en couche de surface Un tel granulat ne doit être utilisé que lorsque les conditions de trace et de trafic sont favorables
Entre 0,35 et 0,45	Passable	L'utilisation d'un tel granulat est recommandée lorsque les conditions de tracé et de trafic sont défavorables (virages, carrefours, vitesses élevées, trafic intense)
Entre 0,45 et 0,55 Supérieur à 0,55	Bon Très bon	

2.4.6. Classement de synthèse

À partir de ces différents essais, la norme P 18-101[14] sur les caractéristiques des granulats destinés aux travaux routiers classe les gravillons suivant les cinq catégories de résistance mécanique du Tableau 2.2. L'appartenance à une catégorie nécessite de satisfaire simultanément :

- à la somme des valeurs de LA et de MDE ;
- et aux valeurs de LA et de MDE du Tableau.

Tableau 2.2. Classification selon la norme (P18-101)

Catégorie	LA + MDE	LA	MDE
A	≤ 25	≤ 20	≤ 15
B	≤ 35	≤ 25	≤ 20
C	≤ 45	≤ 30	≤ 25
D	≤ 55	≤ 35	≤ 30
E	≤ 80	≤ 45	≤ 45
F	> 80	> 45	> 45

Lorsque la catégorie F est retenue, les limites supérieures doivent obligatoirement être fixées.

Questions

- 2.1. Quel est le rôle des granulats ?
- 2.2. Pourquoi 80% d'une chaussée c'est des granulats ?
- 2.3. Comment obtenir un mélange cimentaire léger et résistant ?

CHAPITRE 3

Liants Routiers

Aperçu

Ce chapitre traite les propriétés des liants routiers. Les liants hydrocarbonés sont présentés, avec plus de détails couvrant le bitume, à savoir : les types, constituants, caractéristiques du bitume routier, émulsions et bitumes modifiés. De plus, les liants hydrauliques et pozzolaniques sont avancés à la section 3.3.

3.1. Introduction

Dans le domaine routier la notion du liant se divise en deux avec les deux catégories principales des corps de chaussées (souples et rigides). Les voies souples sont généralement à base des liants noirs, et les voies rigides sont basées sur les bétons de liants hydrauliques.

Pour les liants hydrauliques on trouve principalement les différents types des ciments, et les chaux.

Les liants noirs sont basés sur deux matériaux : les goudrons et dérivées et les bitumes et ses dérivées.

3.2. Les liants hydrocarbonés

Un liant hydrocarboné est un liant organique constitué d'hydrocarbures, c'est-à-dire essentiellement à base de Carbone d'hydrogène, aux quels s'ajoutent l'oxygène le soufre, l'azote, en faibles quantités. Voir la [Figure 3.1](#) représentant les différents produits.

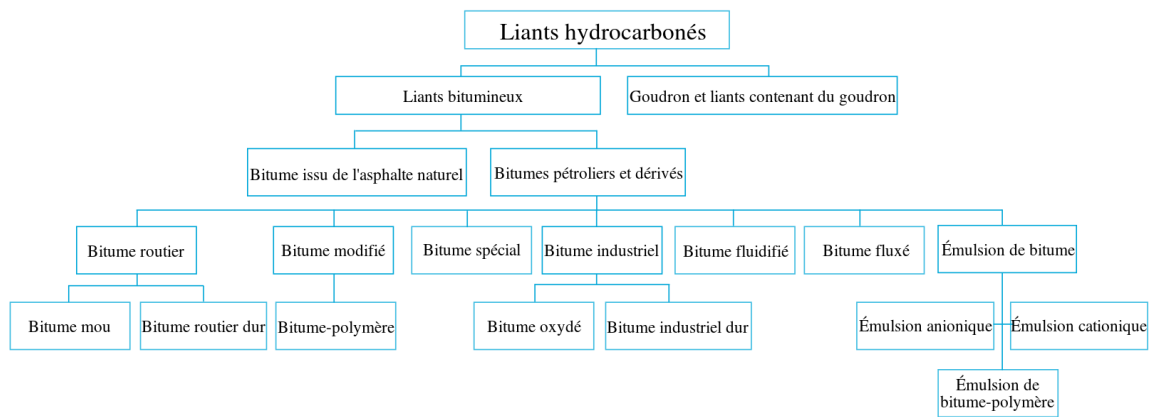


Fig.3.1. Produits de liants hydrocarbonés
 (https://www.wikiwand.com/fr/Liant_hydrocarbon%C3%A9)

On distingue deux sortes de produits dans cette famille :

- Les goudrons qui proviennent de la pyrogénéation de matière d'origine végétale (houille, lignite, tourbes), mais les goudrons routiers sont issus essentiellement de la houille.
- Les bitumes qui sont produits en raffinerie à partir de la distillation fractionnée de certains pétroles bruts

Mais les goudrons de houille ne sont plus guère utilisés en technique routière pour des raisons économique et des considérations d'environnement du fait que leur composition inclut des produits cancérigènes. D'où actuellement dans la pratique routière, lorsqu'on parle de liant hydrocarboné il s'agit pratiquement toujours de bitumes. Ces derniers sont largement utilisés dans la réalisation des chaussées souples à cause de leurs caractéristiques qui leur rendent principalement propres à cet usage. La technique des bitumes est vaste et complexe, nous nous limitons à exposer sous forme résumé leurs propriétés essentielles.

Les bitumes sont employés pour leurs propriétés agglomérantes et d'étanchéité, ils sont très visqueux aux températures ordinaires et peuvent être utilisés sous forme fluide. Ils présentent les qualités essentielles suivantes :

- $\frac{3}{4}$ La cohésivité qui est la propriété de se déformer sans fissuration interne, ni arrachement.
- $\frac{3}{4}$ L'adhésivité : c'est la propriété de coller aux agrégats minéraux.

Le traitement des granulats à partir des liants hydrocarbonés fournit les matériaux suivant : les grave-bitume(GB), sable-bitume (SB), les enrobés denses et semi-denses

3.2.1. Types de bitumes

3.2.1.1. *Bitume naturel*

Le bitume à son état naturel est sous forme de résidu d'anciens gisements de pétrole dont les éléments les plus légers ont été éliminés au cours du temps par distillation naturelle.

Ils sont extraits soit à ciel ouvert, les gisements se présentent alors comme de véritables *lacs*, soit sous forme de filons en sous-sol, [Figure 3.2](#). Le plus connu de ces bitumes naturels est le *bitume de Trinidad*, [Figure 3.3](#), qui relève du premier type de gisement.

Les bitumes naturels subissent des opérations de dégazage et de déshydratation avant d'être conditionnés, le plus souvent, en bacs fusibles.

Au total, la production mondiale est très faible puisqu'elle ne dépasse pas 200 000 t.

Ils sont utilisés e comme ajouts pour certaines utilisations particulières, compte tenu de leurs caractéristiques spécifiques (aptitude à être colorés, effet stabilisateur pour les asphaltes coulés...).



Fig .3.2. Bitume souterrain (<https://planet-terre.ens-lyon.fr/>)



Fig.3.3. Le plus grand lac de Bitume à ciel ouvert de Trinidad (<http://www.voyagecaraibe.com/Trinidad/>)

Asphalte naturel

L'asphalte naturel est constitué par une roche calcaire imprégnée d'hydrocarbures lourds (jusqu'à 20 %), [Figure 3.4](#). Le bitume naturel d'imprégnation a des caractéristiques particulières du fait de l'exsudation par la roche des fractions non colloïdales.

L'asphalte naturel entre traditionnellement dans la composition de l'asphalte coulé. Il peut également être utilisé comme appoint dans les enrobés auxquels il apporte du liant et des fines.



Fig.3.4. Asphalte naturel (www.alamyimages.fr)

Bitume de pétrole

C'est *le principal liant hydrocarboné utilisé dans les chaussées*. Les bitumes de pétrole sont fabriqués par distillation de bruts sélectionnés. Pour obtenir économiquement les propriétés spécifiques à chaque utilisation, on peut utiliser des procédés de soufflage, de précipitation, de mélange et bien souvent une combinaison de ces procédés.

Toutes ces opérations se font en raffinerie et permettent d'obtenir les différentes catégories de liants demandées par les ingénieurs routiers.

Main Bitumen Refinery Processes

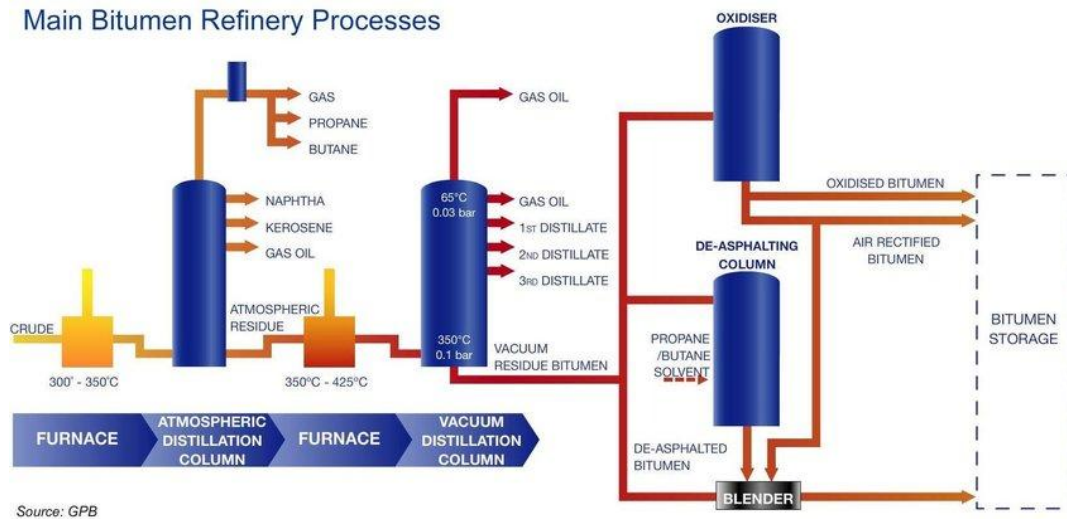


Fig.3.5. Procédures d'extraction de bitume (Source : GPB)

3.2.2. Constitution du bitume

Le bitume est composé d'hydrocarbures de masse moléculaire élevée appartenant en majorité aux groupes aliphatiques et naphténiques, auxquels s'ajoutent en moindre quantité du soufre, de l'azote et des traces de métaux divers. Les hydrocarbures sont pour l'essentiel saturés et donc peu réactifs.

Il se présente comme un système colloïdal dans lequel les micelles sont constituées d'asphaltènes, à forte masse moléculaire, peptisés par des résines, et la phase intermicellaire de maltènes, d'aspect huileux.

Les propriétés des bitumes résultent des proportions et également de la composition chimique précise des différents constituants.

Leurs caractéristiques et leur comportement sont déterminés par un certain nombre d'essais dont les principaux sont décrits ci-après et qui permettent de les classer en catégories normalisées.

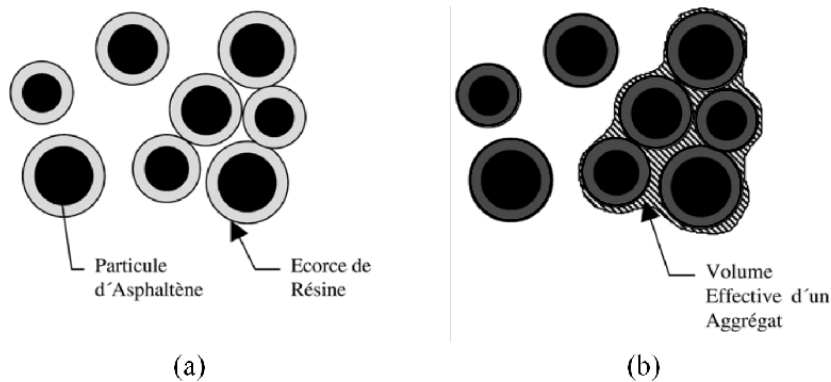


Fig.3.6. composition d'asphalte [29]

3.2.2.1. Principales caractéristiques des bitumes routiers

3.2.2.2. Pénétrabilité

C'est la profondeur d'enfoncement, exprimée en dixièmes de millimètre, d'une aiguille normalisée, de 1 mm de diamètre, sous une charge de 100 g, appliquée pendant 5 s à 25 °C (Figure 3.7).

La pénétrabilité à 25 °C (NF EN 1426[30], ASTM D5/D5M[31]) est l'une des bases de la classification des bitumes routiers. Les spécifications correspondantes se traduisent par deux nombres correspondant aux seuils inférieur et supérieur de pénétrabilité de la classe considérée.

Il existe, en France, cinq classes de bitumes routiers qui sont dans le sens des duretés croissantes : 180-220, 80-100, 60-70, 40-50, 20-30.

Pour mieux définir un bitume, on peut être amené à effectuer des essais à plusieurs, ce qui permet de tracer une courbe de pénétrabilité en fonction de la température, très utile pour apprécier la susceptibilité thermique du bitume.

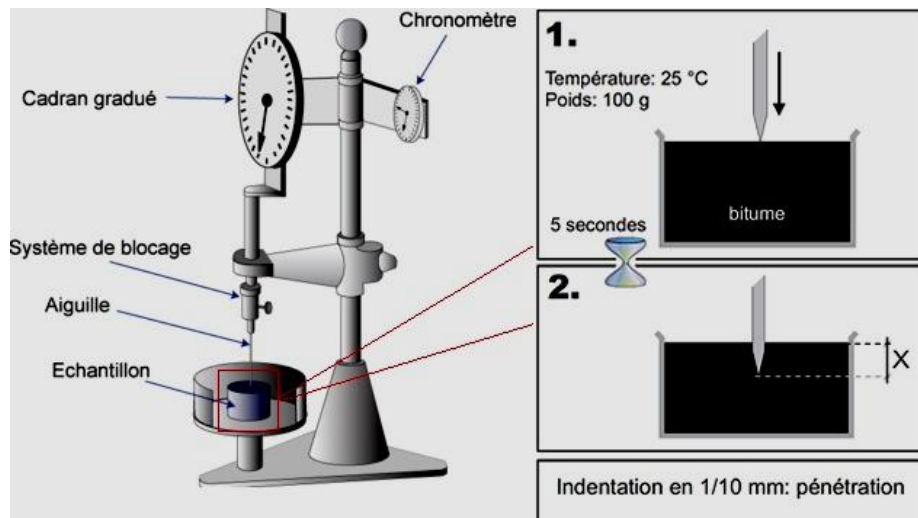


Fig. 3.6. Essai de pénétrabilité à l'aiguille de bitume (modifié de Wikipedia.com)

3.2.2.3. Point de ramollissement bille et anneau

Les bitumes ne sont pas des corps purs, ils n'ont pas de point de fusion franc. Leur consistance décroît quand la température s'élève. On a donc dû fixer arbitrairement un repère de changement de consistance, c'est le point de ramollissement appelé également température bille et anneau (TBA).

L'essai est réalisé au moyen d'une bille d'acier de 3,5 g placée sur un disque de bitume coulé dans un anneau de 15,9 mm de diamètre (Figure 3.7). L'ensemble est placé dans un bain d'eau chauffé à vitesse constante. Sous l'effet du poids de la bille et de la température, le bitume s'étale. Quand la poche ainsi créée touche le plateau inférieur de l'équipage, on note la température atteinte qui caractérise le point de ramollissement

(TBA). Comme pour la pénétrabilité, on donne pour chaque classe de bitume les limites inférieure et supérieure entre lesquelles doivent se situer les valeurs de TBA.

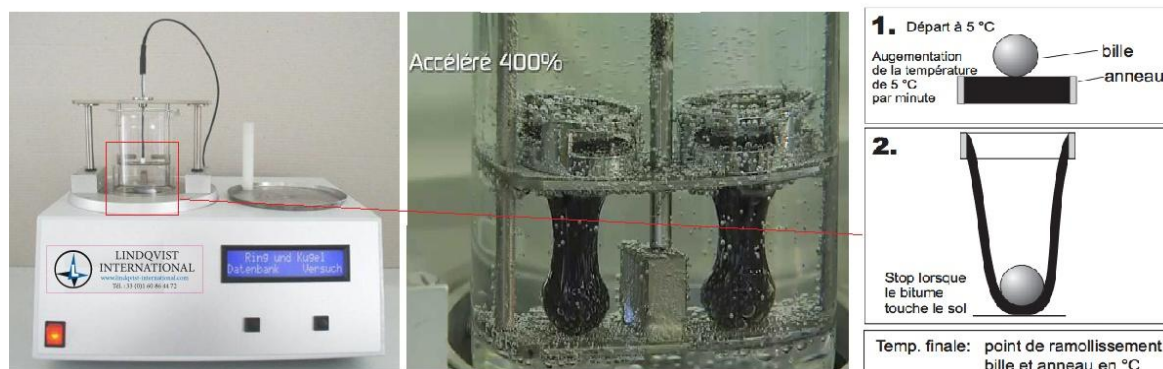


Fig .3.7. Appareil bille et anneau et procédure de mesure de point de ramollissement de bitume

3.2.2.4. Classification des bitumes routiers

Le [Tableau 3.1](#) donne la classification définie par les normes en vigueur. Il faut souligner que cette classification est susceptible d'évolution, pour prendre en compte notamment le vieillissement que provoque l'élévation de température que subit le bitume au cours de l'enrobage. L'effet de cette élévation de température peut être simulé par l'essai RTFOT, Rolling Thin-Film Oven Test (norme [ASTM D 2872\[32\]](#)) qui consiste à soumettre un échantillon de bitume à la température de 163 °C en étuve ventilée pendant 75 min. On mesure ensuite la température bille et anneau et la pénétration du bitume. Une évolution importante de ces deux grandeurs après RTFOT traduit une sensibilité excessive au vieillissement.

- Les bitumes 180-220 sont essentiellement utilisés pour la fabrication des émulsions et la réalisation d'enrobés fins mis en œuvre en couches minces.
- Les bitumes 80-100, 60-70 et 40-50, s'ils sont également utilisés pour la fabrication des émulsions, sont surtout destinés à la confection des enrobés denses, des bétons bitumineux et des graves-bitumes.
- Les bitumes 20-30 sont principalement utilisés pour la confection des couches d'assise en sable-bitume.

Dans le cas de sables de concassage, on peut également employer le bitume 40-50. Sous des climats plus chauds que le climat français, on peut utiliser des bitumes de dureté supérieure.

Tableau 3.1. Classification des bitumes routiers[21]

Qualité	180-220	80-100	60-70	40-50	20-30
Pénétrabilité (25 °C, 100 g, 5 s)(1/10 mm)	180 à 220 34 à 43	70 à 100 42 à 48	50 à 70 46 à 51	35 à 50 50 à 56	20 à 30 52 à 68
Point de ramollissement bille et anneau.....(°C)	1,00 à 1,07 < 2		1,00 à 1,10 < 1		
Densité relative à 25 °C (méthode au picnomètre)					
Perte de masse au chauffage (163 °C, 5 h)(%)	> 70	> 70	> 70	> 70	> 70
Pourcentage de pénétrabilité restant après perte de masse au chauffage par rapport à la pénétrabilité initiale.....					
Point d'éclair (appareil Cleveland).....(°C)	> 230 > 100	> 230 > 100	> 230 > 80	> 250 > 60	> 250 > 25
Ductilité à 25 °C.....(cm)					
Solubilité dans le tétrachloroéthylène (C ₂ Cl ₄).....(%)			> 99,5		
Teneur en paraffine.....(%)			< 4,5		

3.2.3. Bitumes fluidifiés et fluxés

Les bitumes sont très visqueux à température ambiante. On peut les rendre suffisamment fluides par simple chauffage pour permettre l'enrobage des granulats, des enrobés et des graves-bitumes. Par contre, lorsqu'on les utilise en répardage pour les enduits superficiels, plusieurs difficultés apparaissent, liées au maintien de températures élevées dans les répandeuses, au refroidissement trop rapide du film de liant répandu avant gravillonnage (mouillage défectueux), aux difficultés de mise en œuvre.

Deux types de solution ont été mises au point pour abaisser la viscosité à la mise en œuvre, tout en la retrouvant avant la mise en service :

- l'utilisation de diluants ;
- la mise en émulsion dans de l'eau.

Les diluants sont des intermédiaires de mise en œuvre qui permettent de travailler dans des gammes de températures raisonnables tout en facilitant le mouillage. Après application, le diluant doit disparaître pour laisser en place le bitume d'origine. Cette évaporation est plus ou moins complète et demande des durées très variables. Suivant le type de diluant utilisé, on distingue les bitumes fluidifiés et les bitumes fluxés.

3.2.3.1. Bitumes fluidifiés

Le diluant est une fraction légère issue du pétrole. Dans de nombreux pays, ils sont fabriqués sous le nom de cut-back et on les distingue par leur vitesse de séchage, elle-même fonction du fluidifiant (essence, kérosène ou gas-oil).

On distingue traditionnellement les catégories suivantes en fonction de la vitesse de séchage :

- lente (SC, de l'anglais slow-curing) ;
- moyenne (MC, de medium-curing) ;
- rapide (RC, rapid-curing).

En France, compte tenu des conditions climatiques moyennes, les bitumes fluidifiés sont du type MC et sont obtenus par fluidification du bitume par du kérosène. Tous les bitumes routiers peuvent être fluidifiés, mais pour les mêmes raisons climatiques, on

n'utilise pratiquement que du 80-100. La fabrication des bitumes fluidifiés se fait en France exclusivement en raffinerie, pour des raisons de sécurité et d'homogénéité du produit obtenu. Ils n'ont pas une consistance suffisante pour pouvoir être soumis, comme les bitumes, à des essais de pénétrabilité à l'aiguille.

3.2.3.2. Bitumes fluxés

Ils sont obtenus par mélange de bitume et d'huiles de houille à faible volatilité provenant de la distillation du goudron brut. Le mélange est plus fluide que le bitume d'origine et son adhésivité sur les granulats est améliorée.

Contrairement au kérosène des bitumes fluidifiés, une partie des huiles de fluxage reste associée au bitume de base qui se trouve ainsi plastifié. Les bitumes fluxés sont fabriqués directement par les entreprises routières. La fabrication s'effectue soit en discontinu, par gâchées successives dans des bacs munis d'un système de malaxage, soit en continu dans des unités de fluxage en ligne. Le choix des huiles de houille permet d'ajuster la durée de séchage du produit obtenu.

3.2.3.3. Principales caractéristiques des bitumes fluidifiés et fluxés

Outre les essais qui permettent de caractériser le bitume entrant dans la composition du produit, les bitumes fluidifiés et fluxés sont caractérisés par un certain nombre d'essais spécifiques, adaptés à leurs particularités. Ce sont les suivants :

- Distillation fractionnée : réalisée dans des conditions normalisées, elle permet de déterminer la fraction distillant au-dessous des températures de 190, 225, 315 et 360 °C.
- Pseudoviscosité : elle caractérise de façon indirecte la viscosité du produit.

Elle est déterminée dans le viscosimètre STV (Standard Tar Viscosimeter) nommé antérieurement BRTA (British Road Tar Association). Cet appareil ([Figure 3.8](#)) permet de déterminer la vitesse d'écoulement du produit à travers deux orifices de 10 mm et 4 mm respectivement tout en le maintenant à une température constante.



Fig .3.8. Standard Tar Viscosimeter (www.indiamart.com)

3.2.4. Émulsions de bitume

Au lieu de le fluidifier ou de le fluxer, on peut aussi transformer le bitume en un produit fluide en l'émulsionnant, c'est-à-dire le disperser dans l'eau sous forme de fines gouttelettes de quelques micromètres. Cette émulsion est stabilisée par l'emploi d'un corps organique à longue chaîne qui :

- abaisse la tension interfaciale eau-bitume ;
- se fixe à la surface des micelles de bitume en les chargeant électriquement et en créant entre elles un effet de répulsion qui assure leur stabilité.

Les émulsions sont de deux types :

- les émulsions anioniques dans lesquelles le radical lipophile, c'est-à-dire celui qui se fixe sur la gouttelette de bitume, est négatif.

Les gouttelettes sont donc chargées négativement. Les émulsifiants correspondants sont des bases du type : $\text{RCOO}^- \text{Na}^+$

- les émulsions cationiques dans lesquelles le radical lipophile est positif. L'émulsifiant est dans ce cas un acide du type :

Les émulsions se rompent au contact des granulats, et cela pour diverses raisons. D'une part, les charges électrostatiques des gouttelettes de bitume sont neutralisées par les charges contraires du minéral, d'autre part, il y a toujours absorption d'eau par la pierre. L'émulsion se sépare alors en deux phases : le bitume qui adhère aux granulats et l'eau qui s'évacue et s'évapore.

Les émulsions anioniques se rompent mieux avec les matériaux basiques tels que les calcaires.

Les émulsions les plus utilisées actuellement sont des émulsions cationiques, qui permettent d'obtenir la rupture sur des matériaux acides aussi bien que basiques.

Le liant de base peut être soit du bitume pur, soit du bitume fluxé ou amélioré. $\text{RNH}_3^+ \text{Cl}^-$

Des procédés ont été mis au point pour maîtriser la rupture des émulsions utilisées pour les enduits superficiels. Ils permettent de les réaliser dans des conditions telles que les procédés traditionnels conduiraient à des échecs, en raison, soit de la faible température, soit de l'humidité du support. Ces procédés consistent, soit à pulvériser en même temps que le répandage de l'émulsion un agent de rupture, soit à utiliser des émulsifiants spéciaux.

3.2.4.1. Fabrication

Les constituants de l'émulsion (eau, bitume préalablement réchauffé et émulsifiant) sont introduits par des pompes doseuses entre le stator et le rotor d'une turbine tournant à grande vitesse.

Les produits sont laminés, mélangés et émulsifiés par le cisaillement ainsi obtenu.

Ces opérations se font dans des usines de fabrication. Les émulsions produites sont stockées dans des cuves en attendant leur livraison.

3.2.4.2. Principales caractéristiques

Les émulsions sont caractérisées par un certain nombre d'essais :

— teneur en eau, déterminée par distillation dans des conditions normalisées et pH de la phase aqueuse ;

— indice de rupture, que l'on mesure en introduisant régulièrement des fines siliceuses normalisées dans 100 g d'émulsion.

L'indice de rupture s'exprime par le poids de fines qui conduit à l'agglomération du bitume de l'émulsion ;

— pseudoviscosité appréciée soit avec le viscosimètre STV déjà cité, soit avec le pseudoviscosimètre Engler dont le principe est de mesurer le temps d'écoulement de 200 cm³ d'émulsion à 20 °C et à le diviser par le temps d'écoulement de 200 cm³ d'eau. Il est réalisé dans l'appareil représenté sur la [Figure 3.9](#).



Fig .3.9. Mesure du temps d'écoulement par viscosimètre d'Engler (modifié de : <http://www.cqtestkit.com/products.asp?sid=31&id=20>)

Ces essais permettent de définir les classifications normalisées représentées sur les [Tableaux 3.3 et 3.4](#).

Le **Tableau 3.5** récapitule, pour chaque catégorie d'utilisation, les teneurs en liant et les fourchettes de viscosité recommandées.

Du point de vue de la vitesse de rupture, on utilise :

- des émulsions à rupture rapide pour les enduits et les emplois partiels au point-à-temps ;
- des émulsions à rupture lente pour les enrobés denses à froid et semi-denses, les graves-émulsions, les matériaux destinés aux coulis bitumeux, les granulats pré-enrobés, les retraitements, stabilisations et imprégnations.

Tableau .3.5. Les utilisations des émulsions de bitume

Utilisation	Teneur en liant (%)	Viscosité (en degree Engler)
Imprégnations, couches d'accrochage.....	55	2 à 6
Couches d'accrochage, enrobés, enrobés coulés à froid, enduits superficiels.....	60	2 à 6
Enrobés, graves-émulsions, enduits superficiels.....	65	6 à 15
Enduits superficiels.....	69 et plus	15 à 30

3.2.5. Bitumes modifiés

Ce sont des mélanges de bitume et d'additifs destinés à améliorer les qualités intrinsèques du liant. Cette amélioration se traduit par les effets suivants :

- réduction de la susceptibilité thermique (augmentation de la rigidité à haute température pour réduire l'orniérage, rigidité plus faible à basse température pour réduire les risques de fissuration), ce qui est également favorable du point de vue des températures de malaxage et de pose ;
- amélioration du comportement en fatigue ;
- augmentation de l'adhésivité en présence d'eau ;
- possibilité d'employer un dosage en liant plus élevé, propriété très intéressante dans le cas des enrobés drainants.

En contrepartie d'une augmentation du prix, ils permettent donc de donner au bitume des caractéristiques mieux adaptées à certaines catégories d'utilisation et à certains environnements climatiques.

On les utilise à la fois pour les enduits superficiels, pour des enrobés courants ou spéciaux, en membrane, en chape d'étanchéité pour tabliers de ponts.

Les types d'additifs sont très nombreux et chaque type conduit à des modifications tout à fait spécifiques :

- fines minérales : chaux, ciment portland...
- fibres : laine minérale, polypropylène, polyesters...
- caoutchoucs (élastomères) : latex naturel, latex synthétique (styrène-butadiène), copolymères (styrène-butadiène-styrène ou SBS), caoutchouc recyclé...

— plastiques (plastomères) : polyéthylène, polypropylène, éthylène-vinylacétate (EVA), polychlorure de vinyle (PVC)...

Ces bitumes ne sont, pour l'instant, pas normalisés. Les performances sont évaluées par les méthodes traditionnelles en attachant une importance particulière aux propriétés que l'on souhaite améliorer : influence de la température sur la viscosité, résistance à l'orniérage, etc.

3.3. Liants hydrauliques et pouzzolaniques

Ce sont des produits capables, lorsqu'on les met en présence d'eau, de donner lieu à un phénomène de prise, c'est-à-dire à des mécanismes de dissolution et de recristallisation qui rigidifient le produit jusqu'à en faire une véritable roche. Ces liants ne sont pas utilisés seuls, mais ajoutés en faible proportion à des granulats. On peut les classer en trois catégories :

- a) *les liants hydrauliques* au sens strict qui forment, par réaction avec l'eau, des composés hydratés stables présentant entre eux et avec les granulats une forte adhérence. Ce sont les ciments et les cendres volantes hydrauliques. Ces dernières proviennent de la combustion de lignite dans les centrales thermiques. C'est le cas, en France, des cendres de Gardanne ;
- b) *les liants dont les propriétés hydrauliques ne se manifestent qu'en présence d'un activant*. C'est le cas du laitier qui ne réagit qu'en présence de bases telles que la chaux ou le gypse sodé ;
- c) *les liants pouzzolaniques* qui réagissent après addition de chaux en proportion appropriée. La chaux n'est plus seulement un activant, mais un élément de la réaction qui s'intègre dans les édifices moléculaires qui se créent au cours de la cristallisation. Entrent dans cette catégorie les pouzzolanes volcaniques (qui, additionnées de chaux, donnaient le ciment des romains) et les cendres volantes silico-alumineuses provenant des centrales thermiques au charbon.

Dans tous les cas, il s'agit de produits vitreux, donc métastables. Les mécanismes de dissolution et de recristallisation évoqués précédemment les font évoluer vers une configuration cristalline stable. Dans le cas des liants de type b, le problème est d'amorcer le mécanisme en permettant la dissolution qui ne se produit pas en pH neutre. Dans le cas c, il est à la fois de permettre la dissolution et de mettre en présence tous les éléments nécessaires pour constituer les composants cristallins.

La [Figure 3.10](#) situe les différents produits que nous allons examiner sur le diagramme classique $\text{CaO}/\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$.

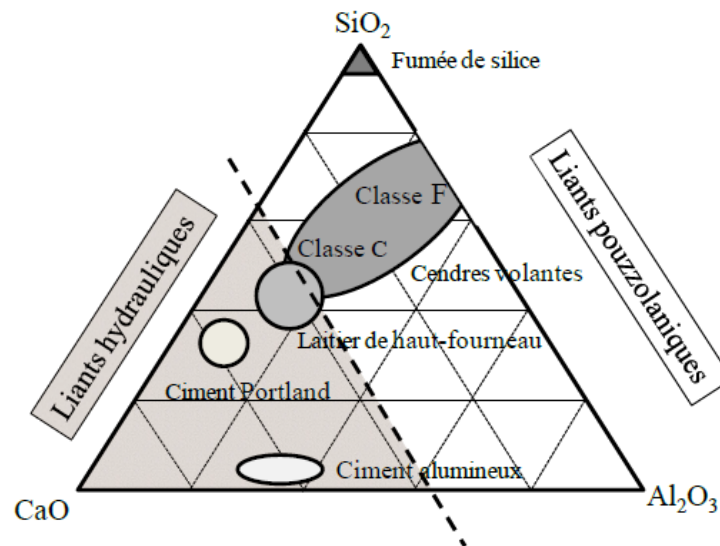


Fig. 3.10. Diagramme des phases des ciments et des ajouts minéraux
 (<https://docplayer.fr/28537236-Universite-de-montreal-caracterisation-en-laboratoire-des-remblais-en-pate-cimentes-avec-ajout-de-granulats-steriles-concasses-ibrahima-hane.html>)

3.3.1. Ciments

Les ciments, [Figure 3.11](#), sont des produits constitués essentiellement de silicates et d'aluminates de calcium anhydres obtenus par broyage de clinker. Le clinker est lui-même obtenu par cuisson à haute température d'un mélange approprié de calcaire et d'argile en proportion moyenne de 80 % - 20 %. Le clinker peut être additionné de laitier, de pouzzolanes naturelles, de cendres volantes, etc.



Fig .3.11. Le ciment Portland

La gamme des ciments est très étendue et fait l'objet d'une normalisation précise

Note. Veuillez consulter la documentation gratuite de Cimbéton via www.infociments.fr/ pour les types les aspects liés aux ciments et bétons) ; et Les livres de référence : de [Neuville\[35\]](#) et de [Mehta\[36\]](#).

Outre les ciments normalisés, certaines usines proposent des liants spécialement adaptés à la fabrication des graves traitées. On cherche pour ces liants un début de prise plus lent et un durcissement plus progressif, permettant une mise en œuvre plus commode. On obtient ce résultat en jouant sur la composition (généralement à base de laitier ou de cendres volantes) et sur la finesse de mouture.

L'auteur recommande à nos lecteurs le recours au Tableau de l'[ASTM C150\[37\]](#) pour le choix de type de ciment selon l'utilisation souhaitée.

Tableau .3.6. Domaines d'application et composition minéralogique des ciments ([ASTM C150](#))

Type de ciment	Norme ASTM C 150	C ₃ S	C ₂ S	C ₃ A	C ₄ AF	Finesse m ² /kg
I	Usage général	55	19	10	7	370
II	Résistance modérée aux sulfates et moyenne chaleur d'hydratation	51	24	6	11	370
III	Résistance élevée à jeune âge	56	19	10	7	540
IV	Faible chaleur d'hydratation	28	49	4	12	380
V	Résistance aux sulfates	38	43	4	9	380

3.3.2. Ajouts minéraux

Selon Ramachandran [\[38\]](#), les ajouts minéraux sont des produits fins, ajoutés aux mortiers et bétons afin d'obtenir des propriétés spécifiques. Contrairement aux ajouts chimiques (adjuvants), ils sont incorporés avec un taux relativement élevé (5-80 %). Ils sont introduits lors de la fabrication des ciments, ou bien ajoutés en substitution massique au ciment dans la composition des bétons.

D'après la norme européenne [EN 206-1\[39\]](#), on distingue deux types d'additifs, Type I et Type II (selon le degré de réactivité de l'ajout exprimé par la valeur du coefficient d'équivalence k). Le type I englobe les ajouts inertes et semi-inertes, et le type II les ajouts pozzolaniques et Hydrauliques. Le [Tableau 3.7](#) présente cette classification et les ajouts entrant dans chaque type.

Tableau 6 - Classification des additifs selon la norme EN 206-1

TYPE I	Inerte ou semi-inerte	Cendres volantes pulvérisées	BS 3892 Part 2
		Filler minéral (calcaire, dolomite...)	BS EN 12620
		Filler granulé vitreux	(needs to be tested for conformity)
		Pigments	BS EN 12878
TYPE II	Pozzolanique	Cendres volantes	BS EN 450
		Cendres volantes pulvérisées	BS 3892 Part 1.
		Fumée de silice	prEN 13263
		Pozzolane naturelle	
	Hydraulique	Laitier granulé de haut fourneau	BS 6699

3.3.2.1. Laitiers de haut-fourneau

Le laitier de haut-fourneau est la scorie en fusion provenant du traitement des minerais de fer. La température de sortie du creuset va de 1 450 à 1 600 °C. Laissé à l'air libre, le laitier se refroidit lentement en donnant un produit cristallisé inerte qui, concassé, est utilisé comme granulats.

Un refroidissement brutal en fait un produit vitreux qui le rend apte, dans certaines conditions, à donner lieu au phénomène de prise. Le refroidissement brutal peut être obtenu de deux façons différentes :

— soit dans un pot de granulation soumis à des jets d'eau sous pression. On obtient alors un sable granulé 0 / 5 appelé laitier granulé ;

— soit en projetant le laitier en fusion dans une atmosphère sursaturée d'eau, à l'aide d'un tambour tournant à grande vitesse. On obtient alors le laitier bouleté, grave 0/20 dont on sépare par criblage la fraction 0/4 qui est utilisée pour la route.

On augmente le pouvoir hydraulique du laitier bouleté par broyage jusqu'à obtention de 10 à 15 % de fines. Ce broyage préalable peut également être réalisé sur le laitier granulé pour en augmenter la réactivité. Le laitier ayant subi ce traitement est appelé laitier pré-broyé.

Les teneurs en fines généralement requises sont de 10 % en moyenne pour les laitiers granulés prébroyés et de 15 % pour les laitiers bouletés prébroyés.

Les laitiers granulés sont caractérisés par leur « coefficient α ». C'est le produit, divisé par 1 000, de la surface spécifique des fines du laitier par le pourcentage de fines obtenu par un broyage normalisé dans un broyeur à boulets.

Le coefficient α est une relation avec la vitesse de prise et la résistance à long terme des graves traitées. On distingue quatre classes de laitier :

- $\alpha \leq 20$ non employé en technique routière
- $20 < \alpha < 40$ (20/40) catégorie courante
- $40 < \alpha < 60$ (40/60) réservé aux granulats difficiles (sables, granulats peu anguleux)
- $60 < \alpha$ classe exceptionnelle

3.3.2.2. Cendres volantes

Les cendres volantes sont le résidu de la combustion dans les centrales thermiques de charbon ou de lignite pulvérisés. Ce sont de fines particules transportées par les fumées de la centrale et captées par des dépoussiéreurs électrostatiques. Les cendres volantes provenant de la combustion de houille ont des teneurs élevées en silice et en alumine, et une faible teneur en chaux et en sulfates. Ce sont les cendres volantes silico-alumineuses qui représentent 95 % de la production de cendres volantes. Celles qui proviennent de la combustion du lignite ont des teneurs en silice et alumine plus faibles et des teneurs en chaux et en SO₃ nettement plus élevées. Ce sont des cendres volantes sulfocalciques.

Les premières doivent être additionnées de chaux pour faire prise, les secondes font prise naturellement, comme de véritables ciments.

Les cendres volantes sont des matériaux très friables, très fins (dimension maximale 0,2 mm), elles sont légères (1,2 à 1,4 g/cm³ à sec après compactage), elles sont très hydrophiles, pouvant absorber 20 à 25 % d'eau sans perdre leur stabilité.

Il n'existe aucun essai simple et rapide permettant de caractériser leur réactivité et il faut donc faire des études de résistance dans chaque cas particulier.

3.3.2.3. Pouzzolanes

Ce sont les scories de certains types d'éruption volcanique. À l'état naturel, il s'agit de roches poreuses, légères, friables, dont la granularité est de l'ordre de 2 à 20 mm avec une couleur variable (du rouge au gris et au noir).

Pour l'emploi en traitement d'assises de chaussée, elles sont broyées en usine pour obtenir un sable 0/3 à 0,5 mm, avec une moyenne de 12 % de fines.

Mélangées avec de la chaux, elles donnent lieu à un phénomène de prise, d'autant plus marquée que la teneur en fines est plus élevée.

3.3.2.4. Fumée de silice

La fumée de silice est un sous-produit de la fabrication du silicium [40]. Elle est considérée comme l'ajout le plus efficace et le plus utilisé au monde. Ses grains ont une forme sphérique avec une taille de 0.03-0.3 µm²³ (comme représenté dans la Figure 3.12), une surface spécifique d'environ 20 000 m²/kg. Il existe plusieurs types de la fumée de silice, la plus répandue est la fumée de silice densifiée avec une densité de 500-700 kg/m³.

Chimiquement, la fumée de silice est composée essentiellement de silice à environ 95 % et d'autres composants.

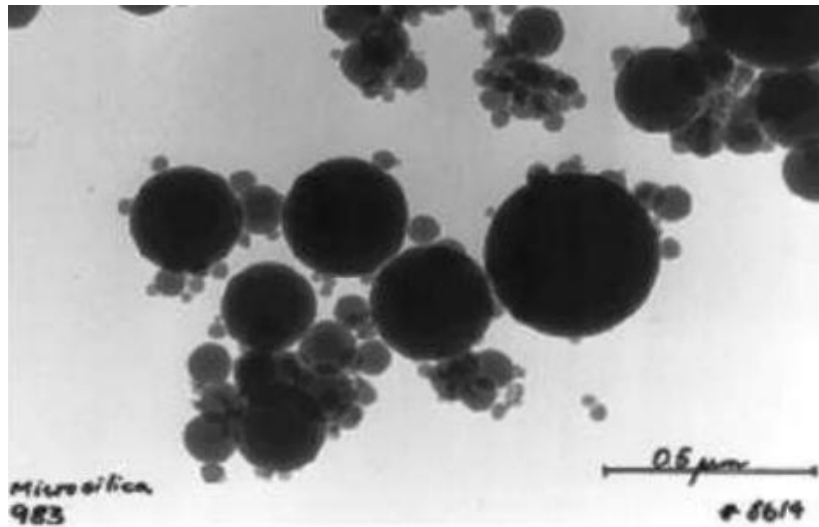


Fig .3.12. La fumée de silice sous MEB [41]

Questions

- 3.1. Parlez SVP du rôle de liant dans une matrice cimentaire ?
- 3.2. Comment un liant participe-il dans la résistance mécanique d'un mélange ?
- 3.3. Est-ce que tous les liants noirs sont acceptables pour utilisation en route ?

CHAPITRE 4

Matériaux des Couches de Chaussées

Aperçu

Le chapitre 4 donne plus de détails sur les caractéristiques des couches entrants dans la composition de différentes catégories de chaussées. De plus, on a avancé des précisions concernant la palette nant des matériaux permis dans chaque couche. En outre, des descriptifs fonctionnels et pratiques sont évoqué sur le sol support, la couche de forme et les assises. Avec plus de détails sur la couche de roulement.

4.1. Introduction

Une chaussée est constituée de plusieurs couches, [Figure 1.7](#), mises en œuvre sur le sol support.

- Le sol support est généralement surmonté d'une **couche de forme** dont la fonction est double : pendant les travaux, *elle permet la circulation des engins*, tandis que d'un point de vue mécanique, *elle permet de rendre plus homogène le sol support* et de le *protéger du gel*.
- Le **corps de la chaussée** proprement dit est constitué de deux types de couche, les *couches d'assise* et la *couche de surface*. L'assise de la chaussée est généralement constituée de deux couches, la *couche de fondation* et, par-dessus, la *couche de base*. Ces couches, généralement constituées de matériaux liés, *permettent à la chaussée de résister mécaniquement aux charges induites par le trafic*.
- Quant à la **couche de surface**, elle est constituée de la *couche de roulement* (ou d'usure) qui subit directement les agressions du trafic et du climat, à laquelle s'ajoute éventuellement une *couche de liaison, chargée d'assurer la liaison entre la couche de roulement et l'assise*.

- La construction d'une route passe par les **étapes** de choix de tracé, terrassement (préparation du terrain, comblement des trous, rognage des bosses, planéité de l'arase de terrassement), mise en œuvre d'une *couche de forme (elle participe au fonctionnement mécanique de la chaussée)*, puis d'une *couche d'assise (elle apporte la résistance mécanique aux charges)*, puis d'une *couche d'accrochage (liaison entre couche d'assise et couche de roulement, elle est réalisée avec une émulsion de bitume)*, et enfin *d'une couche de roulement (elle assure confort et sécurité à l'utilisateur de la route, ainsi que l'étanchéité du revêtement)*.
- Concernant **l'environnement immédiat de la chaussée**, nous distinguons tout d'abord l'accotement, qui est la zone s'étendant de la limite de la chaussée à la limite de la plate-forme. Cet accotement comprend une bande dérasée – appelée bande d'arrêt – qui est une zone dégagée de tout obstacle, permettant la récupération des véhicules déviant de leur trajectoire, ainsi que l'évitement de collision multi-véhicules (elle autorise des manœuvres d'urgence de déport latéral sur l'accotement). Elle permet également l'arrêt des véhicules en dehors de la chaussée. Enfin, elle facilite les opérations d'entretien de la chaussée et de ses dépendances. L'accotement comprend également la berme, qui est la partie non rotable de celui-ci, et qui assure la transition entre les structures stabilisées et les talus ou cunettes. Elle participe aux dégagements visuels et porte certains panneaux de signalisation, ou encore des équipements (dispositifs de retenue en grand remblai, réseaux de concessionnaires. . .). Le talus est la partie pentue aux extrémités d'un profil en travers en déblai ou en remblai, partie dont la pente est indiquée sous forme de fraction exprimant la pente par rapport à la verticale. Quant à la cunette, c'est un fossé peu profond, engazonné ou revêtu et aux formes douces (afin d'améliorer la sécurité) ; essentiellement utilisée en pied de talus ou de déblai, elle récupère les eaux issues de la chaussée, de l'accotement et du talus.

Une route est constituée de granulats ou de sols à 90 %, voire 100 %. Les 0 à 10 % restants peuvent être :

- de l'eau : introduite lors de la mise en œuvre, elle permet de lubrifier les granulats ; son évaporation ultérieure permet de revenir aux propriétés initiales de la roche et des granulats ; on parle dans ce cas de chaussée en grave non traitée (GNT) ;
- des *liants hydrauliques* : ces liants assurent une liaison solide entre les granulats par la formation de cristaux insolubles, et confère à la route une grande rigidité de structure, une faible déformabilité et une incapacité de glissement ou relaxation ;
- des *liants hydrocarbonés* : se présentant sous forme de colle bitumineuse fusible sensible à la température, ils permettent la liaison par forces adhésives des granulats entre eux ; ils confèrent à la route une certaine souplesse – d'où l'appellation commune de chaussée souple voire une certaine mollesse, ainsi qu'une capacité de relaxation et de glissements.

En matière de sécurité, *la couche de roulement doit posséder de bonnes propriétés anti-dérapantes*, c.-à-d. une bonne rugosité. Il faut distinguer la microrugosité, qui résulte de la structure de la roche dont sont issus les granulats et qui conditionne le contact pneu-granat, et la macrorugosité, qui résulte des dénivellations de la surface occasionnées par la juxtaposition des granulats de formes et de grosseurs irrégulières.

Aux vitesses généralement pratiquées sur les routes, la macrorugosité est prépondérante et sa diminution – a fortiori sa disparition – entraîne un risque d'aquaplanage par temps de pluie. La rugosité s'apprécie par la hauteur de sable (HS) et par les coefficients de frottement longitudinal (CFL) et transversal (CFT).

La fonction de drainabilité est une conséquence de la fonction de rugosité : sur une chaussée à macrorugosité élevée, l'eau est drainée par les nombreux canaux intergranulaire et évacuée vers les rives.

La fonction de retardement dans la formation de verglas est également assurée par un enduit superficiel : en effet, la couche de glace en formation – tant qu'elle reste mince est désagrégée par la circulation.

Enfin, il est fondamental pour la pérennité des chaussées que les couches inférieures soient strictement à l'abri des eaux de ruissellement : c'est là la fonction d'étanchéité de l'enduit superficiel.

En matière de confort, elle doit présenter *un bon uni*, afin que l'utilisateur ne ressente pas dans son véhicule de secousses brutales ou de vibrations excessives. Notons que le mauvais uni peut entraîner une perte d'adhérence ou rendre la chaussée trop bruyante. Enfin, la couche de roulement – qui subit directement les agressions du trafic et celles liées aux conditions climatiques – doit faire obstacle à la pénétration d'eau dans les assises de chaussées. Enfin, la chaussée doit être la moins bruyante possible : rappelons qu'au-delà de 60 km/h, c'est le bruit du contact du pneumatique sur la chaussée qui est prépondérant par rapport au bruit du moteur. Un enrobé drainant, par exemple, permet de réduire de 2 à 3 dB la gêne sonore : cette réduction est équivalente à une division par deux du trafic. . .

4.2. Généralités et rappels

4.2.1. Nomenclature

SETR/LCPC [42]

Général

BBSG : Béton bitumineux semi-grenu

BBME : Béton bitumineux à module élevé

BBM : Béton bitumineux mince

BBD_r : Béton bitumineux drainant

BBTM : Béton bitumineux très mince

BBUM : Béton bitumineux ultra- mince

BBS : Béton bitumineux pour chaussée souple à faible trafic

GNT : Grave non traitée

GB : Grave-bitume

ECF : Enrobés coulés à froid

EME : Enrobé à module élevé

ESU : Enduits superficiels d'usure

Rc : béton, produits en béton, mortier, éléments de maçonnerie en béton contenus dans un granulat recyclé

Ru : granulats non liés, pierre naturelle, granulats traités aux liants hydrauliques contenus dans un granulat recyclé

Rcu : correspond à Rc + Ru

Rg : verres contenus dans un granulat recyclé

Rcug : correspond à Rc + Ru + Rg

Ra : matériau bitumineux contenu dans un granulat recyclé

Rb : éléments en argile cuite (briques et tuiles), éléments en silicate de calcium, béton cellulaire non flottant contenus dans un granulat recyclé

X : argiles, sols, métaux ferreux et non ferreux, bois, plastiques, caoutchouc non flottants, plâtre contenus dans un granulat recyclé

XRg : correspond à X + Rg

FL : matériau flottant (exprimé en volume) contenu dans un granulat recyclé

Matériaux

BAC	béton armé continu
BB	béton bitumineux
BBDr	béton bitumineux drainant
BBM	béton bitumineux mince
BBMa	béton bitumineux mince de classe a
BBME	béton bitumineux à module élevé
BBS	béton bitumineux pour chaussée souple à faible trafic
BBSG	béton bitumineux semi-grenu
BBTM	béton bitumineux très mince
BCi	béton de ciment de classe i
BCig	béton de ciment goujonné de classe i
CD	couche drainante
CS	couche de surface
CV	cendres volantes
EMEi	enrobé à module élevé de classe i
GBi	grave-bitume de classe i
GCH	grave-cendre hydraulique
GCi	grave-ciment de classe i
GCV	grave-cendres volantes silico-alumineuses-chaux
GH	grave traitée aux liants hydrauliques
Gi et Si	classes des matériaux
GLg	grave-laitier granulé
GLp	grave-laitier préboyé
GLR	grave traitée aux liants routiers
GNT (BiCj)	grave non traitée (de type Bi et de classe mécanique Cj)
LTCC	limon traité à la chaux-ciment
MTLH	matériaux traités aux liants hydrauliques
SCi	sable traité au ciment de classe i
SH	sables traités aux liants hydrauliques
SLi (ou SLP)	sable traité au laitier (préboyé) de classe i

Support de chaussée (LCPC)

A, B, C, D, R, F	classes des sols et matériaux rocheux (cf. Guide technique «Réalisation des remblais et des couches de forme»)
AR	arase de terrassement
ARi	classe de portance à long terme de l'arase de terrassement
EV ₂	module à la plaque au second cycle de chargement
Ip	indice de plasticité (%)
PFi	classe de portance à long terme de la plate-forme support de chaussée
PST	partie supérieure des terrassements
R _t	résistance à la traction directe (MPa)
VBS	valeur de bleu de méthylène d'un sol (g de bleu pour 100g de sol)

4.2.2. Les classes de trafic

Les classes de trafic sont définies par des seuils exprimés en trafic poids lourds journalier moyen (PL- MJA) de la voie la plus chargée, les poids lourds étant tous des véhicules de charge utile supérieure ou égale à 5 tonnes.

Tableau 4.1. Rappel sur les classes de trafic

Classes de trafic	T5	T4	T3	T2	T1	T0	>T0
Seuils de trafic (PL-MJA)	25	50	150	300	750	2000	

4.3. Constitution des structures des chaussées

Comme déjà évoqué dans le Chapitre 1 et la section précédente, on donne ici quelques détails sur les structures types de chaussées et ses matériaux (selon le catalogue de LCPC).

Les structures de chaussée sont constituées de plusieurs couches comme l'indique le schéma suivant (Figure 4.1).



Fig .4.1. Structure type de chaussée[42]

4.3.1. Les chaussées bitumineuses épaisses

Elles se composent d'une couche de surface bitumineuse sur une assise en matériaux traités aux liants hydrocarbonés;

4.3.2. Les chaussées a assise traitée aux liants hydrauliques

Elles comprennent une couche de surface bitumineuse sur une assise en matériaux traités aux liants hydrauliques ;

4.3.3. Les structures mixtes

Elles comportent une couche de surface et une couche de base en matériaux bitumineux sur une couche de fondation en matériaux traités aux liants hydrauliques. De plus, le rapport de l'épaisseur de matériaux bitumineux à l'épaisseur totale de chaussée est de 0,5;

4.3.4. Les chaussées en béton de ciment

la couche de béton de ciment, qui sert aussi de couche de roulement, repose soit sur une couche de fondation en matériaux traités aux liants hydrauliques ou en béton maigre, soit sur une couche drainante en matériaux granulaires ("dalle épaisse") soit sur une couche d'enrobé reposant elle même sur une couche de forme traitée aux liants hydrauliques;

4.3.5. Les structures souples

Elles comportent une couverture bitumineuse relativement mince, reposant sur une ou plusieurs couches de matériaux granulaires non traités;

4.3.6. Les structures Inverses

Elles se composent d'une couche de surface et d'une couche de base en matériaux bitumineux, sur une couche en grave non traitée de faible épaisseur, reposant elle-même sur une couche de forme traitée aux liants hydrauliques qui joue également le rôle de couche de fondation.

4.4. Description des structures et classes des matériaux utilisés

Dans cette section on aborde les six familles de structures des chaussées (selon la normalisation française) :

- les matériaux utilisés,
- les structures de référence retenues, c'est-à-dire les combinaisons des différents matériaux utilisés en assise,
- les conditions de collage aux interfaces des couches.

4.4.1. Structures bitumineuses épaisses

• Matériaux utilisés

Les matériaux utilisés dans les structures bitumineuses épaisses sont les suivants :

- grave-bitume de classe 2, GB2
- grave-bitume de classe 3, GB3
- enrobé à module élevé de classe 2, EME2.

Ces matériaux ont été retenus car ils possèdent une bonne tenue à la fatigue.

La grave-bitume de classe 3 présente une meilleure tenue à la fatigue que la grave bitume de classe 2, mais cette dernière est intéressante dans les régions riches en granulats ou pour les structures à faible trafic sur une plate-forme de bonne qualité.

Les structures de référence choisies excluent les graves bitume de classe 1 qui ne sont pas autorisées sur le réseau routier national non concédé, et les enrobés à module élevé de classe 1 dont le comportement est mal connu.

• Structures de référence

Elles sont récapitulées ci-contre (Figure 4.2). Pour toute structure dont l'épaisseur totale d'assise en matériau bitumineux est inférieure ou égale à 12 cm, il convient d'exiger un nivellement de la plate-forme à ± 2 cm. Il peut être obtenu, par exemple, par apport d'une couche de réglage d'au moins 10 cm en grave non traitée insensible à l'eau (teneur en fines < 8 %), mise en œuvre avec un engin guidé, et de granularité adaptée à l'épaisseur appliquée.

La structure GB2/GB3 n'est pas retenue, bien que son dimensionnement soit le même que celui de la structure GB3/GB3 et qu'elle soit ainsi plus économique. Toutefois, à même épaisseur, une grave-bitume de classe 2 s'opposera moins bien qu'une grave-bitume de classe 3 à la remontée des fissures de fatigue en surface.

• Conditions aux interfaces

Toutes les couches sont considérées comme collées.

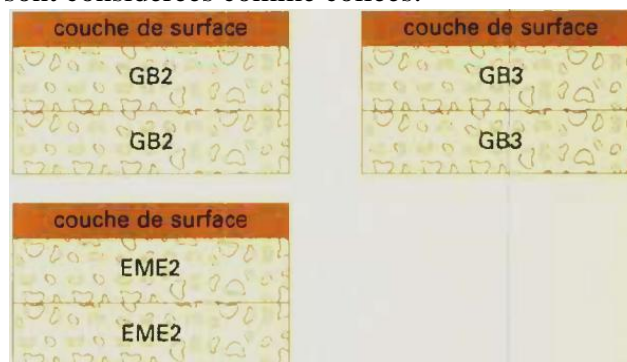


Figure .4.2. Structures bitumineuses de référence[42]

4.4.2. Les structures à assise traitée aux liants hydrauliques

• Matériaux utilisés

Son évoque ici les matériaux définis dans le Tableau 4.2 ci-dessous.

Tableau .4.2. Matériaux utilisés dans les structures traitées aux liants hydrauliques [42]

Matériaux	Classe	Conditions d'utilisation	Résistance minimale en traction directe en laboratoire
Grave-ciment (GC)	G3,G4		
Grave-liant routier (GLR)	G3	Base et fondation	cf Normes
Grave-cendres hydrauliques (GCH)	G3		
Grave-laitier prébroyé * (GLp)	G2	Base et fondation	0,9 MPa à 360 jours
Grave-laitier granulé (GLg) ou grave-laitier prébroyé **	G1	Base et fondation	0,65 MPa à 360 jours
Grave-cendres volantes silico-alumineuses-chaux (GCV)	G3	Base et fondation	1,5 MPa à 360 jours
Sables traités (structures GH/SH)	S2 ou S3	Fondation sous GH avec même traitement	cf Normes
Sables traités (structures SH)	S3	Base et fondation	cf Normes

* activant sulfatique ou calcique autre que la chaux
** activant chaux

• Structures de référence

Elles sont récapitulées ci-dessous (figure 3).

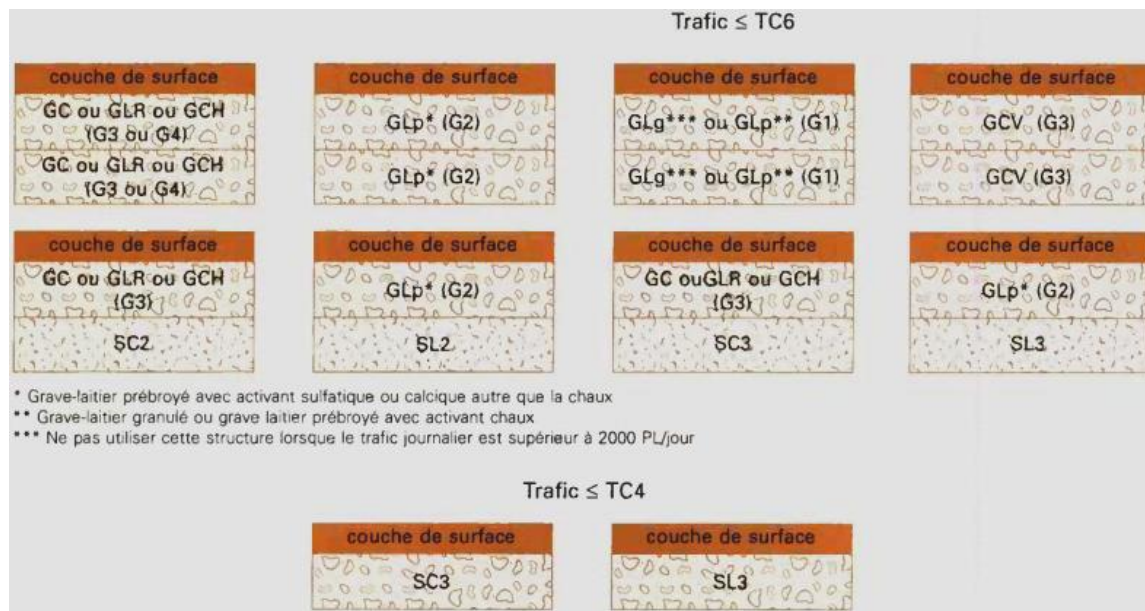


Fig .4.3. Structures à assises traitées aux liants hydrauliques de référence [42]

• Préfi ssuration

Lorsque le trafic est supérieur ou égal à TC6, la préfi ssuration des matériaux traités aux liants hydrauliques en couche de base est obligatoire afin de diminuer les conséquences de l'évolution des fissures de retrait. Pour les autres trafics, la préfi ssuration est vivement conseillée. Pour la grave-ciment de classe 4, la préfi ssuration est obligatoire quel que soit le trafic. On considère que la préfi ssuration n'a pas d'incidence sur le dimensionnement.

• **Conditions aux interfaces**

Elles dépendent du type de matériau utilisé et du nombre de couches appliquées. Le tableau 2 ci-dessous récapitule les conditions de collage aux interfaces des couches.

Tableau .4.3. Conditions de collage aux interfaces

Structures	Conditions aux interfaces
GLp*/GLp* GC3/GC3 ou GLR/GLR ou GCH/GCH	semi-collé
GLg ou GLp**	collé
GC4/GC4 ou GCV/GCV	décollé
SL3/SL3 (laitier prébroyé*) SC3/SC3 (ciment ou liant routier ou cendres hydrauliques)	semi-collé
GLp*/SL2 ou GLp*/SL3 ou GC/SC2 ou GC/SC3	semi-collé

* activant sulfatique ou calcique autre que la chaux
 ** activant chaux

4.4.3. Les structures mixtes

• **Matériaux utilisés**

Les matériaux traités aux liants hydrauliques utilisés en couches de fondation sont décrits dans le [Tableau 4.2](#). Le matériau retenu pour la couche de base est la grave bitume de classe 3 : elle présente une bonne résistance à la fatigue et une bonne résistance vis à vis de la propagation des fissures de retrait.

• **Structures de référence**

Elles sont récapitulées ci-dessous ([Figure 4.4](#)).



Figure .4.4. Structures mixtes de référence

Les structures mixtes ont été calculées en respectant un rapport épaisseur de matériau bitumineux sur épaisseur totale égal à 0,5.

• Conditions aux interfaces

L'interface entre la couche de fondation et la couche de base est considérée comme colée à la mise en service. Après rupture du matériau hydraulique, l'interface est considérée comme décollée.

4.4.4. Les structures en béton de ciment**• Matériaux utilisés**

Les matériaux suivants sont retenus :

Couche de base-roulement

- le béton armé continu (BAC) avec des fers ronds, ou le béton de ciment de classe 5 goujonné, pour les trafics supérieurs ou égaux à TC5,
- le béton de ciment de classe 5 non armé et non goujonné (BC5) sur fondation traitée pour les trafics TC4 à TC5 sur les voies du réseau structurant, et TC3 à TC6 sur les autres routes.
- le béton de ciment de classe 5 en dalle épaisse sur couche drainante pour les trafics TC2 à TC5.

Couche de fondation

- le béton maigre de classe 2 (BC2),
- une couche de 5 cm en enrobés dans le cas du béton armé continu en couche de base-roulement lorsqu'il repose sur une couche de forme traitée aux liants hydrauliques de classe PF3 ou PF4,
- la grave-ciment de classe G3,
- une couche drainante en grave non traitée d'une dizaine de centimètres dans le cas d'une dalle épaisse.

• Structures de référence

Elles sont récapitulées ci-dessous ([Figure 4.5](#)).

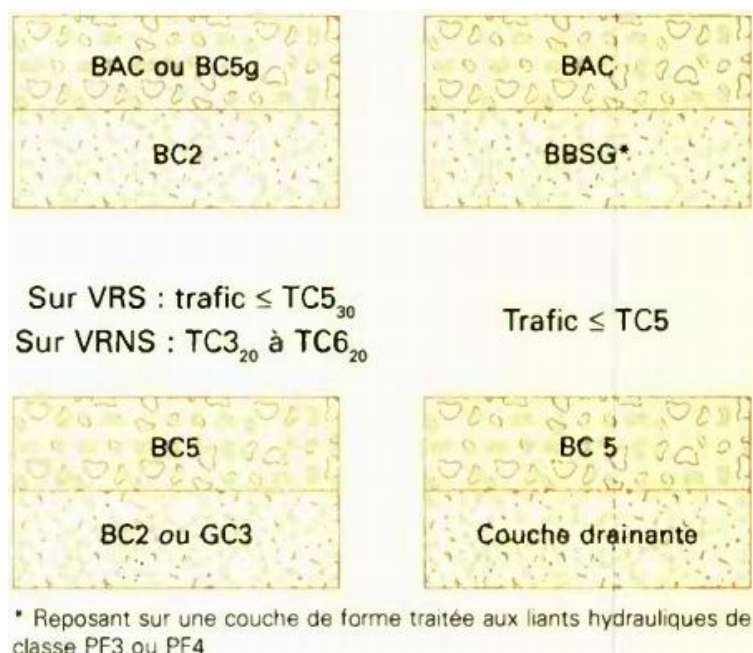


Figure .4.5. Structures en béton de ciment de référence

•Conditions aux interfaces

L'interface entre la couche de base-roulement en béton de ciment et la couche de fondation est décollée.

4.4.5. Les structures souples

Elles ne sont pas autorisées sur les voies du réseau structurant ni pour des trafics supérieurs ou égaux à $TC6_{20}$.

• Matériaux utilisés.

Couche de base

- grave-bitume de classe 3 (GB3)
- grave non traitée (GNT) de type B2 (B2C2 ou B2C1) uniquement dans le cas où le trafic est inférieur ou égal à $TC3_{20}$.

Couche de fondation

- grave non traitée (GNT) de type B2 (B2C2 ou B2C1)

Il n'a pas paru souhaitable de faire figurer explicitement dans une fiche de structure pour le réseau national les graves non traitées de type A (graves non reconstituées ni humidifiées en centrale) ou de type B1. La qualité de ces matériaux est hétérogène ce qui peut conduire à un mauvais comportement de la chaussée.

• **Structures de référence**

Elles sont récapitulées ci-contre (Figure 4.6).

• **Conditions aux interfaces**

Toutes les couches sont considérées comme collées.

4.4.6. Les structures inverses

Elles ne sont autorisées que sur une classe de plateforme PF3 ou PF4 constituée d'une couche de forme traitée aux liants hydrauliques.

Elles sont par ailleurs limitées aux trafics inférieurs ou égaux à TC530 sur les voies du réseau structurant et aux trafics inférieurs ou égaux à TC6 20 sur les voies du réseau non structurant.

• **Matériaux utilisés**

Les matériaux suivants sont retenus :

- grave-bitume de classe 3 (GB3) en couche de base
- grave non traitée (GNT) de type B2 et de classe de performance C1.

• **Structure de référence**

Elle est présentée ci-contre (Figure 4.7).

• **Conditions aux interfaces**

Les couches bitumineuses sont considérées comme collées entre elles et sur la GNT. Celle-ci est considérée comme décollée sur la plate-forme PF3 ou PF4 traitée.

Traf

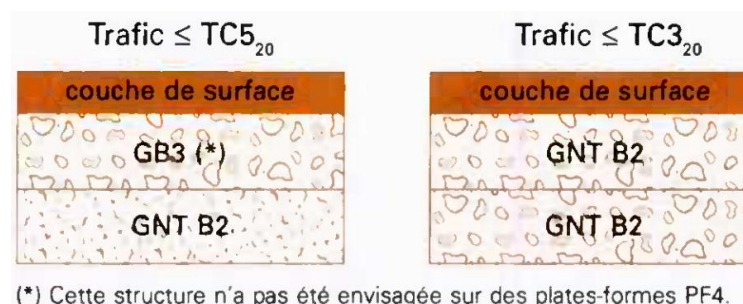


Fig. 4.6. Structures souples de référence

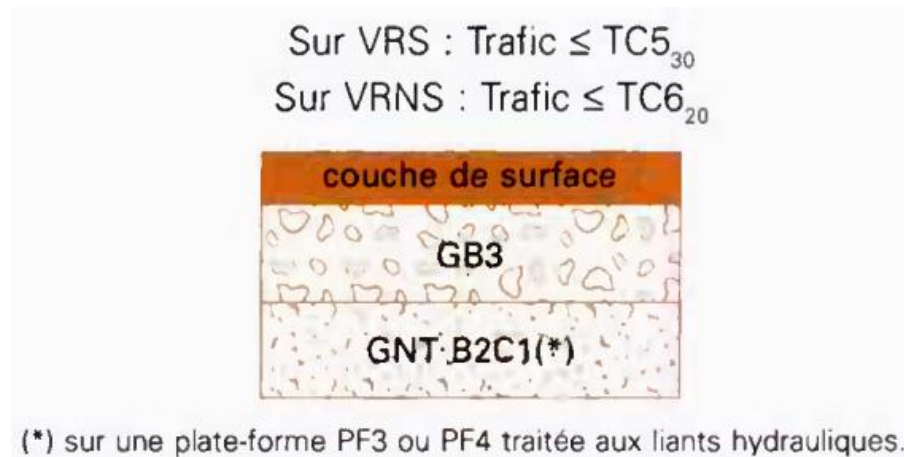


Fig .4.7. Structure inverse de référence

4.5. Récapitulatif sur la combinaison des matériaux

La combinaison des différents matériaux et la sélection appropriée selon la nature des couches est présentée dans le [Tableau 4.6](#).

Tableau .4.6. Types de combinaison des matériaux[1]

Matériau	Liant	Type	Couche
Grave (6 ≤ D ≤ 20 mm)	eau	GNT, GRH	fondation, base
	ciment	BC, GTLH	toutes les couches
	bitume	Enrobés de surface, GB, EME	toutes les couches
Sable (0,5 ≤ D ≤ 6 mm)	ciment	STLH	fondation, bases à trafics moyen et faible
	bitume	Sable bitume, sable bitume	SB : fondation ; SE et micro BB : roulement
Sol fin (D ≤ 0,5 mm)	eau		sol support, remblai ou couche de forme
	ciment	Sol TLH, LTCC	couche de forme, fondation, bases à trafics moyen et faible

4.6. Descriptif du le sol support

On distingue tout d'abord le remblai, qui est un sol surélevé, du déblai, qui est un sol enfoncé.

Le sol est un produit meuble résultant de la dégradation d'une roche mère. Si cette dégradation est d'origine mécanique (température, vent, érosion. . .), le matériau obtenu est une fraction granulaire grossière : les minéraux obtenus sont identiques à la roche mère, c.-à-d. que la minéralogie demeure inchangée. On parle dans ce cas de matériaux graveleux. Par contre, si la dégradation est d'origine physico-chimique (action de l'eau ou de l'air), le matériau obtenu est une fraction fine argileuse, et dans ce cas la minéralogie est modifiée.

La *fraction granulaire* d'un sol – dite aussi fraction grenue – présente un comportement régi par le frottement intergranulaire, qui est fonction de la forme, l'angularité (forme) et

la texture des grains, ainsi que de la distribution granulométrique et de la compacité. Ce comportement est quasiment indépendant de la teneur en eau. Cette fraction granulaire possède une résistance au cisaillement, mais ne présente, par contre, aucune résistance en traction. De ce fait, elle apparaît plus ou moins vulnérable à l'érosion, perméable et non gélive; la portance est quasiment indépendante de la teneur en eau. Quant à la trafiquabilité, elle est très variable.

La *fraction argileuse* concerne les matériaux de diamètres inférieurs à 2 μm . Sa structure, cristalline, est formée d'un empilement de feuillets (à 7 ou 14 \AA 3), chaque feuillet étant une superposition alternée de couches tétraédriques de silice et de couches octaédriques d'alumine. Les bords de ces feuillets sont chargés négativement. Le comportement de cette fraction est essentiellement régi par les forces d'attraction survenant entre les particules ; il est fonction de la surface spécifique (externe et interne), de la compacité et de la teneur en eau. La fraction argileuse possède une résistance au cisaillement due essentiellement à la cohésion **C**, ainsi qu'une résistance en traction liée à **C** – laquelle cependant diminue lorsque la teneur en eau augmente. Par ailleurs, cette fraction est imperméable, peu vulnérable à l'érosion, sujette au retrait et au gonflement, et enfin gélive.

Peu de sols naturels ne sont constitués que de l'une ou l'autre de ces fractions. Le comportement d'un sol, constitué alors en proportions variables de ces deux types de fractions, est bien souvent complexe et imprévisible. Aussi le géotechnicien doit-il avoir recours à des essais : essais d'identification, qui permettent d'analyser les proportions des deux fractions et de classer les sols en familles, et essais de comportement, qui permettent de caler le comportement de chaque famille de sols. Il existe deux essais caractérisant la nature des sols :

- l'analyse granulométrique : il s'agit du tamisage (soit au passant de 2mm, soit au passant de 80 μm), qui permet par exemple de distinguer sols fins, sols sableux (riches en fines) et sols graveleux (pauvres en fines) ;
- la mesure de l'argilosité : il s'agit des limites d'Atterberg (qui porte sur l'indice de plasticité IP), ainsi que de l'essai au bleu de méthylène (qui détermine la valeur de bleu du sol, dite VBS). Quant aux essais caractérisant l'état hydrique des sols, ils sont également de deux types :
- l'essai Proctor Normal : il s'agit de déterminer le comportement du sol, au moment du compactage, vis-à-vis de la teneur en eau ;
- l'essai « indice portant immédiat » (IPI) : il s'agit d'étudier la variation de la portance du sol en fonction de la teneur en eau.

Concernant la partie supérieure des terrassements (PST) – qui est constituée par le dernier mètre (supérieur) de remblai. Les besoins sont identiques à ceux de l'ensemble du remblai ; s'y ajoute un besoin supplémentaire en matière de rigidité à court et long termes. Il faut donc *sélectionner les meilleurs matériaux pour leur bonne portance et leur faible sensibilité à l'eau*. Même si les dispositions prises pour la PST permettent d'améliorer la rigidité – c.-à-d. la portance du sol, il est en général nécessaire de réaliser

sur cette PST une couche de forme. Cette dernière constitue la transition entre les terrassements et la chaussée.

Le compactage des terrassements sert à densifier suffisamment le sol pour que le remblai soit stable et que ses déformations n'entraînent pas de désordres ultérieurs dans la chaussée. Le compactage des assises de chaussée doit conduire au maximum de compacité pour avoir les qualités mécaniques les meilleures (module, fatigue, stabilité). Les trois fonctions principales du compactage sont le rapprochement des grains pour éviter des déformations (tassements ou orniérage) des couches de chaussée, l'imbrication, en les arrangeant, des éléments entre eux afin d'accroître les caractéristiques mécaniques R_c et R_t et de diminuer les risques d'attrition et la diminution du pourcentage de vides, c.à-d. le ralentissement de la circulation de l'eau. Le compactage doit vaincre la cohésion et le frottement interne, l'imperméabilité (qui s'oppose à l'expulsion de l'air et, éventuellement, de l'eau).

Il existe trois types de compacteurs : à pneus (adaptés aux sols fins et cohésifs, ce sont des engins lourds – 30 à 60 t – évoluant sur des surfaces non réglées), à pieds dameurs (adaptés aux sols ayant une forte cohésion) et vibrants (sous forme de plaques ou de rouleaux).

Notons que le compactage est une activité dont le rendement est décroissant : un gain de 1 % de densité est plus difficile à obtenir quand la densité déjà atteinte est élevée ; cependant, cette activité est toujours rentable, ne serait-ce que par l'augmentation des performances mécaniques initiales, à rapporter aux coûts d'entretien ultérieur (en cas de déficience).

4.7. Sur la couche de forme

À court terme, la couche de forme doit assurer la traficabilité quasi tout temps des engins approvisionnant les matériaux de la couche de fondation, permettre le compactage efficace de la couche de fondation, satisfaire les exigences de nivellement de la plate-forme support de chaussée et assurer la protection de l'arase de terrassement vis-à-vis des agents climatiques dans l'attente de la réalisation de la chaussée.

À long terme, elle doit permettre d'homogénéiser la portance du support pour concevoir des chaussées d'épaisseur constante, de maintenir dans le temps, en dépit des fluctuations de l'état hydrique des sols supports sensibles à l'eau, une portance minimale pouvant être estimée avec une précision suffisante au stade du dimensionnement de la structure de chaussée et d'améliorer la portance de la plate-forme pour optimiser le coût de l'ensemble couche de forme - structure de chaussée.

4.8. Sur la couche d'assises

On note que la répartition des charges sur le sol est différente selon le type d'assise, allant de la concentration pour les chaussées souples à la diffusion pour les chaussées ri-

gides. Au passage d'une charge lourde, les chaussées souples à assise non traitée se déforment verticalement de l'ordre de 1 à 3 mm.

Le sol support se déforme également. Après le passage de la charge, sol et chaussée retrouvent leur position initiale si la structure est adaptée. Par contre, si la charge est trop lourde ou trop souvent répétée, le sol va se déformer sans reprendre sa position initiale, entraînant une dégradation rapide de la chaussée. Ainsi, la chaussée souple est adaptée aux routes peu circulées par les poids lourds.

Au passage d'une charge lourde, les chaussées rigides à assise traitée se déforment verticalement de l'ordre de 0 à 0,5 mm. La charge sur le sol est mieux répartie et les effets plus limités. Si la charge est trop lourde et si la structure est insuffisante, la déformation devient trop grande. Elle peut entraîner la destruction de la chaussée par cassure. Ce type de chaussée est adaptée aux routes très circulées par les poids lourds.

Il existe trois types de compacteurs pour assise : les compacteurs lisses statiques (en surface pour les enrobés, pinçage du joint, effacement des traces de pneus et cylindrage des BBDr), à pneus (compactage en profondeur) et vibrants. L'action des compacteurs à pneus porte sur l'effort vertical, le pétrissage et, initialement, le poinçonnement. L'action des compacteurs à pieds dameurs porte sur l'effort vertical et, parfois, sur le pétrissage. Quant à l'action des compacteurs vibrants, elle porte sur l'effort vertical, la vibration et, parfois, le choc.

4.9. Sur la couche de roulement

Concernant les types de matériaux bitumineux, citons :

- les *enduits superficiels d'usure* : monocouche, bicouche, en grave laitier, enduis coulé à froid (ECF) ;
- les *enrobés coulés à chaud* : béton bitumineux soit ultra-mince (BBUM), soit très mince (BBTM), soit mince (BBM), soit semi-grenu (BBSG), soit à module élevé (BBME), soit drainant (BBDr) ;
- les *enrobés coulés à froid* ;
- les couches de roulement en béton de ciment mince collé (BCMC).

L'affinité liant-granulats est déterminée par la possibilité demouillage des granulats par le liant et par la résistance au désenrobage du couple en présence d'eau. Dans ces conditions, la technologie des problèmes d'adhésion et d'adhésivité doit prendre en compte deux facteurs : la création du couple liant-granulats, ainsi que sa solidité dans le temps et ce, que les granulats soient secs ou humides. Lorsque les granulats sont secs, le mouillage par le liant ne présente pas de difficulté dans la mesure où la propreté est satisfaisante ; on assiste au phénomène d'adhésionmécanique ou adhésion globale qui s'apprécie au moyen de l'essai normalisé dit « essai de plaque Vialit ». Lorsque les granulats sont humides, il convient de s'assurer que le liant peut les mouiller : c'est le phénomène d'adhésion active. Là encore, l'essai de plaque Vialit permet d'évaluer cette a

hésivité. Enfin, le couple étant créé, la liaison ne doit pouvoir être dissociée en présence d'eau : c'est le phénomène d'adhésion passive, qui s'apprécie à partir d'un essai normalisé de désenrobage en immersion statique dans l'eau. L'affinité liant-granulats peut être améliorée grâce au préenrobage à chaud (ou laquage) des granulats, au préenrobage à froid des granulats ou au chauffage des granulats. En règle générale, on retient un liant d'autant plus visqueux que la circulation est importante, ou qu'il peut faire chaud et sec.

4.9.1. Types

4.9.1.1. Enduits superficiels d'usure

L'étude de la formulation d'un enduit superficiel (ES) permet de faire le choix, pour le cas du chantier considéré, des éléments suivants : la structure de la chaussée, la catégorie du liant retenu, la nature et la granularité des granulats, l'affinité liant-granulats, ainsi que les dosages en liant et en granulats. Concernant la structure, elle peut être monocouche à simple gravillonnage – elle comporte une couche de liant et une couche de granulats –, monocouche à double gravillonnage – elle comporte une couche de liant et deux couches de granulats – ou bicouche – elle comporte deux couches de liant et de granulats alternées. Le choix de la structure dépend essentiellement des paramètres liés au trafic – telle que l'agressivité de la circulation (liée à la fréquentation de poids lourds et au tracé de la route) – et de l'état de surface de la chaussée souhaité (surface caractérisée par son homogénéité, sa texture – lisse ou non, avec ou sans ressuage – et ses particularités). Le choix du liant est fonction du niveau du trafic, de l'état du support et de la période de l'année à laquelle l'exécution de l'enduit est envisagée. L'ES est destiné aux routes à faible et moyen trafics (inférieur à T0), présentant peu de déformations et suffisamment homogène. L'épaisseur minimale d'un ES est de 1 cm.

Il assure les fonctions d'étanchéité, d'adhérence, de drainabilité, pour un coût modeste (1 à 2 €/m²). En revanche, il est sensible aux arrachements, au support (poinçonnement, ressuage) et aux conditions de mise en œuvre.

4.9.1.2. Enrobés coulés à froid

Ils sont destinés aux routes dont la circulation est moyennement rapide 1, ainsi qu'aux routes urbaines. Esthétiques (il est possible de les colorer), ils doivent être appliqués sur un support pas ou peu orniéré (moins de 1 cm), dont la déflexion est limitée. Leur épaisseur est de l'ordre du centimètre. Ils assurent les fonctions d'étanchéité et d'adhérence, pour un coût modeste (2 à 3 €/m²). De plus, ils permettent de diminuer la gêne occasionnée – la remise en service de la chaussée est possible quelques heures seulement après leur pose – et sont moyennement bruyants. En revanche, ils sont sensibles au support (fissures) et peuvent présenter un lissage dans le passage de roues en cas de trafic lourd et de support légèrement orniéré. Ils nécessitent par ailleurs le fraisage (à base de résine) de la signalisation.

4.9.1.3. Bétons bitumineux ultraminces

Ils peuvent recouvrir tout type de routes, et particulièrement celles où la vitesse pratiquée est élevée.

Le support doit être en bon état (pas de déformation supérieure au centimètre) et la déflexion faible. Leur épaisseur minimale est de 1,5 cm (pour un BB à chaud). Ils présentent une excellente adhérence, qui est durable (6 à 10 ans), une drainabilité forte, et ils apportent une très légère amélioration de l'uni. Ils sont économiques (2 à 3,5 €/m²). Par contre, à l'instar de toutes les techniques trèsminces, ils sont tributaires du support et nécessitent un enlèvement de la signalisation. Ils représentent un intermédiaire entre les ES et les BB très minces.

4.9.1.4. Bétons bitumineux très minces

Ils recouvrent essentiellement les routes sur lesquelles la vitesse pratiquée est élevée, notamment les autoroutes (un tiers du réseau autoroutier est actuellement recouvert par ce type de revêtement). Le support doit être en bon état (pas d'ornièrerie supérieure au centimètre, de fissure ni de faïençage). Leur épaisseur minimale est de 2 cm. Ils présentent une bonne adhérence, qui est durable (10 ans), une drainabilité forte, et ils apportent une amélioration sensible de l'uni. Ils sont par ailleurs peu sensibles à l'ornièrerie, et leur coût demeure modeste (2,8 à 3,5 €/m²). Enfin, ils sont peu bruyants, mais ne présentent pas d'apport structurel. Ils sont très utilisés en entretien de surface.

4.9.1.5. Bétons bitumineux minces

Ils recouvrent tout type de routes, mais peuvent être sujets à l'ornièrerie en cas de passage de charges lourdes. Le support doit être en bon état (pas d'ornièrerie supérieure au centimètre) et la déflexion faible. Leur épaisseur minimale est de 2 cm. Ils constituent un compromis entre le BB très mince et le BB semi-grenu.

Ils présentent une bonne adhérence, une imperméabilité moyenne (compacité de 7 à 9 %), et ils apportent une amélioration sensible de l'uni – notamment s'ils constituent deux couches (épaisseur totale de 8 cm).

Ils sont compatibles avec toutes les sortes d'entretien, et leur coût demeure acceptable (3,5 à 4,5 €/m²).

4.9.1.6. Bétons bitumineux drainants

Ils recouvrent les routes à circulation rapide et supportant un trafic PL important (autoroutes, VRU, boulevards urbains sans stationnement). Le support doit être en bon état (pas d'ornièrerie supérieure au centimètre) ; la chaussée peut être bitumineuse ou mixte. Ils sont généralement appliqués sur chaussée neuve.

Leur épaisseur varie entre de 3 et 5 cm. Ils présentent une bonne (et durable) adhérence, une perméabilité importante, une texture élevée et durable. Ils ne sont pas sujets à l'ornièrerie, et empêchent les mécanismes d'aquaplanage, de projections d'eau ou

d'éblouissement (d'où une bonne visibilité même par temps de grosse pluie). Ils ne sont pas sujets à l'orniérage et sont parmi les revêtements les moins bruyants – du moins au jeune âge. En revanche, leur coût est élevé. Notons que ces BB ont un comportement thermique spécifique, et que le colmatage 1 diminue leurs propriétés acoustiques. Le dé-colmatage se limite au nettoyage par eau sous haute pression. Quant à l'entretien localisé, il demeure difficile (recyclage, thermorecyclage, fraisage et – possiblement – nouvelle couche drainante).

4.9.1.7. Bétons bitumineux semi-grenus

Ils recouvrent tout type de routes, sont peu sujets à l'orniérage et destinés à la réduction de la fatigue des couches inférieures. Leur épaisseur minimale varie de 5 à 9 cm. Ils présentent une bonne adhérence, une bonne (voire très bonne) imperméabilité, mais une texture quelconque. Ils apportent une amélioration importante de l'uni. Ils sont moyennement bruyants, mais leur coût est élevé (6.5 à 7 €/m²).

4.9.1.8. Bétons bitumineux souples

Ils recouvrent les routes à (très) faible trafic, présentant un support déformé et une forte déflexion. Leur épaisseur varie (selon la catégorie du BB) entre de 4 et 12 cm. Ils sont compatibles avec toutes les techniques d'entretien, acceptent des variations d'épaisseur et présentent une texture faible. Leur imperméabilité est bonne. Par contre, ils sont très sensibles aux déformations permanentes.

4.9.2. Mise en œuvre

La mise en œuvre dépend de critères principalement d'ordre politique (uniformité du réseau, hiérarchisation, image de marque. . .) et technico-économique (coût global. . .). Ces critères sont soumis à des contraintes : celles liées au trafic, au climat, à l'environnement, au tracé, au support, aux travaux annexes, à la rapidité d'exécution, à l'importance du chantier, à l'entretien, à la législation, etc.

Globalement, la répartition est la suivante : les autoroutes concédées appliquent des BBTM, BBSG et BBDr, les routes nationales des BBTM, BBSG et ESU, les routes départementales des ESU, ECF, BBUM et BBM, et les routes communales des ESU, ECF et BBM.

- Concernant les techniques de pose, citons les techniques modulaires que sont le dallage et pavage.
- Concernant les techniques de réhabilitation, citons les techniques d'enlèvement (fraisage, grenailage, hydrogénation – ces deux dernières permettant de rétablir une bonne microrugosité) et les techniques de traitement en place (thermoreprofilage, thermorégénération, thermorecyclage).

Questions

- 4.1. Pourquoi les structures inverses ?
- 4.2. Citez les propriétés les plus significatives en cas de chaussées rigides et celles pour les chaussées souples.
- 4.3. Les bétons bitumineux drainants ont-ils mieux par rapport les chaussées bitumineuses épaisses ?

CHAPITRE 5

Le béton hydraulique- Généralités, composition et mise en oeuvre

Aperçu

On a pris la présentation des différents aspects du béton hydraulique comme objectif principal du présent chapitre. On détaille ici quelques généralités sur les ciments et mortiers, la composition du béton ordinaire, et quelques passages portants sur la mise en oeuvre et le contrôle des bétons.

5.1. Généralités

5.1.1. Les ciments

Le ciment portland est un liant hydraulique composé essentiellement de silicates et d'aluminates. Il réagit chimiquement avec l'eau pour former un matériau rigide, la pâte de ciment durci. Quand on ajoute les granulats à la pâte, le ciment a le rôle d'un liant qui colle les granulats entre eux pour former le béton. Il est le matériau de construction le plus utilisé au monde[43]. Il est fabriqué par l'échauffement d'un mélange de calcaire et d'argile et d'autres matériaux à une température d'environ 1450 °C[44]. Les ciments hydrauliques se classent généralement en ciment naturels, ciment portland et ciment d'aluminates[45].

La composition chimique du ciment contient en pourcentages environ 65% de CaO, 21% de SiO₂, 6% de Al₂O₃ et des alcalins (Fe₂O₃, MgO, K₂O, Na₂O et SO₃), comme indiqué dans le [Tableau 1](#)[46]. Les phases majeures du ciment portland sont les silicates tricalciques (3CaO•SiO₂), les silicates bicalciques (2CaO•SiO₂), les aluminates tricalciques (3CaO•Al₂O₃), la phase ferrite (4CaO•Al₂O₃•Fe₂O₃)[47]. Les caractéristiques de ces phases sont représentées dans le [Tableau 2](#)[48].

Tableau 5.1. Composition en oxydes du ciment portland (source :Réf.[46])

Oxydes	Marges des constituants (%)	Contenu moyen (%)
CaO	60–69	65
SiO ₂	18–24	21
Al ₂ O ₃	4–8	6
Fe ₂ O ₃	1–8	3
MgO	< 5	2
K ₂ O, Na ₂ O	< 2	1
SO ₃	< 3	1

Tableau 5.2. Les caractéristiques des phases du ciment portland (source :Réf.[48])

Mineral	Formule chimique	Code	Contenu %	Caractéristiques
Tricalcium silicate	3CaO·SiO ₂	C ₃ S	52–63	Hydratation rapide, Chaleur d'hydratation élevé, Forte résistance mécanique
Dicalcium silicate	2CaO·SiO ₂	C ₂ S	13–25	Taux d'hydratation: Moins Chaleur d'hydratation: faible Taux élevé de développement de la résistance mécanique aux age avancés
Tricalcium aluminate	3CaO·Al ₂ O ₃	C ₃ A	1–15	Taux d'hydratation: rapide Chaleur d'hydratation élevée Résistance mécanique: moyenne mais avec un taux rapide Retrait élevé
Tetracalcium aluminoferrite	4CaO·Al ₂ O ₃ ·Fe ₂ O ₃	C ₄ AF	8–16	Taux d'hydratation: rapide Chaleur d'hydratation et résistance mécanique modérés Retrait faible bénéfique pour la résistance à la flexion

Il existe un grand nombre de ciments. Le CEN/TC 51 a jugé opportun de séparer les « ciments courants » des « ciments spéciaux » :

Les ciments dits courants, désignés CEM (NF EN 197-1 : 2001): ciment à base de clinker Portland, ciment de laitier et ciment de haut-fourneau, sont élaborés par les cimentiers et peuvent renfermer plusieurs constituants.

Les liants équivalents, réalisés en centrale à béton, sont constitués d'un assemblage de ciment de clinker pur et de poudres aux propriétés diverses (NF EN 206-1 : 2002).

Les ciments dits spéciaux sont dotés de propriétés singulières : ciments alumineux, ciment prompt...

Il existe 5 catégories de ciment Portland CEM I, CEM II, CEM III, CEM IV et CEM V. On trouve dans norme [EN 206](#) la composition de chaque ciment. En outre, dans la norme [ASTM C 150](#), on donne le domaine d'application de chaque catégorie ainsi que sa composition minéralogique typique ([Tableau 5.3](#)).

Tableau 5.3. Domaines d'application et composition minéralogique des ciments (Source : Ref.[43])

Type de ciment	Norme ASTM C 150	C ₃ S	C ₂ S	C ₃ A	C ₄ AF	Finesse m ² /kg
I	Usage général	55	19	10	7	370
II	Résistance modérée aux sulfates et moyenne chaleur d'hydratation	51	24	6	11	370
III	Résistance élevée à jeune âge	56	19	10	7	540
IV	Faible chaleur d'hydratation	28	49	4	12	380
V	Résistance aux sulfates	38	43	4	9	380

Dans le tableau 5.4. on présente les effets espérés de l'ajout des additions minérales lors de la fabrication des ciments :

Tableau 5.4. Effets des ajouts minéraux ajoutés aux ciments (source Techniques de l'ingénieur)

Constituant ajouté		Effets principaux du constituant ajouté au clinker
S	Laitier granulé de haut fourneau	Diminue la réactivité à court terme. Diminue les retraits Montée en résistance moins rapide Adapté aux ouvrages en contact avec le sol
P	Pouzzolane naturelle	Diminue la réactivité à court terme et ses effets Complète l'hydratation en consommant la portlandite
Q	Pouzzolane calcinée	Diminue la réactivité à court terme et ses effets Complète l'hydratation en consommant la portlandite
V	Cendre volante siliceuse	Apporte une résistance complémentaire à long terme Améliore la durabilité en diminuant la perméabilité Améliore l'ouvrabilité. Teinte en noir le béton
W	Cendre volante calcique	Améliore l'ouvrabilité. Teinte en noir le béton
T	Schiste calciné	Diminue la réactivité à court terme et ses effets Complète l'hydratation en consommant la portlandite
L et LL	Calcaire broyé	Accélère la cinétique d'hydratation à très court terme (2 à 7 jours). Complète le squelette granulaire
M	Mélange de constituants	Associe les effets des différents constituants Diminue le prix du ciment. Couleur et propriétés variables

5.1.2. Les mortiers

5.1.2.1. Introduction

Une construction est un assemblage cohérents des éléments. On doit alors effectuer des scellements ou divers travaux de reprise, de bouchage, etc. Toutes ces opérations se font à l'aide d'un liant toujours mélangé à du sable, de l'eau – et éventuellement un adjuvant – pour obtenir un « mortier », qui se distingue du béton par l'absence de gravillons. Des compositions multiples de mortiers peuvent être obtenues en jouant sur les différents paramètres : liant (type et dosage), adjuvants et ajouts, dosage en eau. En ce qui concerne le liant, tous les ciments et les chaux sont utilisables ; leur choix et le dosage sont fonction de l'ouvrage à réaliser et de son environnement. Le mortier est un mélange de liant – chaux ou ciment –, de sable, d'eau et éventuellement d'adjuvants.

Eau +Liant+ Sable+ Gravier = béton + Adjuvants éventuels

Eau +Liant + Sable = mortier

Eau +Liant = coulis



Fig. 5.1. Mortier de ciment

5.1.2.2. Formulation et performances

Selon les performances souhaitées, on utilise des formulations variées, notamment en ce qui concerne les liants.

Les mortiers de ciment

Les mortiers de ciment, très résistants, prennent et durcissent rapidement. De plus un dosage en ciment suffisant les rend pratiquement imperméables.

Les dosages courants sont de l'ordre de 300 à 400 kg de ciment pour 1 m³ de sable.

Les mortiers de chaux

Les mortiers de chaux sont gras et onctueux. Ils durcissent plus lentement que les mortiers de ciment, surtout lorsque la chaux est calcique.



Fig.5.2. Mortier de chaux (source : Futura Sciences)

Les mortiers bâtards

Le mélange de ciment et de chaux permet d'obtenir conjointement les qualités de ces deux liants. Généralement, on utilise la chaux et le ciment par parties égales ; mais on mettra une quantité plus ou moins grande de l'un ou de l'autre suivant l'usage et la qualité recherchée.

Plus grande plasticité → plus de chaux

Plus grande résistance → plus de ciment

Les sables utilisés sont généralement siliceux ou silico-calcaires ; leur granulométrie est de préférence continue. Les mortiers peuvent comporter différents types d'adjuvants selon la caractéristique recherchée : Plastifiants, entraîneurs d'air, retardateurs de prise, hydrofuges.

L'incorporation de fibres de verre ou de polypropylène permet d'obtenir des mortiers présentant une cohésion supérieure et moins fissurables.

5.1.2.3. Mortiers de chantier

Les mortiers fabriqués sur le chantier

C'est encore le cas très souvent pour des menus travaux ; le plus grand soin doit être apporté tant au stockage qu'au mélange des constituants qui seront choisis en fonction

de l'ouvrage à réaliser : type et classe du liant, nature et granulométrie du sable, dosage en eau, nature des adjuvants.

Les mortiers industriels secs prémélangés

Comme la plupart des produits industriels, ces mortiers font l'objet de contrôles à tous les stades de leur élaboration, ce qui constitue pour l'utilisateur une sécurité. Les avantages présentés par ces produits sont :

- un prédosage de composition constante, garant de régularité et de qualité ;
- un gain de temps pour préparer le mortier ;
- des chantiers plus propres.

Les producteurs proposent de nombreuses formules standard répondant à la plupart des besoins.

Les mortiers frais retardés, stabilisés, prêts à l'emploi

Les mortiers frais retardés et stabilisés sont élaborés et livrés par des centrales, comme le béton prêt à l'emploi. Du fait qu'ils sont retardés, ces mortiers peuvent être livrés et stockés en quantité importante sur le chantier. On peut les utiliser dans un délai allant jusqu'à 36 heures.

Les mortiers de fibres

L'incorporation de fibres de verre ou de polypropylène permet d'obtenir des mortiers présentant une cohésion supérieure et moins fissurables. Ce sont soit des mortiers prémélangés, livrés en sac, soit des mortiers prêts à l'emploi, livrés par certaines centrales.

5.1.2.4. Emplois des mortiers

Les joints de maçonnerie

La construction réalisée en éléments maçonnés (blocs de béton, pierre de taille, briques), nécessite leur assemblage avec un mortier qui doit présenter des caractéristiques mécaniques suffisantes pour assurer la transmission des charges et une capacité suffisante pour être étanche.

On a généralement intérêt à utiliser des mortiers ne présentant pas un module d'élasticité trop élevé, de façon à pouvoir s'adapter aux variations dimensionnelles des éléments qu'il liaisonne sans fissurer. Les mortiers de joints constituent donc un maillon important de la maçonnerie, qui doit être bien étudié et bien mis en œuvre pour assurer la fonction qui lui est dévolue. C'est notamment le cas de la maçonnerie apparente.

La norme [XP P 10-202 - 1 \(DTU 20\)](#) « Maçonnerie, béton armé, plâtre » fournit des indications sur les dosages préconisés pour les mortiers de jointoiment, ainsi que les préconisations pour leur mise en œuvre.



Fig. 5.3. Mortier de maçonnerie (source : Archiexpo.fr)

Les enduits

Ce domaine d'application constitue l'un des plus vastes débouchés des mortiers. À côté des enduits traditionnels en trois couches décrits dans la norme NF P 15-201-1et 2 (DTU 26.1), se développent aujourd'hui des enduits monocouches épais, ainsi que des enduits isolants.

Les chapes

Les chapes ont pour fonction d'assurer la mise à niveau du dallage et la régularité de sa surface. Les chapes peuvent constituer la finition. Elles peuvent aussi constituer le support d'un revêtement de sol. Les chapes doivent présenter une résistance suffisante pour assurer la transmission des charges au support, et parfois résister à l'abrasion ou au poinçonnement (sols industriels). Adhérente ou flottante, la chape peut également avoir une fonction thermique ou acoustique. Ces ouvrages sont décrits dans la norme P 14-201 « DTU 26.2. Travaux de bâtiment. Chapes et dalles à base de liants hydrauliques».

Les scellements et les calages

La multiplicité des problèmes de scellement et de calage a conduit les producteurs de mortiers industriels à mettre au point des produits spécifiques adaptés aux travaux à réaliser : scellements d'éléments de couverture, d'éléments de second œuvre, de mobiliers urbains, de regards de visite et assemblage d'éléments préfabriqués...

5.2. Composition du béton ordinaire

5.2.1. Critères généraux de la composition du béton

Selon Dreux et Fiesta [49], les ouvrages construits en béton d'aujourd'hui sont plus divers tant dans leur destination que dans leurs dimensions et toute nouvelle étude de composition de béton doit en tenir compte il convient donc d'en définir les critères majeurs qui devront constituer clairement les données de l'énoncé du problème que pose l'étude de la composition d'un béton destiné à un ouvrage donné.

Les principaux paramètres sont nombreux:

- les données du projet : caractéristiques mécaniques, dimensions de l'ouvrage, ferrailage...
- les données réelles du chantier : matériel et procédures de mise en œuvre, conditions de l'environnement (humidité, températures, classe d'exposition [NF EN 206-1](#))...
- les données liées aux propriétés souhaitées du béton : maniabilité, compacité, durabilité, aspect...

Donc, l'obtention des caractéristiques requises pour le béton passe impérativement par l'adoption et l'optimisation de sa formulation prescriptions appropriées à la structure et à son environnement. Ainsi, la formulation d'un béton contient généralement deux étapes :

- Approche d'une composition, soit de façon graphique à partir de méthodes telles que celle de Faury ou de Dreux ou Méthode ACI, soit de façon expérimentale (par exemple à partir de la méthode LCPC de Baronet Lesage). On note que ces différentes méthodes sont basées sur le cumul de la recherche et de l'expérience d'une compacité maximale (Théories de Caquot sur la composition granulaire des mélanges).
- La deuxième phase consiste à un travail d'ajustement et de validation expérimental de la formulation en fonction des résultats obtenus par des essais effectués en laboratoire (essais d'étude) ou dans les conditions du chantier (épreuves de convenance).

5.2.2. Méthode de Dreux-Gorisse

5.2.2.1. Présentation et principe

L'étude de la composition d'un béton consiste presque toujours à rechercher conjointement deux qualités essentielles : la résistance et l'ouvrabilité.

Le principe de la méthode Dreux se résume à chercher un dosage en sable, graviers, ciment et eau, permettant d'atteindre une résistance et une ouvrabilité fixée d'avance en fonction des caractéristiques de l'ouvrage à couler [50].

Pour atteindre cet objectif, la méthode Dreux se base essentiellement sur les résultats d'une longue pratique du béton, qui a aboutie à une courbe représentant la composition granulaire de référence des bétons (Courbe OAB) (Figure 5.1).

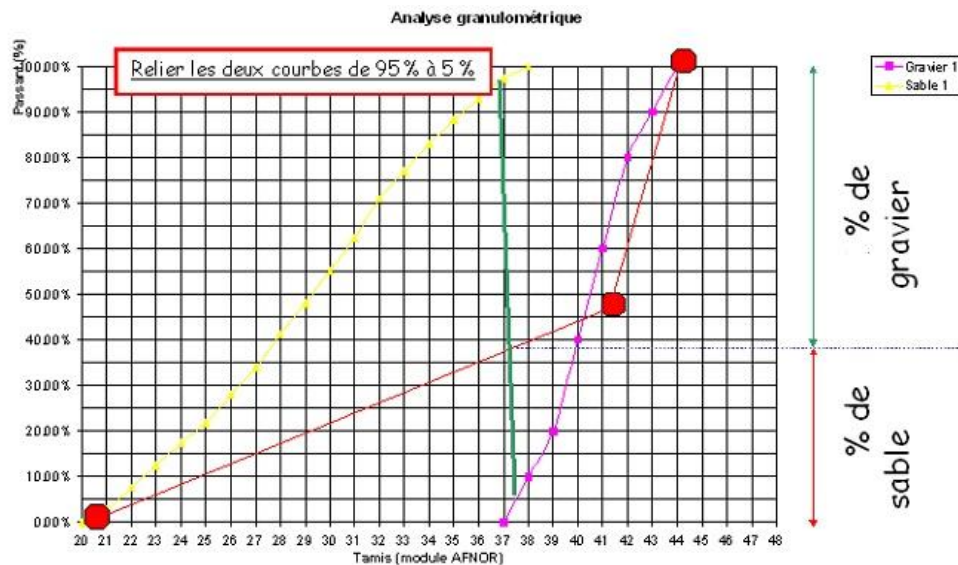


Fig 5.1. Extraction des pourcentages des granulats à partir de la courbe de références OAB

- On fixe a priori les paramètres de résistance à la compression et l'ouvrabilité (Affaissement)
- On calcule à l'aide d'abaques et formules: le dosage en ciment et le dosage en eau
- On détermine à l'aide de la courbe granulaire de référence: le dosage en sable le dosage en graviers

Remarque: les résultats obtenus théoriquement par cette méthode doivent être vérifiés et confirmés par des gâchés d'essais d'affaissement et d'écrasement, si besoin est, rectifier les dosages afin d'arriver à la consistance (ouvrabilité) et résistance souhaitées.

Pour la phase initiale de formulation, après collection des données d'entrée nécessaires pour la formulation citées précédemment on suit les étapes présentées dans la Figure suivante.

- 1/ DETERMINATION DU DOSAGE EN CIMENT
- 2/ DETERMINATION DU DOSAGE EN EAU
- 3/ CONTRÔLE DES QUALITES DE GRANULAT (SABLE)
- 4/ TRACE DE LA COURBE GRANULAIRE OAB
- 5/ TRACE DE LA LIGNE DE PARTAGE
- 6/ DETERMINATION DU DOSAGE DES GRANULATS
- 7/ DENSITE THEORIQUE DU BETON FRAIS

Fig 5.2. Etapes de la méthode de formulation de Dreux-Gorisse

5.2.2.2. Exemple de formulation

DONNEES INDISPENSABLES

• Données sur le béton:

- Résistance à 28 jours f_{c28} en MPa= 25MPa
- Affaissement en cm : A= 5 cm
- Serrage : vibration normale
- Pompage ou non du béton : non pompé

• Données sur le ciment:

- Classe vraie à 28 jours : σ_{c28} =45 MPa
- M_v réelle en g/cm³: 3.1

• Données sur les granulats:

- Qualité des granulats: courante
- Forme des granulats: concassée
- Propreté (Equivalent de sable): ES=75
- Tableaux d'analyse granulométrique des granulats: donnés
- Module de finesse : M_f =2.53 (sable)
- Dimension maximale des granulats : D_{max} =20 mm (gravier)

- Teneur en en W(%) des granulats: W(%) sable = 4 % W(%) gravier = 2%
- Masses volumiques réelles des granulats: MVr (sable)=2.6 g/cm³ MVr(gravier)=2.65 g/cm³

ETAPE 1 : Détermination du dosage en ciment C

Données nécessaires: f_{c28} (béton) ; sc_{28} (classe vraie du ciment) ; D_{max} ; Affaissement ; qualité des granulats

- Résistance moyenne à 28 jours: Calcul de $F_{cm} = f_{c28} * 1.15 = 28.75 = 29 \text{MPa}$
- Rapport CE:
 - Tableau7: détermination de G (le coefficient granulaire) → $G = 0.5$

- On tire E/C de la formule de Bolomey :

$$F_{cm} = G \cdot \sigma_{c28} (C/E - 0.5)$$

$$\rightarrow \frac{C}{E} = \left(\frac{F_{cm}}{G \cdot \sigma_{c28}} \right) + 0.5 = 28 / (0.5 \times 45) + 0.5 = 1.8$$

- Extraction du dosage en ciment de la Figure 8.
E/C=1.8 et Affaissement A= 5 cm → $C = 350 \text{ Kg/m}^3$

ETAPE 2 : Le dosage en eau

- C/E = 1.8 et C = 350 → E = 195 l/m³
- Correction de E (voir tableau 8). $D_{max}=20 \rightarrow \% E_{cor} = 0$
→ $E = 195 \text{ Kg/m}^3$

ETAPE 3 : contrôle de la qualité des granulats

Qualité courante. Sable propre.

ETAPE 4 : tracé de la courbe granulaire OAB

Prendre les résultats de l'essai de tamisage (granulométrie) et tracer les courbes de sable et de gravier. Par la suite on trace la courbe granulaire OAB en respectant les coordonnées présentées dans la Figure suivante.

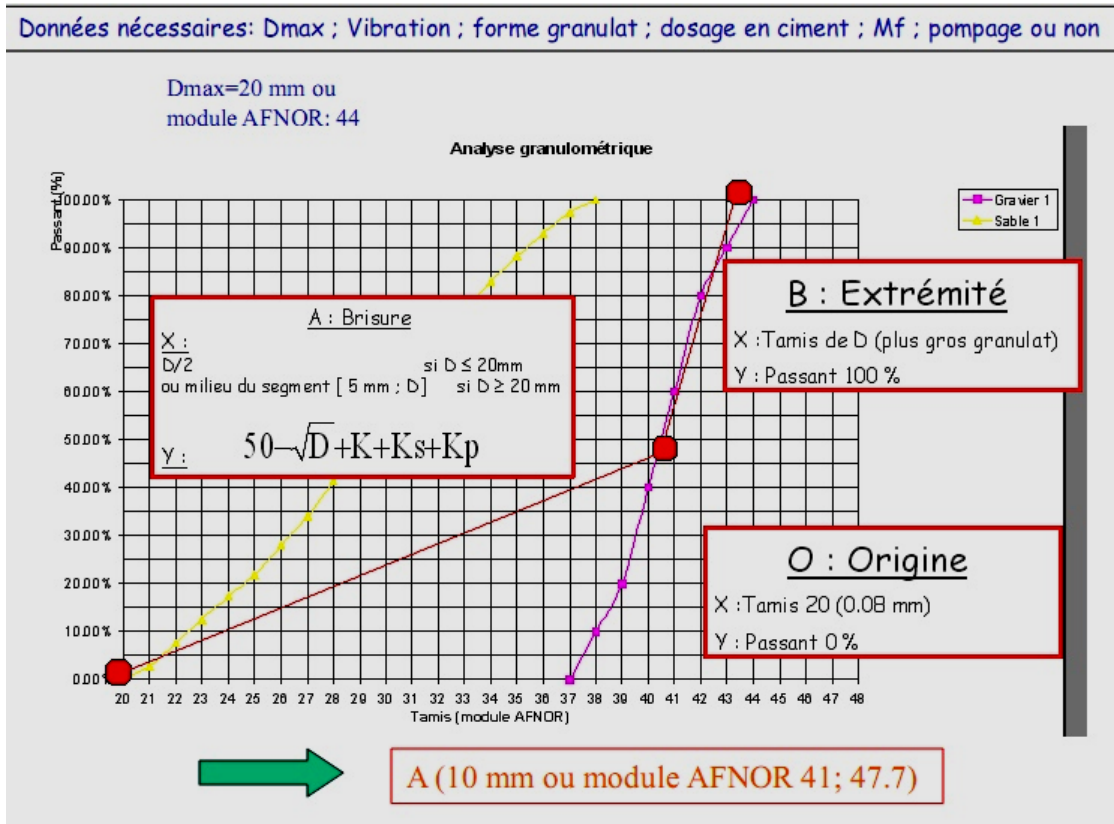


Fig 5.3. Traçage de la courbe granulaire OAB

On procède après au calcul de YA par la formule indiquée dans la Figure , tout en passant par le calcul des coefficients K, Ks, et Kp (se rendre au Tableau 9).

$$\text{Calcul de } YA = 50 - \sqrt{D} + K + K_s + K_p$$

TABLEAU N° 9

Vibration	Faible		Normale		Puissante	
	Roulé	Concassé	Roulé	Concassé	Roulé	Concassé
Forme des granulats (sable en particulier)						
Dosage en Ciment						
400 + Fluidr	-2	0	-4	-2	-6	-4
400	0	+2	-2	0	-4	-2
350	+2	+4	0	+2	-2	0
300	+4	+6	+2	+4	0	+2
250	+6	+8	+4	+6	+2	+4
200	+8	+10	+6	+8	+4	+6

→ K=2

→ $K_s = 6Mf - 15 = 6 * 2.53 - 15 = 0.18$

→ $K_p = 0$

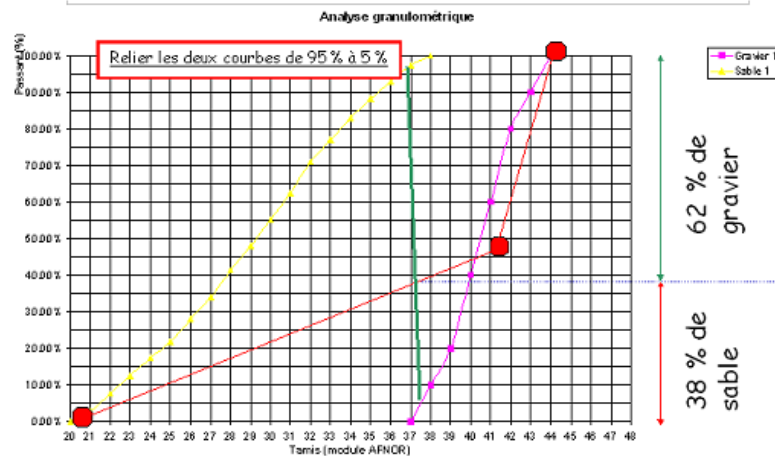
Note 1 : Correction supplémentaire K_s : Si le module de finesse du sable est fort (sable grossier), une correction supplémentaire sera apportée de façon à relever le point A, ce qui correspond à majorer le dosage en sable et vice versa. La correction supplémentaire sur K peut être effectuée en ajoutant la valeur $K_s = 6Mf - 15$ (Mf étant le module de finesse du sable qui peut varier de 2 à 3 avec une valeur optimale de l'ordre de 2.5).

Note 2 : Correction supplémentaire K_p : Si la qualité du béton est précisée pompable, il conviendra de conférer au béton le maximum de plasticité et de l'enrichir en sable par rapport à un béton de qualité courante. On pourra pour cela majorer le terme correcteur K de la valeur $K_p = +5$ à $+10$ selon le degré de plasticité désiré.

$$YA = 50 - \sqrt{20} + 2 + 0.18 = 47.7$$

ETAPE 5 : tracé de la courbe de partage

Données nécessaires: courbes granulométriques ; courbe granulaire OAB



Donc on voit clairement les pourcentages des granulats sur cette figure :
Sable = 38% et **Gravier = 62 %**.

ETAPE 6 : Détermination des dosages des granulats

Il nous reste alors la définition des poids de gravier et de sable.

- Du Tableau 10 on tire la valeur du coefficient de compactage γ .
 $A=5\text{cm}$ (consistance ferme) et $D_{\text{max}}=20\text{mm} \rightarrow \gamma = 0.835$
- Correction de γ : sable et gravier concassés $\rightarrow \gamma_{\text{cor}} = \gamma - 0.03$
 $\rightarrow \gamma_{\text{cor}} = 0.835 - 0.03 = 0.805$
- Le volume total des constituants (sans tenir compte de l'air) V_{tot} :
 $V_{\text{tot}} = V_{\text{Granulats}} + V_{\text{ciment}} = \gamma_{\text{cor}} \cdot 1000$
 $\rightarrow V_{\text{tot}} = 0.805 \cdot 1000 = 805 \text{ l/m}^3$
 $\rightarrow V_{\text{granulats}} = V_{\text{tot}} - V_{\text{ciment}} \quad (V_{\text{ciment}} = M/d_c = 350/3.1 = 112.9 \text{ l/m}^3)$
 $= 805 - 112.9 = 692.1 \text{ l/m}^3$
- $V_{\text{gravier}} = V_{\text{granulats}} \cdot \% \text{ grav} = 692.1 \times 0.62 = 429.1 \text{ l/m}^3$
 $V_{\text{sab}} = V_{\text{granulats}} \cdot \% \text{ sabl} = 692.1 \times 0.38 = 263 \text{ l/m}^3$
- Conversion en masses :
 $M_{\text{grav}} = V_{\text{grav}} \cdot d_{\text{grav}} = 429.1 \times 2.65 = 1137.1 \text{ kg/m}^3$
 $M_{\text{sab}} = V_{\text{sab}} \cdot d_{\text{sab}} = 263 \times 2.6 = 683.8 \text{ kg/m}^3$

Alors :

$$M_c = 350 \text{ kg/m}^3$$

$$M_E = 195 \text{ kg/m}^3$$

$$M_g = 1137 \text{ kg/m}^3$$

$$M_s = 684 \text{ kg/m}^3$$

ETAPE 7: Ajustement de la formulation

Dans cette étape la formulation initiale est prise pour validation. En effet, on test les propriétés réelles voulues (état frais et durci). On ajuste par la suite les masses des quantités.

- Ajustement de la teneur en eau des granulats
On mesure la teneur en eau (%),
Masse de l'eau = Masse théorique de formulation – Teneur en eau
(Sinon on pèse directement le volume trouvé des granulats pour 1m³ = masse humide, nous avons la masse sèche trouvée ; déduire par la suite la différence de la quantité de l'eau calculée).
- Ajustement des quantités des constituants par mesure de la densité réelle du béton et densité théorique.
 - Mesurer la densité réelle du béton frais:
 $D_r = M_r \text{ éprouvette} / \text{Volume de l'éprouvette}$
 - Mesurer la densité théorique du béton frais:
 $d_{th} = M_{th} / 1000 = (M_g + M_s + M_c + M_e) / 1000$
 - Calcul du différentiel de densités Δ
 $\Delta = d_r - d_{th}$
 - Si $\Delta = 0 \rightarrow$ Ok
 - Si $\Delta > 0$ ou $\Delta < 0 \rightarrow$ Mener une correction sur la masse des granulats **$x = 1000 \cdot \Delta$**
- En cas de résistance insuffisante
 \rightarrow Augmenter le dosage en ciment, diminuer le dosage en eau, utiliser un adjuvant (plastifiant) afin d'obtenir un rapport E/C plus faible.
- Si le laborantin n'a pas suffisamment du temps, on prend l'échéance de mesure à 7 jours : **$R_{c28} = 1.45 \times R_{c7}$**
- En cas de faible ouvrabilité ou problème de ségrégation des granulats
 \rightarrow Veut dire sable grossier avec un module de finesse fort \rightarrow corriger par un sable correcteur ou utiliser un plastifiant.



Abaques et Tableaux de DREUX (basés sur G. Dreux sur Technique de l'ingénieur C 2 220-1) Par: T. CHIKER

Tableau 1 – Dimension admissible D pour les plus gros granulats

Caractéristiques de la pièce à bétonner		Valeur maximale de D
e	espacement entre armatures principales	e
r	rayon moyen des mailles de ferrillage	0,8 r
R	rayon moyen du moule	R
h _m	épaisseur minimale de la pièce	h _m /5

Tableau 2 – Enrobage minimal c des armatures

Milieu ambiant	c minimal	D maximal
Locaux couverts et clos	1 cm	2 c
Exposition aux intempéries	2 cm	1,5 c
Milieu agressif	3 cm	c
Milieu très agressif	4 cm	c – 5 mm

Nota : c doit, par ailleurs, être supérieur ou égal au diamètre des armatures (ou à la largeur du paquet d'armatures).

Tableau 3 – Consistance du béton

Consistance du béton	Affaissement au cône (cm)	Serrage nécessaire
Très ferme	≤ 2	Vibration puissante
Ferme	3 à 5	Bonne vibration
Plastique	6 à 9	Vibration normale
Très plastique	10 à 15	Simple piquage
Fluide	> 16	Léger piquage

Tableau 4 – Valeurs optimales du module de finesse des compositions granulaires des bétons courants (d'après Abrams)

Dosage en ciment (kg/m ³)	Dimension maximale D des granulats (mm)						
	10	15	20	25	30	40	60
275	4,05	4,45	4,85	5,25	5,60	5,80	6,00
300	4,20	4,60	5,00	5,40	5,65	5,85	6,20
350	4,30	4,70	5,10	5,50	5,73	5,88	6,30
400	4,40	4,80	5,20	5,60	5,80	5,90	6,40

Tableau 7 – Valeurs approximatives du coefficient granulaire G

Qualité des granulats	Dimension D des granulats		
	Fins (D < 15 mm)	Moyens (25 < D < 40 mm)	Gros (D ≥ 50 mm)
Excellente	0,55	0,60	0,65
Bonne, courante	0,45	0,50	0,55
Passable	0,35	0,40	0,45

Nota : Ces valeurs supposent que le serrage sera effectué dans de bonnes conditions (par vibration en principal).

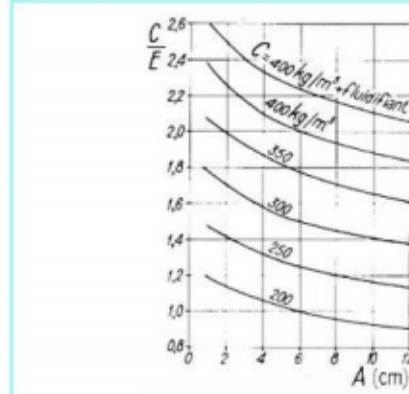


Figure 8 – Abaque permettant d'évaluer approximativement le dosage en ciment C à prévoir en fonction du rapport C/E et de l'ouvrabilité désirée (affaissement au cône A)

Tableau 8 – Correction sur le dosage en eau en fonction de la dimension maximale D des granulats (si D = 25 mm)

Dimension maximale D des granulats (mm)	5	10	16	25	40	63	100
Correction sur le dosage en eau (%)	+15	+9	+4	0	-4	-8	-12

Tableau 9 – Valeurs du coefficient K

Vibration	Faible		Normale		Puissante	
	Roulé	Concassé	Roulé	Concassé	Roulé	Concassé
Forme des granulats (dusable en particulier)	400 + fluidifiant					
	400					
	350					
	300					
	250					
	200					

Tableau 10 – Valeurs du coefficient de compacité γ

Consistance	Serrage	Dimension D des granulats (en mm)						
		D = 5	D = 10	D = 12,5	D = 20	D = 31,5	D = 60	D = 80
Molle	Piquage	0,750	0,780	0,795	0,805	0,810	0,815	0,820
	Vibration faible	0,755	0,785	0,800	0,810	0,815	0,820	0,825
	Vibration normale	0,760	0,790	0,805	0,815	0,820	0,825	0,830
Plastique	Piquage	0,760	0,790	0,805	0,815	0,820	0,825	0,830
	Vibration faible	0,765	0,795	0,810	0,820	0,825	0,830	0,835
	Vibration normale	0,770	0,800	0,815	0,825	0,830	0,835	0,840
	Vibration puissante	0,775	0,805	0,820	0,830	0,835	0,840	0,845
Ferme	Vibration faible	0,775	0,805	0,820	0,830	0,835	0,840	0,845
	Vibration normale	0,780	0,810	0,825	0,835	0,840	0,845	0,850
	Vibration puissante	0,785	0,815	0,830	0,840	0,845	0,850	0,855

*Nota : ces valeurs sont convertibles pour des granulats roulés sinon il conviendra d'apporter les corrections suivantes :
 - sable roulé et gravier concassé : - 0,01
 - sable et gravier concassé : - 0,03*

5.3. Mise en œuvre du béton

5.3.1. Phases de la mise en œuvre

De la sortie de la bétonnière ou du malaxeur à l'ouvrage fini, le béton passe par différentes phases : **transport, coulage dans un coffrage ou un moule, serrage, maturation, démoulage, cure**. Ces différentes phases impliquent le recours à des techniques qui ont beaucoup évolué et qui doivent respecter des règles d'exécution, décrites dans les documents techniques tels que des normes, ou des fascicules de documentation à caractère normatif.

Les règles de bonne exécution, objet de cette section, concernent la mise en œuvre sur le chantier et ne s'appliquent pas nécessairement à la fabrication en usine. Des critères spécifiques peuvent dans ce cas être imposés par la nature des pièces, le processus de préfabrication ou les conditions de travail en usine.

5.3.2. L'approvisionnement du béton

Il est important de rappeler ici les conditions à respecter pour ne pas modifier les caractéristiques du béton entre son lieu de fabrication et son lieu d'utilisation.

- Éviter les chocs ou manœuvres brutales qui peuvent provoquer la séparation des constituants du béton : phénomène de ségrégation dû aux densités différentes des constituants.
- Veiller à ce que le temps de transport ou d'attente ne soit pas susceptible d'entraîner une perte d'ouvrabilité, voire un début de prise du béton, surtout par temps chaud (l'emploi d'un retardateur de prise permet de compenser ce phénomène).
- À l'inverse, par temps froid, il convient de prendre des précautions pour protéger le béton contre le gel.
- Le matériel utilisé pour le transport doit être fréquemment nettoyé pour éviter tout risque de pollution (déchets végétaux ou organiques, restes de béton...).

Les essais de contrôle des caractéristiques du béton effectués au point de livraison doivent avoir lieu juste avant son coulage ; les essais in situ, permettent d'approcher au maximum les caractéristiques du béton fabriqué, avec celles de l'ouvrage.

5.3.3. La mise en place

5.3.3.1. La préparation des différents éléments

Les coffrages doivent :

- être suffisamment rigides pour supporter la poussée du béton tout particulièrement dans le cas des bétons fluides, sans se déformer y compris pendant la phase de vibration, et stables ;
- être étanches pour éviter les fuites de laitance aux joints ;

- avoir un parement nettoyé et traité avec un agent de démoulage approprié et appliqué en couche régulière ; cette préparation est indispensable pour l'obtention d'un béton apparent régulier, et pour éviter des phénomènes d'adhérence entraînant des arrachements lors du décoffrage ;
- être exempts de corps étrangers (clous, ligatures, boulons, etc.) et d'eau stagnante.

Fonctions générales du coffrage

Outre sa fonction première de moulage, le coffrage peut remplir un grand nombre de fonctions ; ses quatre fonctions principales Quelques aspects peuvent être définies comme suit :

- moulage de la forme ;
- moulage de la texture de surface ;
- maintien de la stabilité jusqu'au durcissement ;
- protection contre la dessiccation pendant la prise et le durcissement.

Accessoirement, les coffrages peuvent, suivant les circonstances ou les nécessités de chantier, jouer d'autres rôles :

- protection contre les intempéries (pluie, neige) ;
- protection contre les chocs mécaniques ;
- limitation des échanges thermiques avec l'environnement ;
- élément vecteur de vibration dans le cas de vibration externe ;
- possibilité d'intégrer une plate-forme de travail.

La préparation des armatures

Pour éviter leur déplacement pendant la mise en place du béton et sa vibration, les armatures doivent être correctement calées et positionnées (il existe de nombreux modèles de cales s'adaptant aux différents diamètres d'armatures et aux formes de la pièce à réaliser). L'enrobage des armatures doit aussi être contrôlé.

Les surfaces de reprise de bétonnage

Leur emplacement sera prévu lors du calepinage pour correspondre à la jonction des éléments constitutifs, de façon à ne pas créer un joint gênant pour l'aspect du parement de béton.

Les surfaces de reprise doivent être rugueuses (un repiquage peut parfois s'avérer nécessaire) pour faciliter l'adhérence et humidifiées lorsqu'il s'agit d'un béton déjà durci.

5.3.3.2. Le déversement du béton

Les dalles, planchers, chaussées

Le béton doit être déversé d'une hauteur inférieure à 0,8 mètre et être réparti régulièrement. Les accumulations locales entraînent une surcharge sur les étalements, ainsi que des risques de ségrégation.

Les éléments coffrés

En plus des précautions précédentes, il peut être nécessaire d'utiliser des manchons ou des tubes, pour limiter la hauteur de chute libre du béton (à l'origine de phénomènes de

ségrégation), surtout dans des coffrages hauts et profonds. Il faut éviter le ruissellement du béton sur les parois du coffrage ou le phénomène de cascade sur les armatures.

Le tube plongeur, le manchon ou la goulotte doivent permettre de déverser le béton au fond du coffrage. Ils sont remontés progressivement au fur et à mesure du bétonnage.

Les précautions à prendre lors du coulage sont les suivantes :

- limiter la hauteur de chute ;
- prévoir des couches horizontales successives n'excédant pas 60 à 80 cm de hauteur ;
- maintenir une vitesse de bétonnage aussi constante que possible ;
- éviter la mise en place lors de trop fortes pluies pouvant entraîner un lavage des gros granulats et un excès d'eau dans le béton, surtout à sa surface.

5.3.4. Le serrage du béton

5.3.4.1. Son objet

Le serrage est indispensable pour obtenir des bétons présentant de bonnes caractéristiques mécaniques et physiques, durables, avec des parements réussis. Sauf dans le cas de béton autoplaçant, il est indispensable de faciliter la mise en place du béton grâce à des moyens de serrage.

Le serrage a pour objet de faciliter l'arrangement optimal des grains, permettant ainsi l'écoulement du béton, un bon remplissage des cavités et l'enrobage correct des armatures. Le serrage permet aussi d'évacuer une grande partie de l'air contenu dans le béton et d'améliorer ainsi sa compacité.

5.3.4.2. Les moyens de serrage

Les différents modes de serrage s'appliquent aux ouvrages verticaux (murs, voiles, poteaux, etc.) aussi bien qu'aux horizontaux (dalles, chaussées, etc.).

La vibration interne

On utilise des aiguilles vibrantes électriques, pneumatiques ou thermiques, de 25 à 150 mm de diamètre, en fonction du volume du béton à vibrer.

Pour les bétons courants de granulométrie inférieure à 25 mm, les aiguilles employées ont un diamètre de 40 à 100 mm.

Les règles suivantes doivent être respectées :

- immerger l'aiguille verticalement ou sous un angle faible ;
- la remonter lentement (10 à 15 secondes) sur une hauteur n'excédant pas 60 cm.
- choisir des points de vibration successifs compris entre 30 et 60 cm selon le diamètre de l'aiguille (distance entre points successifs 8 à 10 fois le diamètre de l'aiguille) ;
- ne pas vibrer trop près du coffrage et ne pas toucher les armatures avec l'aiguille.

La vibration externe par vibrateurs de coffrage

Pour les ouvrages de faible épaisseur ou, à l'inverse, de hauteur importante avec une forte densité d'armatures, la vibration interne est pratiquement impossible, on utilise des vibrateurs fixés sur les coffrages. Il s'agit de moteurs à balourds, plus délicats à manipuler que les aiguilles et dont l'emplacement n'est pas toujours facile à déterminer.

L'épaisseur intéressée par les vibrateurs n'excède pas 20 à 30 cm. Pour des pièces importantes, les vibrateurs doivent être déplacés sur les coffrages au fur et à mesure de l'avancement du bétonnage.

Note

La vibration externe sur chantier est une opération qui nécessite une certaine expérience. Elle est par contre couramment utilisée en préfabrication, car les moules, plus robustes, permettent une transmission homogène et efficace des vibrations. Le caractère répétitif des éléments à réaliser permet la détermination optimale de l'emplacement des vibrateurs.

La vibration externe par règle vibrante

Cette technique est utilisée pour les dalles ou chaussées en béton de 20 à 25 cm d'épaisseur ; elle consiste à déplacer à la surface du béton une règle (ou une poutre) équipée de vibrateurs, qui assure son serrage à partir de sa surface.

5.3.5. Traitement de surface

Le surfacage du béton frais est destiné à fermer sa surface, c'est-à-dire à augmenter la compacité de la zone de la peau. L'objectif recherché est aussi un fini de surface lisse et une bonne planéité.

Pour que le surfacage soit efficace, le béton doit être suffisamment riche en mortier et sans excès d'eau qui aurait tendance à ressuer exagérément en surface, entraînant un phénomène de microfissuration (faiénçage). Le surfacage est réalisé avec divers matériels : taloches manuelles ou mécaniques, lisseuses rotatives.

Le surfacage peut être complété par d'autres traitements qui donnent à la surface du béton des caractéristiques particulières. Ces traitements sont notamment le striage, le rainurage ou le dénudage des granulats.

5.3.6. La cure du béton

La cure du béton est la protection apportée pour éviter sa dessiccation et lui assurer une maturation satisfaisante. Elle est particulièrement indispensable pour les dalles et les chaussées, surtout lorsque les conditions atmosphériques sont défavorables : vent, soleil, hygrométrie faible, etc.

5.3.6.1. Les procédés de cure

Ce sont des moyens simples tels que l'humidification renouvelée de la surface ou la mise en place d'une bâche plastique (polyane), ou la pulvérisation de produits de cure qui constituent un film imperméable à la surface du béton.

5.3.6.2. La durée de cure

La durée de la cure dépend essentiellement des conditions ambiantes et de l'évolution du durcissement du béton. Elle est réalisée : pour les dallages, à la fin du surfacage, soit par la pulvérisation d'un produit de cure, soit par la mise en place d'un film de polyéthylène translucide ou d'un géotextile régulièrement humidifié ; pour les murs en élévation, après le décoffrage, par pulvérisation d'un produit de cure, ou par la mise en place d'un géotextile régulièrement humidifié.

Questions

- 5.1. Pourquoi la composition du béton ?
- 5.2. Comment un liant participe-t-il dans la résistance mécanique d'un mélange ?
- 5.3. Comment obtenir les pourcentages des granulats dans un mélange ?

CHAPITRE 6

Optimisation des enrobés

Aperçu

Dans ce chapitre, on a présenté des généralités sur l'optimisation des enrobés : une description du béton bitumineux et de ses types ; ainsi qu'une démonstration complète de la méthode de composition de Marshall avec des exemples illustrant les calculs des paramètres requis. En plus, on a présenté la mise en place et le contrôle des enrobés.

6.1. Introduction

La formulation des enrobés veut dire trouver d'une manière scientifique la combinaison optimale des matériaux constitutifs (granulats, liants...). L'objectif est de produire un matériau possédant des propriétés acceptables (mécaniques, physiques, thermiques, durabilité). Les paramètres critiques dans la construction routière sont la résistance mécanique à l'orniérage et à la fatigue.

La formulation des enrobés est plus compliquée que celle des bétons vu la variabilité des matériaux, le problème de compatibilité granulat /pâte, la sensibilité des enrobés à la température extérieure ...etc.

Les variables majeurs dans une formulation des enrobés sont :

Granularité et forme des granulats : Comme expliqué lors de l'opération du test granulométrique, la granularité qui exprime les taux des classes granulaires dans le mélange obtenu est un facteur crucial pour obtenir une compacité optimale, avec le minimum des vides. De plus, la forme des granulats influence fortement les propriétés à l'état frais de l'enrobé. Plus la forme est aplatie et angulaire plus la fluidité/maniabilité du mélange est ferme, et plus l'énergie de compactage exigée est importante.

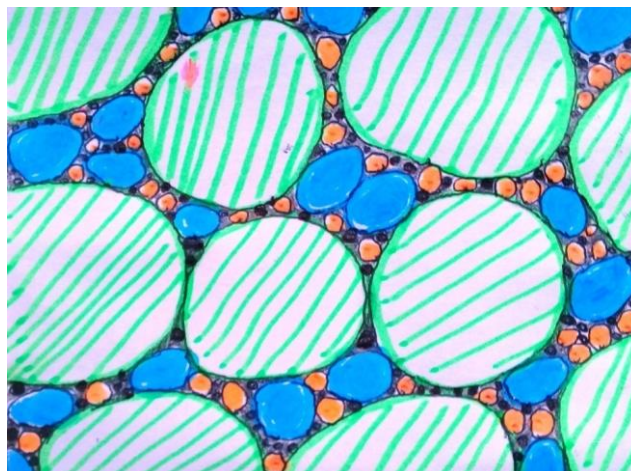


Fig 6.1. La Granularité et son rôle sur le remplissage du mélange (Dessin T. Chiker)

La compacité : C'est le variable clé de la composition des produits noirs. Elle est assurée par un faible taux de vides. Ce paramètre lui-même est lié à plusieurs critères (granularité, type de liant hydrocarboné et sa viscosité, fluidité à l'état frais, compactage, température de mise en place...etc.) . La majorité de paramètre à l'état durci résulte de la compacité.

La teneur en matières fines : L'existence des fines dans le mélange est importante afin d'occuper les petits vides entre les granulats, et augmenter ainsi la compacité du mélange. Mais, le taux des fines ne doit pas dépasser le taux nécessaire, sinon on voit la chute des propriétés mécaniques et physiques. Le taux des fines influence aussi la viscosité du mélange et par la suite sa susceptibilité au compactage.

Qualité de l'interface granulat/liant : lorsque cette interface est bien soudée avec moins de vide la compacité globale augmente, et l'imperméabilité du mélange augmente aussi. Ce paramètre est assuré avec une forme plus arrondie des granulats, une teneur des fines bien calculée, une viscosité optimale du liant, et une température de préparation appropriée.

Choix optimale du liant : La viscosité du liant joue un rôle primordial. Elle influence la totalité des paramètres. La sélection du liant en premier ordre doit répondre aux exigences techniques et de composition de l'élément (couche) à formuler. La majorité des normes fournit des tableaux facilitant le choix de type de liant et les différentes catégories du liant hydrocarboné recommandé pour chaque couche routière. La sélection du liant est aussi prise par le critère de qualité/prix, liée par la disponibilité du matériau et son coût de revient.

Quant aux méthodes de formulation, il existe plusieurs approches des labos à travers le monde. Parmi ces méthodes on cite la méthode LCPC française, la méthode LC canadienne, la méthode de Marshall américaine, la méthode Superpave américaine.

Dans ce cours on donne la méthode de Marshall.

Note : Le premier niveau de formulation nous fournit la formulation initiale. Les niveaux qui suivent nous permettent d'ajuster la formulation par des tests de contrôle qui diffèrent d'un béton de ciment ordinaire.

6.2. Généralités

6.2.1. C'est quoi un béton bitumineux ?

Le béton bitumineux crée généralement la couche supérieure des chaussées appelée couche de surface ou de roulement, C'est le résultat de mélange de granulats et liant (bitume).



Fig 6.2. Le béton bitumineux ([Wikipédia.com](https://fr.wikipedia.org/wiki/B%C3%A9ton_bitumineux))

6.2.2. Les types de bétons bitumineux

On distingue de nombreux types de béton bitumineux (BB), chacun avec ses caractéristiques et les utilisations propres[51].

- Le béton bitumineux mince (BBM) : possède une granulométrie de 0/10 ou 0/14. Ce béton bitumineux est facilement compactable et est parfaitement imperméable. Principalement utilisé pour les parkings ou les trottoirs, son épaisseur varie de 2.5 à 5 cm.

- Le béton bitumineux très mince (BBTM) : c'est sans doute l'enrobé le plus intéressant en termes de rapport qualité-prix. En effet, il dispose d'une très bonne durée de vie ainsi que d'une facilité de mise en œuvre. Quelle que soit la granulométrie (0/10 ou 0/6), le BBTM dispose d'une épaisseur comprise entre 1.5 et 3 cm.

- Le béton bitumineux ultra mince (BBUM) : destiné à une couche de roulement, c'est-à-dire en contact direct avec les pneumatiques des véhicules, il est tout indiqué pour un parking par exemple. Son épaisseur varie de 1 à 1.5 cm.

- Le béton bitumineux souple (BBS) : comme son nom l'indique, ce béton est constitué d'un bitume assez mou pour obtenir un enrobé déformable. Cependant, il possède une faible résistance à l'orniérage.

- Le béton bitumineux drainant (BBD_r) : l'avantage principal de ce type de béton bitumineux réside dans son excellente adhérence, aussi bien par temps de pluie ou de forte chaleur. De plus, il réduit le bruit de roulement. Pour une allée de jardin, il est alors parfaitement adapté

- Le béton bitumineux semi-grenu (BBSG) : celui-ci est l'enrobé à chaud de référence. En effet, il répond à de nombreux besoins (trottoir, allée...) et est très adapté pour un trafic aussi bien moyen que lourd. Son épaisseur varie de 3 à 9 cm, suivant la granulométrie.

- Le béton bitumineux à modules élevés (BBME) : ce béton bitumineux fait partie des enrobés structurants. Il possède une excellente rigidité, une durée de vie importante et une bonne résistance à l'ornièrage. Son épaisseur peut varier de 4 à 9 cm par couche.

La température et l'humidité en temps de pose sont des facteurs à prendre en considération lors du choix du BB.

- le bitume utilisé peut se ramollir si la chaleur est trop forte.

- le béton peut durcir par trop basses températures.

- la pluie ou la neige tassée sont également des critères à prendre en compte, car le BB peut geler et favoriser la formation de verglas.

6.3. Méthode de Marshall

Cette méthode a été développée par Bruce Marshall dans les années 30. Elle est basée sur le choix de la teneur en liant pour une certaine densité du mélange qui satisfait à une stabilité minimale et un fluage évoluant dans un intervalle d'acceptation (par les normes).

La présentation de la méthode ici est basée sur le document de Mamlouk et Zaniewski[12].

Note : La méthode de Marshall est applicable à tous les enrobés à chaud ne comportant pas des granulats de dimension supérieure à 20 mm.

6.3.1. Phase préparatoire de caractérisation

Dans cette section on mène un travail initial de caractérisation et de calculs de certains paramètres essentiels pour la formulation.

- Densité apparente du mélange ($D_{app,m}$)

Selon la formule suivante :

$$d_{app\ m} = \frac{A}{B-C} \dots\dots\dots \text{Eq.1}$$

A: poids sec de l'échantillon

B : poids saturé de l'échantillon de surface saturée

C : poids de l'échantillon immergé

- La densité théorique maximale

La norme [ASTM D2041\[52\]](#) est utilisée pour déterminer la densité théorique maximale du mélange. Un mélange en vrac est préparé en utilisant les mêmes procédures de mélange et de conditionnement que celles utilisées pour préparer les échantillons compactés. Après conditionnement, l'échantillon est étalé sur une table pour refroidir à la température d'essai, 25 ° C. Au fur et à mesure que l'échantillon refroidit, les agrégats enrobés d'asphalte sont séparés. Le poids de l'échantillon de mélange en vrac dans l'air est mesuré. L'échantillon est placé dans un bol à vide et recouvert d'eau.

Un vide est appliqué pour éliminer tout l'air de l'échantillon (dans une pompe à vide). Alors que l'échantillon est toujours couvert avec de l'eau, le poids immergé de la cuve à vide avec l'échantillon est mesuré assuré. Afin de déterminer le poids immergé de l'échantillon, le poids du bol vide doit être connu. Cela se fait généralement périodiquement et s'appelle le poids d'étalonnage du bol; il n'est pas mesuré à chaque fois le test est effectué.

La densité théorique max est :

$$d_{mm} = \frac{A}{A-(E-D)} = \frac{A}{A+D-E} \dots\dots \text{Eq.2}$$

A: poids sec de l'échantillon en vrac

D : poids de calibration du bol immergé sous vide

E : le poids immergé (échantillon+bol)

d_{mm} de l'échantillon à une seule teneur en bitume peut être utilisé pour estimer d'autres teneurs en bitume en calculant d'abord l'effet des densités théorique des agrégats.

Par définition, la densité théorique maximale du béton bitumineux est :

$$d_{mm} = \frac{100}{\left(\frac{Ps}{D_{se}} + \frac{Pb}{Db}\right)} \dots\dots\dots \text{Eq.3}$$

Extraire la densité théorique des granulats couverts par le bitume (D_{se}) par la suite donne :

$$D_{se} = \frac{Ps}{\left(\frac{100}{D_{mm}} + \frac{Pb}{Db}\right)} \dots\dots\dots \text{Eq.4}$$

Avec:

D_{mm} : la densité théorique maximale du béton bitumineux

Ps : % en masse des granulats

Pb : % en masse du liant (bitume)

D_{se} : densité spécifique des granulats couverts par le bitume

Db : la densité de bitume

Note : D_{se} est constante pour tous les mélanges

- Analyse et développement des résultats des densités obtenus

L'objectif de la formulation ici est de déterminer le volume du bitume et celui des granulats exigés pour produire un mélange de propriétés souhaités par le concepteur. Ce pendant, pour faciliter les calculs, on utilise les masses au lieu des volumes, et la densité absolue est utilisé pour convertir en volume.

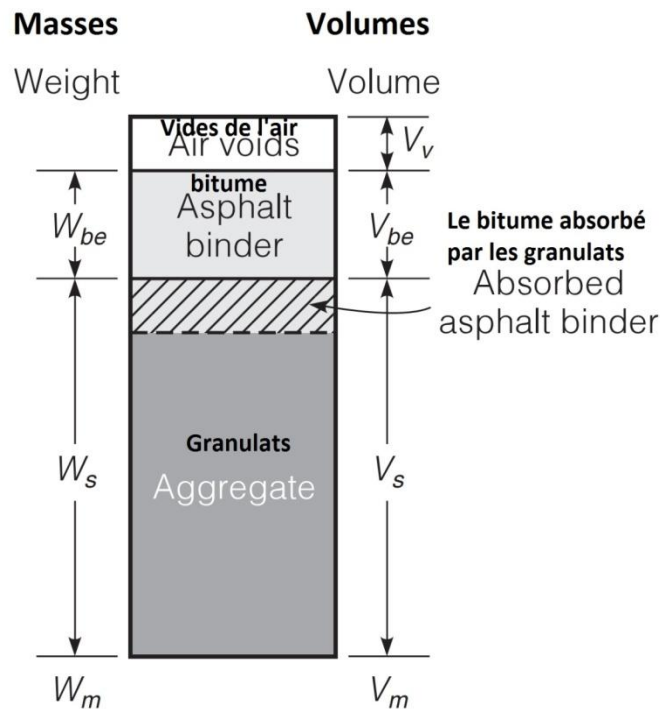


Fig 6.3. Composants d'un mélange bitumineux [12]

Le pourcentage des vides dans le mélange (Les vides dans le mélange total)

$$V_{TM} = \frac{V_v}{V_m} \cdot 100 \dots\dots\dots \text{Eq.5}$$

Et le pourcentage des vides dans les granulats est :

$$V_{MA} = \frac{V_v + V_{be}}{V_m} \cdot 100 \dots\dots\dots \text{Eq.6}$$

Les vides remplis en bitume (des granulats) :

$$V_{FA} = \frac{V_{be}}{V_{be} + V_v} \cdot 100 \dots\dots\dots \text{Eq.7}$$

Avec

V_v : volume des vides de l'air

V_{be} : volume effectif de bitume

V_m : volume total de mélange

Note : Le bitume effectif = le bitume total – le bitume absorbé

.....

■ Exemple 1

Un spécimen de béton bitumineux compacté contient 5% de liant bitumineux ($d_b=1.023$) en poids du mélange total et des agrégats d'une densité de 2,755. La densité apparente totale de bitume st de 2.441 Mg/m³. On ne tient pas compte de l'absorption. Calculez VTM, VMA et VFA.

Solution

- On suppose ³le volume total du mélange $V_m = 1 \text{ m}^3$
- Déterminez la masse du mélange et des composants:

La masse totale du mélange = $1 \times 2.441 = 2.441 \text{ Mg}$

La masse de bitume = Masse total \times % bitume = $2.441 \times (5/100) = 0.122 \text{ Mg}$

La masse du granulat = Masse totale – Masse de bitume = $2.441 - 0.122 = 2.319 \text{ Mg}$

- Calcul des volumes des composants :

$V_b = M_b/d_b = 0.122/1.023 = 0.119 \text{ m}^3$

Pas d'absorption $\rightarrow V_b = V_{be}$

V_s : Volume des granulats

$V_s = 2.319/2.755 = 0.841 \text{ m}^3$

Determine volume of voids:

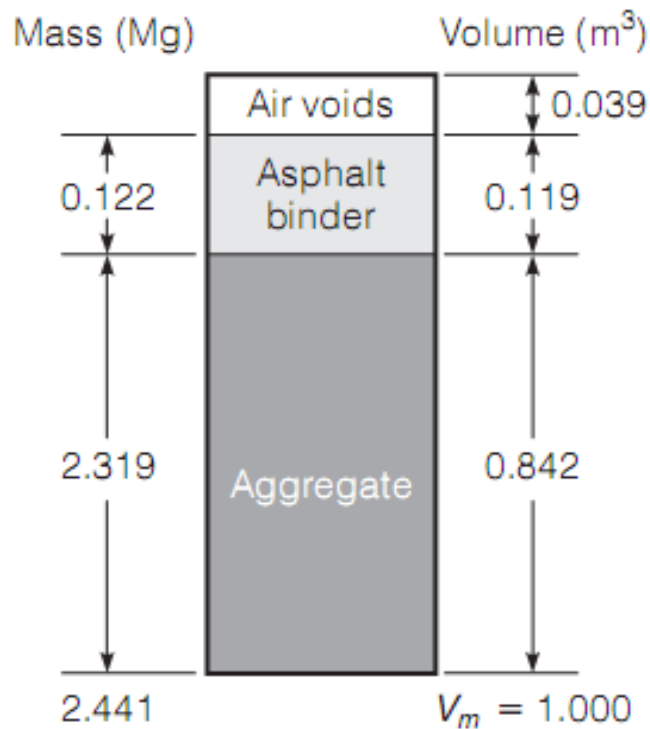
$$V_v = V_m - V_b - V_s = 1 - 0.199 - 0.842 = 0.039 \text{ m}^3$$

Volumetric calculations:

$$\text{VTM} = \frac{V_v}{V_m} 100 = \frac{0.039}{1.00} 100 = 3.9\%$$

$$\text{VMA} = \frac{V_v + V_{be}}{V_m} 100 = \frac{0.039 + 0.119}{1.00} 100 = 15.8\%$$

$$\text{VFA} = \frac{V_{be}}{V_{be} + V_v} 100 = \frac{0.119}{0.119 + 0.039} 100 = 75\%$$



En se basant sur les relations des densités avec masses et volumes et la figure des masses/volumes on obtient les valeurs des volumes cités précédemment on fonction des densités des constituants

$$\text{VTM} = 100. \left(1 - \frac{dmb}{dmm}\right) \dots\dots\dots \text{Eq.8}$$

$$VMA = 100 \cdot \left(1 - dmb \cdot \frac{P_s}{dsb} \right) \dots\dots\dots \text{Eq.9}$$

$$VFA = 100 \cdot \left(\frac{VMA - VTM}{VMA} \right) \dots\dots\dots \text{Eq.10}$$

.....

■ Exemple 2

Sample Problem 9.3

An asphalt concrete specimen has the following properties:
 asphalt content = 5.9% by total weight of mix
 bulk specific gravity of the mix = 2.457

theoretical maximum specific gravity = 2.598
 bulk specific gravity of aggregate = 2.692

Calculate the percents VTM, VMA, and VFA.

Solution

$$VTM = 100 \left(1 - \frac{G_{mb}}{G_{mm}} \right) = 100 \left(1 - \frac{2.457}{2.598} \right) = 5.4\%$$

$$VMA = \left(100 - G_{mb} \frac{P_s}{G_{sb}} \right) = \left(100 - 2.457 \frac{100 - 5.9}{2.692} \right) = 14.1\%$$

$$VFA = 100 \left(\frac{VMA - VTM}{VMA} \right) = 100 \left(\frac{14.1 - 5.4}{14.1} \right) = 61.7\%$$

.....

6.3.2. Les procédures de la méthode de Marshall

Les étapes de base exigées pour réaliser la conception du mélange Marshall sont les suivantes [53]:

1. évaluation des granulats
2. évaluation du ciment bitumineux (liant)
3. préparation des échantillons

4. Stabilité Marshall et mesure de l'écoulement
5. analyse de la densité et des vides
6. Détermination de la teneur en bitume

1. Évaluation des granulats : Les caractéristiques globales qui doivent être évaluées avant de pouvoir être utilisé pour un mélange de béton bitumineux comprennent la durabilité, la résistance, présence de substances délétères, polissage, forme et texture. L'Agence les spécifications définissent les plages autorisées pour la granulométrie. la norme la méthode Marshall est applicable aux granulats denses calibrés avec un maximum pas plus de 25 mm (AASHTO T245). La méthode Marshall modifiée est disponible en utilisant des moules plus grands et un marteau de compactage différent avec une taille d'agrégat maximale nominale jusqu'à deux pouces (50.8 mm) (ASTM D5581). Seule la méthode standard est décrite ci-dessous.

2. Évaluation du liant bitumineux : La qualité du liant est choisie en fonction la plage de températures et les conditions de trafic attendues. La plupart des agences routières ont des spécifications qui prescrivent la qualité de bitume pour les conditions de conception.

3. Préparation des échantillons La procédure complète de conception du mélange Marshall nécessite 18 éprouvettes de 101,6 mm (4 po) de diamètre et 63,5 mm (2,5 po) de hauteur. La stabilité et l'écoulement sont mesurés pour 15 échantillons. De plus, 3 spécimens sont utilisés pour déterminer la densité maximale théorique. Cette valeur est nécessaire pour l'analyse des vides et de la densité. Les spécimens pour la théorie la détermination de la densité maximale théorique est préparée à la conception estimée teneur en bitume sont à préparer aussi. Des échantillons sont également requis pour chacun des cinq bitumes avec différents taux; le contenu de bitume de conception attendue et les ingénieurs utiliser l'expérience et le jugement pour estimer la teneur en asphalte de conception.

La préparation des échantillons pour la méthode Marshall utilise le compacteur Marshall (Figures 6.4 et 6.5). La méthode Marshall nécessite le mélange de l'asphalte et des agrégats à une température où la cinématique de la viscosité du ciment bitumineux est 170 ± 20 cSt, et la température de compactage correspond à une viscosité de 280 ± 30 cSt.



Fig 6.4. Compacteur Marshall Manuel (<http://www.proviteq.com/>)



Fig 6.5. Compacteur Marshall automatique (<https://heig-vd.ch/>)

L'Asphalt Institute permet d'utiliser trois niveaux d'énergie différents pour la préparation des échantillons: 35, 50 et 75 coups de chaque côté de l'échantillon. La plupart des conceptions de mélange pour les chaussées lourdes utilisent 75 coups, car ce meilleur simule la densité requise pour la couche de chaussée à construire.

4. Stabilité Marshall et mesure du débit La stabilité Marshall de béton bitumineux est la charge maximale que le matériau peut supporter lorsqu'il est testé dans le Marshall appareil, (Figure 6.6). Le test est réalisé à une vitesse de déformation de 51 mm / min. (2 po /

min.) Et une température de 60 ° C (140 ° F). L'écoulement de Marshall est la déformation de l'éprouvette lorsque la charge commence à diminuer. La stabilité est rapportée en newtons (livres) et le débit est indiqué en unités de 0,25 mm (0,01 po) de déformation. La stabilité des échantillons d'une épaisseur inférieure à 63,5 mm est ajustée en multipliant par les facteurs indiqués dans le [Tableau 6.1](#). Tous les échantillons sont testés et la stabilité moyenne et le débit sont déterminés pour chaque teneur en asphalte.



Fig 6.6. Appareil de Stabilité Marshall (<http://tbtekt.fr/1-18-marshall-stability-tester.html>)

Tableau 6.1. Facteurs de correction de la stabilité de Marshall

facteurs de correction de la stabilité marshall Marshall Stability Adjustment Factors			
épaisseur de l'éch. en mm	facteur de correction	épaisseur de l'éch. en mm	facteur de correction
50.8 (2)	1.47	65.1 (2 9/16)	0.96
52.4 (2 1/16)	1.39	66.7 (2 5/8)	0.93
54.0 (2 1/8)	1.32	68.3 (2 11/16)	0.89
55.6 (2 3/16)	1.25	69.8 (2 3/4)	0.86
57.2 (2 1/4)	1.19	71.4 (2 13/16)	0.83
58.7 (2 5/16)	1.14	73.0 (2 7/8)	0.81
60.3 (2 3/8)	1.09	74.6 (2 15/16)	0.78
61.9 (2 7/16)	1.04	76.2 (3)	0.76
63.5 (2 1/2)	1.00		

5. Analyse de la densité et des vides Les valeurs de VTM, VMA et VFA sont extrait à l'aide des équations 8, 9 et 10, respectivement.

6. Détermination de la teneur en asphalte Traditionnellement, les résultats des tests sont présentés sous forme de tableaux et de graphiques pour aider à déterminer les facteurs à utiliser dans le choix de la teneur optimale en asphalte. Le [Tableau 2](#) présente des exemples de mélange et mesures. La [Figure 6.7](#) montre des graphiques de résultats obtenu à partir du tableau 2, qui comprend la teneur en asphalte par rapport aux vides d'air, VMA, VFA, poids unitaire, stabilité Marshall et d'écoulement Marshall.

La teneur en asphalte est généralement la plus économique qui satisfiera répondent à tous les critères établis. Différents critères sont utilisés par différentes agences. Les [Tableaux 6.3 et 6.4](#) décrivent les critères de conception de mélange recommandés par The Asphalt Institute. La [Figure 6.8](#) montre un exemple de teneurs en asphalte acceptables.

La sélection du contenu de bitume peut être ajustée dans cette plage pour obtenir un mélange qui répond aux exigences d'un projet spécifique. D'autres agences, comme le National Asphalt Paving Association, utilisent la teneur en ciment bitumineux à 4% de vides d'air comme la valeur de conception, puis vérifient que les autres facteurs répondent aux critères.

Si la stabilité Marshall, l'écoulement Marshall, le VMA ou le VFA tombent en dehors de la plage autorisée, le mélange doit être repensé à l'aide d'une granulométrie ajustée ou de nouvelles sources de matériaux.

La conception du mélange développée en laboratoire constitue la formule de base initiale du mélange. Elle doit être ajustée pour refléter les légères différences entre les agrégats fournis par le laboratoire et ceux utilisés sur le terrain.

Tab 6.2. Exemples de calcul par la méthode de Marshall

TABLE Examples of Mix Design Measurements and Calculations by the Marshall Method (The Asphalt Institute, 2001) exemples de mesures et de calcul par la méthode marshall														
% AC by Wt. of Mix, Spec. No.	Spec. Height, mm	Wt. In Air, g	Wt. In Water, g	SSD Wt., g	Bulk Vol., cm ³	Bulk Sp. Gr.	Max. Theo. Sp. Gr. (loose mix)	% Air Voids	% VMA	% VFA	Measured Stability, kN	Adjusted Stability, kN	Flow, 0.25 mm	
3.5-A		1240.6	726.4	1246.3	519.9	2.386					10.9	10.9	8	
3.5-B		1238.7	723.3	1242.6	519.3	2.385					10.8	10.8	7	
3.5-C		1240.1	724.1	1245.9	521.8	2.377					11.2	11.2	7	
Average						2.383	2.570	7.3	14.0	48.0		10.9	7	
4.0-A		1244.3	727.2	1246.6	519.4	2.396					9.7	9.7	9	
4.0-B		1244.6	727.0	1247.6	520.6	2.391					10.1	10.1	9	
4.0-C		1242.6	727.9	1244.0	516.1	2.408					10.3	10.3	8	
Average						2.398	2.550	6.0	13.9	57.1		10.0	9	
4.5-A		1249.3	735.8	1250.2	414.4	2.429					10.8	10.8	9	
4.5-B		1250.8	728.1	1251.6	523.5	2.389					10.7	10.3	9	
4.5-C		1251.6	735.3	1253.1	517.8	2.417					10.4	10.4	9	
Average						2.412	2.531	4.7	13.9	66.1		10.5	9	
5.0-A		1256.7	739.8	1257.6	517.8	2.427					10.2	10.2	9	
5.0-B		1258.7	742.7	1259.3	516.6	2.437					9.7	9.7	8	
5.0-C		1258.4	737.5	1259.1	521.6	2.413					10.0	10.0	9	
Average						2.425	2.511	3.4	13.8	75.2		10.0	9	
5.5-A		1263.8	742.6	1264.3	521.7	2.422					9.8	9.8	9	
5.5-B		1258.8	741.4	1259.4	518.0	2.430					10.2	10.2	10	
5.5-C		1259.0	742.5	1259.5	517.0	2.435					9.8	10.0	9	
Average						2.429	2.493	2.5	14.1	82.1		10.0	9	

Notes: AC-20 binder, $G_b = 1.030$, $G_{sb} = 2.674$, Absorbed AC of aggregate: 0.6%, $G_{se} = 2.717$, Compaction: 75 blows

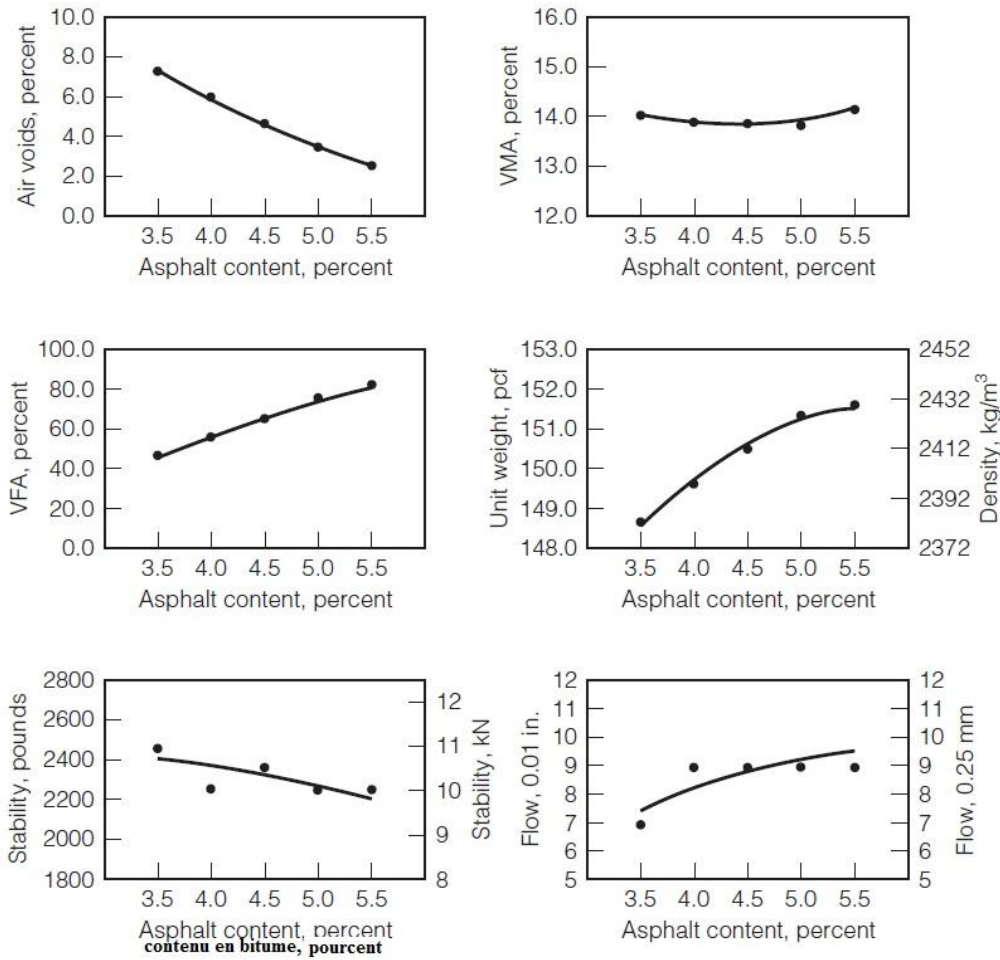


FIGURE Graphs used for Marshall mix design analysis (The Asphalt Institute, 2001).
graphes utilisés pour l'analyse en étude de formulation

Fig 6.7. Graphes utilisés pour l'analyse des études de formulation Marshall

Tab 6.3. Critères Marshall

Asphalt Institute Criteria for Marshall Mix Design (The Asphalt Institute, 2001) critères pour le mélange d'études (institut de bitume, 2001)						
	niveau du trafic		Traffic Level			
	leger	Light	moyen	Medium	lourd	Heavy
Compaction (Blows) coups de compactage	35		50		75	
	Minimum	Maximum	Minimum	Maximum	Minimum	Maximum
stabilité Stability, kN (lb)	3.34 (750)	—	5.34 (1,200)	—	8.01 (1,800)	—
Flow, 0.25 mm écoulement	8	18	8	16	8	14
vides d'air, %	3	5	3	5	3	5
VMA, %	Use the criteria in Table 9.15					
VFA, %	70	80	65	78	65	75

Tab 6.4. Le pourcentage minimum des vides dans les granulats

Minimum Percent Voids in Mineral Aggregate
TABLE (VMA) (The Asphalt Institute, 2001)
pourcentage min des vides dans les granulats (VMA)

Dmax Nominal Maximum Particle Size ¹	Minimum VMA, Percent		
	Design Air Voids ²		
	3.0	4.0	5.0
2.36 mm (No. 8)	19.0	20.0	21.0
4.75 mm (No. 4)	16.0	17.0	18.0
9.5 mm (3/8 in.)	14.0	15.0	16.0
12.5 mm (1/2 in.)	13.0	14.0	15.0
19.0 mm (3/4 in.)	12.0	13.0	14.0
25.0 mm (1.0 in.)	11.0	12.0	13.0

¹The nominal maximum particle size is one size larger than the first sieve to retain more than 10 percent.

²Interpolate minimum VMA for design air void values between those listed.

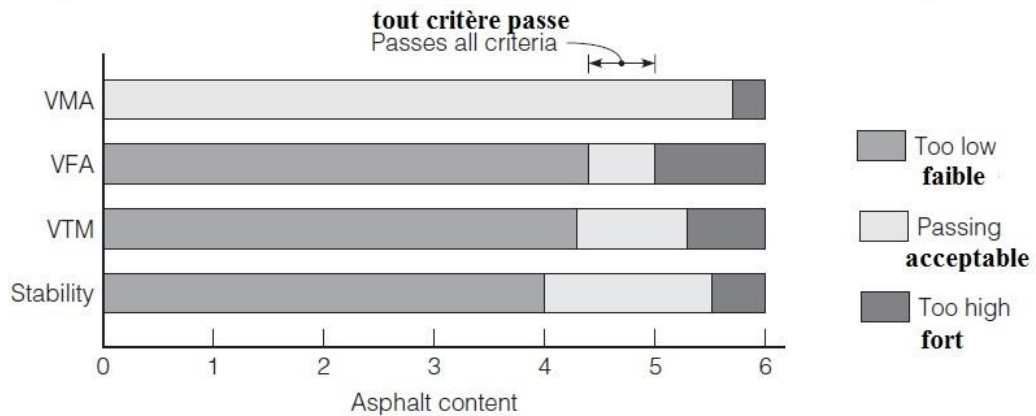


FIGURE An example of the narrow range of acceptable asphalt contents (The Asphalt Institute, 2001).

exemple des rangs acceptables de contenus acceptables en bitume

Fig 6.8. Exemple des contenus acceptable en bitume

6.4. Mise en place

La performance des revêtements bitumineux est fonction de l'état de la surface où sont mises en place les différentes couches d'enrobés. L'état de la surface d'une fondation granulaire peut avoir un impact important sur la performance d'un enrobé. Cette surface doit être stable, sèche, plane et uniforme avec des pentes longitudinales et transversales vers le cours d'eau en rive et vers les puisards. S'assurer de l'absence d'accumulation d'eau (de glace ou neige); Procéder à une vérification de la rigidité (module) des couches granulaires (essai de plaques, déflexion)

Les revêtements bitumineux existants doivent être préparés adéquatement avant d'être recouverts. Les nids-de-poule et les fissures doivent être réparés, et la surface nettoyée.

Un liant d'accrochage sera ensuite utilisé pour assurer une bonne liaison entre la surface existante et le nouveau revêtement, que ce soit un enrobé de correction ou une nouvelle couche de roulement.

6.4.1. Condition climatique

Les conditions climatiques de température ambiante et de vent ont une grande influence sur la température des enrobés et par le fait même sur le taux de compactage. L'influence relative des conditions climatiques dépend principalement du type de mélange, de l'épaisseur posée, de la température initiale des enrobés, de l'intensité du vent (taux de refroidissement) et de la température ambiante lors de la mise en œuvre.

À partir de ces facteurs, le ministère des Transports du Québec a élaboré une carte avec des dates butoir.

6.4.2. Préparation des surfaces

La fondation granulaire doit être suffisamment compactée, stable et la surface doit être exempte d'accumulations d'eau, sans granulats détachés, unie et résistante aux déformations provoquées par le passage des camions transportant les enrobés vers le finisseur. En général, un taux de compactage équivalent à 98 % de la masse volumique de référence « Proctor modifié (PM) » est requis pour la couche finale. L'utilisation d'un liant d'imprégnation est recommandée afin de faciliter l'obtention de ces conditions optimales.

Un essai de déflexion de poutre (déflectomètre) peut être effectué en faisant circuler un camion chargé afin de localiser et de corriger les zones faibles et de valider la rigidité globale de la fondation granulaire.

6.4.3. Equipement

L'équipement utilisé pour la pose des enrobés est présenté dans la [Figure 6.9](#).

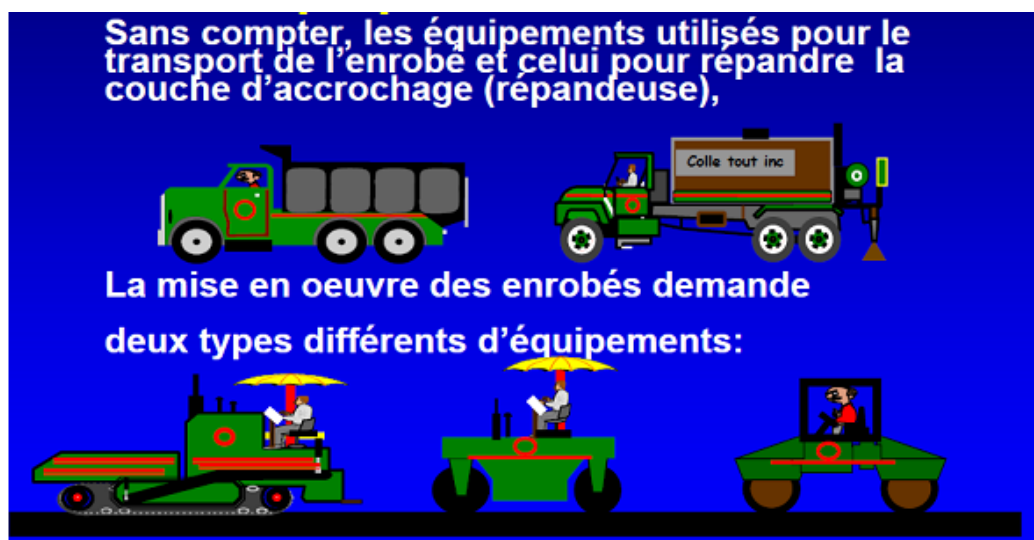


Fig. 6.9 . Equipement de pose des enrobés

En outre, d'autres manières de pose peuvent être appliquées. Voir [Figure 6.10](#).



Fig. 6.10. Autres techniques de pose des enrobés

6.4.4. Échantillonnage

L'échantillonnage d'un enrobé a pour but:

- Vérifier sa conformité aux normes avant son utilisation
- Contrôler sa qualité en cours de production de l'ouvrage
- Vérifier la qualité de l'ouvrage final

On a recours généralement à trois méthodes d'échantillonnage:

- L'échantillonnage dans la benne d'un camion ou d'un finisseur: Il est composé de quatre prélèvements faits en des points précis, au moyen d'un instrument approprié. Le choix du camion est fait de façon aléatoire.
- Échantillonnage sur la route avant compactage: l'échantillon est prélevé sur une plaque placée sur la surface à recouvrir avant le passage du finisseur. Le choix de l'endroit est déterminé de façon aléatoire.
- Échantillonnage sur la route après compactage: Il est effectué au moyen d'une méthode de prélèvement permettant de conserver intacte la portion de revêtement prélevée. Le choix de l'endroit est déterminé de façon aléatoire.

La masse des prélèvements doit être d'au moins le double de la masse requise indiquée au [Tableau 6.5](#) pour les essais conventionnels.

Tableau 6.5. Quantité minimale des échantillons en fonction de Dmax

Dimension de grosseur nominale maximale du granulat	Masse minimale de l'enrobé		
	Essais conventionnels ⁽¹⁾	Essai à la presse à cisaillement giratoire (incluant la densité maximale)	Essai à l'orniéreur
mm	kg	kg	kg
5	4	9	25
10	4	9	25
14	6	9	50
20	8	9	50
28	10	–	–
40	10	–	–

1. Les essais conventionnels en contrôle consistent en une teneur en bitume, une granulométrie, une densité maximale et une densité brute (vides Marshall).

6.5. Contrôle de la qualité des travaux

Le contrôle de la qualité doit être intégré à toutes les phases des travaux. Cette procédure revêt une importance particulière afin d'identifier les problèmes et d'apporter des solutions avant qu'il ne soit trop tard.

Depuis quelques années, les entrepreneurs préconisent la reconnaissance de leur auto-contrôle de la production à la centrale d'enrobage. Toutes les centrales sont certifiées

par le programme d'assurance qualité ISO 9000. Une fiche type d'autocontrôle est jointe en annexe.

À la fin des travaux, il est recommandé d'effectuer une inspection finale pour identifier les déficiences non détectées pendant l'exécution. Après l'identification des déficiences, les correctifs nécessaires pourront être apportés afin de livrer un ouvrage performant en concordance avec les spécifications demandées.

6.5.1. Le contrôle de la qualité pendant les travaux

6.5.1.1. Le contrôle visuel

Un simple contrôle visuel attentif permet d'effectuer plusieurs vérifications. En voici quelques unes :

- les billets de livraison et les attestations de conformité du bitume. Un très grand nombre différents de formulations d'enrobés sont parfois produites par une même centrale. La vérification des billets de livraison et d'attestation de conformité du bitume confirme que le mélange livré ainsi que la classe de bitume utilisé correspondent à la formulation sélectionnée pour les travaux ;
- l'état de la surface. Un examen visuel permet de vérifier si l'état de la surface est acceptable avant de débiter les travaux. Dans le cas d'une fondation granulaire, il faut vérifier si la surface est bien nivelée et compactée et exempte de zones instables et de granulats meubles avant le passage des rouleaux compacteurs ou des camions. Dans le cas d'une surface en enrobé, il faut vérifier que la surface soit propre et sèche, que les irrégularités importantes et les fissures aient été corrigées avant de recevoir le liant d'accrochage ;
- l'application uniforme du liant d'accrochage sur les surfaces horizontales et verticales et la vérification du taux de pose. Un examen visuel permet de confirmer si toutes les surfaces sont couvertes, sinon, de corriger la situation. Il faut alors soit effectuer une deuxième passe de l'épandeur à liant, soit nettoyer ou ajuster les gicleurs ;
- le temps de mûrissement du liant d'accrochage. Un examen visuel permet de vérifier le mûrissement suffisant du liant avant l'épandage du revêtement ;
- la présence de ségrégation dans le revêtement. L'identification précoce d'un problème de ségrégation associé au finisseur permet d'apporter des correctifs et de limiter l'étendue des défauts;
- la présence de fissures après le passage du rouleau compacteur. Ce phénomène est souvent associé à un compactage effectué sur un revêtement trop chaud. Il faut alors modifier la séquence de compactage. L'utilisation d'un rouleau compacteur à pneumatiques alors que le revêtement est encore chaud pourrait permettre de scel-

ler les fissures. La présence de fissures longitudinales près d'une rive non supportée du revêtement demande une réduction de l'énergie de compactage en rive;

- l'épaisseur du revêtement derrière le finisseur, avant le compactage. L'épaisseur du revêtement peut être vérifiée ponctuellement en insérant un outil à pointe pourvu d'un repère. L'épaisseur visée correspond de 20 à 25 % de plus que l'épaisseur compactée et varie en fonction du type de mélange et du finisseur utilisé.

Une autre méthode consiste à mesurer le taux de pose du revêtement. Celui-ci est obtenu en faisant le ratio entre le tonnage de chargements et la surface couverte. Le taux de pose est exprimé en kg/m^2 et peut être converti en épaisseur moyenne lorsque la densité maximale du mélange d'enrobés est connue. La mesure du taux de pose permet de confirmer si l'épaisseur moyenne est conforme mais sans contrôle réel de l'épaisseur du revêtement. Des repères de niveau tels que des piquets, des bordures et des trottoirs peuvent être utilisés afin de valider le niveau final obtenu après le compactage. À titre indicatif, chaque 10 mm d'épaisseur de revêtement compacté correspond à un taux de pose d'environ 23 kg/m^2 .

Il faut valider le plan de compactage par un contrôle du nombre de passages des rouleaux compacteurs, de leur séquence, et des recouvrements entre les passages. Le plan de compactage doit être validé par des essais en place (nucléodensimètre) et révisé lorsqu'il indique un taux de compactage insuffisant. Il faut aussi vérifier la qualité du raclage. Les travaux manuels de raclage associés aux joints et aux raccords avec les structures doivent être effectués avec soin pour obtenir des joints durables et unis. Les déficiences des travaux manuels qui entraînent de la ségrégation ainsi que des bosses ou des creux dans le revêtement peuvent être corrigées immédiatement.

La présence de mottes refroidies d'enrobés incorporées au revêtement est un défaut fréquent dans les couches de surface. Refroidies compactées, elles laissent une zone moins dense et susceptible à l'arrachement en service. Les mottes refroidies peuvent provenir des phénomènes suivants :

- mauvais nettoyage de la benne du camion ou du finisseur ;
- croûte refroidie d'un chargement non protégé par une bâche ;
- approvisionnement irrégulier qui entraîne la vidange du finisseur ;
- opération trop fréquente des ailes de la benne du finisseur ;
- liant d'accrochage qui se détache des pneus des camions ayant circulé sur le produit non mûrit.

6.5.1.2. Les mesures et les essais en chantier

Certaines vérifications nécessitent des mesures avec des équipements appropriés. Parmi les plus importantes, mentionnons :

- la vérification du taux de compactage avec le nucléodensimètre. Les mesures effectuées au nucléodensimètre pendant les travaux permettent de confirmer l'efficacité du plan de compactage. Si le taux de compactage est insuffisant, il faut intervenir en augmentant les passes ou le nombre de rouleaux, en changeant la séquence ou les paramètres d'opération des rouleaux. Un taux de compactage qui semble faible peut également être obtenu à cause d'une variation de la composition de l'enrobé qui a une influence sur la densité maximale ou la quantité d'espaces vides. Dans tous les cas, l'utilisation du nucléodensimètre permet de déceler des déficiences et de procéder à des ajustements pendant les travaux. Le taux de compactage devrait également être vérifié près des joints longitudinaux, afin de valider la procédure de compactage utilisée. Un taux de compactage inférieur à 2 % par rapport au taux de compactage spécifié est généralement acceptable pour tenir compte du confinement moindre dans la zone du joint ;

- la vérification de la température avec un thermomètre à infrarouge. La vérification de la température de l'enrobé lors du déversement des camions indique si la température est suffisamment élevée pour faciliter le compactage. Par ailleurs si la température est trop élevée, l'opérateur de la centrale peut corriger rapidement la situation pour la suite des travaux. Le thermomètre à infrarouge est utile pour vérifier la température des joints longitudinaux et intervenir en faisant des bandes moins longues lorsqu'un seul finisseur est utilisé. Finalement, la mesure de la température du revêtement fin permet de confirmer si le refroidissement est suffisant pour autoriser le retour de la circulation ou procéder à l'épandage des granulats d'accotement ;

- la vérification de l'uniformité thermique du revêtement avec la caméra infrarouge. La caméra infrarouge permet de vérifier la température comme le thermomètre à infrarouge, mais pour un très grand nombre de points à la fois. Le résultat obtenu est présenté sous la forme d'un thermogramme représentant une image de la distribution des températures à la surface du revêtement. La situation souhaitée est d'obtenir un revêtement dont la température est suffisamment élevée et uniforme au début du compactage. L'utilisation de la caméra à infrarouge est un outil approprié pour valider l'ensemble des paramètres du plan d'épandage et de compactage et le contrôle de la qualité finale du revêtement ;

- la vérification de l'uni des joints transversaux avec la règle de 3 mètres. Les raccordements avec le pavage existant ou les joints transversaux pendant les travaux doivent faire l'objet d'une vérification avec une règle de 3 mètres. Un écart maximum de 5 mm est permis sous la règle de 3 mètres. Les joints dont l'uni est inacceptable devraient être repris immédiatement alors que l'enrobé est encore chaud car les corrections effectuées sur un revêtement refroidi sont généralement de moindre qualité.

6.5.1.3. L'échantillonnage et les essais en laboratoire

Il est recommandé d'échantillonner le bitume, les enrobés et le liant d'accrochage utilisés pour un ouvrage. La fréquence d'échantillonnage est fonction de l'envergure des travaux, des exigences du propriétaire et de l'autocontrôle de la centrale de production des enrobés.

Les enrobés bitumineux sont analysés en laboratoire pour vérifier la teneur en bitume, la granulométrie, la densité maximale, la teneur en espaces vides et les autres caractéristiques physiques du mélange. Les analyses fourniront les données de densité maximale et de teneur en espaces vides permettant d'établir le plan de compactage. Dans certains cas, ces paramètres varient suffisamment de ceux de la formule de mélange pour affecter le taux de compactage.

De plus, ces données permettent de corroborer les informations obtenues par le système d'acquisition de données (SAD) des centrales, en particulier pour la teneur en bitume.

Les échantillons de bitume et de liant d'accrochage peuvent être soumis à des essais en laboratoire pour valider leurs propriétés. Ils peuvent aussi être entreposés à des fins d'analyses advenant un problème. Le [Tableau 6.6](#) présente la fréquence d'échantillonnage et d'essais pour les différents matériaux en fonction de divers types d'ouvrages,

Tableau 6.6. La fréquence d'échantillonnage et d'essais des différents matériaux

MATÉRIAUX	TYPE D'ÉCHANTILLONS	FRÉQUENCE	ENDROIT D'ÉCHANTILLONNAGE
LIANT D'ACCROCHAGE	Un contenant métallique de un litre	Un échantillon/projet	Camion épandeur
BITUME	Deux contenants métalliques de un litre	<ul style="list-style-type: none"> • Pour chaque classe de bitume, un échantillon/3000 tonnes d'enrobés › Minimum d'un par projet 	Centrale d'enrobage
ENROBÉS	Une boîte de 9 kg (augmenter à 10 kg pour GB 20) + une boîte additionnelle pour les essais à la PCG › Une quantité additionnelle est à prévoir pour l'essai d'orniérage lorsque requis (25 kg pour le ESG 14 et le GB 20)	<ul style="list-style-type: none"> • Routes, aéroports, aires industrielles Un échantillon/300 tonnes • Rues municipales Un échantillon/300/tonnes › Minimum d'un échantillon/formule/jour 	<ul style="list-style-type: none"> • Centrale d'enrobage (dans la benne du camion) • Chantier (dans la benne du finisseur)

6.5.2. L'inspection finale

L'inspection finale identifie les déficiences non détectées pendant les travaux. Par la suite, il faut planifier les mesures correctives afin de livrer un ouvrage satisfaisant selon les exigences du donneur d'ouvrage. Les vérifications dépendent du type d'ouvrage et les principales activités communes à plusieurs types d'ouvrages sont :

- vérifier l'épaisseur finale en place du revêtement, le taux de compactage et la qualité de l'adhérence entre les couches par le prélèvement de carottes et d'essais en laboratoire. La fréquence suggérée est de une carotte par 500 tonnes de revêtement posé avec un minimum de trois carottes par projet ;
- confirmer l'absence d'ornières à l'aide des relevés de mesure de la surface. Selon les exigences contractuelles, il faut utiliser la règle de trois mètres ;
- évaluer visuellement la qualité du drainage après une pluie afin de confirmer l'absence de falques d'eau importantes et un écoulement efficace vers les puisards ;
- vérifier la qualité des joints transversaux et longitudinaux. Les joints doivent être bien fermés, homogènes et exempts de ségrégation en plus de présenter un bon uni ;
- vérifier la qualité de la surface du revêtement. Celui-ci doit être exempt de fissures, de ségrégation importante, de zones présentant un surplus de bitume (ressuage) et de l'arrachement ;
- vérifier le nivellement des raccords aux regards et puisards, en particulier pour les regards situés dans les voies de circulation ;
- vérifier que les raccordements, aux entrées riveraines et aux intersections, présentent un uni et des pentes acceptables selon les différentes configurations ;
- vérifier la propreté du site des travaux et des zones adjacentes aux travaux telles que les propriétés riveraines et les voies de circulation adjacentes. Planifier un nettoyage lorsque nécessaire.

6.5.3. Les enregistrements des contrôles

Les résultats des contrôles visuels, des mesures et des essais en chantier et en laboratoire ainsi que l'inspection finale devraient faire l'objet d'enregistrements et permettre une bonne traçabilité pour les différentes parties des ouvrages. Ces enregistrements permettent l'établissement d'un dossier relatif au projet ; lequel devrait être conservé pour toute la vie utile de l'ouvrage.

6.5.4. Les points de contrôles de la qualité des travaux

- S'assurer d'un contrôle visuel assidu pendant les travaux.
- Préconiser l'échantillonnage pour des essais de contrôles à la centrale d'enrobage.
- Vérifier que la compaction s'effectue continuellement.
- Prévoir un contrôle constant de la température durant les étapes d'épandage et de compactage.
- Préconiser l'utilisation de la caméra infrarouge pour la vérification en continue de la ségrégation longitudinale thermique.
- Effectuer une vérification soignée de la planéité des joints.
- S'assurer du drainage superficiel du revêtement avant de finaliser les travaux.

Questions

- 6.1. Quel est le type le plus résistant des bétons bitumineux ? Justifiez.
- 6.2. Comment un liant participe-t-il dans la résistance mécanique d'un mélange ?
- 6.3. Dans la phase de préparation pour formulation par Marshall, quelle sont les propriétés à caractériser ?

ANNEXE 1

Aspects normatifs de l'utilisation des granulats - Selon NF P 18-554[16]

Codification des granulats et des liants

CARACTERISTIQUES INTRINSEQUES				
Codes	Los Angeles	Micro-Deval	Polissage accéléré	Codes
-			PSV 56	Anc
Bnc	LA ₂₀	M _{DE} 15	PSV 50	Bnc
Cnc	LA ₂₅	M _{DE} 20		Cnc
Dnc	LA ₃₀	M _{DE} 25	-	-
Enc	LA ₄₀	M _{DE} 40		

Codes	Los Angeles	Micro-Deval	LA + MDE	Polissage accéléré	Codes
-				PSV 56	A ²⁾
B ¹⁾	LA ₂₅	M _{DE} 20	LA + MDE ≤ 35	PSV 50	B ²⁾
C ¹⁾	LA ₃₀	M _{DE} 25	LA + MDE ≤ 45		C ²⁾
D ¹⁾	LA ₃₅	M _{DE} 30	LA + MDE ≤ 55	-	
E ¹⁾	LA ₄₅	M _{DE} 45	LA + MDE ≤ 80		

1) La conformité est assurée si les 3 conditions (LA+MDE, LA, MDE) sont respectées simultanément.

2) La conformité est assurée si les 4 conditions (LA+MDE, LA, MDE, PSV) sont respectées simultanément.

CARACTERISTIQUES DE FABRICATION DES GRAVILLONS							
Codes	Granularité	à D et d	à D/1,4 ou D/2		Propreté	Aplatissement	Codes
			NF EN 13242	NF EN 13043			
-	G _c 85/20 ⁽¹⁾	e 10	-	G25/15 ou G20/15	f _{0,5}	FI ₁₅ ⁽⁶⁾	I
III	G _c 85/20 ⁽²⁾				f _{0,5} ⁽³⁾	FI ₂₀ ⁽⁷⁾	II
IV	G _c 80/20	e 10	GT _c 25/15 ou GT _c 20/15 ou GT _c 20/17,5	-	f ₁ ⁽⁴⁾	FI ₂₅ ⁽⁸⁾ / ⁽⁹⁾	III
V	Autres catégories de la norme NF EN 13242 : FTP renseignée						-
(1) G _c 85/15 si emploi en formule discontinue - (3) f ₁ si MBF10 - (4) f ₂ si MBF10 - (6) FI ₂₀ si D ≤ 6,3 - (7) FI ₂₅ si D ≤ 6,3 - (8) FI ₃₀ si D ≤ 6,3							Notes NF EN 13043
2) G _c 80/20 pour GNT et GTLH - (4) f ₂ pour GNT et GTLH - (5) f ₂ si MBF10 - (9) FI ₃₅ pour GNT et GTLH							Notes NF EN 13242

CARACTERISTIQUES DE FABRICATION DES SABLES ET GRAVES						
Codes	Granularité		Propreté des éléments <2mm			Codes
	NF EN 13242	NF EN 13043	MB ⁽¹⁾ ou MB _{0/D} ⁽¹⁾ ou SE(10)			
a	-	G _F 85 GTC10(4)	MB2	MB _{0/D} 0,8	SE(10) 55	a
b	G _F 85 GT _F 10 ⁽²⁾		MB2,5		SE(10) 45 ⁽⁵⁾	
c	G _F 80 GT _F 10 ⁽³⁾	-	MB3	MB _{0/D} 1	SE(10) 35 ⁽⁵⁾	-
d	Autres catégories de la norme NF EN 13242 : FTP renseignée					
Notes NF EN 13242	(1) Au choix MB ou SE(10) si $D \leq 6,3$ mm et MB ou MB0/D ou SE(10) si $D > 6,3$ mm (2) G _A 85 GT _A 10 si $D > 6,3$ mm (3) G _A 80 GT _A 10 si $D > 6,3$ mm		(4) G _A 85 si $2 < D \leq 6,3$ mm (5) Uniquement pour GNT et GTLH		Notes NF EN 13043	

ANGULARITE DES GRAVILLONS ET DES SABLES D'EXTRACTION ALLUVIONNAIRE OU MARINE					
Codes	Gravillons		Sables et graves		Codes
	Pourcentage de surfaces cassées (NF EN 933-5)		Essai d'écoulement (NF EN 933-6)		
	NF EN 13242	NF EN 13043	Alternatif ⁽¹⁾⁽³⁾	NF EN 13043 ⁽²⁾	
Ang1	-	C _{95/1}	E _{CG} 110	E _{CS} 35	Ang1
Ang2	C _{90/3}	C _{90/1}	E _{CG} 105	E _{CS} 35	Ang2
Ang3	C _{50/10}	C _{50/10}	E _{CG} 95	E _{CS} 30	Ang3
Ang4	C _{NR/50}	-	E _{CG} 85	E _{CS} déclaré	Ang4
	(1) Sur la fraction granulaire 4/6,3-6,3/10 - 4/10 ou 10/14 la plus représentée dans le gravillon (3) Sur la fraction granulaire 10/14 si $D > 14$ mm		(2) Sur la fraction 0/2 mm des sables et graves pour enrobés		

AUTRES CARACTERISTIQUES DES SABLES GRAVES ET GRAVILLONS			
Masse volumique réelle (NF EN 1097-6 - annexe A)		Valeur déclarée	
Résistance au gel/dégel (NF EN 1097-6 art. 8 ou 1367-1 ou 1097-2)		WA ₂₄ 1 ou F2	ou LA ₂₅
Friabilité des 0/D de nature pétrographique différente du gravillon naturel ou d'origine différente du gravillon recyclé ou artificiel (P 18-576)		Sur 0/2 Vss 45	
		Sur 0/4 Vss 40	
Soufre total (art. 11)	Des laitiers de HF	NF EN 1744-1	S2 pour GTLH
Désintégration du silicate bicalcique et du fer (art. 19.1 et 19.2)			Aucune désintégration
Désintégration des laitiers d'aciérie (art. 19.3)			Pour enrobés Vss 3,5 Pour GNT Vss 5 Pour enduits Vss 6,5

Réponses typiques aux Questions posées

- 1.1. *Les routes des anciennes civilisations sont plus durables que celles des temps modernes* car faites généralement par des matériaux durables et bien compactés (pierres et terre). De plus, l'épaisseur des couches de chaussées était surdimensionnée afin d'assurer la longévité de la route.
 - 1.2. La route romaine se distingue par : le tracé en ligne droite pour les zones plates et en mi-pente pour les régions accidentés et l'installation des routes sur les crêtes hautes pour éviter les problèmes des zones basses ; l'adoption d'un corps de chaussée de différentes tailles des granulats et un dallage (pavage) en pierres.
 - 1.3. *Je recommande granulat lourd pour une chaussée* : Elle supporte les différents chargements, ayant une forte résistance mécanique et résiste aux différentes actions du milieu externe.
-

- 2.1. *Le rôle des granulats* quelque soit dans le béton ou dans une couche de la chaussée est de constituer le squelette porteur de l'élément. C'est-à-dire, contribuer, presque à 80% à la résistance mécanique. De plus dans la couche de roulement, ils ont un rôle antidérapant ?
 - 2.2. *80 % d'une chaussée sont des granulats* en volume afin d'obtenir les propriétés souhaités facilitant la mise en oeuvre des matériaux (maniabilité, compactage, porosité, propriétés mécaniques...etc.)
 - 2.3. *un mélange cimentaire léger et résistant* est basé sur une meilleure sélection des granulats légers assurant une masse volumique faible du mélange, et un liant résistant, dosage fort et haute résistance, afin d'obtenir une résistance mécanique importante.
-

- 3.1. *du rôle de liant dans une matrice cimentaire* : Le liant a un rôle principale de collant des autres matières (granulats, fibres...etc.), un deuxième rôle c'est le remplissage des vides (package), un troisième rôle est de contribuer à la résistance mécanique du mélange à environs 20 % pour un béton ordinaire).
- 3.2. *Le liant participe dans la résistance mécanique d'un mélange* par deux aspects :

- Par la formation d'une pâte si rigide et bien cohérente (produits d'hydratation favorisant une haute résistance comme l'hydrate CSH)
- Par la formation d'une zone interfaciale pâte /granulats bien soudée.

3.3. *Non, pas tout liant noir est acceptable pour utilisation en route.*
Les bitumes sont les plus utilisés dans le domaine routier.

4.1. les structures inverses : Elles ne sont autorisées que sur une classe de plateforme PF3 ou PF4 constituée d'une couche de forme traitée aux liants hydrauliques.

4.2. *Les propriétés les plus significatives en cas de chaussées rigides et celles pour les chaussées souples.*

Chaussées souples :

- Utilisation de la GNT en couche de base et de fondation (moins chère) ;
- Couche de roulement moins épaisse. C-à-d, facile à reprendre après dégradation)
- Moins de cout de revient surtout dans les pays pétroliers,
- Plus étanche à l'agression de l'eau et la pénétration des agents destructeurs ;
- Moins de fissuration.

Chaussées rigides :

- Résistance mécanique plus élevée (recommandées pour des classes de trafic sup ;
- Moins de couches inférieures (forme et fondation) ;
- Moins sensible à la température et mois d'orniérage.

4.3. *Les bétons bitumineux drainants sont mieux par rapport les chaussées bitumineuses épaisses en terme d'évacuation de l'eau. L'eau est source de problème dans les routes. En fait, un béton drainant, par son réseau poreux ouvert, offre moins d'érosion et moins de charge supplémentaire dus à la stagnation des eaux.*

5.1. *La composition du béton est indispensable afin d'optimiser les proportions des constituants selon la gamme voulues et les propriétés souhaitées (reliées aussi à la classe de l'environnement de la structure).*

5.2. *Le liant participe dans la résistance mécanique d'un mélange par deux aspects :*

- Par la formation d'une pâte si rigide et bien cohérente (produits d'hydratation favorisant une haute résistance comme l'hydrate CSH)
- Par la formation d'une zone interfaciale pâte /granulats bien soudée.

5.3. *On obtient les pourcentages des granulats dans un mélange par l'application des graphiques de mélange, de partage et des lignes de Joisel lors de l'essai d'analyse granulométrique.*

-
- 6.1. Le type le plus résistant des bétons bitumineux c'est bien le l'ultra mince (BBUM), utilisé en couche de roulement, avec une épaisseur de 1-1.5 cm. Plus la minceur est exigée plus la résistance visé est élevée.
 - 6.2. Le liant dans les cas des produits noirs a une faible implication dans la résistance mécanique, assuré autrement par le squelette granulaire optimisé. Mais, il participe comme réducteur de vides dans le mélange (packing role).
 - 6.3. Dans la phase de préparation pour formulation par Marshall, on caractérise les propriétés physico-chimique des constituants (densité, masse volumique, absorption, porosité, altération, polissage...etc.).
-

Références

1. Lorino, T., *Autopsie d'une chaussée*. LCPC: Nantes, Consulté online 23/02/21: <https://fdocuments.fr/document/autopsie-dune-chaussee.html>
2. Wilford, J.N., *World's Oldest Paved Road Found in Egypt*, in *The New York Times*. May 8, 1994, NYT.
3. Doncaster College, *Bituminous materials: Manufacture*. 1999, Doncaster College: Doncaster.
4. Bordjiba, A., *Valorisation et renforcement des bétons bitumineux* 2017, Université de Annaba, Algérie.
5. Vikidia. *Voie romaine*. Available from: https://fr.wikidid.org/wiki/Voie_romaine
6. Nicholls, J.C., *Asphalt surfacings*. 1998: CRC Press.
7. Lay, M.G. and F.J. Benson. *Roads and highways*. 2016; Available from: <https://www.britannica.com/technology/road>. Accessed 23 February 2021.
8. Wooller, S., *The changing climate: its impact on the Department for Transport*. 2003, Department for Transport London
9. Cimbeton, *T50. Voiries et aménagements urbains en béton (Tome 1) - Conception et dimensionnement*. 2019, Cimbeton
10. Guy, D., *Les granulats* 1985, Laboratoire Central: Sainte-Foy (Québec).
11. AFNOR, *XP P 18-545- Granulats Éléments de définition conformité et codification*. 2004, AFNOR: Saint-Denis La Plaine (France)
12. Mamlouk, M.S. and J.P. Zaniewski, *Materials for civil and construction engineers*. 2017, New Jersey 07030: Pearson Education.
13. Galtier, L., *Mémento roches et minéraux industriels- Granulats*. 1993, BRGM: Orléans.
14. AFNOR, *NF P 18-101 : Granulats- Terminology, définitions et classification*. 1990, AFNOR: Saint-Denis La Plaine.
15. AFNOR, *NF P18-309- Granulats: Granulats d'argile ou de cshiste expansées fabriqués en four rotatif destinés à la confection de bétons*. 1982, AFNOR: Saint-Denis.
16. AFNOR, *NF P 18-554: GRANULATS - MESURES DES MASSES VOLUMIQUES, DE LA POROSITE, DU COEFFICIENT D'ABSORPTION ET DE LA TENEUR EN EAU DES GRAVILLONS ET CAILLOUX*. 1990, AFNOR: Saint-Denis La Plaine.
17. AFNOR, *NF P 18-555: GRANULATS - MESURES DES MASSES VOLUMIQUES, COEFFICIENT D'ABSORPTION ET TENEUR EN EAU DES SABLES*. 1990, AFNOR: Saint-Denis La Plaine.
18. Infociments. *Caractéristiques et types de granulats*. 2018 Feb 24, 2021]; Available from: <https://www.infociments.fr/betons/caracteristiques-et-types-de-granulats>
19. Robert, L. and J.F. Lafon, *Cours ROUTES Matériaux Durabilité des chaussées - Tome 1*, T. Université de Paul Sabatier, Editor. 2012: Toulouse.
20. iDRRIM *Note d'information N 24- Aide au choix des granulats pour chaussées basée sur les normes européennes*. 2013.
21. Berthier, J., *Granulats et liants routiers*. Techniques de l'ingénieur. Construction, 1992. **CB1(C903)**: p. C903.1-C903.11.
22. AFNOR, *NF EN 933-8, Essais pour déterminer les caractéristiques géométriques des granulats — Partie 8 : Évaluation des fines — Équivalent de sable*. 2012, AFNOR: Saint-Denis La Plaine
23. ASTM, *ASTM D 2419 – 02: Standard Test Method for Sand Equivalent Value of Soils and Fine Aggregate*. 2002, ASTM International: West Conshohocken, PA 19428-2959, United States.

24. AASHTO, *AASHTO T 176: Standard Method of Test for Plastic Fines in Graded Aggregates and Soils by Use of the Sand Equivalent Test*. 2017, AASHTO: Washington DC.
25. AFNOR, *NF EN 933-8+A1 - Essais pour déterminer les caractéristiques géométriques des granulats - Partie 8 : évaluation des fines - Équivalent de sable*. 2015, AFNOR: Saint-Denis La Plaine.
26. ASTM, *ASTM C1777 - 20 : Standard Test Method for Rapid Determination of the Methylene Blue Value for Fine Aggregate or Mineral Filler Using a Colorimeter*. 2020, ASTM International West Conshohocken, PA 19428-2959, United States.
27. ASTM, *ASTM C837 - 09(2019) / Standard Test Method for Methylene Blue Index of Clay*. 2019, ASTM International: West Conshohocken, PA.
28. Inpl-Nancy. *Propriétés Mécaniques et Physiques des Sols*. Feb 24, 2021]; Available from: http://tice.inpl-nancy.fr/modules/sciences_techniques/Proprietes-Meca-Sols/chap2/bleu.html
29. Yu, X., N.A. Burnham, and M. Tao, *Surface microstructure of bitumen characterized by atomic force microscopy*. *Advances in Colloid and Interface Science*, 2015. **218**: p. 17-33.
30. AFNOR, *NF EN 1426 : Bitumes et liants bitumineux- Détermination de la pénétrabilité à l'aiguille*. 1999, AFNOR: Saint-Denis La Plaine.
31. ASTM, *ASTM D5 / D5M - 20 : Standard Test Method for Penetration of Bituminous Materials*. 2020, ASTM International: West Conshohocken, PA.
32. ASTM, *ASTM D2872 - 19 : Standard Test Method for Effect of Heat and Air on a Moving Film of Asphalt (Rolling Thin-Film Oven Test)*. 2019, ASTM International: West Conshohocken, PA.
33. AFNOR, *T65-002: Liants hydrocarbonés - Bitumes fluidifiés- Spécifications*. 1991, AFNOR: Saint-Denis La Plaine.
34. AFNOR, *T65-011: Liants hydrocarbonés- Emultions de bitume -Spécifications* 1984, AFNOR: Saint-Denis La Plaine.
35. Neville, A.M., *Properties of Concrete , 5th Ed*. 2013: Pearson Education.
36. Mehta, P.K. and P.J.M. Monteiro, *Concrete: Microstructure, Properties, and Materials*. 2013: McGraw-Hill Education.
37. AASHTO, *AASHTO M 85-15 / ASTM C150/C150M-15 - Standard Specification for Portland Cement* 2015, AASHTO/ASTM: Washington, D.C. 20001.
38. Ramachandran, V.S., *Concrete Admixtures Handbook: Properties, Science and Technology*. 1996: Elsevier Science.
39. AFNOR, *NF EN 206-1, Béton — Partie 1 : Spécification, performances, production et conformité*. 2001, AFNOR: Saint-Denis La Plaine.
40. Chiker, T., *Durabilité de variété des bétons*. 2017, Université de Mentouri 1, Constantine: Constantine.
41. Aldred, J.M., et al., *ACI 234R- Guide for the use of silica fume in concrete*. 2006: ACI-American Concrete Institute-Committee: Farmington Hills, MI, USA.
42. SETRA/LCPC, *Catalogue des Structures Types de Chaussées Nouves*, SETRA and LCPC, Editors. 1998, LCPC: Paris.
43. Kosmatka, S.H., B. Kerkhoff, and W.C. Panarese, *Design and Control of Concrete Mixtures*. 2002: Portland Cement Association.
44. Taylor, H.F., *Cement chemistry*. 1997: Thomas Telford.
45. Neville, A.M., *Properties of Concrete*. 5 ed. 2011: Trans-Atlantic Publications, Indian International Ed,.
46. Aïtcin, P.-C., *Binders for durable and sustainable concrete*. 2007: CRC Press.

47. Ramachandran, V.S., et al., *Handbook of thermal analysis of construction materials*. 2002: William Andrew.
48. Yang, W., *The Issues and Discussion of Modern Concrete Science*. 2015: Springer Berlin Heidelberg.
49. Dreux, G. and J. Festa, *Nouveau guide du béton et de ses constituants. 8th Ed.* 2007: Eyrolles.
50. Dreux, G., *Composition des bétons*. Techniques de l'ingénieur C, 1982. 2(C2220): p. C2220-1 - C2220-15.
51. guidebeton. *Le béton bitumineux*. Feb 24, 2021]; Available from: <http://www.guidebeton.com/beton-bitumineux>.
52. ASTM, *ASTM D2041-03a : Standard Test Method for Theoretical Maximum Specific Gravity and Density of Bituminous Paving Mixtures*. 2003, ASTM International West Conshohocken, PA.
53. TheAsphaltInstitute, *Mix Design Methods for Asphalt Concrete and Other Hot-Mix Types MS-2*. 2001, The Asphalt Institute: Lexington, KY.