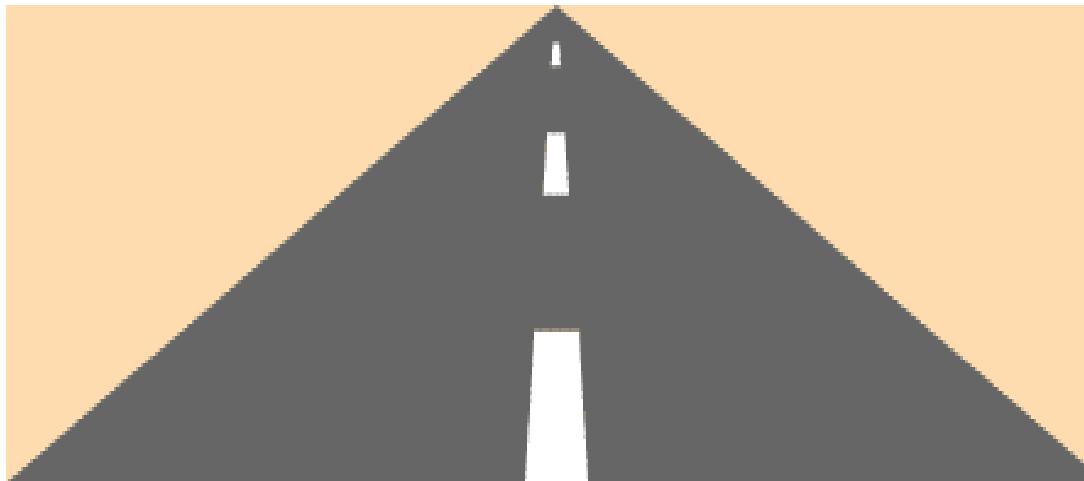




Dimensionnement des structures de chaussées



MANAL ABDERRAHMAN

EXPERT TERRASSEMENTS/CHAUSSEE



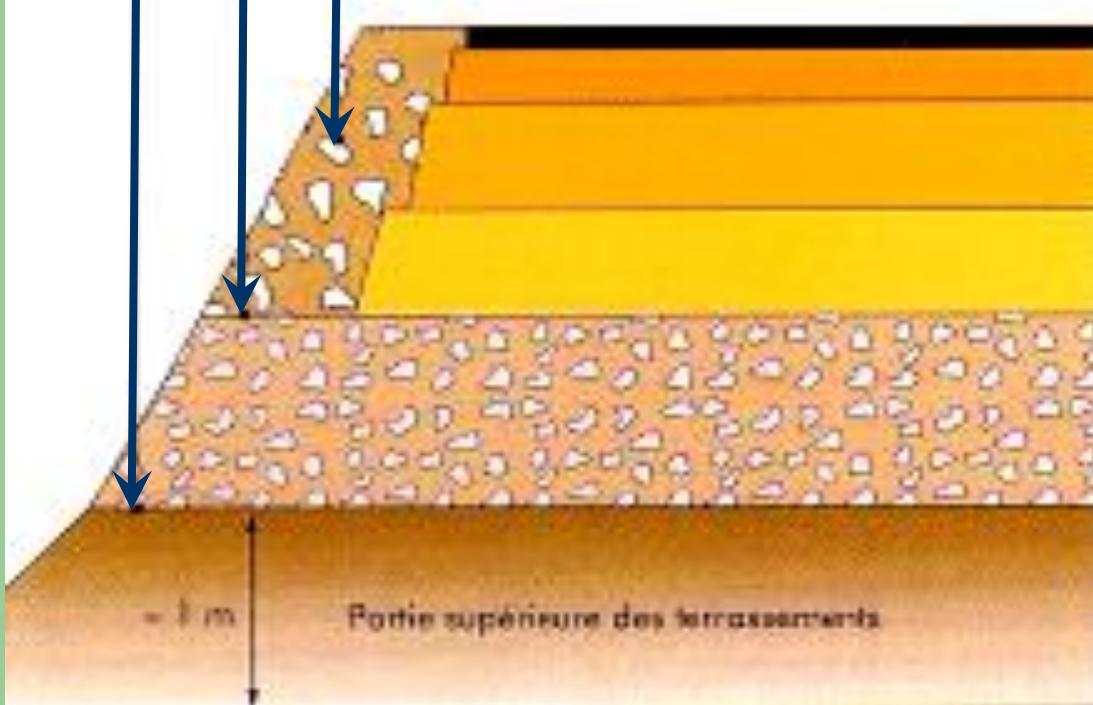
Constituants d'une chaussée et familles de structures

DESCRIPTION FONCTIONNELLE DES COUCHES DE CHAUSSÉES

Arase de terrassement

Plate forme support de chaussée

Accotement



Roulement
Liaison

Base

Fondation

Couches de surface

Couches d'assises

Couches de forme

Sol support

Couche de forme

A court terme (pendant la phase des travaux)

La couche de forme doit présenter des caractéristiques minimales :

- de **traficabilité**, pour assurer, pendant la saison prévue pour l'exécution des travaux de chaussée, la circulation des engins approvisionnant les matériaux de l'assise,
- de **nivellement** pour garantir la régularité de l'épaisseur des couches et l'uni de la chaussée terminée,
- de **déformabilité** pour permettre le compactage correct des couches de chaussée,
- de **résistance vis-à-vis du gel** si nécessaire.

Couche de forme

A long terme (pendant l'exploitation de l'ouvrage)

Les fonctions à long terme se rapportent au comportement de la chaussée en service, à savoir :

- L'homogénéisation de la portance,
- Le maintien dans le temps d'une portance minimale de la plate forme,
- Contribution au drainage de la chaussée.

Couche de forme

Selon les cas de chantiers (nature des sols, climat, environnement hydrogéologique, trafic de chantier...), la couche de forme peut être:

- Inexistante ou réduite à une mince couche de réglage, lorsque les matériaux constituant le remblai ou le sol en place ont eux-mêmes les qualités requises de la portance,
- Constituée d'une ou plusieurs couches de matériaux différents incluant éventuellement un géotextile.

Couches d'assise

L'assise de chaussée est généralement constituée de deux couches, la couche de fondation surmontée de la couche de base.

Ces couches sont en matériaux élaborés, le plus souvent en matériaux liés pour les chaussées à trafic élevé.

- Elles apportent à la chaussée la résistance mécanique, pour résister aux charges verticales induites par le trafic.
- Elles répartissent les pressions sur la plate-forme support afin de maintenir les déformations, à ce niveau, dans des limites admissibles.

Couches d'assise

lors de la construction de la chaussée :

- fournissent un support bien nivélé pour la couche de surface.
- fournissent également un support de portance suffisante pour le compactage de la couche de surface.
- puissent servir provisoirement de couche de roulement (renforcement sous circulation, et/ou circulation de chantier).

lorsque la chaussée est construite :

- assurent un rôle thermique, car les assises doivent protéger le sol support de la pénétration du gel.

Couches d'assise

- La couche de base, plus proche de la surface de la chaussée, subit des contraintes et des déformations notables; il est donc nécessaire qu'elle présente des caractéristiques mécaniques assez élevées.
- quant à la couche de fondation, les contraintes et les déformations auxquelles elle est soumise conduisent à un niveau de qualité mécanique moindre que celui de la couche de base.

Matériaux pour couches d'assise

Les graves non traitées (GNT) :

- **GNF** : Grave non traitée pour couche de fondation.
(**GNF₁** – **GNF₂** – **GNF₃**).
- **GN** : Grave non traitée pour couche de base.
(**GNA** – **GNB** – **GNC** – **GND**).

Les graves traitées au ciment :

- **GC** : Grave Ciment.
- **GAC** : Grave Améliorée au Ciment.
- **GVC** : Grave Valorisée au Ciment.

Les graves traitées aux liants hydrocarbonés :

- **GBF** : Grave Bitume pour couche de Fondation.
- **GBB** : Grave Bitume pour couche de Base.
- **EME** : Enrobé à Module Elevé.
- **GE** : Grave Emulsion.

Graves Non Traitées







EMT







Couche de surface

La couche de surface est constituée :

- de la couche de roulement, qui est la couche supérieure de la structure de chaussée sur laquelle s'exercent directement les agressions conjuguées du trafic et du climat,
- et le cas échéant d'une couche de liaison, entre les couches d'assise et la couche de roulement.

Rôle de la couche de roulement

Premier rôle : la sécurité

La couche de roulement doit posséder de bonnes propriétés antidérapantes, c'est-à-dire une bonne rugosité. Cette rugosité doit être d'autant meilleure que la vitesse est élevée.

Deuxième rôle : le confort

Le confort pour un usager, consiste, en particulier, à ne pas ressentir dans son véhicule de secousses brutales ou de vibrations excessives. Deux facteurs principaux conditionnent ce confort : la suspension des véhicules d'une part, l'uni de la chaussée d'autre part, le mauvais uni pouvant d'ailleurs entraîner une perte d'adhérence ou rendre la chaussée trop bruyante

Rôle de la couche de roulement

Troisième rôle : la participation à la structure

Il intéresse plus particulièrement l'ingénieur routier car :

- ✓ la couche de roulement subit directement les agressions du trafic et celles liées aux conditions climatiques;
- ✓ elle doit également faire obstacle à la pénétration d'eau dans les assises de chaussées qui peut entraîner la destruction de la liaison entre couches à l'interface base / roulement et même désorganiser la couche de base elle-même.

Rôle de la couche de roulement

La couche de roulement doit, de plus, assurer ces différents rôles de manière durable.

Sa qualité doit donc rester convenable, malgré les répétitions des sollicitations entre les renouvellements intervenant au titre de l'entretien.

Matériaux pour couche de roulement

- **RS (ES)** : Revêtement (Enduit) Superficiel.
- **ECF** : Enrobé Coulé à Froid.
- **EF** : Enrobé à Froid.
- **EB (BB)** : Enrobé (Béton) Bitumineux.
- **BBME** : Béton Bitumineux à Module Elevé.
- **BBTM** : Béton Bitumineux Très Mince.
- **BBDr** : Béton Bitumineux Drainant.













0036



2005 12 2



2005 12 2





2005 15 2



02/04/2005 12:16

Eléments indicatifs pour le choix de la couche de roulement

Objectifs	Caractéristiques	ES	ECF	BBTM	BBD _r	BBM	BB	BBME
Sécurité	Epaisseur (cm)	≈ 1	< 1,5	2 à 3	3 à 4	3 à 5	5 à 9	5 à 9
	Adhérence initiale	++	0 à +	+	+	+	0	0
	Adhérence à 5 ans	0 à +	0 à -	+	+	0	0 à -	0
Confort	Amélioration de l'uni	-	--	0	+	+	+	+
	Silence	- à --	0	+	++	0 à +	0 à +	0 à +
Apport structurel	Imperméabilité	+	-	+	--	+	++	++
	Anti remontée de fissures	-	--	-	0	0	+	+
	Orniérage			+	++	0	0	++

++ Très bon
+ Bon

0 Moyen
- Médiocre

-- Mauvais

Principaux modes d'endommagement des chaussées

Couche de roulement

- usure due aux efforts tangentiels exercés par les charges roulantes,
- orniérage par fluage dans des conditions excessives de température et de sollicitations par le trafic,
- fissuration de fatigue par suite d'une mauvaise adhérence de la couche de roulement bitumineuse à l'assise,
- fissuration par remontée des fissures des couches d'assise de chaussée,
- fissuration par fatigue thermique suite à un vieillissement du bitume.

Principaux modes d'endommagement des chaussées

Couches d'assise traitées

- fissuration de fatigue due à l'endommagement qui résulte de la répétition des efforts de traction par flexion au passage des charges,
- fissuration de prise et de retrait thermique des graves traitées aux liants hydrauliques,
- fissuration due aux gradients thermiques des dalles de béton,

Principaux modes d'endommagement des chaussées

Couches d'assise non liées et support de chaussée

- Ces couches s'endommagent le plus souvent par déformations permanentes de la structure (affaissement, orniérage, ...) dues au cumul de déformations plastiques provoquées dans ces matériaux non liés par les sollicitations répétées du trafic.
- La présence d'eau dans ces couches non liées est systématiquement un facteur d'aggravation des dégradations.

Fonctionnement et endommagement des grandes familles de chaussées

Souple



Couche de surface en matériaux bitumineux

Matériaux bitumineux d'assise (< 15 cm)

Matériaux granulaires non traités (20 à 50 cm)

Plate forme support

Sollicitations dues au trafic

- Les matériaux granulaires non liés, qui constituent l'assise de ces chaussées, ont une faible rigidité qui dépend de celle du sol et de leur épaisseur.
- Comme la couverture bitumineuse est relativement mince, les efforts verticaux dus au trafic sont transmis au support avec une faible diffusion latérale.
- Les contraintes verticales élevées engendrent par leur répétition des déformations plastiques du sol ou de la grave qui se répercutent en déformations permanentes en surface de la chaussée.
- La couverture bitumineuse subit à sa base des efforts répétés de traction-flexion

Chaussées souples

Influence des conditions d'environnement

- La faible rigidité de la structure rend ces chaussées particulièrement sensibles aux variations d'état hydrique des sols supports.
- Ceci se manifeste notamment par les "effets de bord": réduction de portance en période humide pouvant conduire à des affaissements de rive et fissuration de retrait hydrique en période de dessiccation.

La réduction de portance associée aux variations d'état hydrique des sols supports sensibles à l'eau est d'autant plus marquée (en saison pluvieuse) que les conditions de drainage et l'imperméabilité de la couche de surface sont mauvaises.

Cette réduction de portance existe aussi pour les autres structures.

Chaussées souples

Évolution du mode d'endommagement

- L'endommagement des chaussées souples se manifeste d'abord, le plus souvent, par l'apparition de déformations permanentes du type orniérage à grand rayon, flaches et affaissements qui détériorent les qualités du profil en travers et du profil en long.
- Ces déformations croissent avec le trafic cumulé, selon la qualité moyenne de la structure et la dispersion des caractéristiques mécaniques du corps de chaussée et du sol.

Évolution du mode d'endommagement

- Les sollicitations répétées de flexion alternée dans la couverture bitumineuse entraînent une dégradation par fatigue, sous la forme de fissures d'abord isolées puis évoluant peu à peu vers un faïençage à mailles de faibles dimensions.
- L'eau s'infiltrant alors plus facilement provoque une accélération des phénomènes : épaufrures aux lèvres des fissures avec départ de matériaux, puis formation de nids de poule.
- Si la chaussée était alors laissée sans entretien, elle évoluerait très rapidement vers une destruction complète.

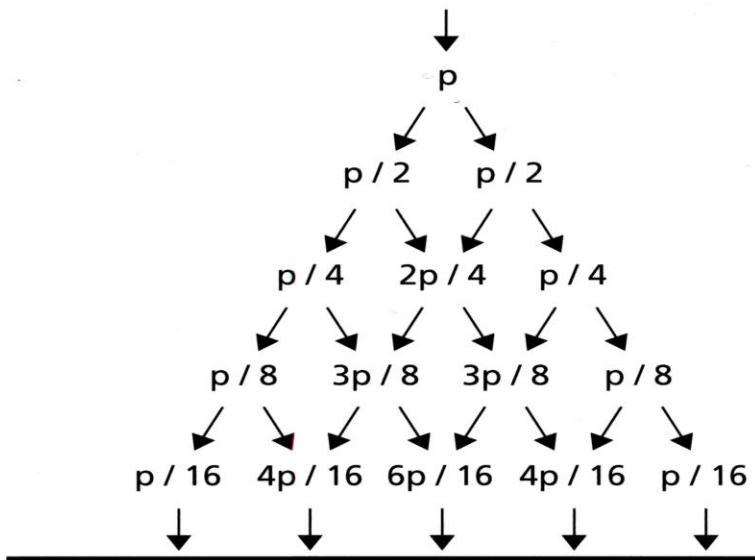
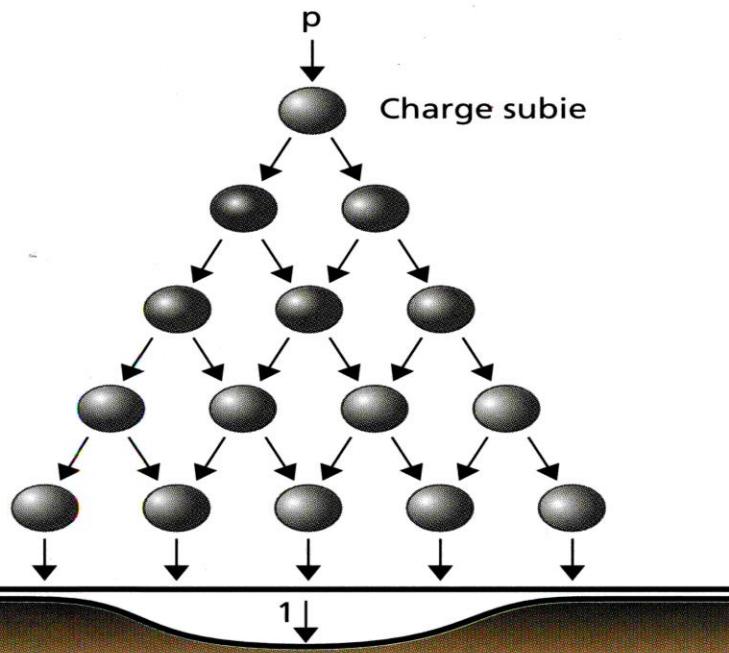
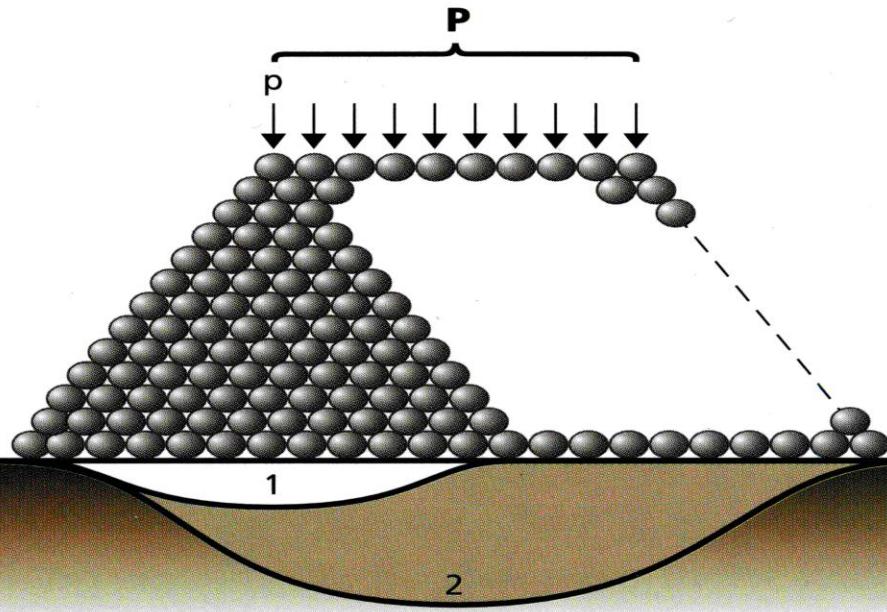
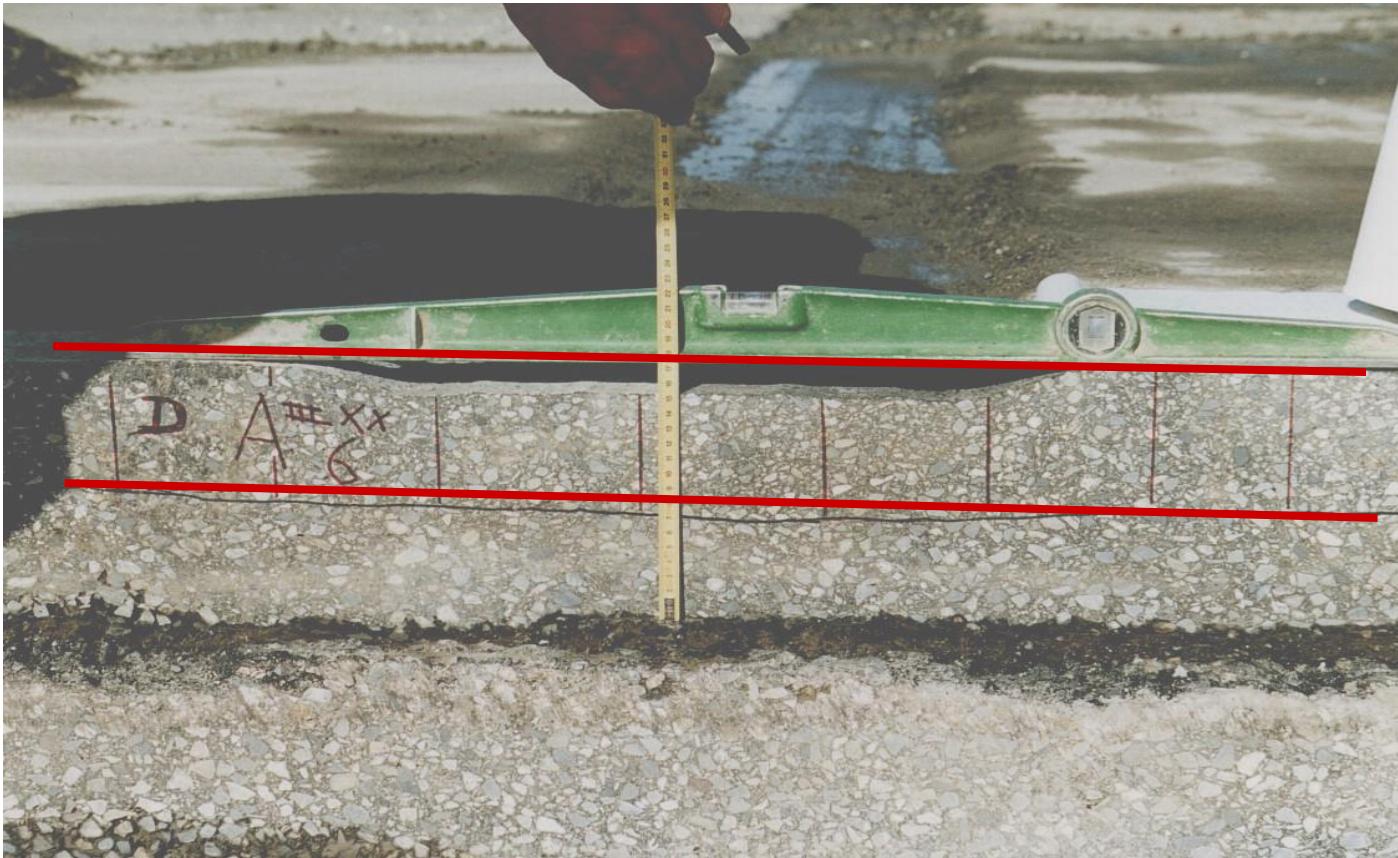


Fig. 3 : Schéma de fonctionnement d'une chaussée constituée d'une couche non liée reposant sur le sol naturel

Orniérage du support (à grand rayon)



Remontée à la surface des fissures de fatigue



Endommagement non structurel



Orniérage de la couche de surface en matériaux bitumineux

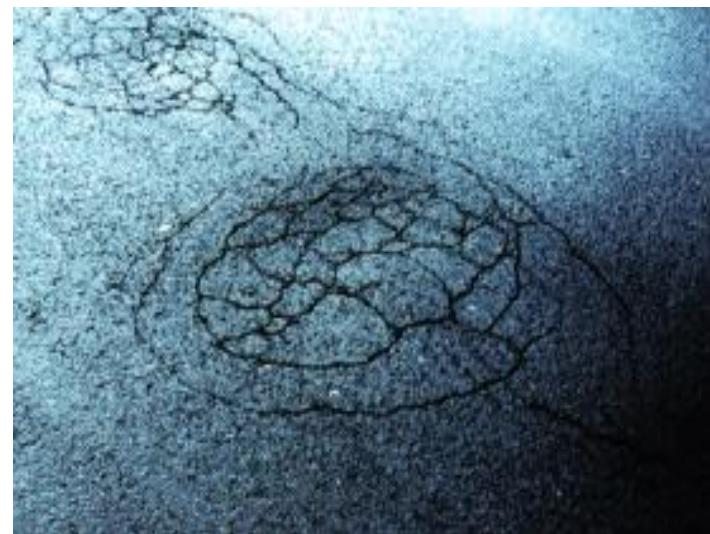
Orniérage



Endommagement non structurel

Dégradations de surface :

- usure : polissage des gravillons, arrachement, ...
- vieillissement : désenrobage, faïençage, ...
- qualité de la mise en œuvre : ressuage, pelade, ...



Faïencage



Ressusage



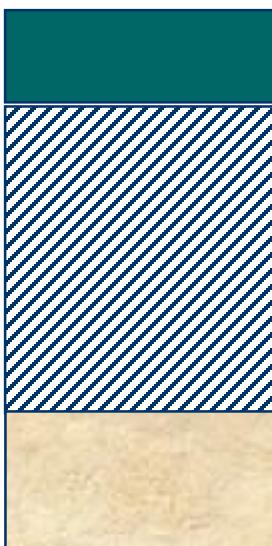
Flache évoluant en nid de poule



Evolution d'un nid de poule



Bitumineuse épaisse



Couche de surface en matériaux bitumineux

Matériaux bitumineux d'assise (15 à 40 cm)

Plate forme support

Chaussées bitumineuses épaisses

Sollicitations dues au trafic

- La rigidité et la résistance en traction des couches d'assise en matériaux bitumineux permettent de diffuser, en les atténuant fortement, les contraintes verticales transmises au support. En contrepartie, les efforts induits par les charges roulantes sont repris en traction-flexion dans les couches liées.
- Ces chaussées comportent en général plusieurs couches. Lorsque celles-ci sont collées, les allongements maximaux se produisent à la base de la couche la plus profonde. Mais, si les couches sont décollées, chacune d'elles se trouvera sollicitée en traction et pourra se rompre par fatigue. La qualité des interfaces a donc une grande incidence sur le comportement de ces chaussées.
- Quant aux efforts sur le support, ils sont généralement suffisamment faibles pour ne pas entraîner en surface des déformations permanentes avant l'endommagement par fatigue des couches bitumineuses liées.

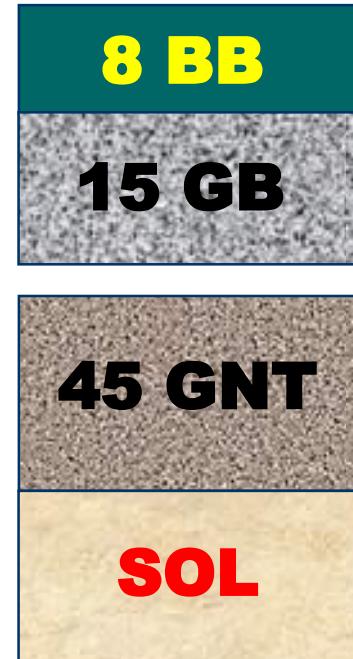
Conditions de collage



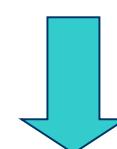
15 ans



4 ans



5 ans



6 mois

Influence des conditions d'environnement

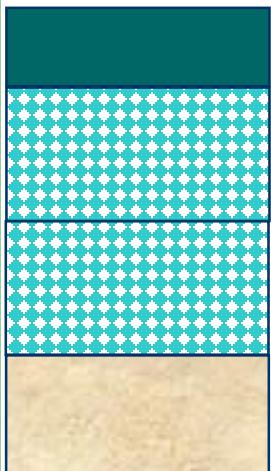
- Elle est semblable à celle décrite pour les chaussées souples.
- L'orniérage par fluage, favorisé par des températures élevées et un trafic lourd lent, n'affecte en général que la couche de surface. Il tient à des choix inadaptés de nature de matériaux et de formulation.

Chaussées bitumineuses épaisses

Évolution du mode d'endommagement

- L'apparition de fissures longitudinales de fatigue dans les traces de roues est généralement postérieure aux dégradations de surface. Les fissures longitudinales se transforment progressivement en faïençage dont la dimension des mailles se réduit peu à peu. Cette transformation s'amorce dans les zones de plus faible qualité (portance du support, caractéristiques du matériau lié, zone de décollement de la couche de roulement).
- La dégradation des fissures accélère le processus avec l'infiltration de l'eau à travers le corps de chaussée. Ceci favorise en retour l'attrition des lèvres de fissures, le départ de matériaux et la formation de nids de poule. A ce stade de désorganisation des couches liées, le mode de fonctionnement de la chaussée est profondément modifié, les blocs réagissant isolément sous les charges.
- Sans entretien, le processus de dégradation des chaussées bitumineuses épaisses se développe ainsi jusqu'à la ruine.

Chaussée à assise traitée aux liants hydrauliques (semi-rigide)



Couche de surface en matériaux bitumineux

Matériaux traités aux liants hydrauliques (20 à 50 cm)

Plate forme support

Sollicitations dues au trafic

- Compte tenu de la grande rigidité des matériaux traités aux liants hydrauliques, les contraintes verticales transmises au support de chaussée sont faibles. En revanche, l'assise traitée subit des contraintes de traction-flexion qui s'avèrent déterminantes pour le dimensionnement de ce type de chaussée.
- Ces structures comportent souvent une couche de base et une couche de fondation. Lorsque l'adhérence entre ces couches assure la continuité des déplacements, la contrainte maximale de traction est observée à la base de la couche de fondation. Dans le cas contraire (où il se produit un glissement relatif), les couches travaillent toutes deux en traction à leur base.
- L'interface couche de surface bitumineuse / couche de base est aussi une zone sensible car :
 - elle est soumise à des contraintes normales et de cisaillement horizontal,
 - les quelques centimètres supérieurs de l'assise traitée sont souvent de plus faible résistance.

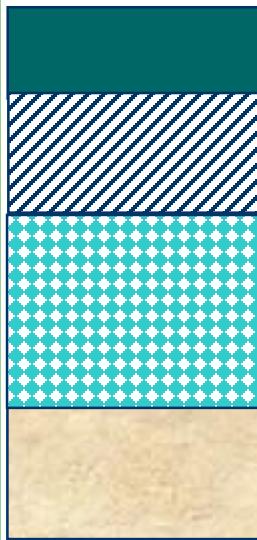
Influence des conditions d'environnement

- Les assises traitées aux liants hydrauliques sont sujettes aux retraits thermiques et aux retraits de prise.
- Le retrait, empêché par le frottement de la couche d'assise sur son support, provoque des fissurations transversales qui remontent à travers la couche de roulement.
- Ces fissures apparaissent en surface de la chaussée avec un espacement assez régulier (entre 5 et 15 m). Leur ouverture varie avec la température entre quelques dixièmes de mm et quelques mm. Les fissures de retrait tendent à se dédoubler et se ramifier sous l'effet du trafic.
- La fissuration de retrait favorise la pénétration de l'eau, ce qui provoque :
 - Une diminution de la qualité du collage
 - Une augmentation de l'allongement à la base de la couverture bitumineuse ;
 - Un accroissement des contraintes de traction à la base des couches traitées ;
 - Une modification des conditions d'appui sur le support de chaussée.

Évolution du mode d'endommagement

- Si la couverture bitumineuse est de faible épaisseur et peu étanche et si la surface de l'assise traitée est mal protégée (enduit de cure), celle-ci se dégraderait rapidement par attrition.
- Avec la pénétration de l'eau par les fissures de retrait thermique ou dans les zones d'enrobés perméables. Ceci entraînerait l'apparition de remontées de boues en surface en période humide.
- Ces dégradations évolueraient rapidement en flâches avec des faïençages, puis en nids de poule.

Chaussée à structure mixte



Couche de surface en matériaux bitumineux

Matériaux bitumineux d'assise (10 à 20 cm)

Matériaux traités aux liants hydrauliques (20 à 40 cm)

Plate forme support

Chaussées à structure mixte

Les différentes couches des structures mixtes ont un rôle fonctionnel distinct :

- La couche de matériau traité aux liants hydrauliques placée en fondation diffuse et atténue, du fait de sa raideur élevée, les efforts transmis au sol support. Cette couche constitue par ailleurs un support de faible déformabilité pour les couches bitumineuses supérieures.
- Les couches bitumineuses (dont l'une est généralement constituée de grave-bitume) ont plusieurs rôles :
 - Elles assurent les qualités d'uni
 - Elles servent à ralentir la remontée des fissures transversales de la couche de matériaux traités aux liants hydrauliques
 - Elles réduisent enfin les contraintes de flexion à la base de la couche de fondation.

Sollicitations dues au trafic

- En première phase, les différentes couches restent adhérentes. La couche bitumineuse est alors peu sollicitée en traction (à l'exception toutefois des zones proches des fissures transversales présentes dans la couche traitée aux liants hydrauliques). C'est en revanche la base de la couche traitée aux liants hydrauliques qui est sollicitée en fatigue par flexion.
- Par suite des mouvements de dilatation différentielle entre la grave-bitume et la grave traitée aux liants hydrauliques, et de l'action du trafic, l'adhérence de ces couches peut finir par se rompre dans certaines zones. Ceci entraîne une forte augmentation des contraintes de traction dans la couche de grave-bitume qui peut alors périr par fatigue à son tour.

Influence des conditions d'environnement

- La couche traitée aux liants hydrauliques est sujette au retrait.
- Les écarts de température journaliers participent, avec l'effet du trafic, à la propagation de la fissuration à travers la couche bitumineuse.

Évolution du mode d'endommagement

- Pour les structures construites selon les règles de l'art, on constate dans l'ensemble un comportement satisfaisant.
- Toutefois, sur des sols de mauvaise portance et lorsque l'épaisseur et la qualité des graves traitées aux liants hydrauliques étaient insuffisantes, on a pu constater des flaches de grandes dimensions conduisant à un faïençage des couches bitumineuses.

Chaussée à structure inverse



Couche de surface en matériaux bitumineux

Matériaux bitumineux d'assise

Matériaux granulaires non traités

Matériaux traités aux liants hydrauliques

Plate forme support

Chaussées à structure inverse

Les chaussées à structure inverse sont des structures composées de trois couches ayant chacune un rôle fonctionnel spécifique.

- La couche de fondation en matériaux traités aux liants hydrauliques a pour objet **d'atténuer les contraintes sur le sol** et d'assurer par ailleurs aux couches supérieures un support de faible déformabilité.
- La couche granulaire a pour fonction **d'éviter la remontée des fissures consécutives** aux phénomènes de retrait et aux mouvements d'origine thermique de la couche en matériaux traités aux liants hydrauliques.
- La couverture bitumineuse **assure les qualités d'uni et d'étanchéité**.

Chaussées à structure inverse

Sollicitations dues au trafic

- La couche traitée aux liants hydrauliques assure une grande partie de la rigidité en flexion de la structure. La couche bitumineuse travaille également en traction à la base de la couche, l'amplitude des allongements étant fonction de l'épaisseur et de la rigidité du support granulaire.
- La couche granulaire, de faible épaisseur, est confinée par les couches liées. Reposant sur un support rigide, elle subit des contraintes relativement élevées. La grave concassée est choisie pour résister à l'attrition et avoir un module intrinsèque élevé afin de limiter la déformation de la couche bitumineuse.

Chaussées à structure inverse

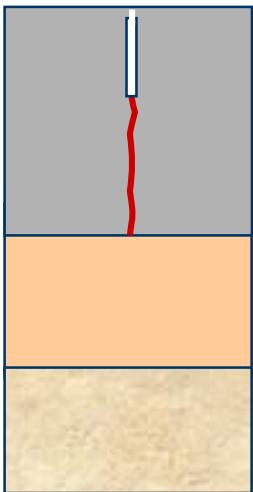
Influence des conditions d'environnement

Les effets thermiques sur le développement de la fissuration de retrait des couches traitées aux liants hydrauliques et sur la déformabilité des couches bitumineuses, déjà signalés pour les autres structures de chaussée, se manifestent aussi sur les structures inverses.

Évolution du mode d'endommagement

- Les essais effectués sur le manège de fatigue du LCPC ont mis en évidence les modes de dégradation potentiels : un léger orniérage attribuable à la couche granulaire et une fissuration transversale de fatigue des couches bitumineuses survenant après un grand nombre de cycles.
- Cette fissuration n'était pas très dense et les fissures sont restées fines. Il a par ailleurs été constaté que le pas des fissures n'était pas systématiquement relié à l'état de fissuration de la couche de matériaux traités aux liants hydrauliques, ce qui tend à établir l'efficacité de la couche granulaire vis-à-vis de la remontée des fissures.
- Dans le cas d'exécution imparfaite, on a relevé des détériorations rapides lorsque l'eau pouvait pénétrer et s'accumuler dans la couche granulaire.

Chaussée en béton de ciment (rigide)



Béton de ciment

Béton maigre ou matériaux traités aux liants hydrauliques

Plate forme support

Sollicitations dues au trafic

- Du fait du module d'élasticité élevé du béton de ciment, les efforts induits par le trafic sont essentiellement repris en flexion par la couche de béton. Les contraintes de compression transmises au sol sont faibles. Comme pour les chaussées à assise traitée aux liants hydrauliques, la sollicitation déterminante est la contrainte de traction par flexion à la base.
- Lors de la prise et des cycles thermiques, le béton subit des phases de retrait. La fissuration correspondante est généralement contrôlée, soit par la réalisation de joints transversaux, soit par la mise en place d'armatures continues longitudinales destinées à répartir par adhérence les déformations de retrait.

Influence des conditions d'environnement

- Pour ces structures, les sollicitations créées par les variations des conditions d'environnement peuvent être nettement supérieures à celles dues au trafic. C'est cependant la combinaison des sollicitations dues aux charges et au gradient thermique qui provoque l'endommagement par fatigue.
- Les variations journalières de la température ambiante créent dans les dalles des gradients thermiques. Les dalles ont alors tendance à se déformer. Il s'ensuit une modification des conditions d'appui sur le support conduisant à majorer l'effet du trafic.

Évolution du mode d'endommagement

- Pour les chaussées en béton classiques à dalles discontinues, la fissuration créée par des contraintes de traction par flexion excessives à la base des dalles est l'un des deux modes principaux de dégradation.
- Le second mode principal de dégradation tient à l'évolution des conditions d'appui au voisinage des joints et des fissures. Cette évolution est essentiellement due à la présence d'eau à l'interface dalle / fondation dont l'effet se conjugue :
 - à l'érodabilité du support,
 - aux chargements transitoires répétés du trafic,
- L'emploi de matériaux peu érodables en couche de fondation, et un drainage convenable aux interfaces (entre la dalle et son support, entre la dalle et l'accotement), sont des dispositions constructives, qui permettent d'éviter la dégradation des chaussées en béton.