

1. Granulats

1.1 Principales catégories

Les granulats sont dits :

- naturels, lorsqu'ils sont issus de roches meubles ou massives, extraites *in situ*, et qu'ils ne subissent aucun traitement autre que mécanique ;
- artificiels, lorsqu'ils proviennent soit de la transformation thermique de roches, minerais et déchets, soit de la démolition d'ouvrages divers.

Les granulats naturels peuvent se caractériser :

- par la nature des gisements d'où ils sont extraits ;
- par leur nature pétrographique ;
- par leur niveau de performance en utilisation routière.

Du point de vue du gisement dont ils proviennent, on distingue les matériaux alluvionnaires et les matériaux de roches massives.

Les dépôts alluviaux se situent dans les lits des rivières, dans leurs basses vallées ou dans des terrasses déposées au cours des temps géologiques. Les matériaux alluvionnaires sont meubles et leur extraction peut être réalisée à un prix modéré.

Les roches massives sont extraites dans des carrières d'où elles doivent être abattues à l'explosif avant de subir les opérations d'élaboration.

Du point de vue de la nature pétrographique, la variété des roches qui constituent les granulats est très grande. On peut les regrouper en roches sédimentaires, roches métamorphiques et roches magmatiques.

Les roches sédimentaires se sont déposées dans le lit des rivières, des lacs et des océans et se sont consolidées sans transformations chimiques importantes par précipitation de la silice, du calcium ou parfois du magnésium dissous.

Les roches métamorphiques proviennent de la transformation des roches sédimentaires sous l'effet des contraintes et de la température élevée résultant de leur enfouissement à grande profondeur. Dans ce processus, les minéraux sont profondément transformés et une schistosité apparaît, d'autant moins accentuée que la transformation minéralogique est plus prononcée.

Les principaux constituants des roches métamorphiques sont le quartz, extrêmement dur, inaltérable et résistant, le feldspath (silicate d'alumine et de sodium, potassium ou calcium) un peu moins dur et altérable, les micas (silicates d'aluminium avec du magnésium et du potassium) très lamellaires et tendres et de nombreux autres silicates en quantité plus ou moins importantes (pyroxènes, amphiboles, etc.).

Les roches magmatiques s'enracinent en profondeur en masses importantes (roches plutoniques) ou par les cheminées ou failles par lesquelles sont montées les coulées de lave. Leur niveau de cristallisation est variable. Certaines laves sont totalement vitreuses.

L'aptitude des granulats à être utilisés dans les assises de chaussée est appréciée par un certain nombre d'essais dont les principaux sont les suivants.

1.2 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 $D \leq 1,58 d$.

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 délimitée par 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 fuseaux 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.

1.3 Propreté

Comme pour les sols, la propreté est mesurée par l'essai d'équivalent de sable et par l'essai au bleu de méthylène.

1.4 Angularité

Elle joue un rôle important 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 I_C , proportion en poids d'éléments supérieurs à la dimension D du granulat élaboré ;
- le rapport de concassage R_C , rapport entre d du matériau soumis au concassage et D du granulat obtenu.

1.5 Forme

Elle 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.

Elle est définie, par référence à la figure 1, 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.

1.6 Qualité de la roche

Trois essais permettent de la caractériser.

1.6.1 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.

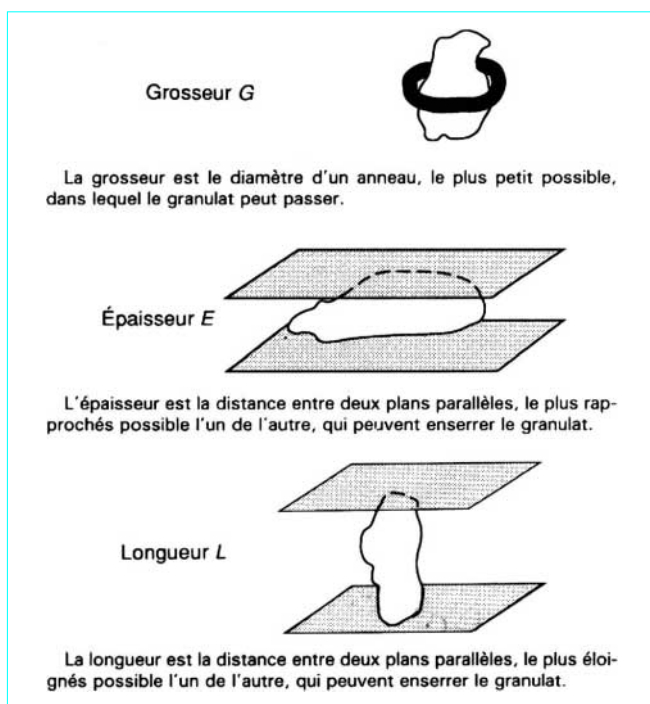


Figure 1 – Définitions relatives à la forme des gravillons

Le coefficient Deval est égal à $20\,000/P$, 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.

1.6.2 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).

1.6.3 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 1.

Tableau 1 – Interprétation de l'essai de polissage accéléré des granulats		
Coefficient de poli	Appréciation	Interprétation
Inférieur à 0,35	Mauvais	En principe, un tel granulat ne doit pas être employé en couche de surface
Entre 0,35 et 0,45	Passable	Un tel granulat ne doit être utilisé que lorsque les conditions de tracé et de trafic sont favorables
Entre 0,45 et 0,55	Bon	L'utilisation d'un tel granulat est recommandée lorsque les conditions de tracé et de trafic sont défavorables (virages, carrefours, vitesses élevées, trafic intense)
Supérieur à 0,55	Très bon	

1.6.4 Classement de synthèse

À partir de ces différents essais, la norme P 18-101 sur les caractéristiques des granulats destinés aux travaux routiers classe les gravillons suivant les cinq catégories de résistance mécanique du tableau 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 – Classement des granulats selon la norme P 18-101			
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.

2. Liants hydrocarbonés

Les deux grandes catégories de liants hydrocarbonés sont les goudrons et les bitumes, ainsi que les produits qui en dérivent.

À l'origine, les seuls liants routiers étaient les goudrons, qui provenaient de la distillation des goudrons bruts d'usines à gaz ou de cokeries de hauts-fourneaux. L'arrêt des usines à gaz a fait que le goudron routier, sous sa forme traditionnelle, a pratiquement complètement disparu, le brai de cokerie trouvant d'autres applications plus rentables et les huiles de goudron étant utilisées en ajout au bitume pour en faire des bitumes fluxés.

La quasi-totalité des liants routiers est donc maintenant à base de bitume.

2.1 Types de bitumes

2.1.1 Bitume naturel

Le bitume existe à l'état naturel sous forme de résidu d'anciens gisements de pétrole dont les éléments les plus légers ont été éliminés au cours du temps par une sorte de 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. Le plus connu de ces bitumes naturels est le bitume de Trinidad 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 ne sont guère utilisés que comme ajout pour certaines utilisations particulières, compte tenu de leurs caractéristiques spécifiques (aptitude à être colorés, effet stabilisateur pour les asphaltes coulés...).

2.1.2 Asphalte naturel

L'asphalte naturel est constitué par une roche calcaire imprégnée d'hydrocarbures lourds (jusqu'à 20 %).

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.

2.1.3 Bitume de pétrole

C'est de très loin 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.

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.

2.3 Principales caractéristiques des bitumes routiers

2.3.1 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 2).

La pénétrabilité à 25 °C 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 températures, ce qui permet de tracer une courbe de pénétrabilité en fonction de la température, très utile pour apprécier la susceptibilité thermique du bitume.

2.3.2 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).

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 flue. 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*.

2.3.3 Classification des bitumes routiers

Le tableau 3 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.

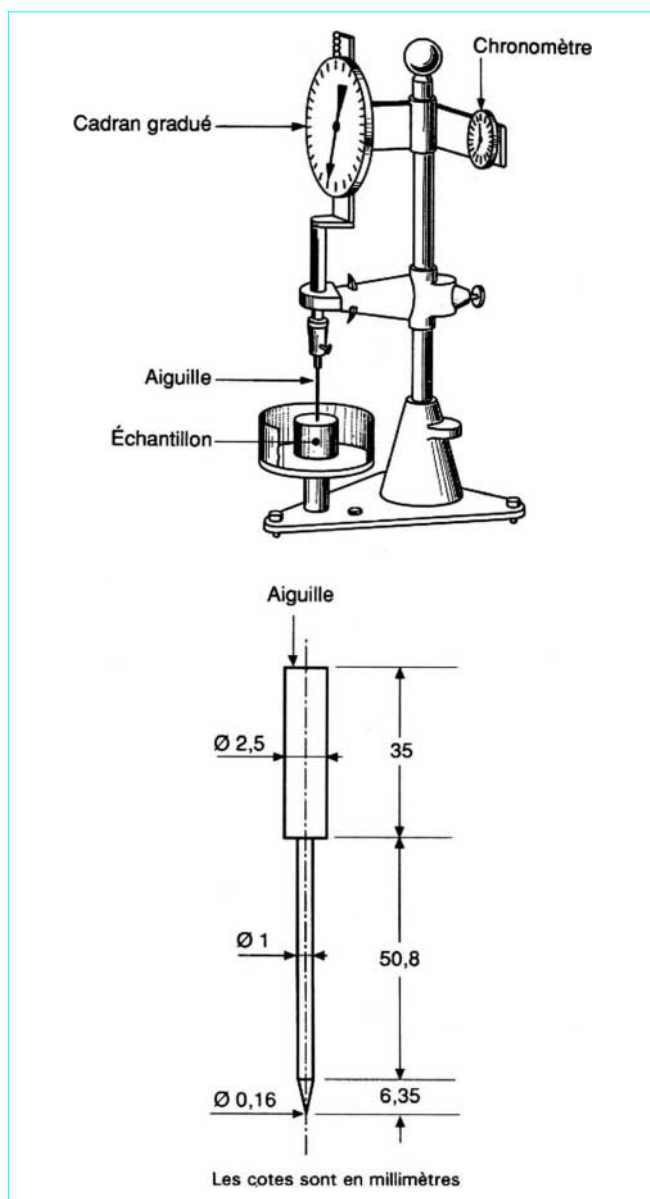


Figure 2 – Mesure de la pénétrabilité

L'effet de cette élévation de température peut être simulé par l'essai RTFOT, *Rolling Thin-Film Oven Test* (norme ASTM D 2872) 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.

2.4 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 répandage pour les enduits superficiels, plusieurs difficultés apparaissent, liées au maintien de températures élevées dans les répanduses, 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.

2.4.1 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.

2.4.2 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.

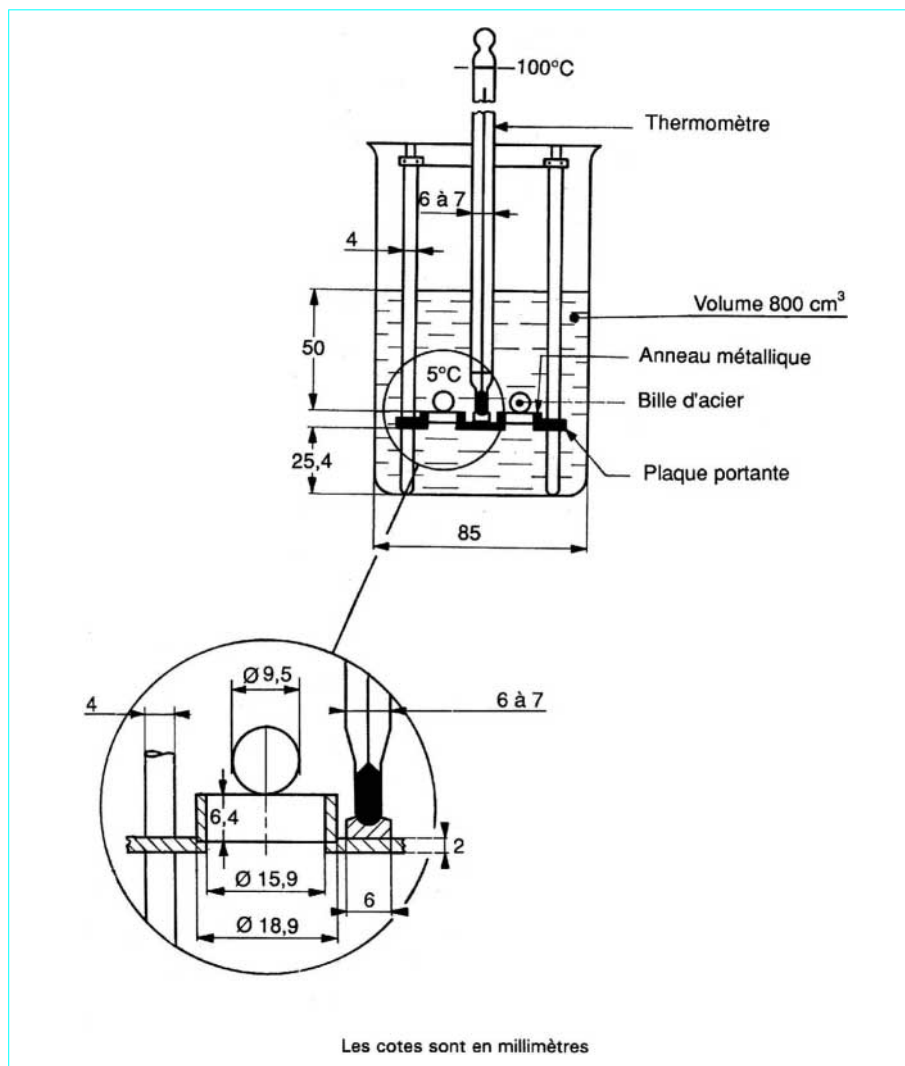


Figure 3 – Appareil bille et anneau pour le point de ramollissement du bitume

Tableau 3 – Classification des bitumes purs

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

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.

2.4.3 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 4) 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.

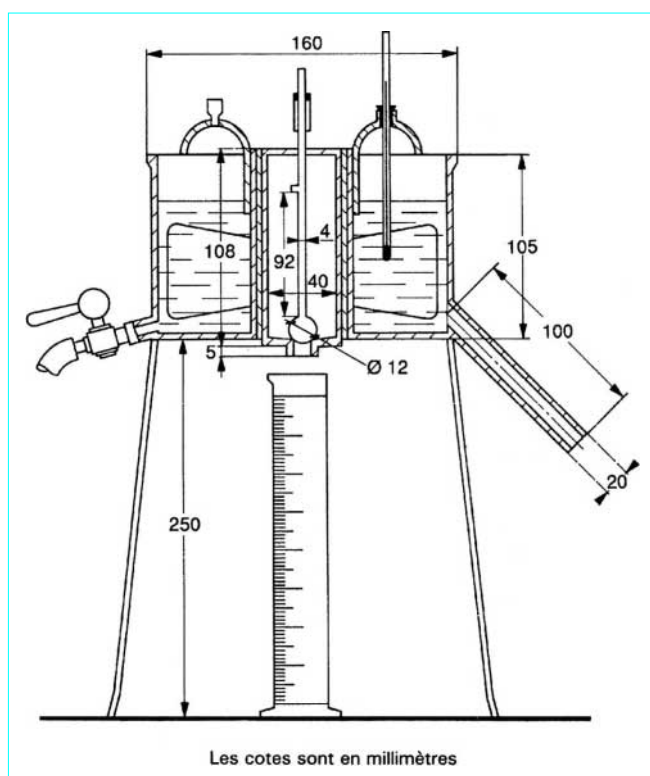


Figure 4 – Viscosimètre STV pour la mesure de la pseudoviscosité

L'orifice de 10 mm est utilisé si la pseudoviscosité est égale ou supérieure à 10 s. Si la pseudoviscosité à 25 °C dépasse 600 s, la température d'essai est portée à 40 °C. L'orifice de 4 mm est utilisé à 25 °C pour les bitumes fluidifiés dont la pseudoviscosité à l'orifice de 10 mm est inférieure à 10 s.

2.4.4 Classification des bitumes fluidifiés et fluxés

Le tableau 4 donne la classification des bitumes fluidifiés et fluxés suivant les normes en vigueur en France à la date de rédaction.

Les bitumes fluidifiés 0-1 sont utilisés pour l'imprégnation des sols relativement compacts et les bitumes fluidifiés 10-15 pour celle des sols plus poreux. Soulignons que ces deux classes comportent deux sous-classes en fonction de la position du point d'éclair par rapport aux seuils de 21 et 55 °C.

On utilise les bitumes fluidifiés et les bitumes fluxés 150-250 pour les enrobages à froid, les emplois partiels différés et les enduits superficiels sur route à trafic faible en début et fin de saison.

Les bitumes fluidifiés et fluxés 400-600 sont réservés de préférence pour les enrobés et les enduits superficiels. Ces enduits peuvent être également exécutés sur routes moyennement circulées avec des bitumes 800-1200, au prix de certaines précautions.

Le bitume fluidifié 800-1200 et les bitumes fluxés 1200-1600 et 1600-2400 sont utilisés pour les enduits superficiels sur routes à forte circulation.

2.5 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 :

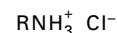
- abaisse la tension interfaciale eau-bitume ;
- se fixe à la surface des micelles de bitume en les chargeant électriquement et en créant entre elles un effet de répulsion qui assure leur stabilité.

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 :



- 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.

Tableau 4 – Classification des bitumes fluidifiés et fluxés (d’après norme T 65-002)

Caractéristique	Méthode normalisée de référence	Bitumes fluidifiés par un diluant pétrolier					Bitumes fluxés par une huile de goudron de houille pétrolier			
		Classe					Classe			
		0-1	10-15	150-250	400-600	800-1 400	400-600	800-1 200	1 200-1 600	1 600-2 400
Pseudoviscosité mesurée au viscosimètre	NFT 66-005									
— d’orifice 4 mm, à 25 °C...(s)		< 30								
— d’orifice 10 mm, à 25 °C...(s)			10 à 15	150 à 250	400 à 600		400 à 600			
— d’orifice 10 mm, à 40 °C...(s)						80 à 200		90 à 140	140 à 200	200 à 300
Densité relative à 25 °C (au pycnomètre)	NFT 66-007	0,90 à 1,02	0,90 à 1,02	0,92 à 1,04	0,92 à 1,04	0,92 à 1,04	0,95 à 1,15	0,95 à 1,15	0,95 à 1,15	0,95 à 1,15
Distillation fractionnée (résultats exprimés en pourcentage du volume initial)	NFT 66-003									
Fraction distillant au-dessous de :										
190 °C		< 9					< 5	< 4	< 3	< 2
225 °C		10 à 27	< 11	< 3	< 2	< 2	< 10	< 10	< 10	< 10
315 °C		30 à 45	16 à 28	6 à 15	5 à 12	3 à 11	< 25	< 25	< 25	< 25
360 °C		< 47	< 32	< 20	< 15	< 13	< 30	< 30	< 25	< 25
Pénétrabilité à 25 °C, 100 g, 5 s du résidu à 360 °C de la distillation.....(1/10 mm)	NFT 66-004	80 à 250	80 à 250	80 à 200	80 à 200	80 à 200				
Point d’éclair (vase clos) .....(°C)	NFT 66-009	A: 21 ≤ 55 °C B: ≥ 55 °C	A: 21 ≤ 55 °C B: ≥ 55 °C	≥ 55	≥ 55	≥ 55	≥ 55	≥ 55	≥ 55	≥ 55

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.

2.5.1 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.

2.5.2 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 5.

Ces essais permettent de définir les classifications normalisées représentées sur les tableaux 5 et 6.

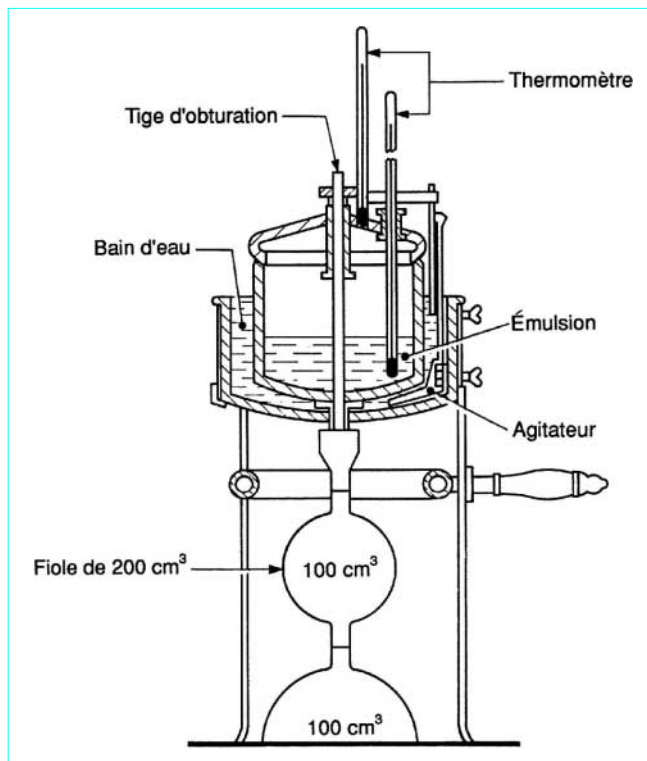


Figure 5 – Viscosimètre Engler pour émulsions de bitume

Tableau 5 – Classification des émulsions anioniques (norme NF T 65-011)

Caractéristique	Méthode normalisée de référence	Rapide				Lente			Surstabilisée	
		Classe				Classe			Classe	
		EAR 50	EAR 55	EAR 60	EAR 65	EAL 55	EAL 60	EAL 65	EAS 55	EAS 60
Teneur en eau.....(%)	NF T 66-023	49 à 51	44 à 46	39 à 41	34 à 36	44 à 46	39 à 41	34 à 36	44 à 46	39 à 41
Pseudoviscosité Engler à 25 °C.....(s)	NF T 66-020	< 6	< 15	> 2	> 6	< 15	> 2	> 6	< 15	< 2
Pseudoviscosité STV à 25 °C (diamètre de l'orifice d'écoulement 4 mm).....(s)		.....	.....	< 18	.....	.....	< 18	.....	.....	< 18
Homogénéité.....	NF T 66-016	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....
— particules supérieures à 0,63 mm.....	.....	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1
— particules comprises entre 0,63 et 0,16 mm.....	.....	< 0,25	< 0,25	< 0,25	< 0,25	< 0,25	< 0,25	< 0,25	< 0,25	< 0,25
Indice de rupture.....	T 66-019	> 0,5	> 0,5	> 0,5	> 0,5	0	0	0	< 0,25	< 0,25
Stabilité au ciment.....	NF T 66-024	.....	.....	.....	.....	> 2	> 2	> 2	≤ 2	≤ 2
Charge des particules.....	T 66-021	négative	négative	négative	négative	négative	négative	négative	négative	négative

Tableau 6 – Classification des émulsions cationiques (norme NF T 65-011)

Caractéristique	Méthode normalisée de référence	Rapide			Semi-rapide			Lente			Surstabilisée	
		Classe			Classe			Classe			Classe	
		ECR 60	ECR 65	ECR 69	ECM 60	ECM 65	ECM 69	ECL 55	ECL 60	ECL 65	ECS 55	ECS 60
Teneur en eau.....(%)	NF T 66-023	39 à 41	34 à 36	30 à 32	39 à 41	34 à 36	30 à 32	44 à 46	39 à 41	34 à 36	44 à 46	39 à 41
Pseudoviscosité Engler à 25 °C.....(s)	NF T 66-020	2 à 15	> 6	.....	> 2	> 6	.....	< 15	2 à 15	> 6	< 15	> 2
Pseudoviscosité STV à 25 °C (diamètre de l'orifice d'écoulement 4 mm).....(s)		.....	.....	> 9	< 18	.....	> 9	.....	.....	.....	.....	< 18
Homogénéité.....	NF T 66-016	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....
— particules supérieures à 0,63 mm.....	.....	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1
— particules comprises entre 0,63 mm et 0,16 mm.....	.....	< 0,25	< 0,25	< 0,25	< 0,25	< 0,25	< 0,25	< 0,25	< 0,25	< 0,25	< 0,25	< 0,25
Stabilité au stockage par décantation (1).....	T 66-022	< 5	< 5	< 5	< 5	< 5	< 5	< 5	< 5	< 5	< 5	< 5
Adhésivité (2).....	NF T 66-018	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....
— émulsion à stockage limité (1).....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....
1 ^{re} partie de l'essai.....	.....	≥ 90	≥ 90	≥ 90	≥ 90	≥ 90	≥ 90	.....	.....	.....	.....	.....
2 ^e partie de l'essai.....	.....	≥ 75	≥ 75	≥ 75	≥ 75	≥ 75	≥ 75	.....	.....	.....	.....	.....
— émulsion stockable (1).....	.....	.....	.....	.....	≥ 75	≥ 75	≥ 75	≥ 75	≥ 75	≥ 75	.....	.....
Indice de rupture.....	NF T 66-017	< 100	< 100	< 100	80 à 140	80 à 140	80 à 140	> 120	> 120	> 120	.....	.....
Stabilité au ciment.....	NF T 66-024	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	≤ 2	≤ 2
Charge des particules.....	NF T 66-021	positive	positive	positive	positive	positive	positive	positive	positive	positive	positive	positive

(1) Il est admis qu'une émulsion stockée pendant un temps *t* à une température supérieure à 5 °C, brassée, peut présenter une couche superficielle de solution aqueuse ; après brassage cette couche doit disparaître et l'émulsion ne doit pas présenter d'amorce de rupture.

On distingue :

- une émulsion à stockage limité, par le fait que le temps *t* précédemment défini est au maximum de 15 jours ;
- une émulsion stockable, par le fait que le temps *t* précédemment défini est compris entre 15 jours et 3 mois.

(2) Les caractéristiques d'adhésivité d'une émulsion doivent être spécifiées vis-à-vis d'une nature définie de granulats.

2.5.3 Utilisation

Les émulsions sont utilisées dans de nombreux types de matériaux et de procédés.

Le tableau 7 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 préenrobés, les retraitements, stabilisations et imprégnations.

Tableau 7 – Utilisation des émulsions de bitume

Utilisation	Teneur en liant (%)	Viscosité (en degré 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

2.6 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.

Les liants modifiés peuvent être fabriqués avant emploi en raffinerie (bitume SBS et EVA), en usine fixe ou mobile (SBS, EVA et caoutchouc), ou au moment de l'emploi, dans le malaxeur de la centrale d'enrobage.

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 édifices cristallins.

La figure 6 situe les différents produits que nous allons examiner sur le diagramme classique CaO/SiO₂/Al₂O₃.

3.1 Ciments

Les ciments 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.

La gamme des ciments est très étendue et fait l'objet d'une normalisation précise (cf. article *Variétés de béton de constituants* [C 2 210] dans ce traité).

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.

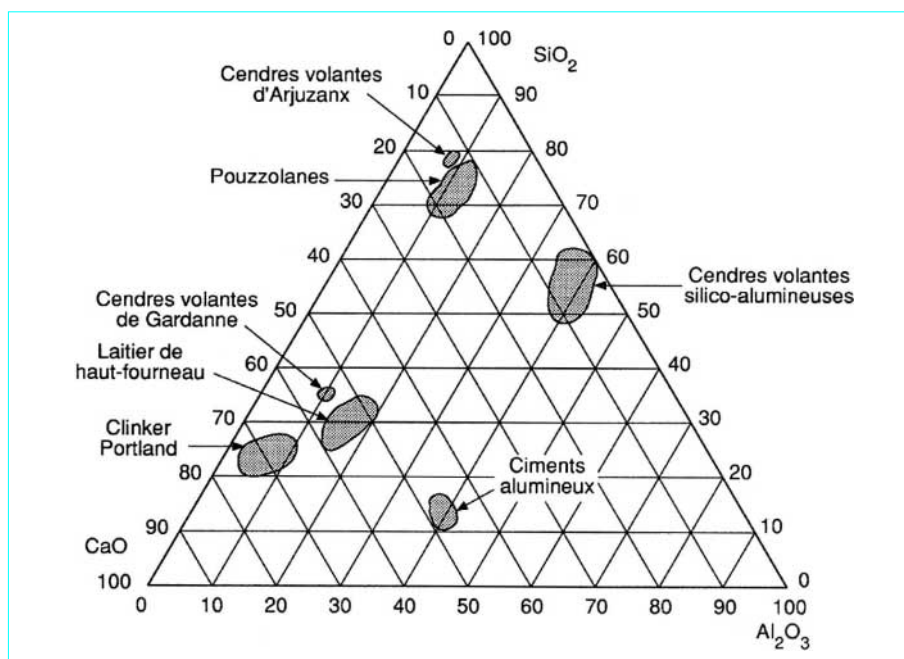


Figure 6 – Identification des liants hydrauliques et pouzzolaniques

3.2 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 granulat.

Un refroidissement brutal en fait un produit vitreux qui le rend apte, dans certaines conditions, à donné 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 saturée 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 prébroyé.

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
$20 < \alpha \leq 40$ (20/40)	catégorie courante
$40 < \alpha \leq 60$ (40/60)	réservé aux granulats difficiles (sables, granulats peu anguleux)
$60 < \alpha$	classe exceptionnelle

3.3 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 SO_3 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.

3.4 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.

Granulats et liants routiers

par **Jean BERTHIER**

*Professeur à l'École Nationale des Ponts et Chaussées
Président du BCEOM*

Normalisation

France

Association Française de Normalisation AFNOR

P 18-101	12.90	Granulats. Vocabulaire. Définitions et classifications.
T 65-002	12.91	Liants hydrocarbonés. Bitumes fluidifiés. Spécifications.
NF T 65-011	10.84	Liants hydrocarbonés. Émulsions de bitume. Spécifications.
NF T 66-003	5.70	Distillation des bitumes fluidifiés et des bitumes fluxés.
NF T 66-004	12.86	Pétroles et dérivés. Produits bitumineux. Pénétrabilité à l'aiguille.
NF T 66-005	12.86	Bitumes fluidifiés et bitumes fluxés. Détermination de la pseudoviscosité.
NF T 66-007	4.57	Détermination de la densité relative des produits bitumineux. Méthode du picnomètre.
NF T 66-008	7.79	Détermination du point de ramollissement des produits bitumineux. Méthode bille et anneau.

NF T 66-009	3.69	Point d'éclair en vase clos des bitumes fluidifiés et des bitumes fluxés au moyen de l'appareil Abel.
NF T 66-016	12.83	Émulsions de bitume. Essai d'homogénéité par tamisage.
T 66-019	12.83	Émulsions de bitume. Détermination de l'indice de rupture d'une émulsion anionique.
NF T 66-020	12.84	Émulsions de bitume. Détermination de la pseudoviscosité.
T 66-021	12.83	Émulsions de bitume. Détermination du signe de la charge des particules d'une émulsion.
NF T 66-023	1.84	Émulsions de bitume. Détermination de la teneur en eau.
NF T 66-024	1.84	Émulsions de bitume. Essai de stabilité au ciment.

États-Unis

American Society for Testing and Materials ASTM

D 2872-88		Test method for effect of heat and air on a moving film of asphalt (Rolling Thin-Film Oven Test).
-----------	--	---

