

Les produits noirs ou liants hydrocarbonés

Cours de C. Fond

1. Les produits noirs d'origine naturelle.....	2
1.1. Le bitume naturel.....	2
1.2. L'asphalte	2
2. Les produits noirs d'origine artificielle	2
3. Constituants des goudrons et bitumes	3
4. Propriétés physiques des liants hydrocarbonés	4
4.1. Imperméabilité.....	4
4.2. Adhésivité.....	4
4.3. Susceptibilité thermique	5
4.4. Vieillessement	5
4.5. Propriétés mécaniques	5
4.6. Propriétés physiques des liants hydrocarbonés	7
5. Les classements des produits standards.....	7
5.1. Liants hydrocarbonés à caractère solide.....	7
5.2. Liants hydrocarbonés à caractère fluide	8
• risque de durcissement et de dégradation du liant hydrocarboné.....	8
6. Les émulsions de bitumes.....	8
7. Les graves-bitumes et graves-émulsions	9
8. Les bétons bitumineux ou enrobés bitumineux	9
8.1. Classification principale	9
8.2. Granulométrie.....	10
8.3. Teneur en bitume	10
8.4. Résistance en fatigue des matériaux bitumineux	11
9. Coulis bitumineux	12
10. Produits noirs et étanchéité.....	12
Annexe 1 : généralité sur le comportement mécanique des matériaux	13
Classification du comportement mécanique des matériaux	13
Définitions	13
Notions de viscoélasticité	15
Exemple de modèles simples pour l'analyse du comportement viscoélastique... ..	15
Annexe 2 : notion de thermomécanique	16
Coefficient de dilatation thermique	16
Dilatation volumique	16
Contraintes et déformations d'origine thermiques.....	17
Annexe 3 : quelques indications pour le choix des liants hydrocarbonés en construction routière.....	18
Indice de gélivité des sols.....	18

Les produits noirs ou liants hydrocarbonés

1. Les produits noirs d'origine naturelle

1.1. Le bitume naturel

Le bitume naturel est issu de la polymérisation du pétrole au contact d'argiles. Un bitume naturel contient entre 50 et 60 % de bitume pur.

Terminologie :

produit bitumineux : produit qui contient du bitume.

produit bitumeux : produit fabriqué avec du bitume.

1.2. L'asphalte

L'asphalte est une roche poreuse argilo-calcaire contenant 6 à 25 % de bitume pur. Il existe aussi des calcaires asphaltiques et des schistes bitumineux contenant 8 à 10 % de bitume pur.

2. Les produits noirs d'origine artificielle

Bitumes et " goudrons " sont des liants hydrocarbonés. Ils sont issus de la distillation du goudron brut ou du pétrole brut.

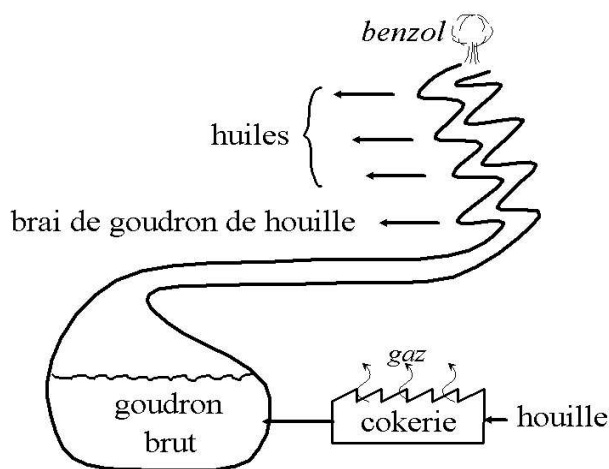


Schéma de distillation du goudron brut pour obtenir le brai (de goudron) de houille, communément appelé goudron.

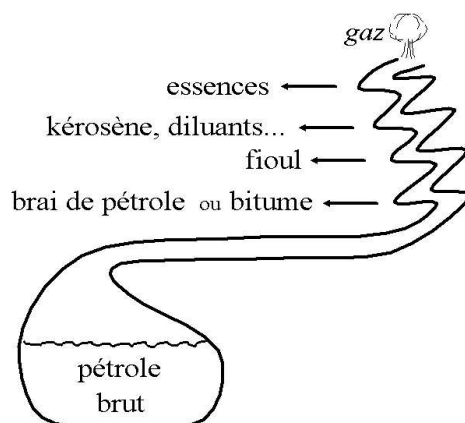
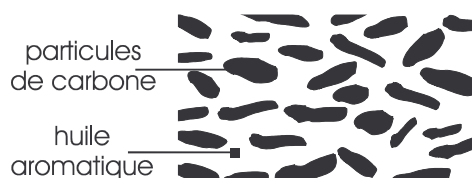


Schéma de distillation du pétrole brut pour obtenir le brai de pétrole, communément appelé bitume.

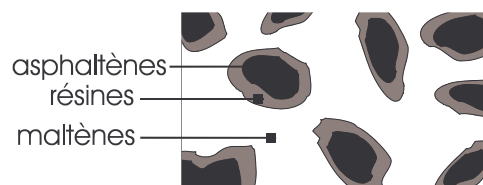
Le bitume est le produit le plus lourd issu de la distillation du pétrole. Selon l'origine du pétrole et le mode d'obtention, on obtient 20 à 30 % en masse de bitume artificiel. En général, les bitumes durs sont fluidifiés (obtention d'un " cut-back " par ajout d'un diluant en raffinerie) ou fluxés (ajout d'huile de houille).

3. Constituants des goudrons et bitumes

Goudrons et bitumes sont des *colloïdes* : ils sont constitués d'une phase continue et d'une phase dispersée. Il faut remarquer que le bitume naturel contient, en plus du bitume issu de distillation, des charges minérales. La phase dispersée (carbone, asphaltènes...) confère la couleur noire aux matériaux.



Représentation schématique de la microstructure d'un goudron.



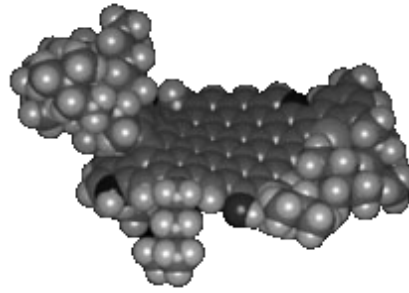
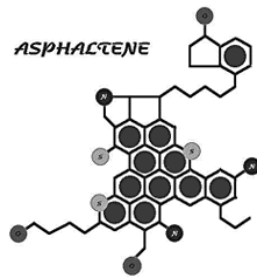
Représentation schématique de la microstructure d'un bitume.

Les formules chimiques des constituants des produits noirs sont relativement complexes, comme l'indique la figure suivante. Les éléments sont en majorité le carbone et l'hydrogène et en faibles quantités l'oxygène et le soufre. Ces éléments forment les :

- maltènes : carbures linéaires qui confèrent plasticité et *ductilité*,
- asphaltènes : carbures cycliques qui confèrent stabilité et adhérence,
- carbènes : (CH₂) qui fragilisent et sont *anti-émulsifiants*.

	Bitumes naturels	Bitumes artificiels
Maltènes	≈ 70 %	60 à 80 %
Asphaltènes	≈ 30 %	20 à 40 %
Carbènes	≈ 0.5 %	1 à 2 %

Pourcentages en masse des constituants principaux des bitumes.



Exemple d'une molécule d'asphaltène.

Les liants hydrocarbonés sont relativement inertes et résistants aux acides, en particuliers les goudrons. Comparés aux bitumes, les goudrons présentent aussi une relativement bonne résistance aux solvants.

La compatibilité chimique est totale entre produits bitumineux entre eux et goudronneux entre eux. Elle est possible entre produits bitumineux et goudronneux. L'objectif essentiel des mélanges est d'adapter les propriétés mécaniques aux températures d'usage et de mise en œuvre en modifiant leur viscosité. Pour les bitumes fluxés et fluidifiés, il faut prévoir un temps d'évaporation des huiles et essences pour obtenir les propriétés voulues (retour progressif à un état de type solide).

Terminologie :

Bitume + kérosène = bitume fluidifié

Bitume + huiles de goudrons = bitume fluxé

Bitume + eau + tensioactif (+ énergie mécanique) = émulsion de bitume

Bitume (majoritaire) + goudron = bitume-goudron

Bitume + brai de houille = bitume-brai

Goudron (majoritaire) + bitume = goudron-bitume

Brai de houille + huiles de goudron = goudron routier

Goudron + polymère = goudron modifié (goudron-styrène¹, etc)

4. Propriétés physiques des liants hydrocarbonés

4.1. Imperméabilité

Bitumes et goudrons sont imperméables à l'eau et à la vapeur.

4.2. Adhésivité

L'adhésivité est liée à la propriété de mouillage. Elle dépend du couple de matériaux (par exemple du couple liant hydrocarboné-granulats). L'adhésion et le mouillage augmentent avec la fluidité, d'où une sensibilité de l'adhésivité à la température. L'adhésion aux granulats est généralement bonne.

Le problème essentiel en adhésion est d'éviter le mouillage des granulats par l'eau plutôt que par le liant. La compétition entre le mouillage de l'eau et du liant peut avoir pour effet une décohésion liant-granulats.

Des **dopes** peuvent être utilisées pour augmenter l'adhésion. Savons calcaire ou de métaux (fer, aluminium...) sont des tensioactifs ajoutés dans des proportions ne dépassant pas 1% de la masse. Leur rôle est d'augmenter l'affinité physico-chimique entre le liant et, par exemple, les granulats. Le **dopage** peut s'effectuer par introduction directe dans le liant ou par pulvérisation des granulats.

L'effet de séchage des granulats par absorption de l'eau peut aussi être mis à profit en traitant les granulats par ajout de chaux vive ou de ciment portland (respectivement environ 2 % et 3 % en masse).

¹ Le goudron-styrène est utilisé pour ses propriétés de résistance au kérosène.

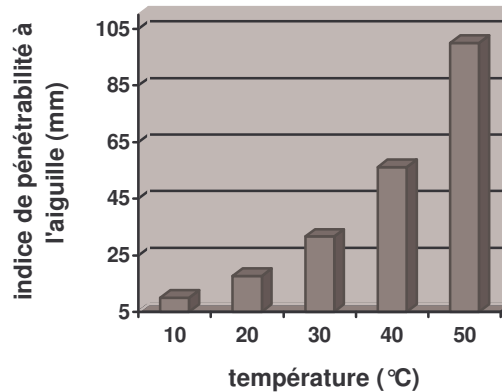
Terminologie :

Adhésivité active : mouillage.

Adhésivité passive : résistance au déplacement par l'eau.

4.3. Susceptibilité thermique

On désigne par *susceptibilité* thermique la sensibilité des propriétés mécaniques à la température. Par exemple la variation de l'indice de pénétrabilité à l'aiguille avec la température.



Exemple typique de variation de l'indice de pénétrabilité à l'aiguille d'un bitume avec la température.

4.4. Vieillessement

On appelle vieillissement l'évolution des propriétés au cours du temps sous l'effet de perte d'huiles et de l'oxydation. On observe principalement un durcissement et une diminution de la susceptibilité.

Remarque : Un des tests classiques de vieillissement pour les bitumes consiste à mesurer l'écart de masse pour un séjour de 5h à 163°C.

4.5. Propriétés mécaniques

Comme les liants hydrocarbonés ont une constitution complexe, leurs propriétés mécaniques le sont également.

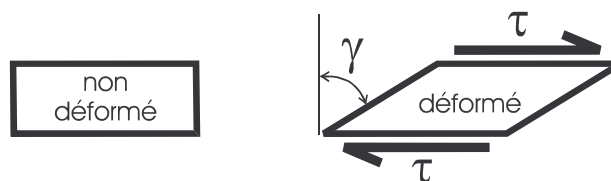
Notion de viscoélasticité :

Comportement élastique linéaire en cisaillement pur :

$$\tau = G \gamma$$

unités : τ et G en Pa et γ sans dimension.

cette loi de comportement est analogue à $\sigma = E \epsilon$ en traction uniaxiale (loi de Hooke). G est le module de cisaillement, parfois noté μ .



Déformation de glissement simple² : τ est la contrainte de cisaillement et γ est la distorsion.

Comportement visqueux linéaire en cisaillement pur :

$$\tau = \eta \left(\frac{\partial \gamma}{\partial t} \right)$$

unités : τ en Pa, η en Pa.s et $\left(\frac{\partial \gamma}{\partial t} \right)$ en s^{-1} .

$\left(\frac{\partial \gamma}{\partial t} \right)$ est souvent noté $\dot{\gamma}$. η est la viscosité. Le Pa.s est appelé le *poiseuille* et noté **Pl**. La *poise*, notée **Po** correspond à 10^{-1} Pl.

Comportement viscoélastique linéaire en cisaillement pur :

La résistance au cisaillement, au sens de la contrainte à appliquer pour distordre le matériau, est donc la somme de deux contributions : une réponse élastique indépendante du temps et une réponse visqueuse sensible à la vitesse de déformation.

$$\tau = G \gamma + \eta \left(\frac{\partial \gamma}{\partial t} \right)$$

où la part $G \gamma$ est responsable de la composante du comportement de type solide et la part $\eta \left(\frac{\partial \gamma}{\partial t} \right)$ est responsable de la composante du comportement de type fluide visqueux.

La susceptibilité thermique se traduira donc par une évolution des paramètres de description du comportement du matériau, ici G et η , avec la température, T . On cherchera donc à connaître $G(T)$ et $\eta(T)$. Le comportement mécanique des liants hydrocarbonés est particulièrement complexe et ne se prête pas toujours parfaitement à la description par les lois linéaires énoncées ci-avant. Pour décrire plus finement le comportement, en plus de la viscoélasticité, on aussi pourra utiliser des formalismes de viscoplasticité.

Tests de laboratoire pour le comportement mécanique :

Test de pénétrabilité à l'aiguille :

voir T. P.

Test bille-anneau (point de ramollissement) :

voir T. P.

Test de pseudo-viscosité :

Il consiste à mesurer le temps d'écoulement d'une quantité donnée de produit (en général 50 cm^3) par un orifice calibré (en général 4 ou 10 mm) à une température précise (en général 25 ou 40 °C).

² En comparant l'état non déformé à l'état déformé et en remarquant que la surface des deux figures est identique, on en déduit aisément qu'une déformation de cisaillement n'induit pas de variation de volume de la matière.

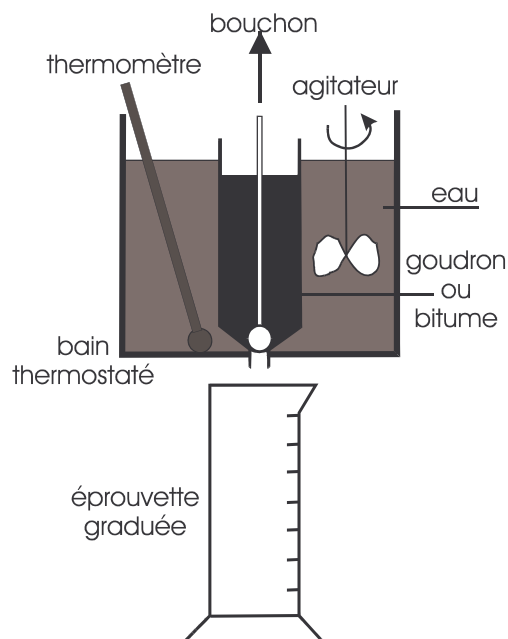


Schéma de principe de fonctionnement des pseudo-viscosimètres BRTA³ ou STV⁴.

4.6. Propriétés physiques des liants hydrocarbonés

Produits	Bitumes	Goudrons
Densité	purs : 1.03 à 1.05 fluxés : environ 1.05 fluidifiés : 0.93 à 1.0	purs : 1.19 à 1.24
Point éclair	purs > 230 °C fluxés : > 55 °C fluidifiés : > 55 °C bitumes-goudrons : > 130 °C bitumes-brais : > 230 °C	purs : > 130 °C goudrons-styrène : > 180 °C
Chaleur spécifique	purs : à 0°C $c_s \approx 0.41 \text{ cal/g}^\circ\text{C}$ à 100°C $c_s \approx 0.46 \text{ cal/g}^\circ\text{C}$ à 200°C $c_s \approx 0.52 \text{ cal/g}^\circ\text{C}$	purs : à 0°C $c_s \approx 0.45 \text{ cal/g}^\circ\text{C}$ à 100°C $c_s \approx 0.51 \text{ cal/g}^\circ\text{C}$
Dilatation thermique	$\alpha_T \approx 2 \cdot 10^{-4} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$ (20°C → 150°C ⇒ ≈+8% en volume)	$\alpha_T \approx 2.1 \cdot 10^{-4} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$

5. Les classements des produits standards

5.1. Liants hydrocarbonés à caractère solide

Classe	Matériaux	Pénétrabilité à l'aiguille	Point de ramollissement	Température de pompage	Température d'enrobage
20/30	Bitumes purs	1.5 à 3.5 mm	52 à 65 °C	135 °C	180 °C
40/50	Bitumes purs	3.5 à 5.5 mm	47 à 60 °C	125 °C	170 °C

³ British Road Tar Association.

⁴ Standard Tar Viscosimeter

60/70	Bitumes purs	5.5 à 7.5 mm	43 à 56 °C	120 °C	165 °C
80/100	Bitumes purs	7.5 à 10.5 mm	41 à 51 °C	115 °C	155 °C
180/220	Bitumes purs	17.5 à 225 mm	34 à 43 °C	105 °C	145 °C
80/100	Goudrons-styrène	7.5 à 105 mm	38 à 43 °C	90 °C	120 °C
40/50	Bitumes-brai	3.5 à 5.5 mm	51 à 55 °C	110 °C	145 °C
60/70	Bitumes-brai	5.5 à 7.5 mm	48 à 53 °C	115 °C	150 °C

5.2. Liants hydrocarbonés à caractère fluide

Classe	Matériaux	Pseudo-viscosité	Température limite*	Température de pompage	Température d'enrobage
		40 °C, Ø 10 mm			
16	goudrons purs	190 à 370 s	130 °C	90 °C	120 °C
15	goudrons purs	80 à 140 s	130 °C	80 °C	120 °C
14	goudrons purs	35 à 55 s	130 °C	75 °C	115 °C
		25 °C, Ø 4 mm			
13	goudrons purs	200 à 300 s	130 °C	75 °C	115 °C
12	goudrons purs	35 à 100 s	130 °C	75 °C	110 °C
11	goudrons purs	10 à 25 s	130 °C	75 °C	110 °C
		40 °C, Ø 10 mm			
1200	bitumes-goudrons	80 à 120 s	< 150 °C	90 °C	145 °C
2000	bitumes-goudrons	120 à 200 s	165 °C	90 °C	145 °C
2500	bitumes-goudrons	200 à 240 s	165 °C	90 °C	150 °C
		25 °C, Ø 4 mm			
0/1	bitumes-fluidifiés	< 30 s	60 °C	15 °C	25 °C
		25 °C, Ø 10 mm			
10/15	bitumes-fluidifiés	10 à 15 s	100 °C	45 °C	75 °C
150/250	bitumes-fluidifiés	150 à 250 s	160 °C	70 °C	120 °C
400/600	bitumes-fluidifiés	400 à 600 s	170 °C	90 °C	140 °C
		40 °C, Ø 10 mm			
800/1400	bitumes-fluidifiés	80 à 200 s	185 °C	100 °C	160 °C
		25 °C, Ø 10 mm			
400/600	bitumes-fluxés	400 à 600 s	150 °C	70 °C	130 °C
		40 °C, Ø 10 mm			
800/1200	bitumes-fluxés	90 à 140 s	160 °C	80 °C	140 °C
1200/1600	bitumes-fluxés	140 à 200 s	170 °C	90 °C	150 °C
1600/2400	bitumes-fluxés	200 à 300 s	175 °C	100 °C	155 °C

- risque de durcissement et de dégradation du liant hydrocarboné

6. Les émulsions de bitumes

Une *émulsion* de bitume est obtenue en mélangeant énergiquement le bitume avec de l'eau. L'émulsion est constituée de globules de bitume dont la taille varie de 2 à 20 µm. Afin d'éviter que les globules de bitume ne s'agglomèrent entre eux, il faut utiliser une matière tensioactive. Ce tensioactif possède une affinité physico-chimique à la fois avec l'eau (*hydrophile*) et le bitume et forme donc un film autour des globules de bitume. Le produit obtenu est donc un fluide visqueux. L'évaporation de l'eau entraîne l'agglomération des globules et permet de retrouver les propriétés du bitume. Pour ce processus de durcissement, on parle de "rupture" de l'émulsion. L'indice de rupture définit la classe de l'émulsion – rapide, semi-rapide, lente ou surstabilisée. Par exemple, L'indice de rupture du LCPC est mesuré en introduisant des fines siliceuses dans 100 g d'émulsion.

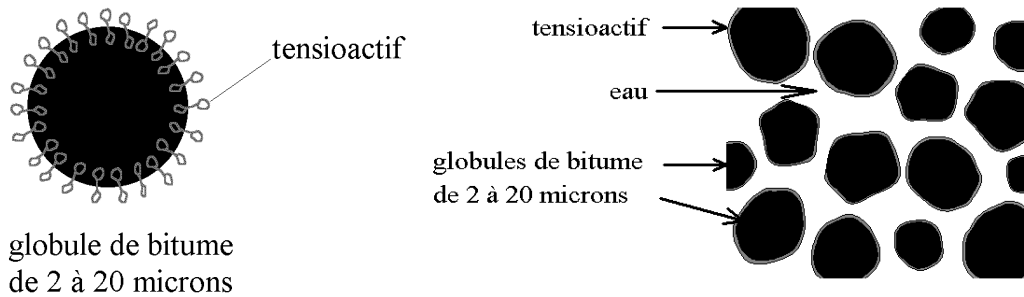
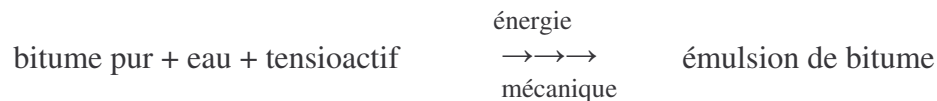


Schéma représentant une émulsion de bitume.



Caractérisation de la viscosité des émulsions de bitume par la pseudo-viscosité : on utilise le stokes, noté **St**, et exprimé en m²/s

$$St = \frac{\text{viscosité dynamique}}{\text{masse volumique}} = \frac{Pa \cdot s}{kg / m^3} = \frac{N \cdot s}{m^2 \cdot kg / m^3} = \frac{kg \cdot m \cdot s}{s^2 \cdot kg / m} = \frac{m^2}{s}$$

En pratique, les pseudo-viscosités varient de 0.15 à 2.3 St.

Le tensioactif peut être de l'acide chlorhydrique ou d'autres émulsifiants dont les formulations chimiques sont généralement complexes. La teneur en eau est de l'ordre de 30 % à 50 %, selon la viscosité souhaitée.

7. Les graves-bitumes et graves-émulsions

Les graves-bitumes et graves-émulsions sont utilisés en technique routière pour les couches de base et de fondation. Ils sont constitués de granulats, essentiellement concassés pouvant atteindre une taille de 30 mm, d'environ 4 % de bitume et d'environ 8 % de fillers. Les fillers, dont la dimension des grains est de l'ordre de 0.1 mm, servent à augmenter la compacité du mélange.

8. Les bétons bitumineux ou enrobés bitumineux

Les enrobés bitumineux, aussi appelés bétons bitumineux, sont constitués de granulats concassés de taille inférieure à 10 mm (5 mm pour les enrobés " fins "), d'environ 6 % de bitume et d'environ 8 % de fillers. Lorsque les granulats ont une taille inférieure à 6.3 mm, on parle aussi de sables enrobés ou de micro-bétons bitumineux. Pour une bonne tenue mécanique, la pellicule d'enrobage (de bitume) doit être la plus fine possible. De 5 à 8 microns en pratique.

8.1. Classification principale

Enrobés à chaud Chauffage & séchage des granulats	Enrobés à froid Eventuellement ajout de chaux ou de ciment pour " sécher " les granulat
D. C. : " dense à chaud " % vides < 8 %	
S. C. : " semi dense à chaud " 8 % < % vides < 12 %	S. F. : " semi dense à froid " % vides < 12 %
O. C. : " ouvert à chaud " 12 % < % vides	O. F. : " ouvert à froid " 12 % < % vides

Les O. C. et O. F. sont perméables.

8.2. Granulométrie

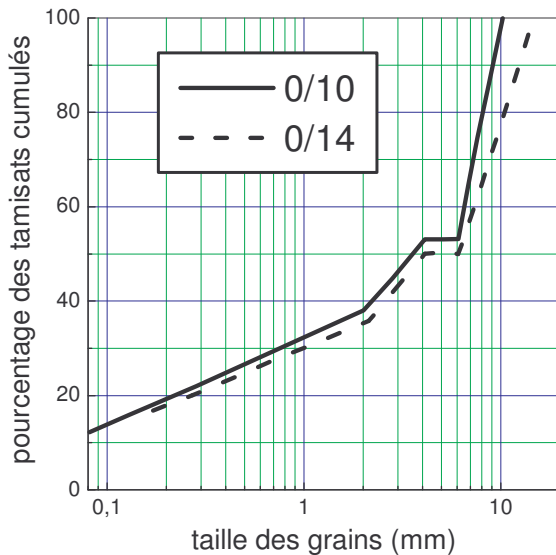
Il est difficile de définir simplement une courbe granulométrique type car celle-ci dépend de la nature et de la forme des granulats ainsi que des propriétés mécaniques du liant (dureté, viscosité, ...). On peut toutefois citer comme exemple de composition :

G : granulats – environ 50 % de gravillons 5/20 mm à 5/12.5 mm.

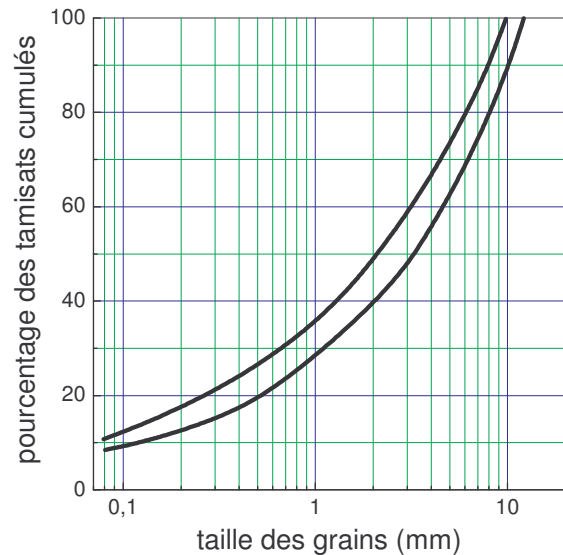
S : sable grossier – environ 30 % de 0.3/5 mm.

s : sable – environ 13 % de 0.08/0.3 mm.

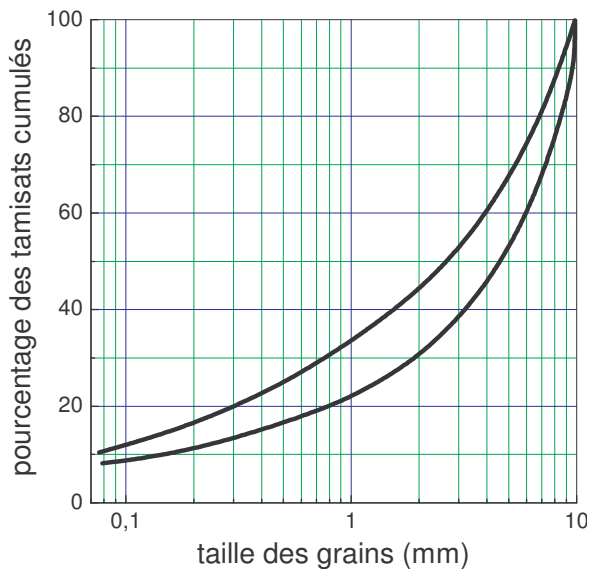
f : fillers – environ 7 % de dimension < 80 μm , dont 2 % de chaux favorisant le mouillage.



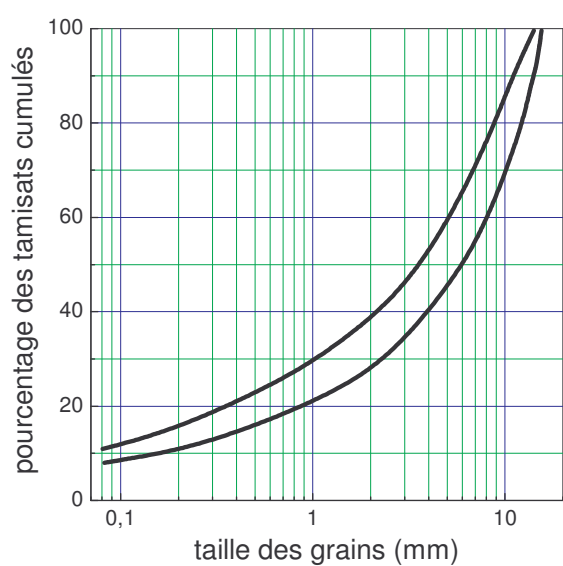
Exemples des courbes granulométriques de bétons bitumineux faiblement discontinus.



Fuseau des courbes granulométriques de bétons bitumineux 0/10 "cloutés"



Fuseau des courbes granulométriques de bétons bitumineux 0/10 "semi-grenus".



Fuseau des courbes granulométriques de bétons bitumineux 0/14 "semi-grenus".

8.3. Teneur en bitume

La teneur en liant p se calcule comme suit :

$$p = k \sqrt[5]{\Sigma}$$

où Σ désigne la surface spécifique des granulats et k est le module de richesse qui vaut 3.74 pour les bétons bitumineux. Σ peut se déduire de la Formule de Duriez :

$$100 \Sigma = 0.2 G + 2 S + 14 s + 140 f$$

Σ s'exprime en m^2 / kg et G, S, s, f en pourcentages.

Pour l'exemple ci-avant cela donne :

$$100 \Sigma = 0.2 * 50 + 2 * 30 + 14 * 13 + 140 * 7 \text{ d'où } \Sigma = 12.32 \text{ m}^2 / \text{kg}$$

puis $p = 3.74 * 1.645 = 6.2 \%$ de la masse de granulats.

NB. Selon les ouvrages, on trouvera des formules semblables correspondant à des classifications légèrement différentes. Par exemple :

G : granulats de dimension supérieure à 6.3 mm.

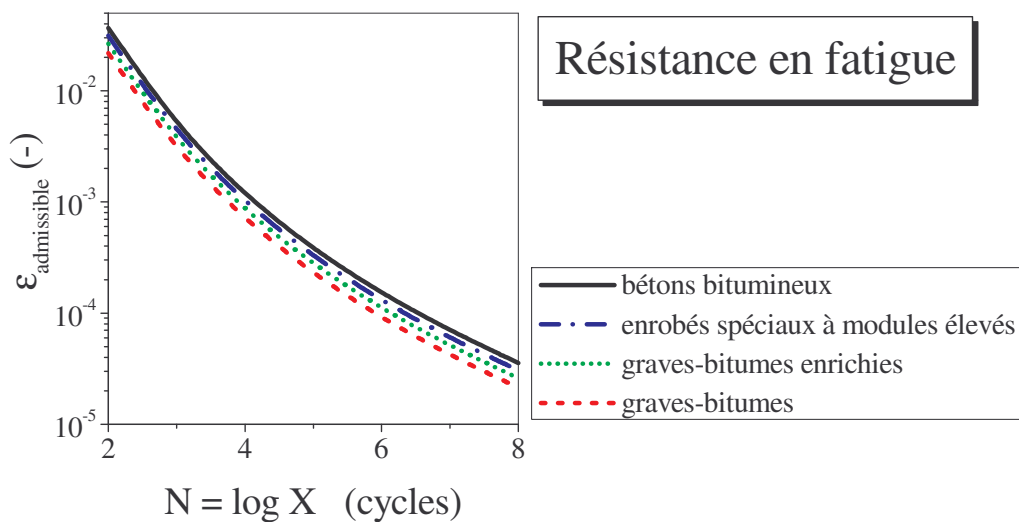
S : sable grossier dont la dimension des grains est comprise entre 0.315 mm et 6.3 mm.

s : sable fin dont la dimension des grains est comprise entre 0.08 mm et 0.315 mm.

f : fillers de dimension $< 80 \mu m$.

$$100 \Sigma = 0.25 G + 2.3 S + 12 s + 135 f$$

8.4. Résistance en fatigue des matériaux bitumineux



Tendances pour les déformations admissibles en fatigue vs. nombre de cycles à la ruine du matériau.

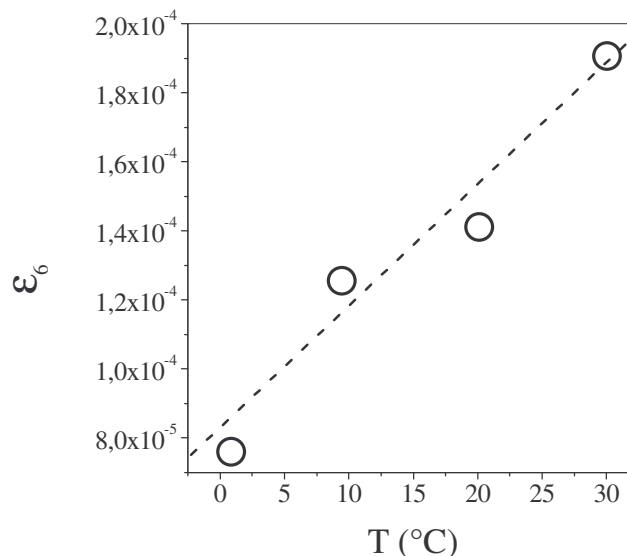
On se reportera au cours de construction routière pour ce qui est de la sollicitation à laquelle est soumise l'enrobé bitumineux (trafic routier, météorologie de la région, etc.). En ce qui concerne le matériau, pour une sollicitation donnée – niveau de contrainte ou de déformation, fréquence de cette sollicitation – on peut mesurer le nombre de cycles que peut subir un enrobé bitumineux avant d'atteindre une dégradation inadmissible (rupture, chute de module d'élasticité, déformation permanente, ...). Le plus souvent, les essais sont menés à 10 °C en flexion et à 25 Hz. En première approximation, la déformation admissible à $X = 10^N$ cycles vaut :

$$\epsilon_N \approx \frac{A}{N^b}$$

A et b sont des constantes qui dépendent du matériau. b est de l'ordre de 5 pour les matériaux bitumineux. En général on connaît ϵ_6 et on en déduit $\epsilon_N \approx \epsilon_6 \left(\frac{6}{N}\right)^5$. En ce qui concerne la variation de la déformation admissible avec la température, dans une large gamme de température la règle $\epsilon_6(T) \sqrt[2]{E(T)} \approx \text{constante}$ est un estimateur convenable.

En résumé :

Type de matériau	Module d'Young	Déformation admissible à 10^6 cycles
Bétons bitumineux	$E \approx 6 \text{ GPa}$	$\epsilon_6 \approx 1.50 \cdot 10^{-4}$
Graves - bitume	$E \approx 9 \text{ GPa}$	$\epsilon_6 \approx 0.90 \cdot 10^{-4}$
Graves – bitume enrichies	$E \approx 10 \text{ GPa}$	$\epsilon_6 \approx 1.10 \cdot 10^{-4}$
Enrobés spéciaux à modules élevés	$E > 14 \text{ GPa}$	$\epsilon_6 \approx 1.30 \cdot 10^{-4}$



Déformations admissibles à $N = 10^6$ cycles vs. température pour un enrobé bitumineux (composition : granulats silico calcaire + 4 % de bitume 40/50 + 7 % de fines ; teneur en vides = 9 %).

9. Coulis bitumineux

Ce sont des mortiers fluides constitués de sable et d'émulsion de bitume surstabilisée pour un durcissement rapide. Ils sont utilisés pour des rejointoiements et la fermeture de porosité.

10. Produits noirs et étanchéité

Les technologies sont très diverses. En règle générale, il faut armer les produits noirs si l'on travaille en couche mince.

Annexe 1 : généralité sur le comportement mécanique des matériaux

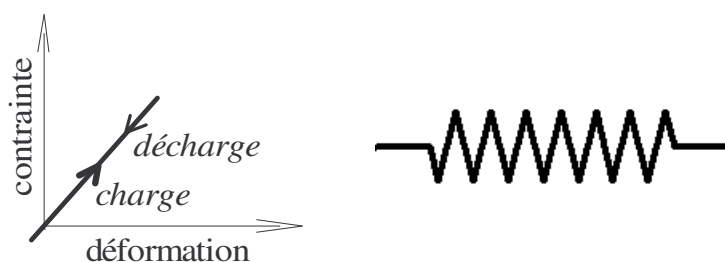
Classification du comportement mécanique des matériaux

Le comportement mécanique d'un matériau à l'état solide peut présenter différents types de composantes. La plus connue est l'**élasticité**. Elle se manifeste pour la plupart des matériaux en petites déformations – typiquement moins de 1 ‰ pour les matériaux rigides tels que les aciers, céramiques et moins de 1 % pour les matériaux plus souples telles que le bois et les matières plastiques⁵. Dès que l'on soumet un matériau à de plus grandes déformations, son comportement mécanique peut présenter de la **plasticité** et/ou de l'**endommagement** (inélasticité). L'éventuelle **viscosité** du matériau peut en revanche se manifester dès les petites déformations. Cette composante du comportement est responsable du fluage, de la relaxation et de l'élasticité recouvrée (anélasticité). Dès que l'on sort du cadre de l'élasticité linéaire on parle de " non linéarité du comportement mécanique ". On peut ainsi traiter de viscoélasticité, viscoplasticité, viscoélastoplasticité, plasticité avec endommagement, élasticité non linéaire, etc.

La composante visqueuse du comportement est responsable de la sensibilité de la réponse mécanique à la vitesse de la sollicitation⁶ ou au temps d'application de la sollicitation mécanique. D'une façon générale, on constate expérimentalement que lorsque plus le matériau solide est proche de sa température de ramollissement ou fusion plus les effets de sa viscosité sont importants. Ainsi, à température ambiante un bitume ou un haut polymère seront bien plus sensibles à la vitesse de sollicitation qu'un acier ou une céramique. Pour les aciers, on admet en général que les effets de la viscosité à température ambiante sont du second ordre.

Définitions

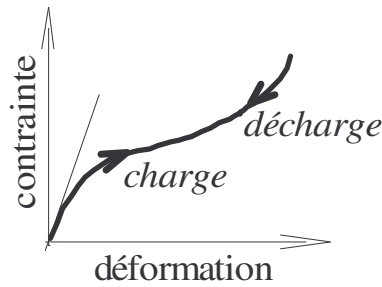
Elasticité : comportement réversible sans dissipation d'énergie, i. e. l'énergie fournie pour déformer le matériau est totalement restituée au déchargement. On peut considérer une relation contrainte-déformation linéaire aux petites déformations. Pour les caoutchoucs et élastomères le comportement élastique peut être non linéaire aux grandes déformations – typiquement au delà de 20 % de déformation.



Comportement élastique linéaire – représenté schématiquement par un ressort

⁵ dans le langage usuel matières plastiques désigne les hauts polymères. En toute rigueur il conviendrait de considérer que matières plastiques désignent les matériaux présentant un comportement plastique et les métaux entreraient dans cette appellation.

⁶ La sollicitation mécanique peut être une déformation imposée ou une contrainte imposée, voire une combinaison des deux.

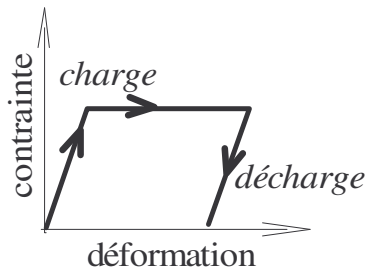


Comportement élastique non linéaire

Plasticité : comportement irréversible avec dissipation d'énergie mécanique ne dépendant pas de la vitesse de sollicitation ou de sa durée d'application. Il y a une déformation résiduelle lorsque la sollicitation mécanique est supprimée.

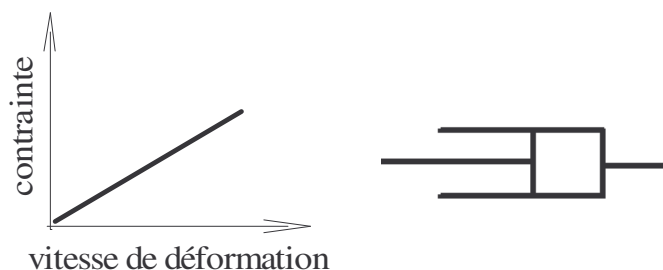


Comportement plastique parfait – représenté schématiquement par un patin (avec frottement)



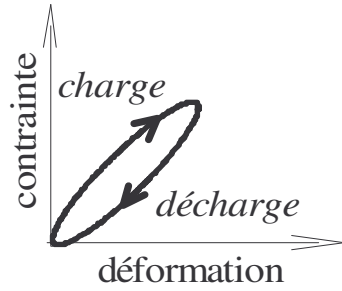
Comportement élastique plastique parfait

Viscosité : comportement de type fluide avec dissipation d'énergie mécanique. L'application d'une contrainte induit une vitesse de déformation et réciproquement. En d'autres termes, si la déformation imposée ne varie plus au cours du temps, toute contrainte tend à disparaître, avec déformation irréversible.



Comportement visqueux linéaire représenté schématiquement par un amortisseur

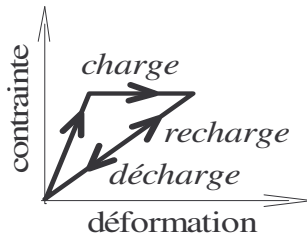
Viscoélasticité : comportement réversible avec dissipation d'énergie mécanique dépendant de la vitesse de sollicitation ou de sa durée d'application. Il n'y a pas de déformation résiduelle lorsque la sollicitation mécanique est supprimée.



Comportement viscoélastique

Viscoplasticité : comportement irréversible avec dissipation d'énergie mécanique dépendant de la vitesse de sollicitation ou de sa durée d'application. Il y a une déformation résiduelle lorsque la sollicitation mécanique est supprimée. Cette déformation résiduelle dépend de l'histoire du chargement.



Endommagement : la sollicitation mécanique engendre une variation des modules d'élasticité, voire de l'anisotropie⁷. C'est typiquement une des composantes du comportement mécanique du béton hydraulique en compression.



Comportement endommageable

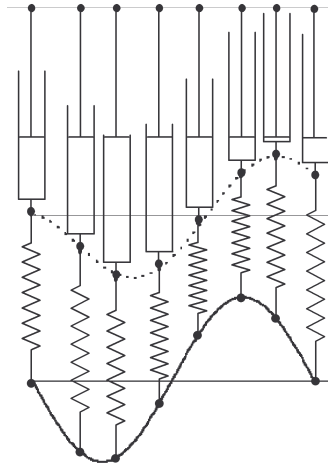
Notions de viscoélasticité

Exemple de modèles simples pour l'analyse du comportement viscoélastique.

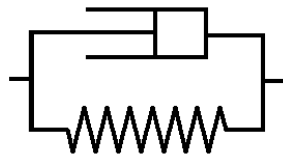
	$F = k x \Leftrightarrow F / S = E (\Delta L / L)$
	$F = k v \Leftrightarrow F / S = \eta \frac{\partial}{\partial t} (\Delta L / L)$



⁷ Anisotropie : opposé à l'isotropie, l'anisotropie se manifeste par une réponse mécanique du matériau qui dépend de la direction de sollicitation.



Modèle rhéologique : élément de Maxwell pour le comportement viscoplastique.



Modèle rhéologique : élément de Kelvin-Voigt pour le comportement viscoélastique.

Annexe 2 : notion de thermomécanique

Coefficient de dilatation thermique

Le coefficient de dilatation thermique pour les solides est aussi appelé coefficient de dilatation linéique. Il relie les variations dimensionnelles aux variations de température. Supposons un matériau dont les propriétés sont isotropes et un écart de température ΔT suffisamment faible, on peut alors écrire :

$$\Delta L = \alpha_T L \Delta T = \alpha_T L (T_a - T_0)$$

où ΔL est la variation de longueur, α_T le coefficient de dilatation linéique, L la longueur initiale (à T_0), T_0 la température initiale et T_a la température actuelle. La longueur à la température T_a est $L + \Delta L$. On entend par écart de température suffisamment faible, un écart de température tel que α_T puisse être considéré comme constant (pas de changement de phase...) et que $\Delta L \ll L$.

Dilatation volumique

Considérons un pavé de dimensions L , l et h à la température T_0 . Son volume V à la température T_0 vaut donc $V(T_0) = L l h$. Connaissant T_a et α_T on peut ensuite écrire :

$$V(T_a) = (L + \Delta L) (l + \Delta l) (h + \Delta h) = \\ L l h + L l \Delta h + L \Delta l h + \Delta L l h + L \Delta l \Delta h + \Delta L l \Delta h + \Delta L \Delta l h + \Delta L \Delta l \Delta h$$

On remarque que $L \Delta l \Delta h$, $\Delta L l \Delta h$ et $\Delta L \Delta l h$ sont des termes du deuxième ordre puisque $\Delta L \ll L$, $\Delta l \ll l$, $\Delta h \ll h$ et $\Delta L \Delta l \Delta h$ est un terme du troisième ordre pour les mêmes raisons. On peut donc simplifier l'expression précédente en écrivant

$$V(T_a) \approx L l h + L l \Delta h + L \Delta l h + \Delta L l h$$

En pratique, il est commode d'exprimer la variation de volume ramenée au volume initial. On l'exprimera donc ainsi :

$$\frac{V(T_a) - V(T_0)}{V(T_0)} = \frac{\Delta V}{V} = \frac{(L + \Delta L) (1 + \Delta l) (h + \Delta h) - L l h}{L l h}$$

$$\approx \frac{\Delta L}{L} + \frac{\Delta l}{l} + \frac{\Delta h}{h} = 3 \alpha_T \Delta T = 3 \alpha_T (T_a - T_0)$$

Contraintes et déformations d'origine thermiques

Les déformations d'origine thermiques sont dites libres de contraintes, c'est à dire que si le solide qui se dilate le fait librement (aucune force extérieure ne s'y oppose), aucune contrainte n'est générée. Pourtant les dimensions du solide ont changées. Il s'agit donc de faire un "décalage d'origine" des déformations puisque le nouvel état de référence pour le calcul des contraintes doit intégrer les déformations thermiques. Dans le cas de la traction uniaxiale il faudra donc écrire :

$$\sigma = E (\varepsilon - \varepsilon_{th}) = E (\varepsilon - \alpha_T \Delta T)$$

où σ désigne la contrainte, E le module d'Young du matériau, ε la déformation totale et ε_{th} la déformation liée à la variation de température. Dans le cas particulier où le solide est libre de se dilater, la condition $\sigma = 0$ équivaut à dire que la déformation totale vaut simplement $\alpha_T \Delta T$. Dans le cas particulier où toute dilatation est empêchée, la déformation totale est nulle et on en déduit une contrainte $\sigma = - E \alpha_T \Delta T$ dont l'origine est liée à la dilatation thermique et aux conditions aux limites sur l'objet.

Annexe 3 : quelques indications pour le choix des liants hydrocarbonés en construction routière

Indice de gélivité des sols

Les propriétés mécaniques - en particulier la viscosité - du liant hydrocarboné est choisie en fonction de la température d'utilisation. Pour bien choisir le liant, il convient de considérer les températures extrêmes d'utilisation. Si l'on considère par exemple la température d'utilisation la plus basse, une analyse de données géographiques et météorologiques est indispensable. On définit de façon simplifiée l'indice de gélivité des sols comme étant le total des produits de la température journalière moyenne inférieure à 0° C par le nombre de jours. L'unité est le °C j. La carte suivante reporte l'indice de gel en France d'un hiver exceptionnellement rigoureux (1962-1963).

