



ROUTES

Faculté des Sciences et Techniques de Marrakech



Chapitre 1 :

Géotechnique routière

Terminologie routière



Chaussée: c'est la surface revêtue de la route sur laquelle circule normalement les véhicules.



Terminologie routière



Accotement : ce sont deux bandes latérales qui encadrent la chaussée.



Terminologie routière



Plate forme : c'est l'ensemble chaussée accotements y compris éventuellement le TPC.

Fossé : ce sont des excavations aménagées de part et d'autre de la plate forme, ils sont destinés à assainir la plate forme en collectant les eaux de ruissellements.

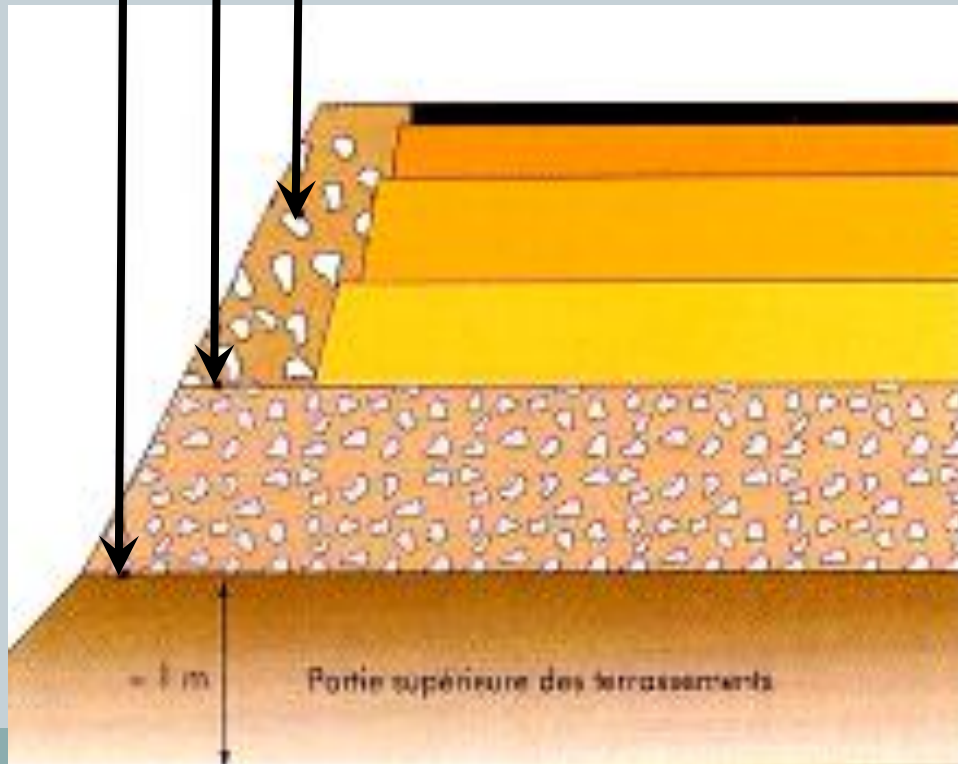
Terminologie routière

Composition d'une chaussée :

Arase de terrassement

Plate forme support de chaussée

Accotement



Roulement

Liaison

Base

Fondation

Couches de surface

Couches d'assises

Couches de forme

Sol support

Géotechnique routière



Dans le domaine routier le sol va être utilisé en tant que matériau dans les travaux de terrassement. Le domaine des terrassements et des routes est économiquement très important dans les travaux publics puisqu'il représente 25% du chiffre d'affaires de la profession.



Géotechnique routière



Les choix réalisés lors des études auront des conséquences majeures sur l'économie du projet. Une mauvaise option concernant le réemploi des terres mènera à des surcoûts importants dus à la nécessité d'un traitement non prévu, à la recherche d'un nouveau gisement, aux transports des matériaux et au dépassement des délais.

En ce qui concerne les grandes infrastructures, les principaux paramètres seront les suivants :

- réemploi des terres (opérations de déblai - remblai), caractéristiques intrinsèques et état des matériaux
- incidence des conditions météorologiques
- possibilité d'effectuer des « emprunts » à proximité du remblai à construire
- hauteur du remblai

Géotechnique routière



Autres objectifs de l'ingénieur routier au regard du comportement du sol :

La tenue des talus :

- Stabilité des talus

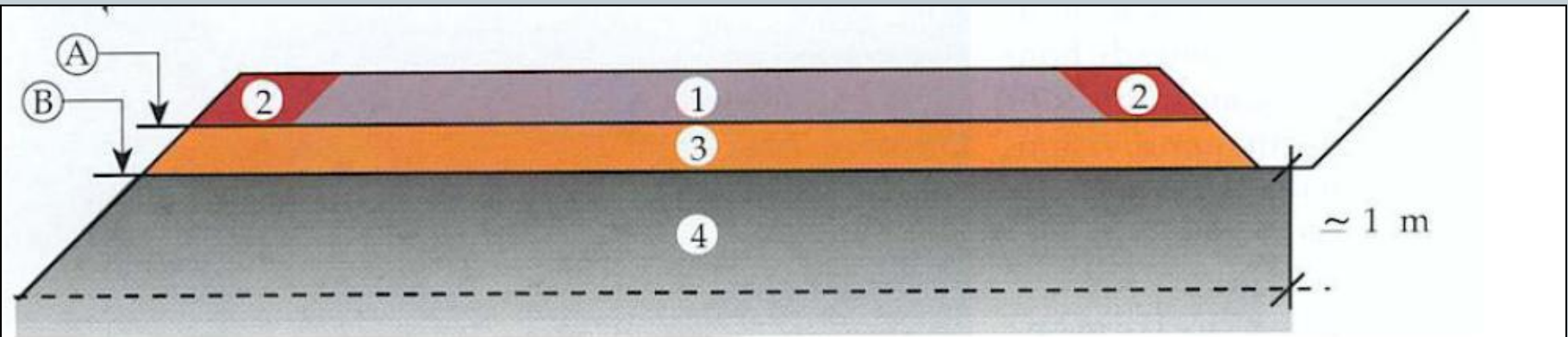
La résistance des remblais et couches de chaussée aux déformations :

- Recherche d'une bonne portance en surface
- Absence de tassement ultérieur

Géotechnique routière



La partie supérieure des terrassements (PST) est la zone supérieure, d'environ 1 mètre, des terrains en place (cas des déblais) ou des matériaux rapportés (cas des remblais). La plate-forme de la PST est l'arase de terrassement AR.



- ① chaussée
- ② accotements
- ③ couche de forme **CDF**
- ④ partie supérieure des terrassements **PST**

Plate – forme A : support de chaussée **PF**

Plate – forme B : arase de terrassement **AR**

Géotechnique routière



Classification des sols et des roches pour travaux de terrassement :

Sols : Il s'agit de matériaux naturels, constitués de grains pouvant se séparer aisément par simple trituration ou éventuellement sous l'action d'un courant d'eau. Ces grains peuvent être de dimensions très variables, allant des argiles aux blocs. Ils correspondent aux classes A, B, C et D définies ci-après. Leur pourcentage de matières organiques est inférieur ou égal à 3 %.

Matériaux rocheux : Il s'agit des matériaux naturels comportant une structure qui ne peut être désagrégée par simple trituration ou sous l'action d'un courant d'eau ; leur utilisation implique une désagrégation mécanique préalable par minage ou emploi d'engin d'extraction de forte puissance. Les matériaux rocheux correspondent à la classe R définie ci-après ; ils ont pour origine l'ensemble des roches sédimentaires, magmatiques et métamorphiques.

Sols organiques : Il s'agit de sols ayant un pourcentage de matières organiques supérieur à 3 %.

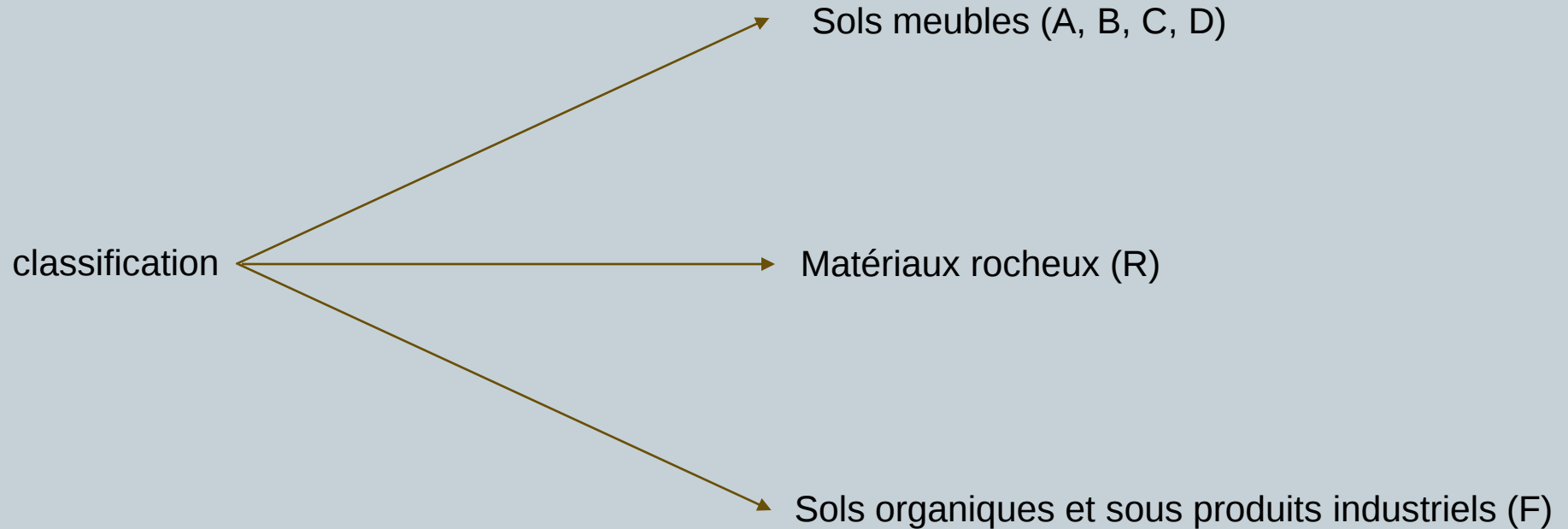
Sous-produits industriels : Il s'agit de matériaux, produits de l'activité humaine, d'origines diverses pouvant être utilisés en remblais et en couches de forme.

Les sols organiques, les sous-produits industriels correspondent à la classe F définie ci-après.

Géotechnique routière



Classification des sols et des roches :



Géotechnique routière



Paramètres de classification des sols meubles :

Paramètres de nature :

Ce sont des paramètres intrinsèques ; ils ne varient pas, ou peu, ni dans le temps ni au cours des différentes manipulations que subit le sol au cours de sa mise en œuvre.

Les paramètres de nature considérés dans la classification des sols sont **la granularité**, **l'indice de plasticité** et **la valeur au bleu de méthylène** du sol.

Géotechnique routière



Paramètres de classification des sols meubles :

Paramètres de nature :

La granularité :

- Le $D_{\max}$

Dimension maximale des plus gros éléments contenus dans le sol

Seuil retenu : 50 mm

Cette valeur permet de distinguer les sols fins, sableux et graveleux (classe A, B et D) (≤ 50 mm), des sols grossiers comportant des éléments blocailleux (Classe C) (> 50 mm).

Géotechnique routière



Paramètres de classification des sols meubles :

Paramètres de nature :

La granularité :

- Le $D_{\max}$

Pour les sols de la classe C (sols comportant des fines et des gros éléments, deux sous-classes sont distinguées selon l'importance de la fraction 0/50 mm :

- la sous-classe C1 qui rassemble les matériaux à éléments «anguleux» possédant une importante fraction 0/50 mm (≥ 60 à 80%) et l'ensemble des matériaux à éléments «roulés».

- la sous-classe C2 qui comprend les matériaux à éléments anguleux possédant une faible fraction 0/50 mm (≤ 60 à 80%).

Pour tenir compte des caractéristiques de la fraction 0/50 mm, l'identification des sols de la classe C est précisée à l'aide d'un double symbole du type **C1Ai**, **C1Bi**, **C2Ai** ou **C2Bi**, **Ai** ou **Bi** étant la classe de la fraction 0/50 mm du matériau considéré.

Géotechnique routière



Paramètres de classification des sols meubles :

Paramètres de nature :

La granularité :

- Le tamisat à 80 μm (ou pourcentage de fines)

Ce paramètre permet de distinguer les sols riches en fines des sols sableux et graveleux

Seuils retenus :

35% : au-delà de 35 % de tamisât à 80 μm , les sols ont un comportement assimilable à celui de leur fraction fine.

12% : c'est un seuil conventionnel permettant d'établir une distinction entre les matériaux sableux et graveleux pauvres ou riches en fines.

Géotechnique routière



Paramètres de classification des sols meubles :

Paramètres de nature :

La granularité :

- Le tamisat à 2 mm

Ce paramètre permet d'établir la distinction entre les sols à tendance sableuse et les sols à tendance graveleuse.

Seuil retenu :

70% : Ce seuil permet de distinguer les sols sableux (plus de 70 % de tamisât à 2 mm) des sols graveleux (moins de 70 % de tamisât à 2 mm).

Géotechnique routière



Paramètres de classification des sols meubles :

Paramètres de nature :

L'argilosité

- L'Indice de Plasticité (IP)

Seuils retenus :

- ✓ 12 : limite supérieure des sols faiblement argileux
- ✓ 25 : limite supérieure des sols moyennement argileux
- ✓ 40 : limite entre les sols argileux et très argileux.

Géotechnique routière



Paramètres de classification des sols meubles :

Paramètres de nature :

L'argilosité

- La Valeur de Bleu de Méthylène (VBS)

Seuils retenus :

0.1 : en dessous duquel sols insensibles à l'eau

0.2 : au dessus duquel apparaît la sensibilité à l'eau

1.5 : seuil distinguant les sols sablo limoneux des sols sablo argileux

2.5 : seuil distinguant les sols limoneux peu plastiques des sols limoneux moyennement plastiques

6 : seuil distinguant les sols limoneux des sols argileux

8 : seuil distinguant les sols argileux des sols très argileux

Géotechnique routière



Paramètres de classification des sols meubles :

Paramètres de nature :

Paramètres de nature Premier niveau de classification	Classe	Paramètres de nature Deuxième niveau de classification	Sous classe fonction de la nature
$D_{\max} \leq 50\text{mm}$ et tamisat à $80\mu\text{m} > 35\%$	A Sols fins	$VBS \leq 2,5$ ou $I_p \leq 12$	A_1 Limons peu plastiques, loëss, silts alluvionnaires, sables fins peu pollués, arènes peu plastiques...
		$12 \leq I_p \leq 25$ ou $2,5 < VBS \leq 6$	A_2 Sables fins argileux, limons, argiles et marnes peu plastiques, arènes...
		$25 \leq I_p \leq 40$ ou $6 < VBS \leq 8$	A_3 Argiles et argiles marneuses, limons très plastiques...
		$I_p > 40$ ou $VBS > 8$	A_4 Argiles et argiles marneuses, très plastiques

Géotechnique routière



Paramètres de classification des sols meubles :

Paramètres de nature :

Paramètres de nature Premier niveau de classification	Classe	Paramètres de nature Deuxième niveau de classification	Sous classe fonction de la nature
$D_{\max} \leq 50\text{mm}$ et tamisat à $80\mu\text{m} \leq 35\%$	B Sols sableux et graveleux avec fines	Tamisat à $80\mu\text{m} \leq 12\%$ tamisat à $2\text{mm} > 70\%$ $0,1 \leq \text{VBS} \leq 0,2$ ou $\text{ES} > 35$	B ₁ Sables silteux...
		tamisat à $80\mu\text{m} \leq 12\%$ tamisat à $2\text{mm} > 70\%$ $\text{VBS} > 0,2$ Ou $\text{ES} \leq 35$	B ₂ Sables argileux (peu argileux)
		tamisat à $80\mu\text{m} \leq 12\%$ tamisat à $2\text{mm} \leq 70\%$ $0,1 \leq \text{VBS} \leq 0,2$ ou $\text{ES} > 25$	B ₃ Graves silteuses...
		tamisat à $80\mu\text{m} \leq 12\%$ tamisat à $2\text{mm} \leq 70\%$ $\text{VBS} > 0,2$ ou $\text{ES} > 25$	B ₄ Graves argileuses (peu argileuses)...
		$12\% < \text{tamisat à } 80\mu\text{m} \leq 35\%$ $\text{VBS} \leq 1,5$ ou $\text{Ip} \leq 12$	B ₅ Sables et graves très silteux...
		$12\% < \text{tamisat à } 80\mu\text{m} \leq 35\%$ $\text{VBS} > 1,5$ ou $\text{Ip} > 12$	B ₆ Sables et graves argileux à très argileux

Géotechnique routière



Paramètres de classification des sols meubles :

Paramètres de nature :

Paramètres de nature Premier niveau de classification	Classe	Paramètres de nature Deuxième niveau de classification	Sous-classe fonction de la nature
VBS $\leq 0,1$ et Tamisat à $80 \mu\text{m} \leq 12\%$	D Sols insensibles à l'eau	Dmax $\leq 50 \text{ mm}$ et tamisat à $2 \text{ mm} > 70\%$	D ₁ Sables alluvionnaires propres, sables de dune...
		Dmax $\leq 50 \text{ mm}$ et tamisat à $2 \text{ mm} \leq 70\%$	D ₂ Graves alluvionnaires propres, sables...
		Dmax $> 50 \text{ mm}$	D ₃ Graves alluvionnaires propres...

Géotechnique routière



Paramètres de classification des sols meubles :

Paramètres de comportement mécanique :

- Los Angeles (LA)
- Micro Deval en présence d'Eau (MDE)
- Friabilité des Sables (FS)

Ces essais sont basés sur l'usure du matériau engendré par la présence de pièces métalliques mobiles (billes d'acier placées avec une fraction granulométrique du matériau dans un tambour tournant selon une vitesse et un temps normalisés); on mesure les modifications granulométriques dues à ces sollicitations dynamiques.

Géotechnique routière



Paramètres de classification des sols meubles :

Paramètres de comportement mécanique :

- Los Angeles (LA) :

Le coefficient **LA** mesure la résistance à la fragmentation par chocs des granulats sur la fraction 10/14 mm. C'est la proportion exprimée en pourcentage d'éléments inférieurs à 1,6mm produite sous les chocs de boulet

$LA = 100 (m/M)$

m : masses des éléments < 1,6mm après essai

M : masse totale du matériau

Le seuil retenu est : **45**



Cet essai va également être utilisé pour les gravillons utilisés dans la chaussée afin d'évaluer leur aptitude à se déformer sous l'action du trafic.

Géotechnique routière



Paramètres de classification des sols meubles :

Paramètres de comportement mécanique :

- Essai d'usure micro – Deval en présence d'eau MDE

Le MDE mesure la résistance à l'usure des granulats et leur sensibilité à l'eau.

Le MDE est la proportion exprimée en pourcentage d'éléments inférieurs à 1,6mm produite sous une charge abrasive de billes.

$MDE = 100 (m/M)$

m : masses des éléments < 1,6mm après essai

M : masse totale du matériau

Le seuil retenu est : **45**



Cet essai permet également de quantifier à la fois l'usure par frottement réciproque des granulats dans une assise(attrition), et l'usure par frottement des pneumatiques sur les gravillons à la surface du revêtement.

Géotechnique routière



Paramètres de classification des sols meubles :

Paramètres de comportement mécanique :

- Essai de friabilité des sables FS

Il permet de mesurer l'évolution granulométrique des sables (fraction 0/1 ou 0/2 mm) produite par fragmentation dans un appareil micro – Deval.

Le coefficient FS est la proportion exprimée en pourcentage d'éléments inférieurs à 0,1mm produite sous une charge abrasive de billes.

$FS = 100 (m/M)$

m : masses des éléments < 0,1mm après essai

M : masse totale du matériau

Le seuil retenu est : **60**

Géotechnique routière



Paramètres de classification des sols meubles :

Paramètres d'état :

Il s'agit des paramètres qui ne sont pas **propres au sol**, mais fonction de **l'environnement** dans lequel il se trouve.

Pour les sols, le seul paramètre d'état considéré dans la présente classification est **l'état hydrique** ; son importance est capitale vis-à-vis de tous les problèmes de remblai et de couche de forme.

L'état hydrique :

- h : état humide
- m : état d'humidité moyen
- s : état sec
- ts : état très sec

Pour déterminer les états hydriques on a besoin de procéder à des essais typiquement routiers que sont : les essais **Proctor normal et modifié et les essais CBR**.

Géotechnique routière



Paramètres de classification des sols meubles :

Paramètres d'état :

Les essais PROCTOR :

Le principe de l'essai est de déterminer la teneur en eau optimale w pour obtenir la plus grande compacité sous une énergie donnée. Suivant l'énergie de compactage on obtiendra, pour la plus faible énergie l'Optimum Proctor Normal (OPN) et pour la plus forte énergie l'Optimum Proctor Modifié (OPM). On utilise l'essai Proctor normal pour les remblais et les couches de forme et l'essai Proctor modifié pour les couches de chaussée.

L'essai consiste à mesurer, sous une énergie de compactage constante, les variations de la densité sèche d'un sol en fonction de sa teneur en eau. En pratique on utilise un moule métallique dans lequel le matériau est mis en place en plusieurs couches, chaque couche étant compacté à l'aide d'une dame en un nombre de coups fixés.

Géotechnique routière

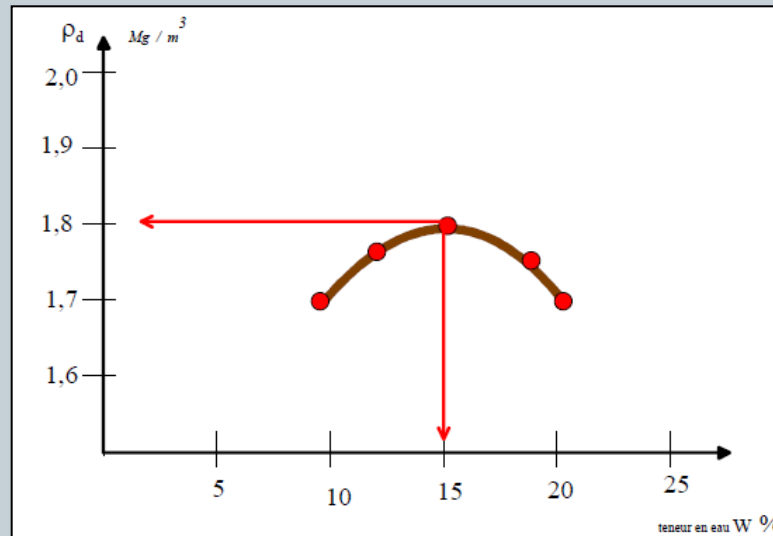


Paramètres de classification des sols meubles :

Paramètres d'état :

Les essais PROCTOR :

On effectue au moins 5 essais qui permettent de tracer l'évolution de la masse volumique sèche ρ_d en fonction de la teneur en eau w . La courbe Proctor permet de déterminer la teneur en eau optimale w^{OPN} ou w^{OPM} qui permet d'obtenir le meilleur compactage ρ^{dOPN} ou ρ^{dOPM} sous une énergie donnée pour un certain type de sol. Sur cet exemple on obtient $\rho^{dOPN} = 1,8 \text{ Mg / m}^3$ pour une teneur en eau $w^{OPN} = 15\%$.



Géotechnique routière

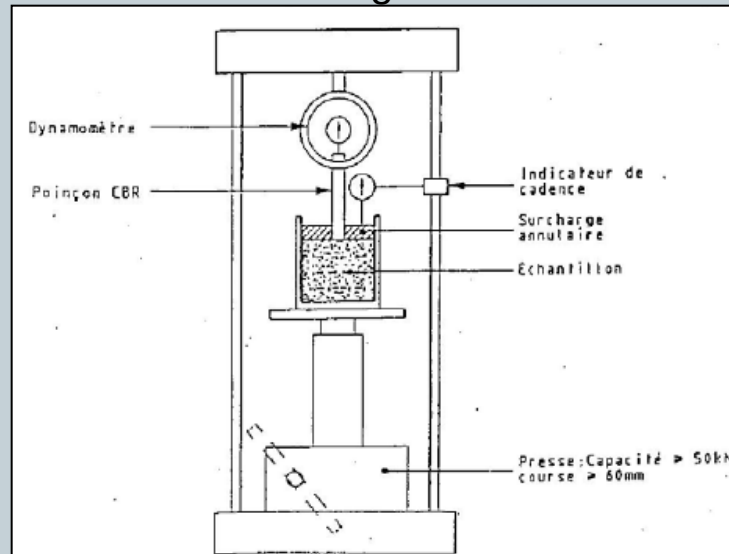


Paramètres de classification des sols meubles :

Paramètres d'état :

L'essai CBR :

Il est effectué sur des éprouvettes de sol issues de l'essai Proctor normal (remblai) ou modifié (couche de forme), l'éprouvette est immergée ou non et subit un poinçonnement statique. Autour du piston une surcharge annulaire composée de deux demi anneaux de plomb peut être placée pour simuler une surcharge.



Géotechnique routière



Paramètres de classification des sols meubles :

Paramètres d'état :

L'essai CBR :

Le poinçonnement est réalisé à la vitesse de 1.27 mm / min jusqu'à un enfoncement de 10 mm
L'indice CBR est conventionnellement la plus grande des valeurs suivantes:

Effort de pénétration à 2.5 mm d'enfoncement (en kN) x 100
13.35 kN

Effort de pénétration à 5 mm d'enfoncement (en kN) x 100
19.93 kN

Les valeurs 13.35 et 19.93 kN correspondent aux enfoncements de 2.5 mm et 5 mm mesurés sur un matériau de référence.

Géotechnique routière



Paramètres de classification des sols meubles :

Paramètres d'état :

L'essai CBR :

On distingue 3 types d'essais CBR.

1- L'Indice CBR après immersion : Il est utilisé pour caractériser un sol en tant que support ou constituant une structure de chaussée. Il correspond au poinçonnement, avec la surcharge annulaire, d'une éprouvette confectionnée à l'aide d'un matériau mis en oeuvre à sa teneur en eau naturelle et immergée dans l'eau durant 4 jours.

Lorsque le poinçonnement est réalisé pour toutes les teneurs en eau de l'essai Proctor, on peut tracer la courbe de l'indice CBR en fonction de la teneur en eau w ; sa forme correspond à une hyperbole qui caractérise bien la sensibilité du sol à l'eau.

C'est ainsi que l'on constate la grande sensibilité à l'eau des limons pour lesquels un excès de 2 ou 3 points de teneur en eau par rapport à w_{opt} fait chuter considérablement sa portance.

Géotechnique routière



Paramètres de classification des sols meubles :

Paramètres d'état :

L'essai CBR :

2- L'Indice CBR immédiat :

Il correspond au poinçonnement, avec la surcharge annulaire, d'une éprouvette confectionnée à l'aide d'un matériau mis en oeuvre à sa teneur en eau naturelle.

3- L'IPI (Indice Portant Immédiat) :

Il est utilisé pour caractériser un sol à supporter directement la circulation des engins de chantier. Il correspond au poinçonnement, sans la surcharge annulaire, d'une éprouvette confectionnée à l'aide d'un matériau mis en oeuvre à sa teneur en eau naturelle et compacté à l'énergie du Proctor Normal.

Géotechnique routière



Paramètres de classification des sols meubles :

Paramètres d'état :

L'état hydrique :

- La position de w_n par rapport à w_{OPN} : exprimé par le rapport w_n / w_{OPN}
- L'indice de consistance I_C : exprimé par le rapport $I_C = (W_L - w_n) / I_p$
- L'Indice Portant Immédiat IPI : CBR immédiat sans surcharge ni immersion

Géotechnique routière



Paramètres de classification des sols meubles :

Paramètres d'état :

L'état hydrique :

<i>Classement selon la nature</i>		<i>Classement selon l'état hydrique</i>	
Sous classe fonction de la nature	Caractères principaux	Paramètres et valeurs de seuils retenus	Sous - classe
A₁ Limons peu plastiques, loess, silts alluvionnaires, sables fins peu pollués, arènes peu plastiques...	Ces sols changent brutalement de consistance pour de faibles variations de teneur en eau, en particulier lorsque leur w_n est proche de w_{opn} . Le temps de réaction aux variations de l'environnement hydrique et climatique est relativement court, mais la perméabilité pouvant varier dans de larges limites selon la granulométrie, la plasticité et la compacité, le temps de réaction peut tout de même varier assez largement.	$IPI \leq 3$ ou $w_n \geq 1,25 w_{opn}$	A_{1th}
		$3 < IPI \leq 8$ ou $1,10 w_{opn} \leq w_n < 1,25 w_{opn}$	A_{1h}
		$8 < IPI \leq 25$ ou $0,9 w_{opn} \leq w_n < 1,10 w_{opn}$	A_{1m}
		$0,7 w_{opn} \leq w_n < 0,9 w_{opn}$	A_{1s}
		$w_n < 0,7 w_{opn}$	A_{1ts}

Géotechnique routière



Classification des sols meubles :

Classe	Type de sol	Sous-classe
La classe A $D_{\max} \leq 50 \text{ mm}$ et tamisat à $80\mu\text{m} > 35\%$	les sols fins (silts, limons, argiles, etc....)	A1, A2, A3 et A4 Suivant l'importance de la plasticité
La classe B $D_{\max} \leq 50 \text{ mm}$ et tamisat à $80\mu\text{m} \leq 35\%$	les sols sableux ou graveleux avec fines	B1, B2 B3, B4, B5, et B6 Suivant l'importance et les caractéristiques des fines et l'importance de la fraction sableuse
La classe C $D_{\max} > 50 \text{ mm}$	Matériaux d'éboulis, Tv grossiers,..	C1 et C2 CiAi ou CiBi ou CiDi
La classe D $D_{\max} \leq 50 \text{ mm}$ et tamisat à $80\mu\text{m} \leq 12\%$ VBS < 0.1	Sables et graves propres	D1 (Sables propres) D2 (Graves propres)

Géotechnique routière



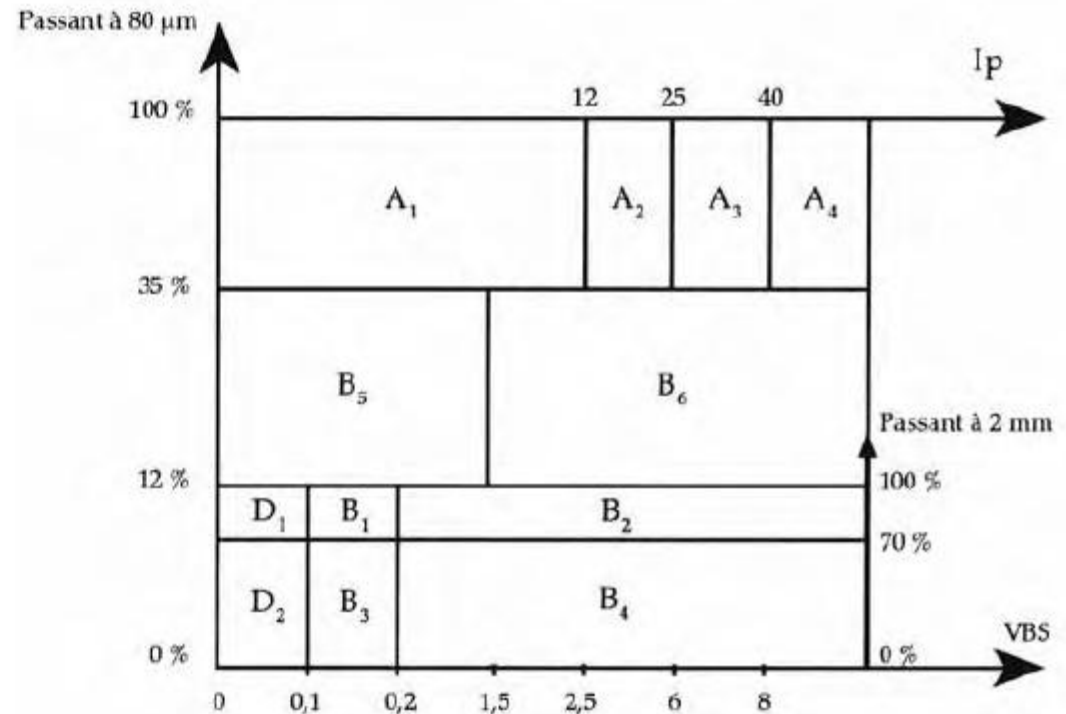
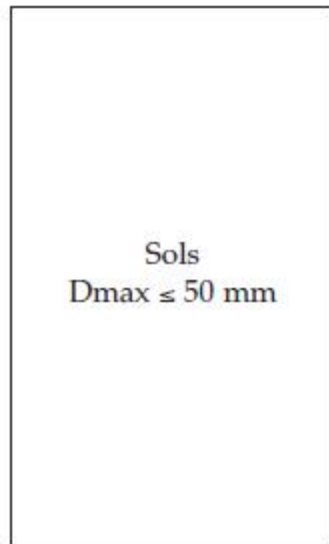
Classification des sols meubles :

Classe	Type de sol	Sous-classe
Les sols Tirseux $W_I - W_r > 42$ (Indice d'instabilité volumétrique)	Sols fins caractérisés par un fort gonflement	TxA3 : pour les sols avec $IP \leq 40$ TxA4 : pour les sols avec $IP > 40$
Les sols Tuffacés Taux de $CaCO_3$	Sols calcifiés	Tf : si $50\% \leq CaCO_3 \leq 70\%$ Tc : si $CaCO_3 > 70\%$ Soit TfAi ou TfBi Soit TcAi ou TcBi

Géotechnique routière



Classification des sols meubles :



Géotechnique routière



Classification des sols meubles :

Sols
 $D_{\max} > 50 \text{ mm}$

Passant à $80 \mu\text{m}$

12 %

D_3

0 0,1

C_1 OU C_2

C_1 : matériaux roulés et matériaux anguleux peu charpentés ($0/50 > 60$ à 80 %)

C_2 : matériaux anguleux très charpentés ($0/50 \leq 60$ à 80 %)

VBS

Géotechnique routière



Paramètres de classification des matériaux rocheux :

- Classification des matériaux rocheux d'après **la nature pétrographique** de la roche
- Classification d'après **les caractéristiques mécaniques** : Dureté Los Angeles, Usure MICRO-DEVAL Humide
- Pour les matériaux évolutifs : classification suivant **la fragmentabilité (FR)** et **la dégradabilité (DG)**.

Géotechnique routière



Paramètres de classification des matériaux rocheux :

➤ Classification des matériaux rocheux d'après la nature pétrographique de la roche

Roches Sédimentaires	Roches carbonatées	- Craies	R ₁
		- Grès calcaire - Calcaires marneux - Calcschistes - Calcaires durs - Calcaires dolomitiques	R ₂
	Roches argileuses	- Marnes - Schistes sédimentaires - Argilites - Pelites	R ₃
	Roches siliceuses	- Grès argileux - Grès siliceux - Poudingues - Brèches	R ₄
	Roches salines	- Gypse - Gypse marneux - Sel gemme	R ₅
Roches Magmatiques et Métamorphiques		- Granite - Basalte - Quartzite	R ₆

Géotechnique routière



Paramètres de classification des matériaux rocheux :

- Classification d'après **les caractéristiques mécaniques** : Dureté Los Angeles, Usure MICRO-DEVAL Humide

Nature pétrographique de la roche		Paramètres et valeurs seuils retenus	Sous-classe	
Roches magmatiques et métamorphiques	R_c Granite, basalte, trachyte, andésite... Gneiss, schistes métamorphiques, schistes ardoisiers...	$LA \leq 45$ et $MDE \leq 45$	Roches magmatiques et métamorphiques dures	R_{c1}
		$LA > 45$ ou $MDE > 45$ et $FR \leq 7$	Roches magmatiques et métamorphiques de dureté moyenne	R_{c2}
		$FR > 7$	Roches magmatiques et métamorphiques fragmentables ou altérées	R_{c3}

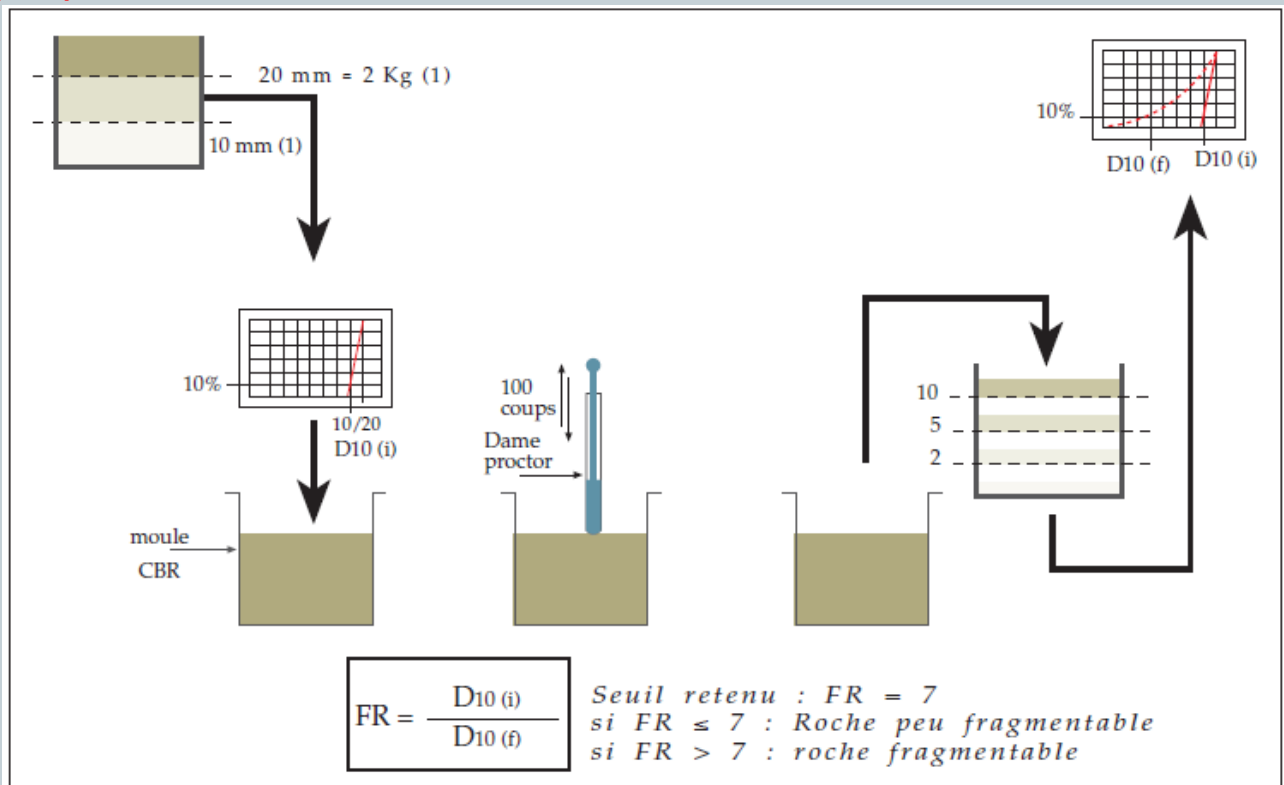
Géotechnique routière



Paramètres de classification des matériaux rocheux :

- Pour les matériaux évolutifs : classification suivant la fragmentabilité (FR) et la dégradabilité (DG).

Fragmentabilité :



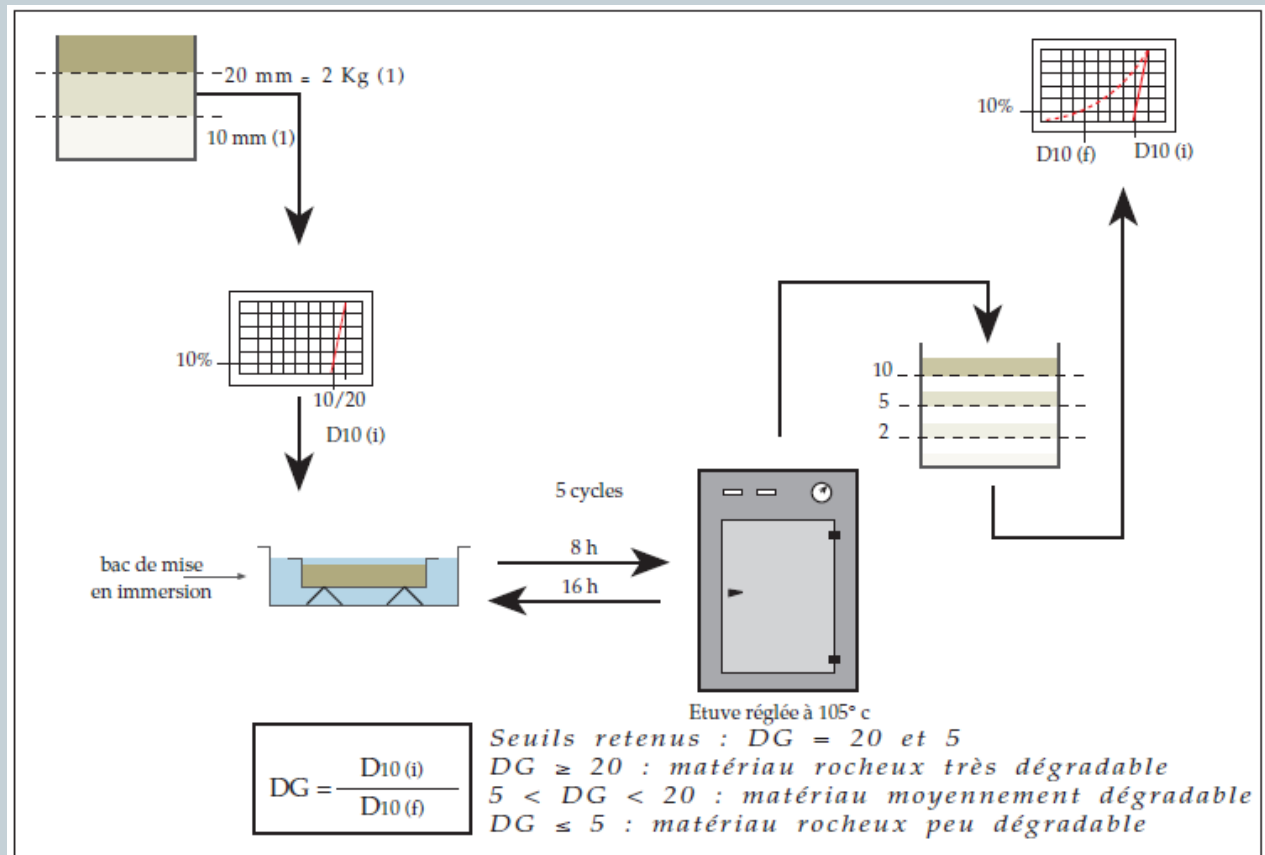
Géotechnique routière



Paramètres de classification des matériaux rocheux :

- Pour les matériaux évolutifs : classification suivant la fragmentabilité (FR) et la dégradabilité (DG).

Dégradabilité :



Géotechnique routière



Paramètres de classification des matériaux rocheux :

- Pour les matériaux évolutifs : classification suivant la fragmentabilité (FR) et la dégradabilité (DG).

Seuils retenus :

- ☐ FR = 7
- ✓ Si $FR < 7$: peu fragmentable
- ✓ Si $FR > 7$: fragmentable
- ☐ DG = 20 et 5
- ✓ $DG > 20$: très dégradabile
- ✓ $5 < DG < 20$: moyennement dégradabile
- ✓ $DG < 5$: peu dégradabile

Géotechnique routière



Exemple d'application :

Dmax	> 50 mm	> 2mm	< 0,080mm	WL	WP	VBS	w	wopn	IPI
6,3	0	11	77	32	21		4,5	8,5	
100	19	25	8			0,18			
100	10	20	65	27	13		0,8	9	
63	42	50	22			0,16			18
20	0	18	10			0,08			
85	0	15	28	35	18				8
35	0	53	11			1,8	10,3	10,8	

Géotechnique routière



Les sols organiques et les sous produits industriels (classe F)

Il s'agit d'une catégorie particulière issue « d'un gisement régional »; sur le plan géotechnique on utilisera les mêmes critères pour les sols naturels; hormis leurs caractéristiques particulières (teneur en MO, en imbrûlés, en sel, selon les cas) pour lesquelles se poseront les problèmes réglementaires environnementaux.

Ces derniers matériaux sont par nature répartis sur l'ensemble de l'hexagone; l'épaisseur maximale des remblai érigés avec ces matériaux est de 3 m et il ne peuvent être employés à proximité de la nappe (principe de précaution).

Géotechnique routière



Les campagnes de reconnaissance :

Si les sondages classiques (carottages, pressiomètres etc...) permettent de dresser le modèle géotechnique et d'effectuer les études de mécanique des sols, il conviendra d'effectuer une reconnaissance spécifique concernant la géotechnique routière. Les outils utilisés sont les suivants :

- < 10 m de profondeur: pelle mécanique et tarière simple
- jusqu'à 15 m de profondeur, tarière continue de gros diamètre (300 mm). On note que la précision de positionnement des échantillons prélevés par cet outil est assez aléatoire en profondeur; de plus ce matériel est inadapté sous nappe.
- pour des terrassements dont la profondeur est supérieure à 15 m, les carottages restent le bon outil (possibilité de réaliser des essais de nature et d'état) sous réserve d'extrapoler les résultats d'essais issus des zones moins profondes.
- les mesures géophysiques seront de bons outils pour évaluer certains paramètres (en particulier la sismique réfraction pour les terrassements rocheux).

Géotechnique routière



Applications du GTR92 :

Ce document (fascicule II, annexes techniques du GTR92) dont la première partie détaille les données de la norme NF P 11-300, est partagé en trois chapitres :

- les conditions d'utilisation des matériaux en remblai
- les conditions d'utilisation des matériaux en couche de forme
- le compactage des remblais et des couches de forme

Géotechnique routière



Applications du GTR92 :

Les conditions d'utilisation des matériaux en remblai :

Pour chaque classe ou sous-classe de matériaux définie dans la classification, les tableaux indiquent les conditions de mise en œuvre à respecter en fonction de la situation météorologique au moment où le matériau est mis en remblai.

Le tableau suivant définit les conditions pouvant être imposées pour l'utilisation des différents matériaux en remblai.

Géotechnique routière



Applications du GTR92 :

Rubrique	Code	Conditions d'utilisation
E Extraction	0	Pas de condition particulière à recommander
	1	Extraction en couches (0,1 à 0,3m)
	2	Extraction frontale (pour un front de taille > 1 à 2m)
G Action sur la granularité	0	Pas de condition particulière à recommander
	1	Elimination des éléments > 800 mm
	2	Elimination des éléments > 250 mm pour traitement
	3	Fragmentation complémentaire après extraction
W Action sur la teneur en eau	0	Pas de condition particulière à recommander
	1	Réduction de la teneur en eau par aération
	2	Essorage par mise en dépôt provisoire
	3	Arrosage pour maintien de l'état
	4	Humidification pour changer d'état
T Traitement	0	Pas de condition particulière à recommander
	1	Traitement avec un réactif ou un additif adaptés
	2	Traitement à la chaux seule
R Régilage	0	Pas de condition particulière à recommander
	1	Couches minces (20 à 30 cm)
	2	Couches moyennes (30 à 50 cm)
C Compactage	1	Compactage intense
	2	Compactage moyen
	3	Compactage faible
H Hauteur des remblais	0	Pas de condition particulière à recommander
	1	Remblai de hauteur faible (h< 5m)
	2	Remblai de hauteur moyenne (h< 10m)

Géotechnique routière



Applications du GTR92 :

- L'extraction E : l'extraction par couches d'un sol d'humidité «h» est favorable en période de forte évaporation. A l'inverse, l'extraction frontale, en période humide, permet de conserver au mieux la teneur en eau initiale d'un matériau « m ».
- La granularité G, concerne des valeurs - seuils de dimension des blocs (< 250 mm pour les traitements, < 800 mm pour réaliser une couche). La dimension des blocs limitera l'épaisseur des couches ou nécessitera leur écrêtage.
- L'action sur l'eau W, c'est la difficulté majeure des chantiers de terrassement dans la mesure où un remblai formé par des terres trop humides sera instable et intrajicable (phénomène de matelassage). A l'inverse des terres trop sèches seront difficilement compactables (énergie de compactage excessive, compacité insuffisante) et nécessiteront un arrosage.
- Le traitement T, lorsque les terres sont trop humides il sera possible d'agir à l'aide, entre autres, d'un traitement à la chaux qui, outre la diminution de w^n , déplacera favorablement w^{OPN}

Géotechnique routière



Applications du GTR92 :

- Le réglage R, indique l'épaisseur des couches élémentaires de remblai.
- Le compactage C, son intensité est précisée et sera une fonction croisée de la classe du matériau, de l'épaisseur de la couche, de son état hydrique et de la position de la couche dans l'édification du remblai (couche de forme par exemple).
- La hauteur du remblai, H détermine sa catégorie; on considère qu'un remblai est de grande hauteur si celle-ci est supérieure à 10 m. La hauteur du remblai peut impliquer le non emploi de certains matériaux

Géotechnique routière



Applications du GTR92 : Les conditions d'utilisation des matériaux en remblai :

Sol	Observations générales	Situation météorologique	Conditions d'utilisation en remblai	Code
A _{1h}	Ces sols sont difficiles à mettre en œuvre en raison de leur portance faible. Ils sont sujet au matelassage. Le matelassage est à éviter au niveau de l'arase - terrassement	+	pluie faible	Situation ne permettant pas la mise en remblai avec des garanties de qualité suffisantes NON EGWTRCH
		=	ni pluie, ni évaporation importante	Solution 1 : traitement T : traitement avec un réactif adapté C : compactage moyen 0 0 0 1 0 2 0
		-	évaporation importante	Solution 1 : utilisation en l'état C : compactage faible H : remblai de faible hauteur ($h < 5m$) 0 0 0 0 0 3 1
				Solution 2 : aération E : extraction en couches minces W : réduction de la teneur en eau par aération R : couches minces C : compactage moyen H : remblai de hauteur moyenne ($h < 10m$) 1 0 1 0 1 2 2
				Solution 3 : traitement T : traitement avec un réactif adapté C : compactage moyen 0 0 0 1 0 2 0

Géotechnique routière



Applications du GTR92 : Les conditions d'utilisation des matériaux en couche de forme :

La démarche est la même que pour le remblai mais les exigences sont différentes. La couche de forme correspond au support sur lequel sera mise en place les couches de chaussée. Il s'agira soit du terrain naturel dans le cas d'un projet en déblai, soit d'une couche de terres d'apport en cas de projet en remblai. Elle s'appuiera sur la Partie Supérieure des Terrassements (PST).

La plate- forme sur laquelle sera mise en œuvre la CdF est l'Arase de terrassement (AR).

Le rôle de cette couche est multiple :

- elle doit assurer un fin réglage topographique de la plate-forme ;
- posséder des caractéristiques mécaniques correspondant aux calculs de dimensionnement de la chaussée et être suffisamment traficable pour assurer le transport des matériaux constitutifs de la chaussée; sa portance doit permettre le compactage de ces derniers.

Géotechnique routière



Applications du GTR92 : Les conditions d'utilisation des matériaux en couche de forme :

Par expérience il sera nécessaire d'obtenir une portance minimale de la plate-forme sur laquelle la couche de forme sera mise en place, caractérisée comme suit :

- matériaux traités: module EV_2 de 35 MPa à la plaque statique.
- matériaux granulaires: $EV_2 = 15$ à 20 MPa

Pour permettre la mise en place des couches de chaussée, le module EV_2 de la couche de forme doit être d'au moins 50 MPa.



Géotechnique routière



Applications du GTR92 : Les conditions d'utilisation des matériaux en couche de forme :

- On effectue un préchargement à 0,3 bars, soit 850 Kg pour mettre en place le sol sous la plaque de 60 cm de diamètre.
- On exerce ensuite sur la plaque un chargement de 2,5 bars, soit 7 tonnes et on lit sur le comparateur la déformation du sol W1 en mm.
- Après remise à zéro, On exerce un dernier chargement de 2 bars, soit 5,6 tonnes et on lit la déformation du sol W2 en mm.

Les deux modules E_{v2} et E_{v1} sont calculés à partir de la déflexion correspondante :

$$E_v = \frac{1,5 \times Q \times a}{W} \times (1 - \nu^2) \text{ et le résultat est exprimé en bars}$$

avec Q : pression moyenne sous la plaque en bars

a : rayon de la plaque en mm

W : déflexion en mm

ν : coefficient de Poisson égal à 0,25.

Le module E_{v2} donne la portance du sol et le rapport $k = E_{v2}/E_{v1}$ renseigne sur le taux de compacité du sol.

Géotechnique routière



Applications du GTR92 :

Le compactage :

Le compactage qui permettra d'assurer la traficabilité des engins et de réduire les tassements, devra tenir compte de plusieurs facteurs:

- la classification du matériau ;
- l'objectif du compactage ;
- le matériel de compactage ;
- l'épaisseur compactée.

Géotechnique routière



Applications du GTR92 : Le compactage :

Intensité du compactage

Les objectifs de densification basés sur de nombreuses planches d'essai sont les suivants:

♦ compactage « q3 » à atteindre pour le compactage des couches de forme:

- p_{dm} = à 98 % de la densité OPN

- p_{dfc} = à 96 % de la densité OPN

p_{dm} est la moyenne sur toute l'épaisseur de la couche

p_{dfc} est calculée en fond de couche, sur une tranche de 8cm d'épaisseur située à la partie inférieure de la couche

♦ compactage « q4 » à atteindre pour le compactage des couches de remblai.

- p_{dm} = à 95 % de la densité OPN

- p_{dfc} = à 92 % de la densité OPN

Géotechnique routière



Applications du GTR92 : Le compactage :

Les compacteurs :

Les compacteurs ont une largeur utile d'au moins 1.30 m et différentes catégories sont à considérer:

- les compacteurs à pneus: Pi
- les compacteurs statiques/vibrants à pieds dameurs: SPi /VPi
- les compacteurs vibrants à cylindres lisses: Vi
- les plaques vibrantes PQi (réservées aux zones exigües)

Le classement (i) du compacteur dans sa catégorie croît avec l'efficacité de l'engin :

- compacteurs à pneus P: i varie du moins puissant ,1, au plus puissant , 3
- Vi et VPi varient de 1 à 5
- SPi de 1 à 2



Géotechnique routière



Applications du GTR92 : Le compactage :

Les paramètres définissant les modalités de compactage

- ✓ Le paramètre Q/S représente l'épaisseur d'un matériau donné que peut compacter un compacteur donné en une application de charge pour obtenir la compacité recherchée.
 - Q est le rythme de production de l'engin de compactage (m^3)
 - S représente le rythme d'utilisation d'un compacteur, soit le produit de la distance d parcourue par le compacteur en action par la largeur de compactage L. La distance d sera enregistrée sur un disque (en plus clair, un « mouchard »)
 - Plus l'intensité de compactage recherchée sera forte, plus Q/S sera faible.
- ✓ L'épaisseur des couches; elle varie entre 0.20 m et 0.80 m selon l'état du sol, la catégorie du compacteur et l'objectif recherché
- ✓ La vitesse de translation; elle peut varier entre 2 km/h pour certains vibrants et atteindre 8 km/h pour de compacteurs statiques à pieds dameurs.

On utilisera le tableau spécifique pour chaque classe de matériau qui, en fonction du compacteur, de l'épaisseur de la couche (e) de l'objectif de compactage (codes 1 à 3), déterminera Q/S, la vitesse (V), le nombre de passes (N) et Q/L

Géotechnique routière



Applications du GTR92 : Le compactage :

Compacteur Modalités		P1	P2	P3	V1	V2	V3		V4		V5		VP1	VP2	VP3	VP4	VP5	SP1	SP2	PQ3	PQ4
Energie de compactage faible Code 3	Q/S	0.080	0.120	0.180	0.055	0.085	0.125		0.165		0.205		0.055	0.085	0.165	0.205	0.265	0.070	0.100		0.065
	e	0.30	0.45	0.60	0.25	0.35	0.30	0.50	0.35	0.65	0.40	0.80	0.25	0.30	0.30	0.35	0.40	0.25	0.40		0.20
	V	5.0	5.0	5.0	2.0	2.5	4.0	2.5	5.0	2.5	5.0	2.5	2.0	3.0	4.0	5.0	5.0	8.0	8.0	0	1.0
	N	4	4	4	5	5	3	4	3	4	2	4	5	4	2	2	2	4	4		3
	Q/L	400	600	900	110	215	500	315	825	415	1025	515	110	255	660	1025	1325	560	800		65

Q/S (m)
e (m)
V (km/h)
N -
Q/L (m³/h.m)

0 compacteur ne convenant pas

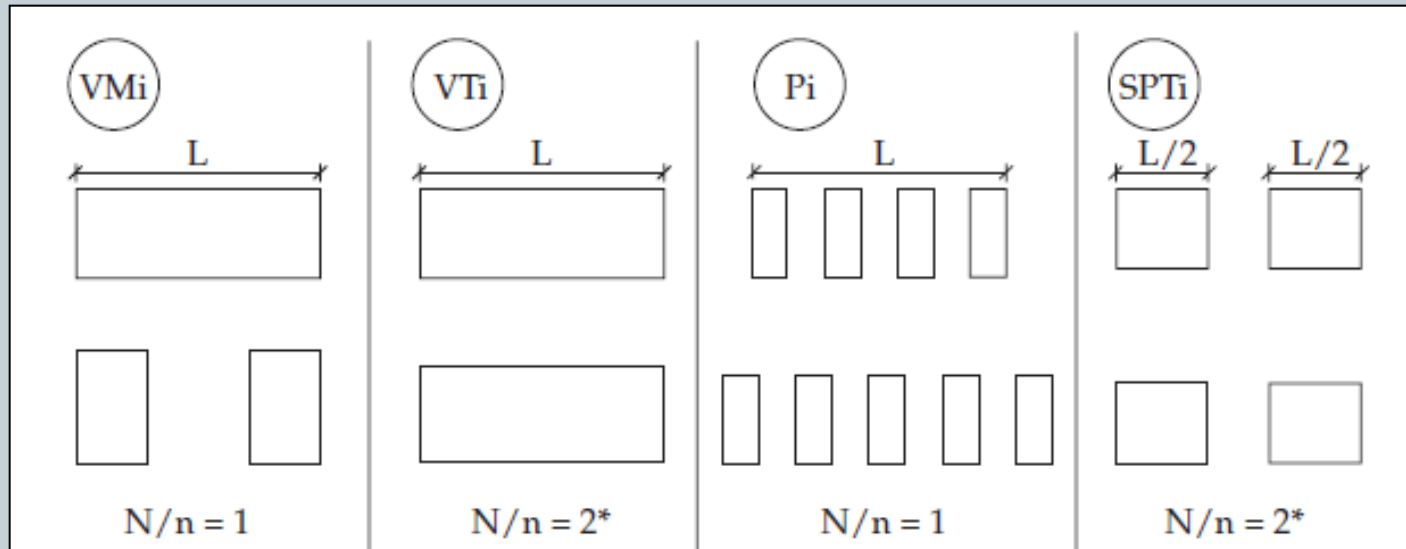
Géotechnique routière



Applications du GTR92 : Le compactage :

Le nombre de passes n et le nombre d'applications de charge N .

Une passe est par définition un aller ou un retour de compacteur. La valeur N indiquée dans les tableaux est le nombre d'applications de charge. N et n coïncident pour les compacteurs monocylindres et les compacteurs à pneus. Pour un tandem longitudinal, le nombre de passes à considérer est la moitié de N , par le fait qu'une passe constitue deux applications de charge. La valeur est calculée par le rapport $N = e / (Q/S)$, arrondi à l'entier supérieur.



Géotechnique routière



Applications du GTR92 : Le compactage :

Le débit par unité de largeur de compactage Q/L :

Il correspond au débit théorique (avant application du coefficient de rendement k) qu'aurait un compacteur monocylindre ($n = N$) d'un mètre de largeur, en respectant les prescriptions de Q/S , e et V . On le calcule, avec les unités utilisées (Q/L en m^3/h ; Q/S en m et V en km/h , par :

$$Q/L = 1000 \times (Q/S) \times V \text{ (m}^3\text{/h.m)}$$

Cette valeur permet de prévoir le débit pratique attendu pour un compacteur donné, par :

$$Q_{\text{prat}} = k \times (Q/L) \times L \times (N/n) \text{ (en m}^3\text{/h)}$$

Géotechnique routière



Applications du GTR92 : Le compactage :

Exemple d'application :

Exemple : Sol B1, en remblai (qualité q4)

Modalités		Compacteur P1
code 2	Q/S	0,060
Le code à retenir provient des tableaux d'utilisation des sols (fonction de l'état hydrique et de la météo).	e	0,35
	V	5,0
	N	6
	Q/L	300

Que deviennent les paramètres du compactage si on prend $e = 0,30$ m ?

Géotechnique routière



Applications du GTR92 : Le compactage :

Exemple : Sol B1, en remblai

Modalités		Compacteur V3	
code 2	Q/S	0,135	
	e	0,30	0,80
	V	5	2
	N	3	6
	Q/L	675	270

Que deviennent les paramètres du compactage si on prend $e = 0,50$ m?

Géotechnique routière



Applications du GTR92 : Le compactage :

Cas des compacteurs mixtes ou tandems différenciés :

Pour ces compacteurs considérés comme une somme de deux compacteurs, les prescriptions sont à établir à partir des règles suivantes :

- Q/S est la somme des Q/S des deux compacteurs considérés :
- e est la plus petite des épaisseurs.
- V est la plus faible des valeurs données pour les deux compacteurs.
- N est l'arrondi supérieur de : $e/(\text{somme des } Q/S)$.
- $N/n = 1$ du fait de la prise en compte de la combinaison des deux compacteurs;
- Q/L est déterminé par : $1000 \times V \times (\text{somme des } Q/S)$.

Géotechnique routière



Applications du GTR92 : Le compactage :

Exemple : Sol B1, (P1 + VM3)

Modalités		Compacteur V3	
code 2	Q/S	0,135	
	e	0,30	0,80
	V	5	2
	N	3	6
	Q/L	675	270

Modalités		Compacteur P1
code 2 Le code à retenir provient des tableaux d'utilisation des sols (fonction de l'état hydrique et de la météo).	Q/S	0,060
	e V	0,35 5,0
	N	6
	Q/L	300

Quels sont les paramètres du compactage dans le cas d'un tandem différencié P1 + V3 ?

Géotechnique routière



Applications du GTR92 : Le compactage :

Cas des ateliers de compactage.

1- L'atelier est homogène (compacteurs identiques).

Les modalités d'utilisation (épaisseur et vitesse) correspondent à la classe de compacteur considéré. Seule est à considérer la répartition du travail, qui peut être différente selon les engins :

Avec Q : le volume de sol (global) compacté

S1, S2... : la surface balayée par chacun des compacteurs,

(Q/S tableau : la valeur lue dans les tableaux, ceci implique pour les valeurs (Q/S1), (Q/S2) de chaque compacteur, que la condition suivante soit remplie :

$$Q/S \text{ tableau} \left[\frac{1}{(Q/S_1)} + \frac{1}{(Q/S_2)} + \dots \right] \geq 1$$

Géotechnique routière



Applications du GTR92 : Le compactage :

Cas des ateliers de compactage.

1- L'atelier est homogène (compacteurs identiques).

Cas d'un remblai en sol C2A1s, compacté par 2 vibrants monocylindres V4 (L = 2 m) - Q = 2400 m³ en une journée. Epaisseur compactée : 0,40 m.

Q/S	0,50
e	0,40
V	2
N	8
Q/L	100

La vitesse ne peut excéder 2 km/h pour cette épaisseur. Le débit théorique d'un compacteur (2 x 100 = 200 m³/h) montre que 12 heures utiles de V4 sont nécessaires.

Si les valeurs de S en fin de journée sont :

S1 = 24 000 m² (soit 6 h de temps utile) Q/S1 = 0,100

S2 = 18 000 m² (soit 4,5 de temps utile) Q/S2 = 0,133

$$Q/S \text{ tableau } \left[\frac{1}{(Q/S_1)} + \frac{1}{(Q/S_2)} \right] = 0,875 (<1)$$

Géotechnique routière



Applications du GTR92 : Le compactage :

Cas des ateliers de compactage.

1- L'atelier est hétérogène (compacteurs différents)

Les compacteurs agissent sur une zone de travail commune (s'il en était autrement, chacun serait considéré individuellement). Après lecture des tableaux de chacun des compacteurs, on se conforme aux règles suivantes :

- e réel doit être inférieur ou égal au plus petit des e tableaux.
- le débit théorique de l'atelier est pris égal à la somme des débits théoriques des compacteurs.
- pour les vitesses et les nombres d'applications de charge de chaque compacteur, diverses façons de gérer l'atelier peuvent exister (dans le respect des prescriptions individuelles pour la vitesse). La conditions à satisfaire est :

$$\frac{Q/S \text{ tabl.1}}{(Q/S_1)} + \frac{Q/S \text{ tabl.2}}{(Q/S_2)} + \dots \geq 1$$

Géotechnique routière



Applications du GTR92 : Le compactage :

Exemple : Sol B1, (P2 + V3) : Cas d'un remblai de sol B1 à compacter avec un atelier composé d'un vibrant V3 monocylindre et d'un pneu P2 - $Q = 10\,000\text{ m}^3/\text{jour}$.

A partir des prescriptions extraites du tableau, il peut être décidé d'effectuer la mise en œuvre en 0,40 m compactés :

	V3		P2
Q/S	0,135		0,090
e V	0,30 5	0,80 2	0,45 5
N Q/L	3 675	6 270	5 450

	V3	P2
Q/S	0,135	0,090
e V	0,40 4	0,40 5
N Q/L	3 540	5 450

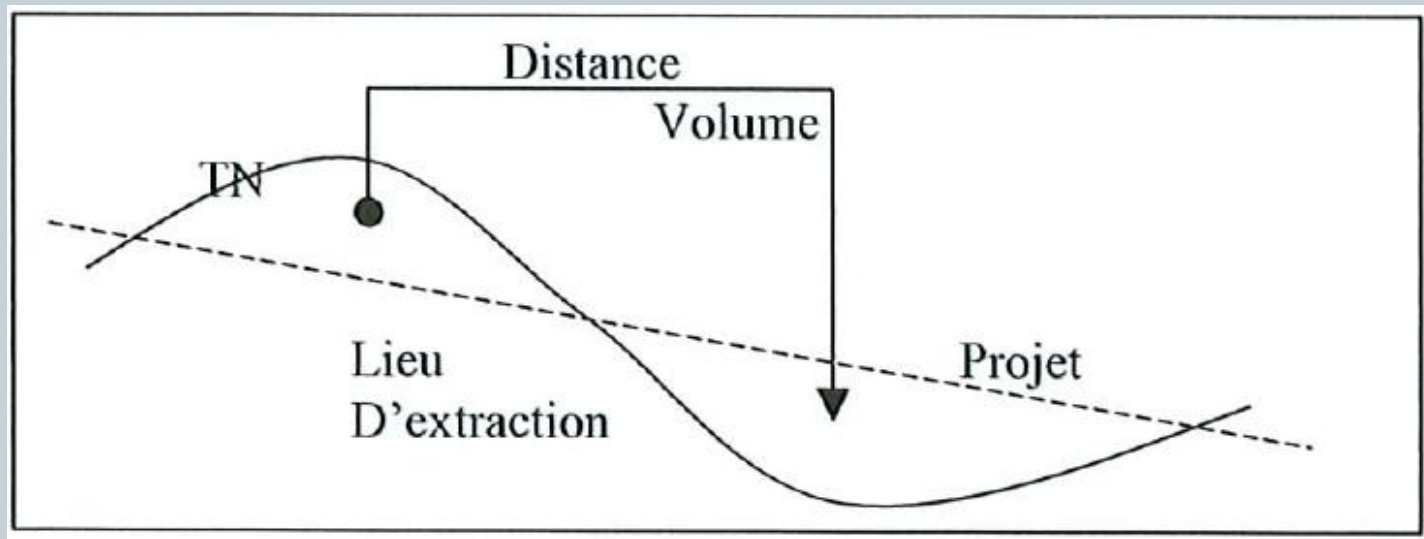
condition lorsque le compacteur est seul

Géotechnique routière



Le mouvement de terre est l'opération qui consiste, au moyen d'engins appropriés à effectuer le transport des terres de déblai (ou d'emprunt) en remblai (ou en déblai).

Il faudra donc organiser les transports de façon à ce que la somme des mouvements de transport soit la plus petite possible.



Géotechnique routière



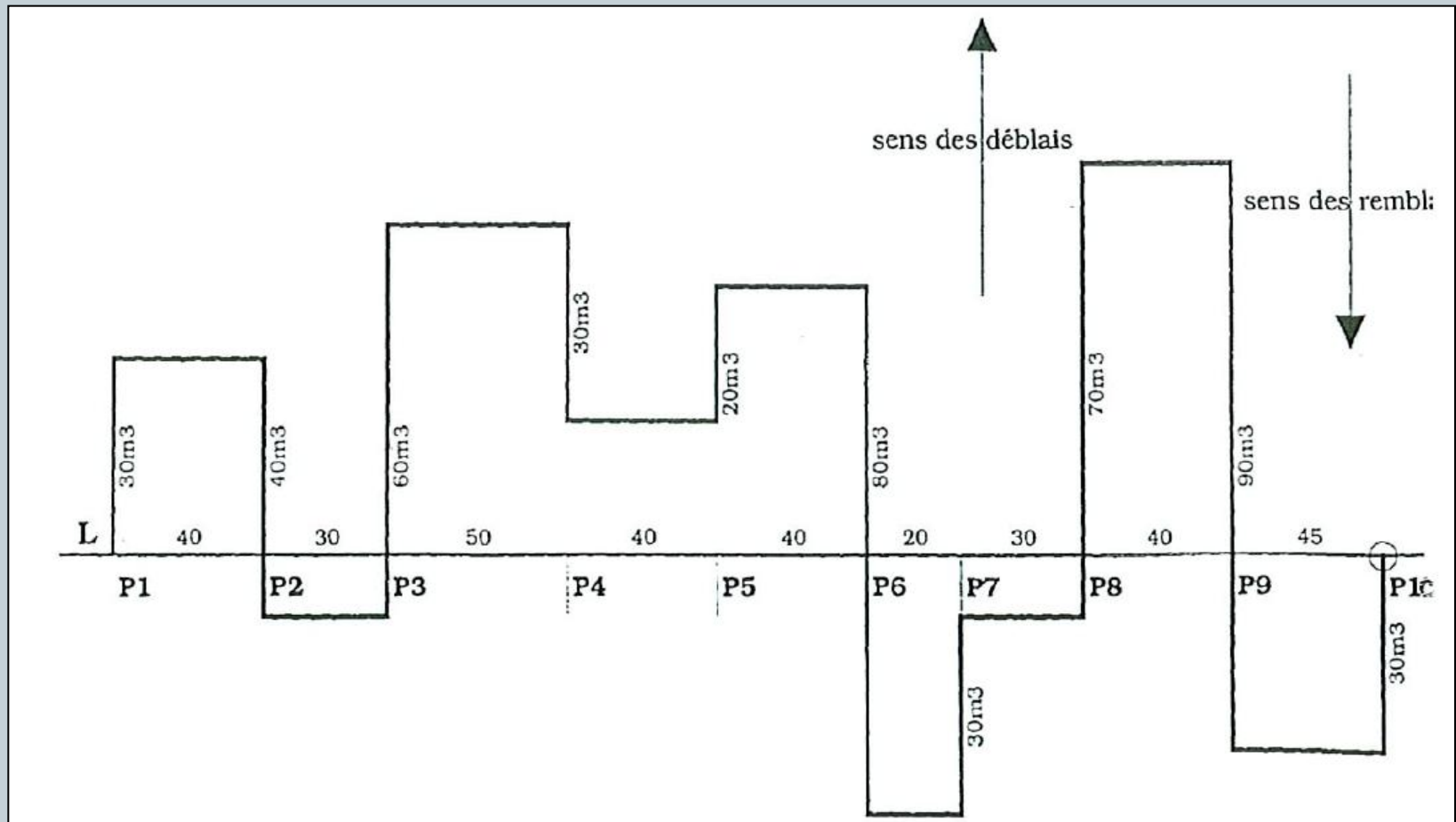
Épure de Lalanne :

N° de profil	Excédents	
	D > R	R > D
1	9	10
Profil n° 1	30	
Profil n° 2		40
Profil n° 3	60	
Profil n° 4		30
Profil n° 5	20	
Profil n° 6		80
Profil n° 7	30	
Profil n° 8	70	
Profil n° 9		90
Profil n° 10	30	
Total	240	240

Géotechnique routière



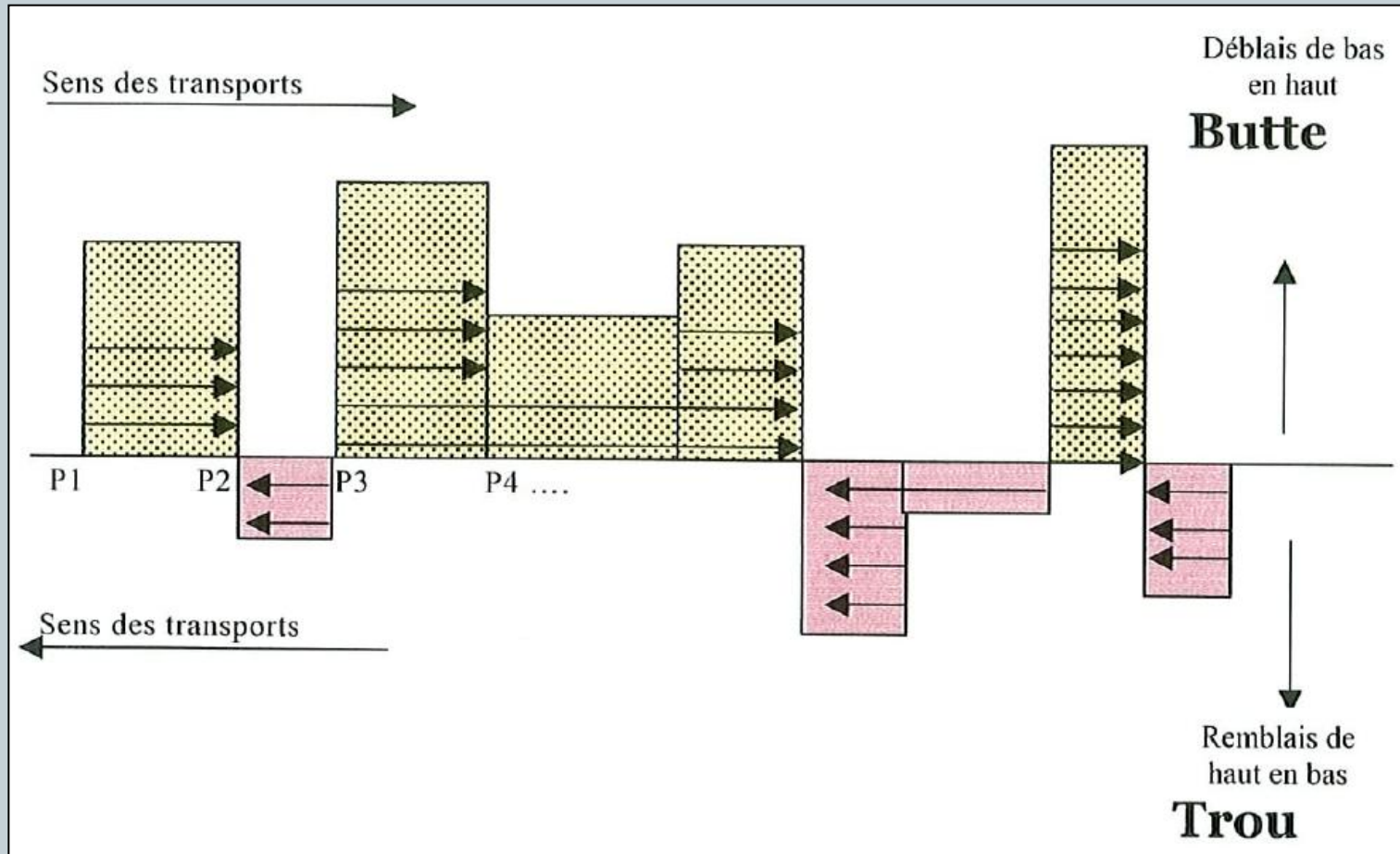
Épure de Lalanne :



Géotechnique routière



Épure de Lalanne - transport :



Géotechnique routière



Différents cas envisagés :

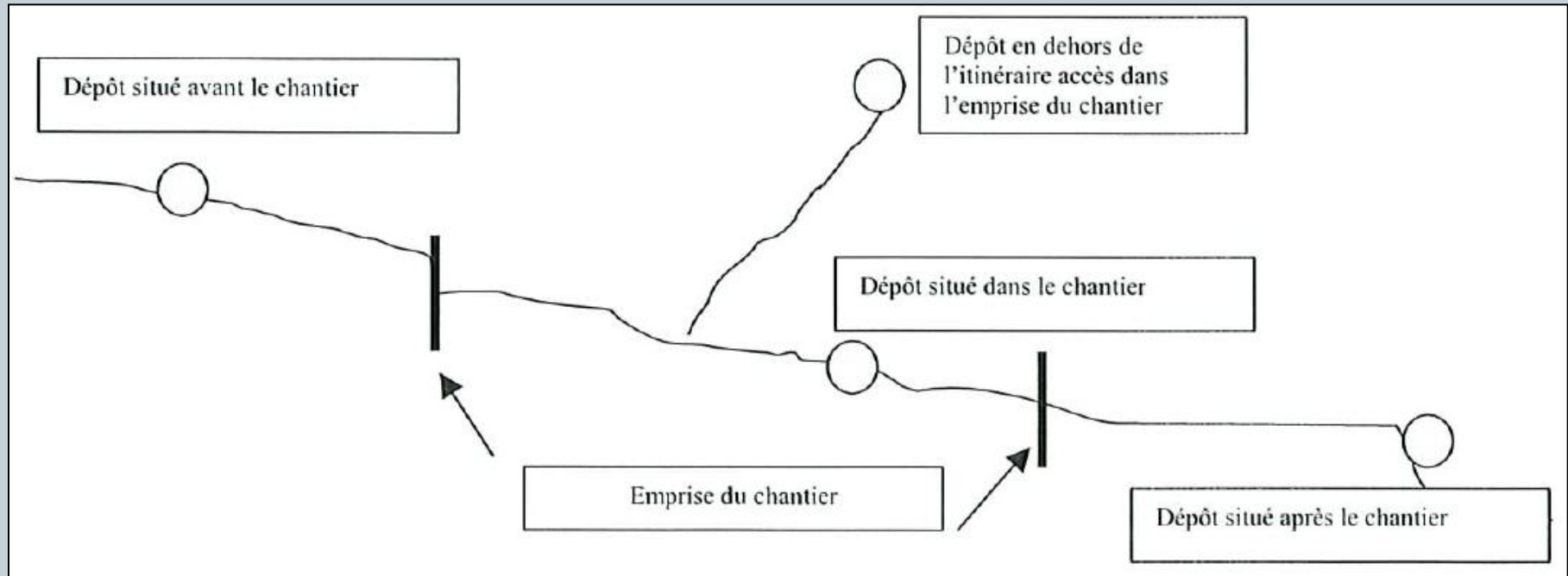
Une épure de Lalanne peut donner :

- ✓ Un excès de remblai
- ✓ Un excès de déblai
- ✓ ou déblai et remblai compensés.

Il peut également y avoir :

- ✓ Un seul lieu de dépôt ou d'emprunt :
 - placé à gauche
 - placé à droite
 - à l'intérieur de l'épure
- ✓ Plusieurs lieux de dépôt ou d'emprunt :

Géotechnique routière



Géotechnique routière



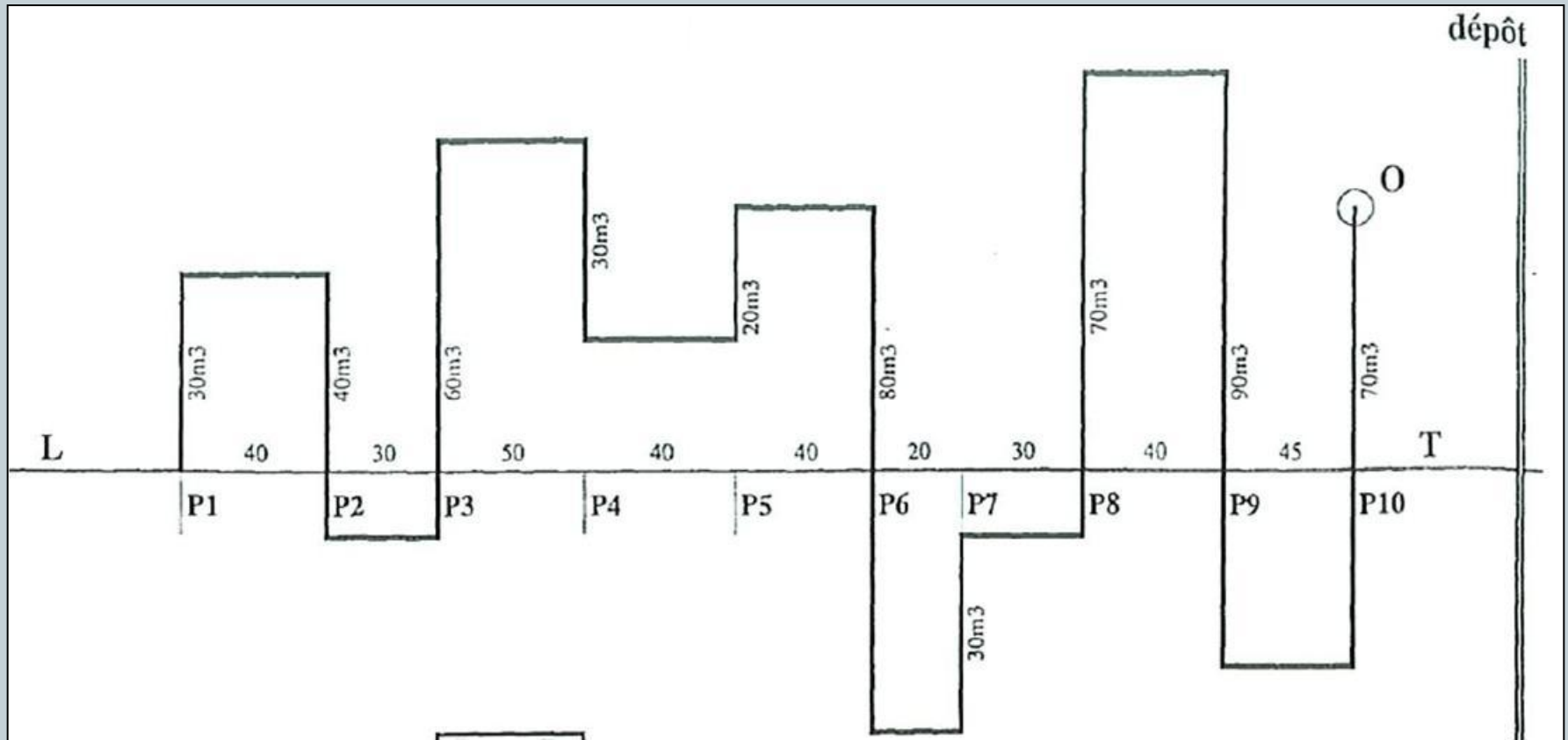
Épure de Lalanne - déblais excédentaires :

N° de profil	Excédents	
	D > R	R > D
1	9	10
Profil n° 1	30	
Profil n° 2		40
Profil n° 3	60	
Profil n° 4		30
Profil n° 5	20	
Profil n° 6		80
Profil n° 7	30	
Profil n° 8	70	
Profil n° 9		90
Profil n° 10	70	
Total	280	240

Géotechnique routière



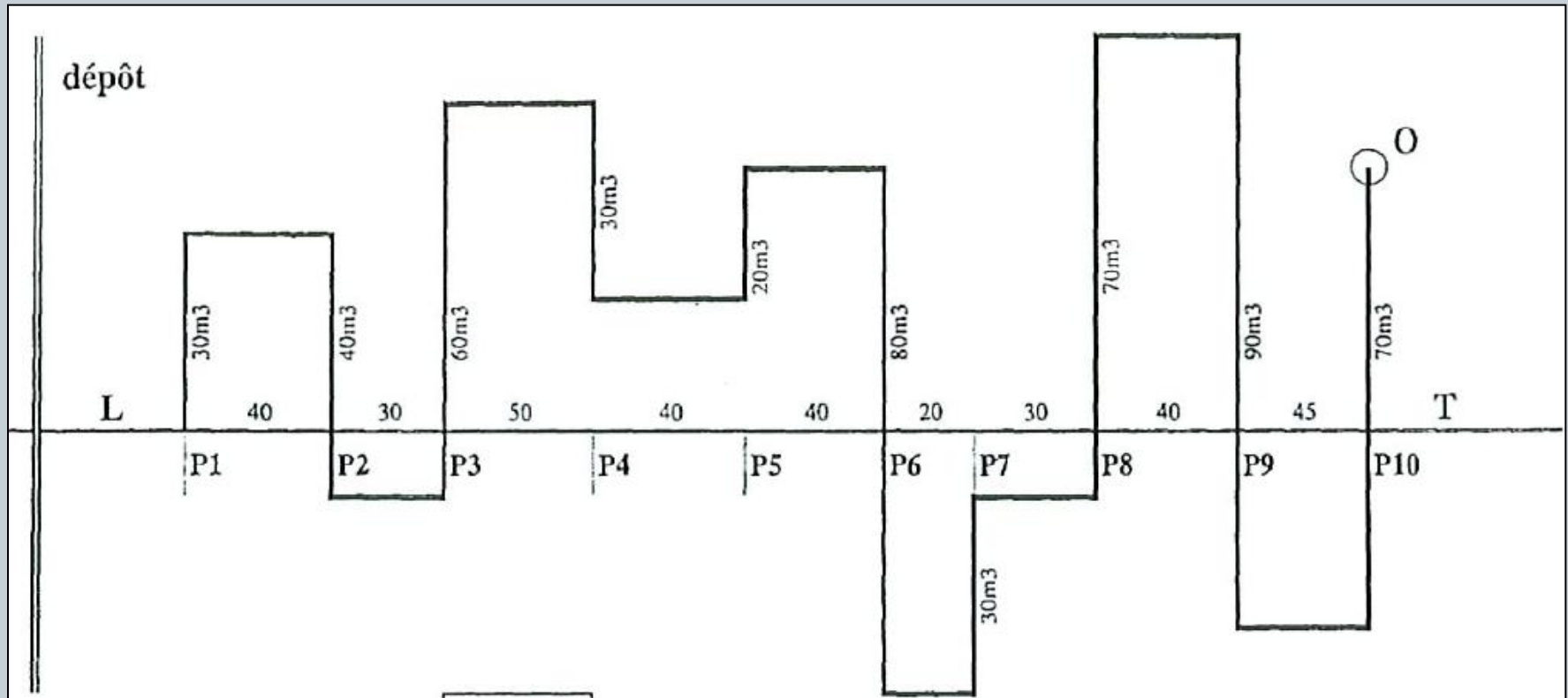
Épure de Lalanne - déblais excédentaires, dépôt à droite :



Géotechnique routière



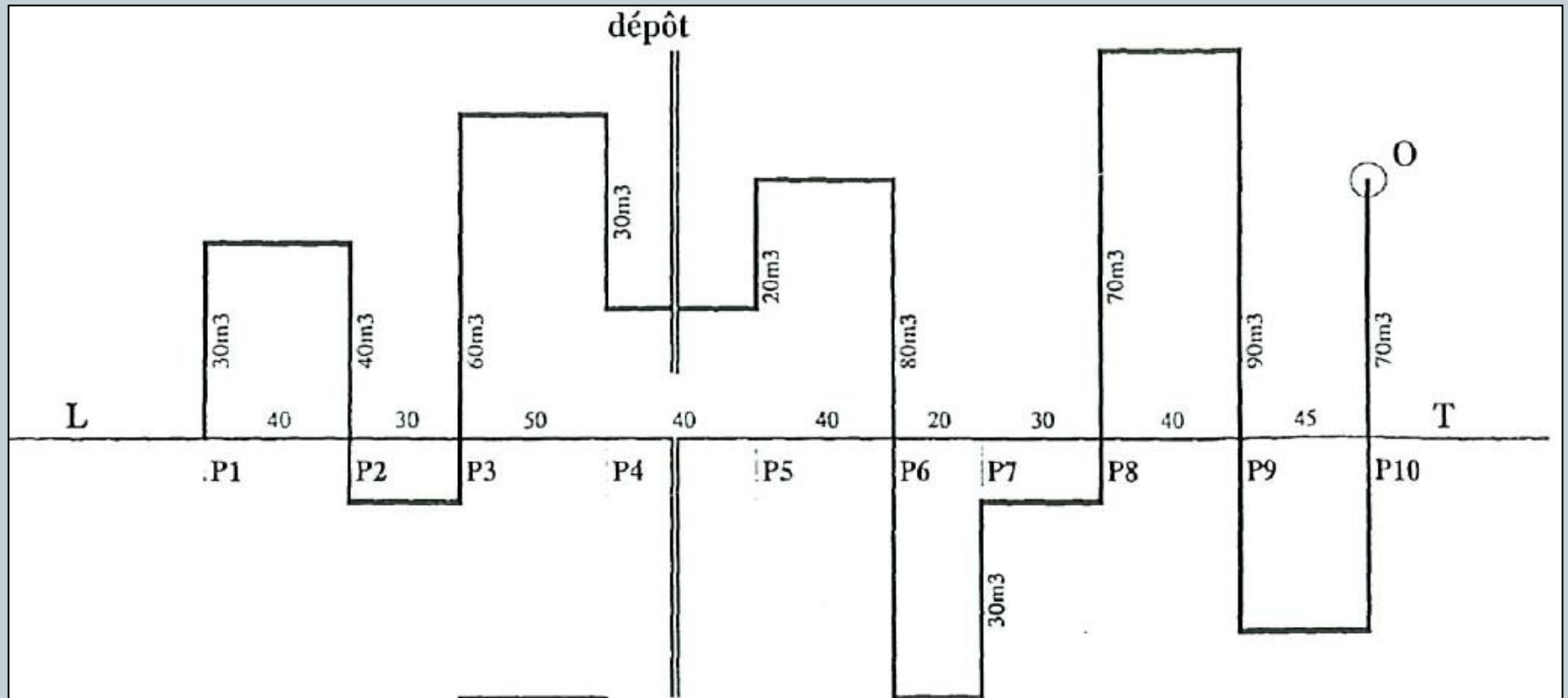
Épure de Lalanne - déblais excédentaires, dépôt à gauche :



Géotechnique routière



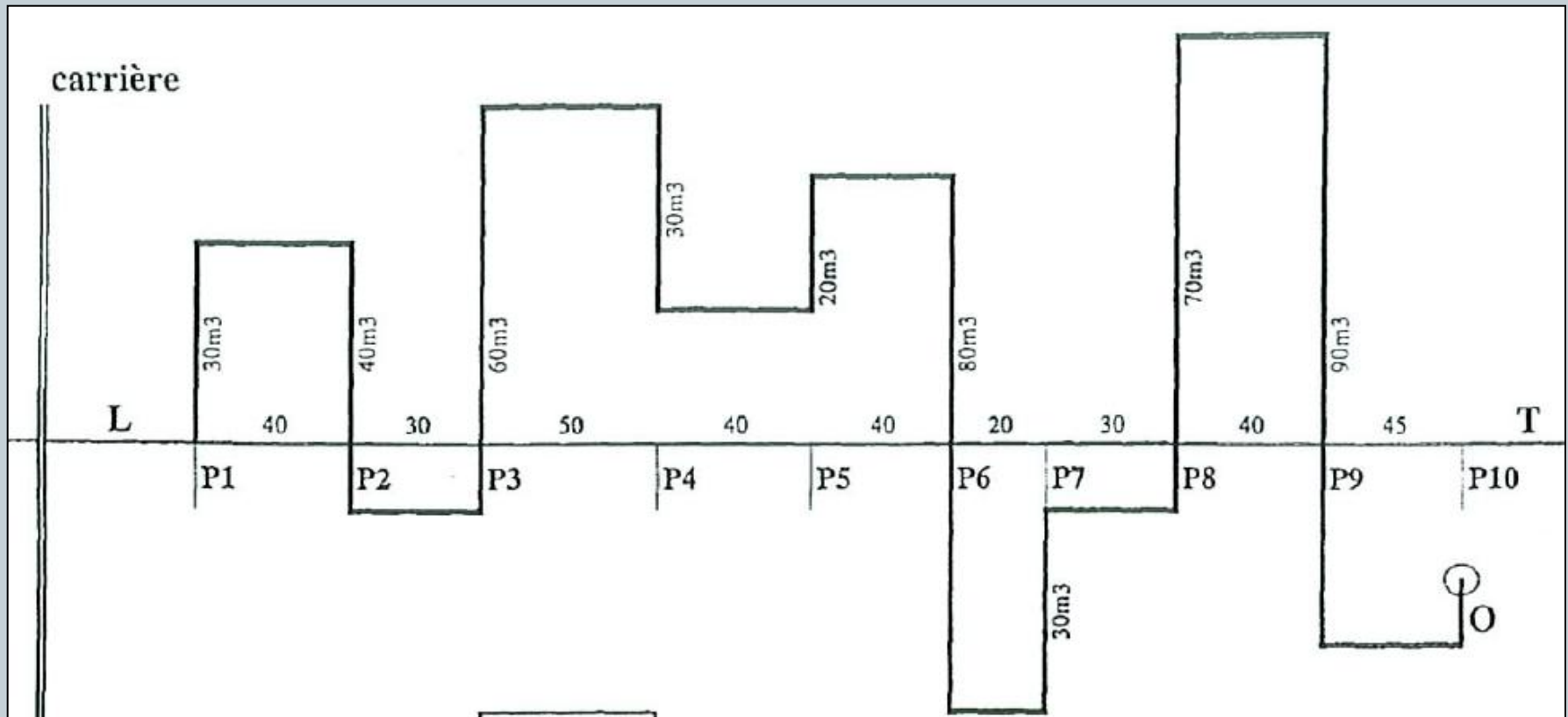
Épure de Lalanne - déblais excédentaires, dépôt au milieu :



Géotechnique routière



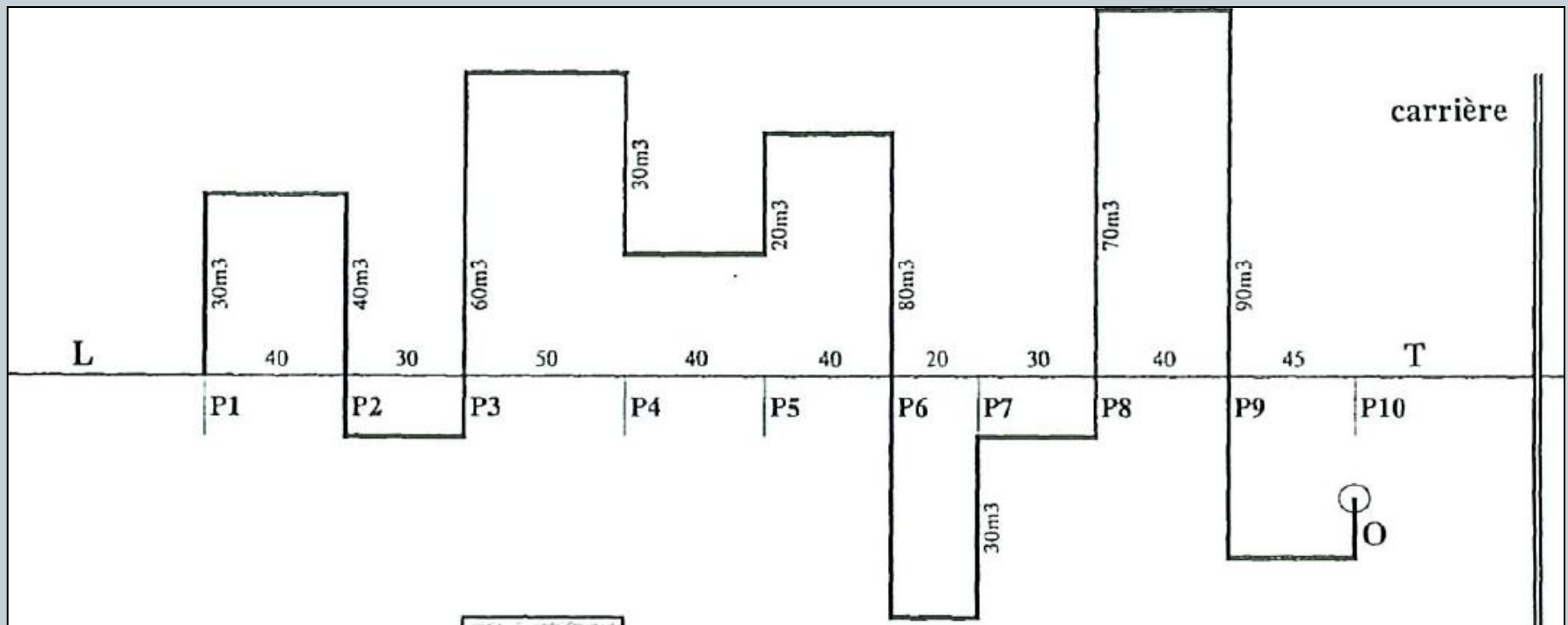
Épure de Lalanne – remblais excédentaires, carrière à gauche :



Géotechnique routière



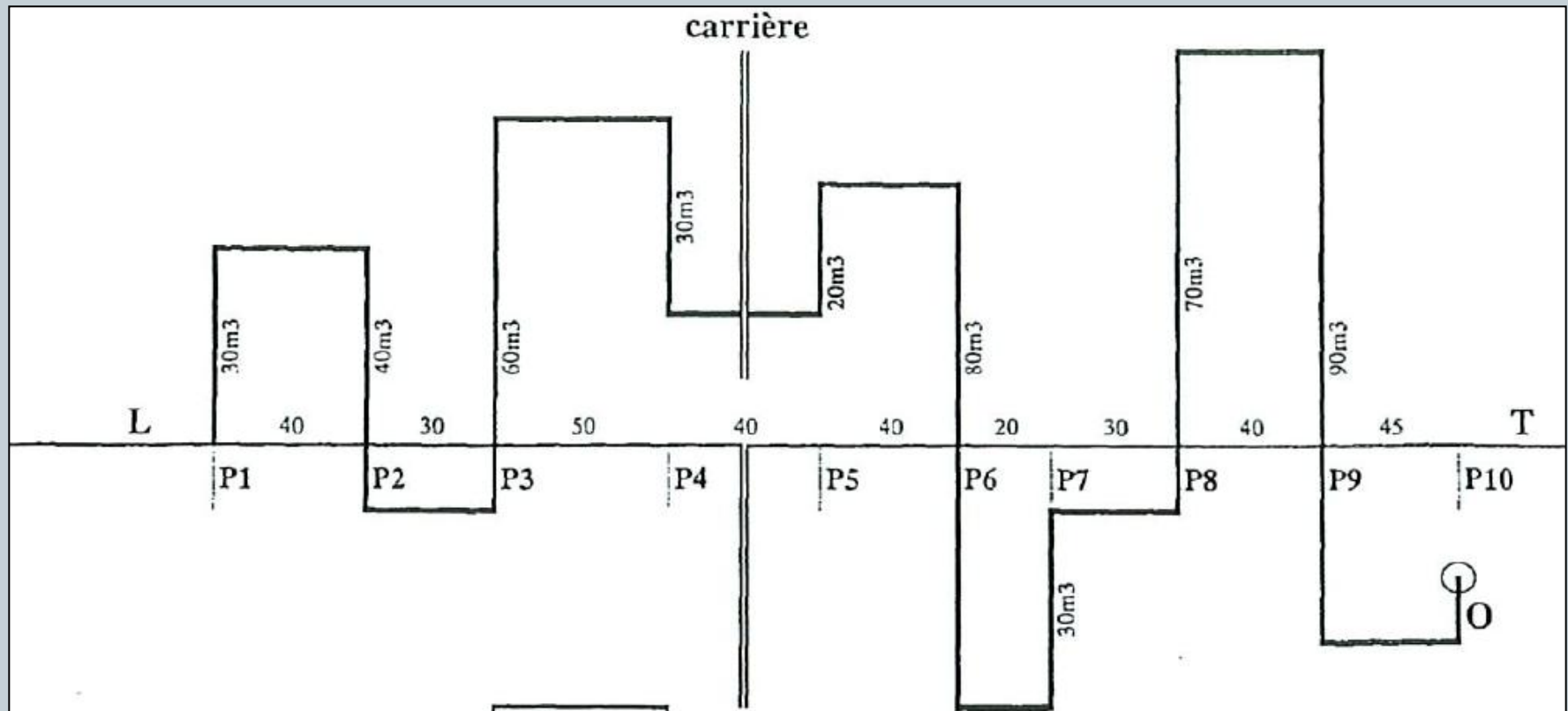
Épure de Lalanne – remblais excédentaires, carrière à droite :



Géotechnique routière



Épure de Lalanne – remblais excédentaires, carrière au milieu :



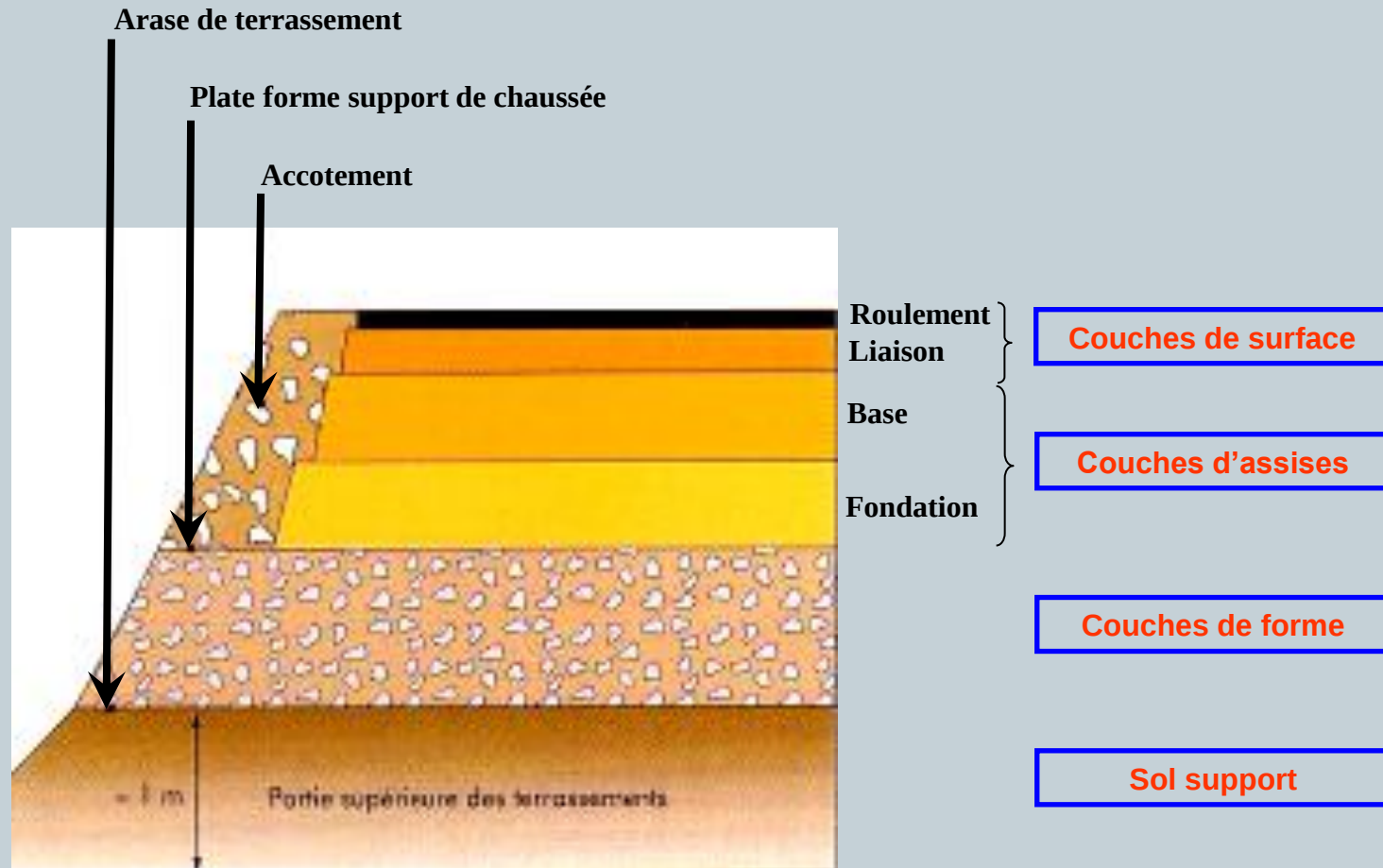


Chapitre 2 :

Structure et matériaux constituant la chaussée

Constituants d'une chaussée et familles de structures

Description fonctionnelle des couches de chaussées :



Constituants d'une chaussée et familles de structures



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.

Constituants d'une chaussée et familles de structures



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.

Constituants d'une chaussée et familles de structures



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.

Constituants d'une chaussée et familles de structures



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.

Constituants d'une chaussée et familles de structures



Couches d'assise :

lors de la construction de la chaussée :

- fournissent un support bien nivelé pour la couche de surface.
- fournissent également un support de portance suffisante pour le compactage de la couche de surface.
- peuvent 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.

Constituants d'une chaussée et familles de structures



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.

Constituants d'une chaussée et familles de structures



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.

Constituants d'une chaussée et familles de structures

Graves Non Traitées











Constituants d'une chaussée et familles de structures



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.

Constituants d'une chaussée et familles de structures



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

Constituants d'une chaussée et familles de structures



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.

Constituants d'une chaussée et familles de structures



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.

Constituants d'une chaussée et familles de structures



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.
- **BBD_r :** Béton Bitumineux Drainant.













2005 10 2

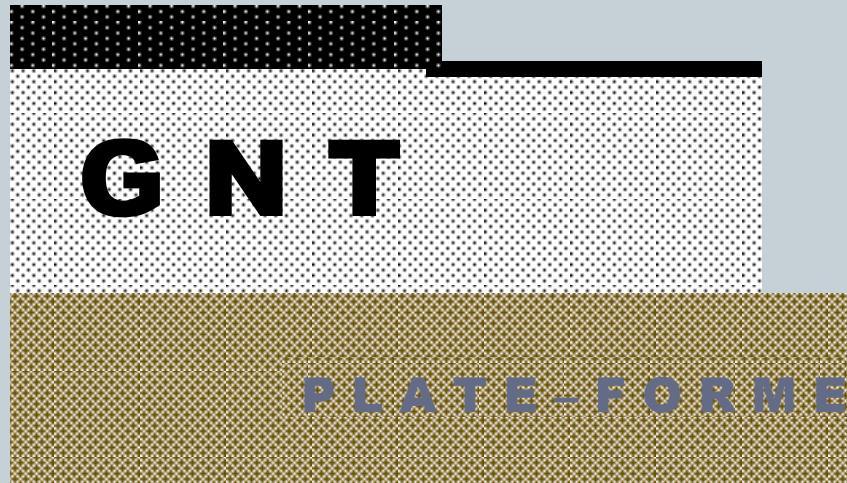


02/04/2005 12:16

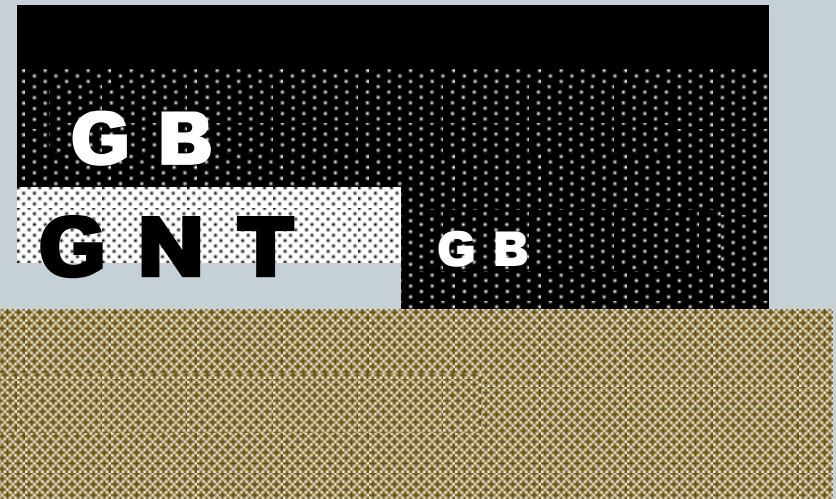
Constituants d'une chaussée et familles de structures

Les différentes structures:

1- SOUPLES



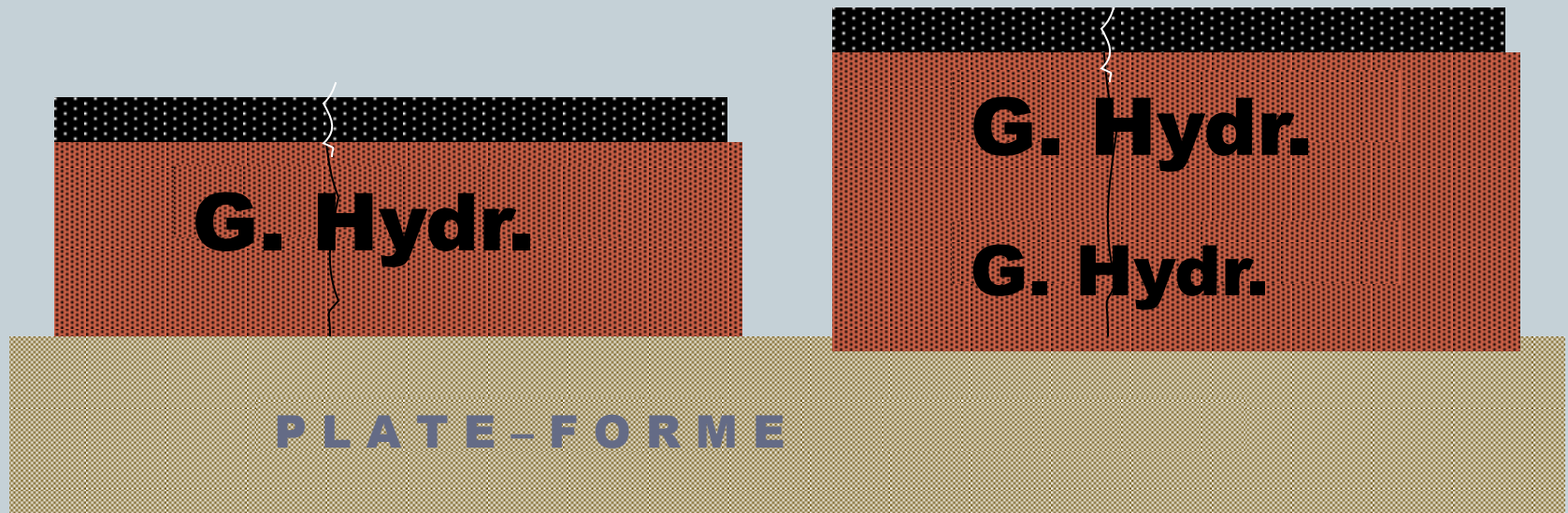
2- BITUMINEUSES EPAISSES



Constituants d'une chaussée et familles de structures

Les différentes structures:

3- SEMI-RIGIDES



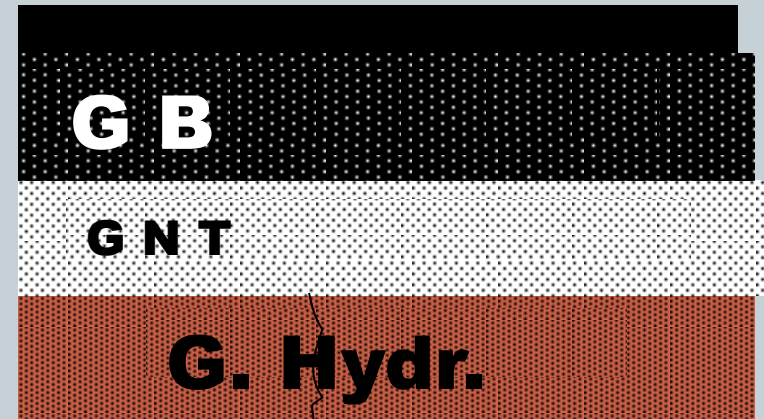
Constituants d'une chaussée et familles de structures

Les différentes structures:

4- MIXTES



5- INVERSES

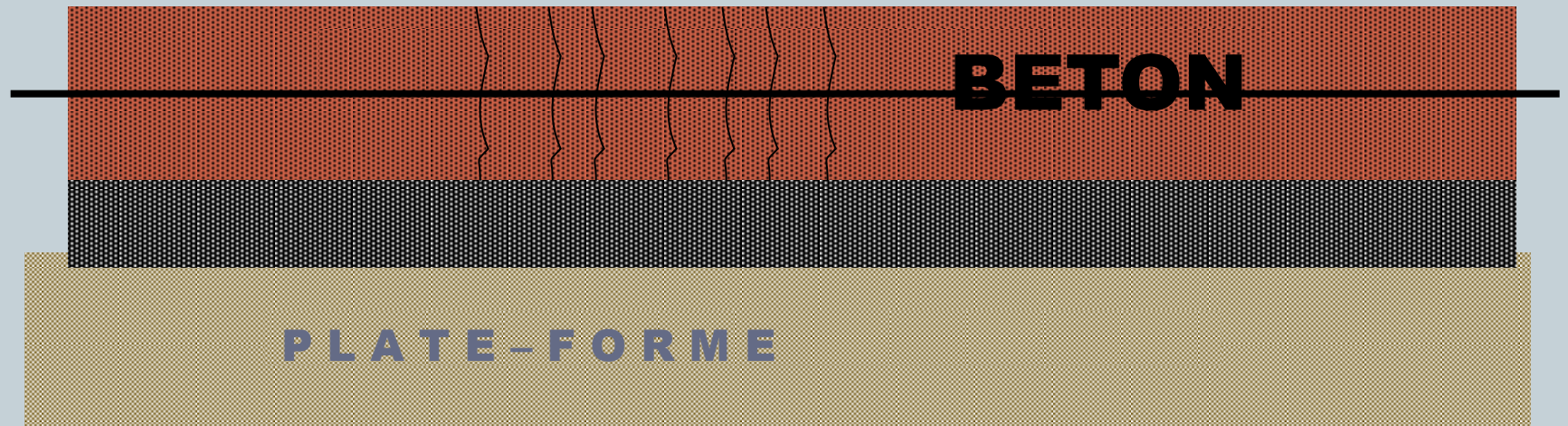


Constituants d'une chaussée et familles de structures



Les différentes structures:

6- RIGIDES



LES ASSISES NON TRAITEES

Les granulats

Qu'ils soient concassés en carrière à partir de roches massives ou extraits de ballastières, les granulats sont la matière première la plus utilisée dans le domaine de la construction. La consommation moyenne s'élève à environ 7 tonnes par habitant en Europe par an.



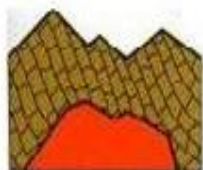
LES ASSISES NON TRAITEES



Les roches magmatiques ou ignées

(improprement appelées éruptives dans la profession)

- Effusives, à refroidissement rapide et faible cristallisation
 - Rhyolite, andésite, basalte...



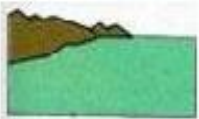
- Intrusives à refroidissement lent et développement de cristaux
 - Granit, granodiorite, diorite, gabbros...



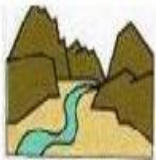
LES ASSISES NON TRAITEES



Les roches sédimentaires



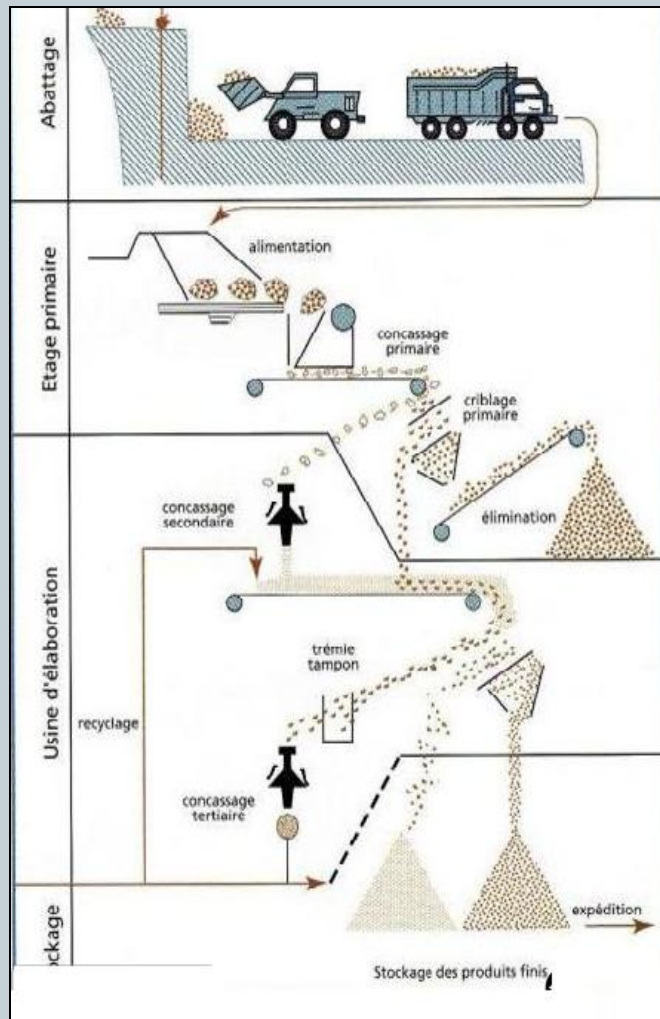
- Les roches d'origine chimique et organique
 - Carbonatées: le calcaire, craie...
 - Siliceuses: silex, meulière...
 - Silicatées: argilites, marnes
 - Organiques: tourbe, houille, pétrole...



- Les roches détritiques (éboulis, alluvions, éoliennes, consolidées ou non)
 - La nature des matériaux détritiques dépend de celle de la roche mère, et est en général constituée de mélanges
 - La granulométrie dépend du mode de transport et de sédimentation



LES ASSISES NON TRAITEES



Du front de taille en carrière ou de la ballastière jusqu'à l'expédition vers l'utilisateur, les roches vont subir plusieurs opérations:

- Extraction
- Transport
- Réduction volumétrique ou concassage*
- Criblage
- Lavage ou débourbage*
- Recomposition*
- Stockage
- Chargement



LES ASSISES NON TRAITEES

Gravillons :



► granulométrie : 4/6 - 6/10 mm



► granulométrie : 10/14 - 10/20 mm



LES ASSISES NON TRAITEES



Gravillons :

Caractéristiques mécaniques :

Résistance à la fragmentation par chocs (Los Angeles)

Résistance à l'attrition et à l'usure (MDE)

Résistance au polissage (CPA)

LES ASSISES NON TRAITEES



Gravillons :

Caractéristiques mécaniques :

Résistance au polissage (CPA) :

Les gravillons situés à la surface de chaussée doivent présenter des arêtes vives et des faces râpeuses pour lutter contre la glissance. Pour maintenir cette capacité il faut bien entendu qu'ils conservent dans le temps ces arêtes qui ont tendance à disparaître par polissage.

On utilise une roue supportant des plaques sur laquelle sont collés les granulats à tester, et on la fait frotter contre une autre roue à bandage de caoutchouc en présence d'eau et d'abrasifs.

LES ASSISES NON TRAITEES

Gravillons :

Caractéristiques mécaniques :

Résistance au polissage (CPA) :

Après un certain nombre de rotation, on mesure à l'aide d'un pendule la perte de rugosité à la surface des plaque et l'on en tire le CPA qui donne son nom à l'essai.



LES ASSISES NON TRAITEES



Gravillons :

Caractéristiques mécaniques :

Résistance au polissage (CPA) :

Valeurs repères :

CPA	Appréciation
> 0,55	Excellent
0,50 à 0,55	Bon à très bon
0,45 à 0,49	Médiocre à passable
< 0,45	Interdit

LES ASSISES NON TRAITEES



Gravillons :

Caractéristiques de fabrication :

- ✓ Forme ou coefficient d'aplatissement
- ✓ Propreté
- ✓ Angularité

LES ASSISES NON TRAITEES



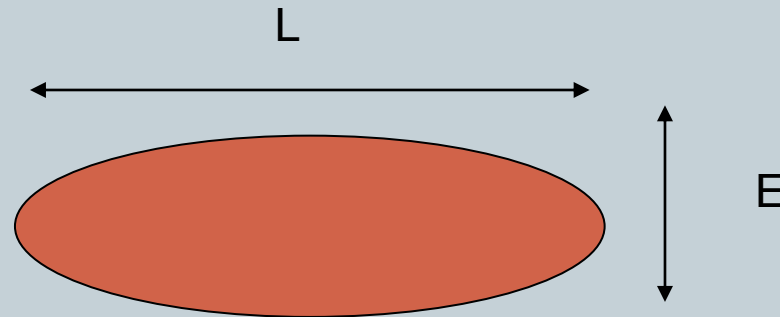
Gravillons :

Caractéristiques de fabrication :

✓ Forme ou coefficient d'aplatissement

La forme est définie par ses trois dimensions principales:

- E son épaisseur
- G sa grosseur
- L se longueur



Définition de la longueur et l'épaisseur

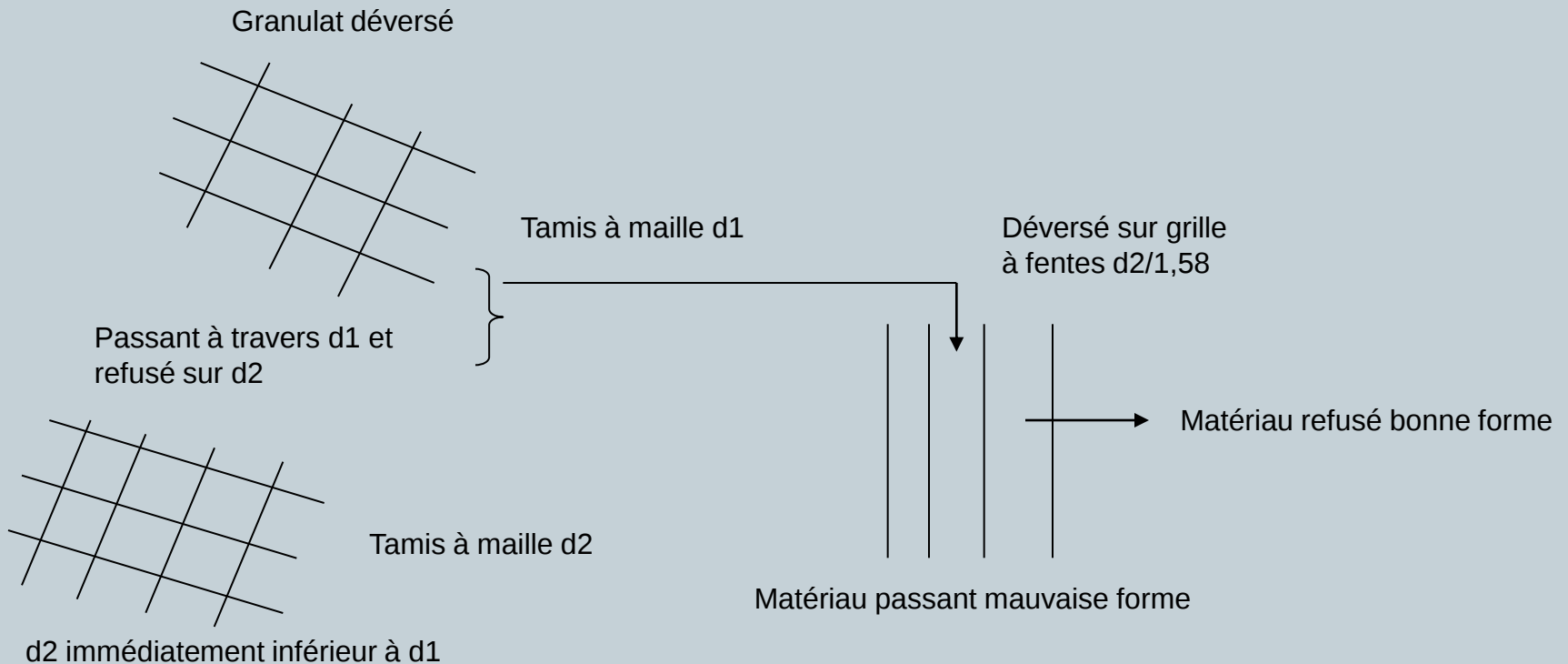
LES ASSISES NON TRAITEES

Gravillons :

Caractéristiques de fabrication :

✓ Forme ou coefficient d'aplatissement

Pour quantifier la forme d'un granulat on détermine le coefficient d'aplatissement qui par définition le pourcentage d'éléments tels que : $G/E > 1,58$



LES ASSISES NON TRAITEES



Gravillons :

Caractéristiques de fabrication :

✓ Propreté

La propreté des gravillons(propreté superficielle) correspond à la proportion d'élément inférieur à 0,5mm que l'on obtient par lavage sur un tamis de 0,5mm d'ouverture.

✓ Angularité

C'est ce qui fait la différence entre un matériau concassé et un matériau roulé. Les éléments présentant des faces se coupant à angles vifs (pointu) augmentent l'angle de frottement interne et diminuent sa maniabilité, ce qui a deux effets opposés:

- Le compactage est plus difficile
- La stabilité est plus élevée

On apprécie l'angularité de la manière suivante :

- Matériaux issus des roches massives sont entièrement concassées par définition
- Matériaux d'origine alluvionnaire.

LES ASSISES NON TRAITEES

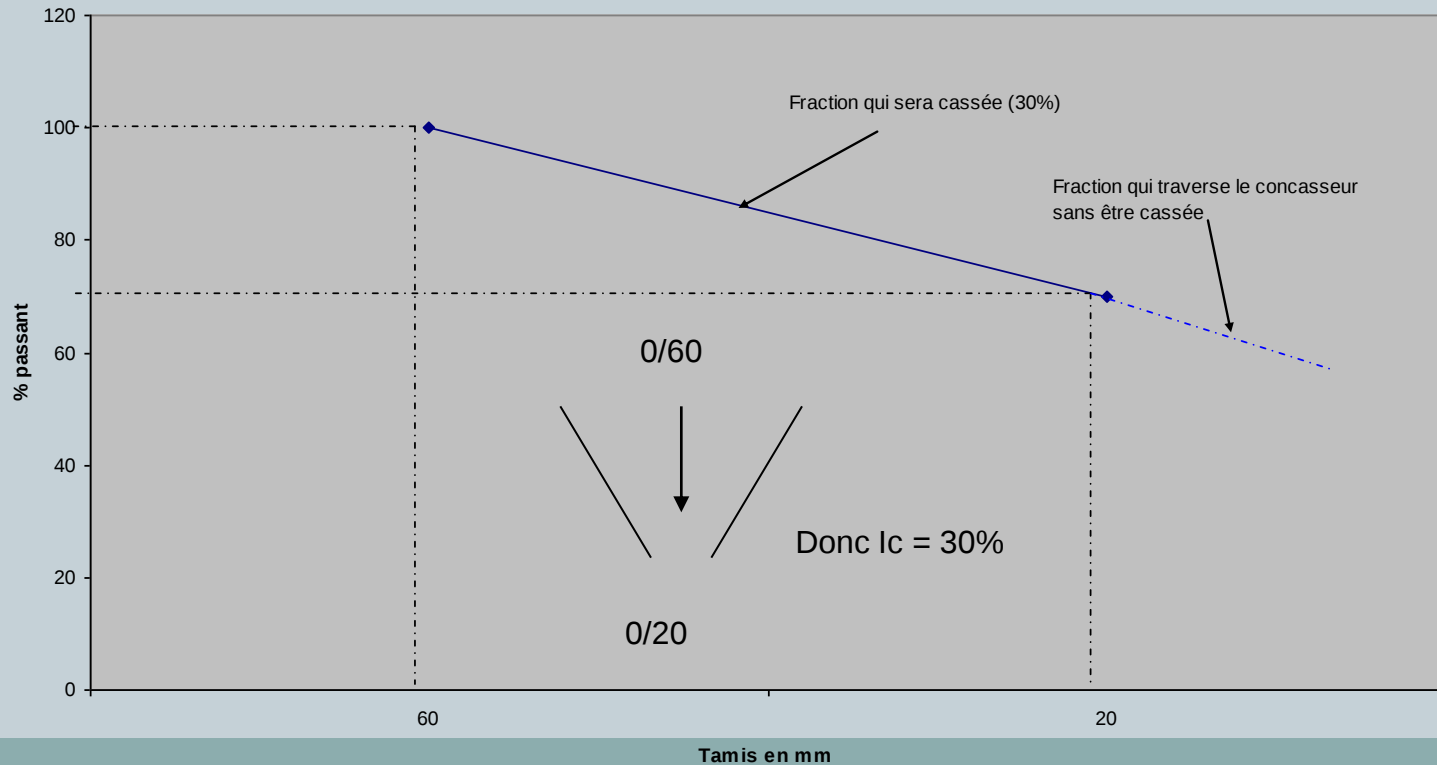
Gravillons :

Caractéristiques de fabrication :

✓ Angularité

Définition de l'indice de concassage : l'indice de concassage d'un tout-venant est de x si ce tout-venant 0/d est obtenu par concassage d'un matériaux ayant x% de refus à la maille d.

Détermination de l'indice de concassage



LES ASSISES NON TRAITEES



Gravillons :

Caractéristiques de fabrication :

✓ Angularité

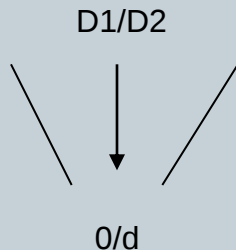
La faiblesse dans la notion de l'indice de concassage réside dans le fait qu'un gravillon roulé ayant une seule face ébréchée est considéré comme concassé, ce qui est insuffisant pour les couches de roulement.

Dans ces cas on utilise la notion du rapport de concassage R_c : $R_c = D1/d$

D1: dimension des plus petits matériaux à l'entrée du concasseur

d: dimension des plus gros matériaux à la sortie du concasseur

Exemple:



On alimente avec 40/80, on produit 0/20

$$R_c = 40/20 = 2$$

$R_c > 4$ alors le matériau est qualifié de concassé pur

LES ASSISES NON TRAITEES



Les sables :

L'équivalent de sable :

Pour les granulats, on pratique l'essai sur la fraction 0/2 d'un sable dont la teneur en fines a été ramenée à 10%.

Pour les sols, on pratique l'essai sur la fraction 0/5 d'un sable dont la teneur en fines est la teneur naturelle.

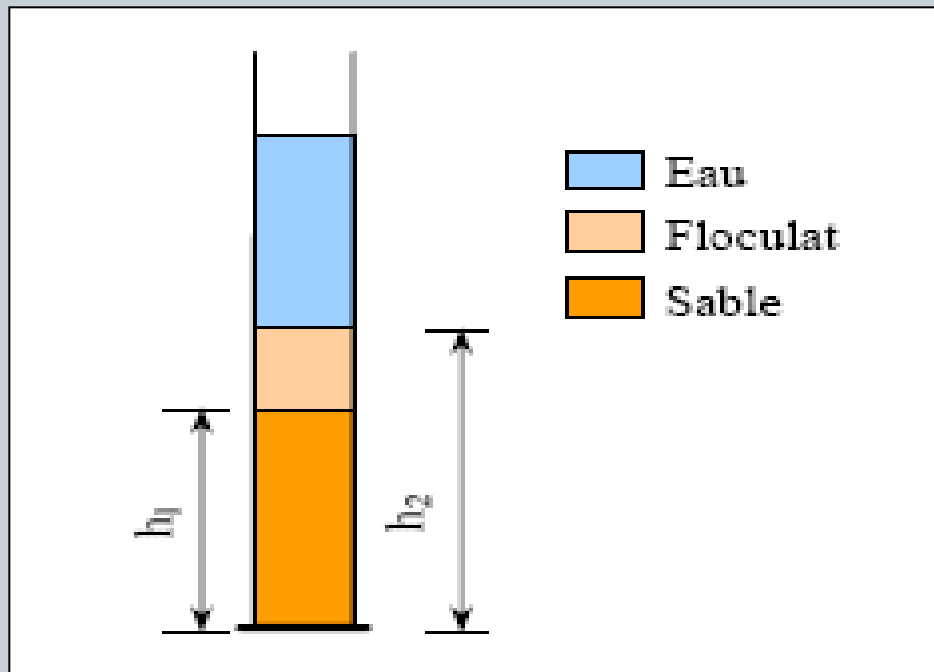


► granulométrie : 0/2 -0/4 mm

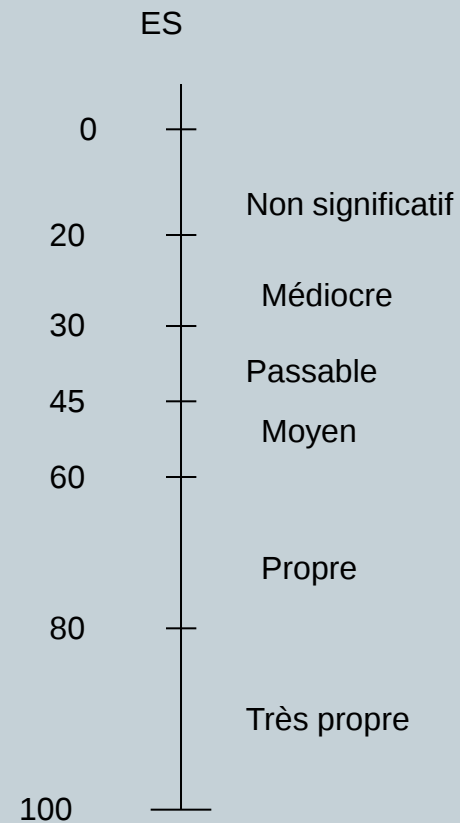
LES ASSISES NON TRAITEES

Les sables :

L'équivalent de sable :



$$ES = (h_2/h_1) \cdot 100$$



LES ASSISES NON TRAITEES



Les fines :



▶▶ granulométrie : 0/63 μm

LES ASSISES NON TRAITEES



Spécifications de la GNF

2 – Granulats pour G.N.F. Les spécifications de ces granulats sont les suivantes :

Fuseau	Granularité passant au tamis de mm							Dureté		Propreté LP	C.A	Epaisseur de la couche	Compactage	Angularité	
	60	40	20	10	6.3	2.0	0.08	LA	MDE					Trafic	LC
0/60	100 à	58 à	40 à	31 à	26 à	18 à	2 à	T3		(Z.N.A)		Minimum de 20 cm	Egale ou supérieure à 95% de L'OPM	T3	0
								T4		<				T4	
	90	89	69	59	51	40	10	<40		6					
	%	%	%	%	%	%	%	T0	<25	(Z.A)	<20			T0	
0/40								T1		<8		Minimum de 15 cm	Egale ou supérieure à 95% de L'OPM	T1	>30
								T2						T2	
								<35							
								T0,T		(Z.N.A)				T0	
0/40		100 à	60 à	40 à	33 à	20 à	2 à	1		<6		idem	idem	T1,T2	>30
								T2	<25	(Z.A)<8	<20				
	100 %	90	90	70	64	48	14	<35							
		%	%	%	%	%		T3,T	<25	Idem	idem			T3,T4	
								4							
								<40						0	

- Des dérogations à ces spécifications sont acceptées dans le cas d'utilisation de roches tendres, suivant des caractéristiques qui seront mentionnées au C.P.S.
- Si l'équivalent de sable est supérieur à 30 (ES> 30) Sur la fraction 0/5 ou 0/4, il ne sera pas effectué de mesure D'indice de plasticité.

LES ASSISES NON TRAITEES



Spécifications de la GNF

GRAVE NON TRAITEE POUR COUCHE DE FONDATION GNF 1-2-3

Trois catégories de graves non traitées pour couche de fondation sont prévues :
GNf1 – GNf2 – GNf3 en 0/40 ou 0/60

A) GRANULARITE

Les fuseaux de spécification sont les suivants :

Matériau	Classe	% passant au tamis de (mm)							
		80	60	40	20	10	6,3	2	0,08
GNf1	0/60	100	100	89	69	59	53	40	10
				58	40	31	26	18	2
GNf2 et GNf3	0/40	100	100	100	90	70	64	48	14
					60	40	33	20	2
	0/60	100	100	89	69	59	53	40	10
			80	55	32	25	17	7	2
	0/40	-	100	100	90	70	64	48	14
				80	47	30	20	10	2

B) PROPRETE

Zone	H, h, a	d
GNf1	ES>30 ou IP <6 sinon VB <1,5	IP < 8
GNf2-3	IP < 8	IP < 12

C) DURETE

Zone	H, h, a	d
GNf1	LA < 30 MDE < 25	LA < 30
GNf2	LA < 40 MDE < 35	LA < 40
GNf3	LA < 50 MDE < 45	LA < 50

D) ANGULARITE

- GNf1 IC > 60
- GNf2 IC > 30
- GNf3 IC sans condition

LES ASSISES NON TRAITEES



Spécifications de la GNA et GNB

3 – Granulats pour GNA et GNB
Les spécifications de ces granulats sont les suivantes :

Granularité passant au tamis de mm							Dureté		Propreté		Epaisseur de la couche	Compactage	Angularité	
40	31.5	20	10	6.3	2	0.08	LA	MDE	IP	ES			Trafic	LC
100 %	100	68	43	35	22	4	<30	<20	T0 T1	>30	Minimum de 15 cm	Trafic T0,T1,T2 ≥98% OPM	G.N.A	Concassé Pur ou 100%
	à 90%	à 90 %	à 78 %	à 64 %	à 43 %	à 11%			T2 T3 N.P T4 <6			Trafic T3,T4 ≥ 95 % OPM		

LES ASSISES NON TRAITEES



Spécifications de la GNA et GNB

FICHE N° 11

GRAVE NON TRAITEE TYPE A ET B : GNA – GNB

A) GRANULARITE

Origine	Granularité passant au tamis de mm							
	40	31,5	20	10	6,3	2	0,08	
Ballastière	100	85 à 100	68 à 100	43 à 78	35 à 64	22 à 43	4 à 11	0/31,5
	100	85 à 100	62 à 90	35 à 62	25 à 50	14 à 34	2 à 10	0/31,5
Roche massive	-	100	85 à 100	47 à 77	35 à 60	18 à 38	2 à 10	0/20

B) RESISTANCE MECANIQUE

- L.A < 30
- MDE < 20 (non applicable en zone d).

C) AUTRES CARACTERISTIQUES

Angularité

GNA	IC > 100 %
GNB	IC > 35 %

Propreté

ES (0/5) > 30 ou
ES (0/2) > 45 sinon VB < 1,5

LES ASSISES NON TRAITEES

Spécifications de la GNC et GND

FICHE N°12

GRAVE NON TRAITE TYPE C ET D : GNC – GND

A) GRANULARITE

		Granularité passant au tamis de (mm)						
		60	40	20	10	6,3	2	0,08
0/31,5	-	100	52	35	25	13	2	
			à	à	à	à	à	
			87	70	60	38	10	
0/40	100	80	57	30		10	2	
		à	à	à		à	à	
		100	82	65		32	10	

B) RESISTANCE MECANIQUE

	LA	MDE ⁽¹⁾	LA + MDE
GNC	< 35	< 30	< 65
GND	< 40	< 35	< 75

(1) en zone d le critère MDE n'est pas pris en compte.

C) AUTRES CARACTERISTIQUES

Angularité

GNC IC > 30, GND roulé admissible

Propreté

IP < 6 zone H, h sinon VB < 1,5
IP < 12 zone a, d

LES ASSISES NON TRAITEES

Matériaux pour accotements :

La note technique de la DRCR/DT intitulée « spécification pour matériau d'accotement » de 1990 définit :

- 3 types de matériau pour couche supérieure d'accotement MS1 – MS2 – MS3 ;
- Les caractéristiques des matériaux pour sous couche (Sc) ;
- Les caractéristiques des couches anticontaminantes (AC) ;
- Et celles des matériaux drainants (D).

1/ Matériau pour couche supérieure MS1 – MS2 – MS3

- Granulométrie - dureté

	% passant au tamis de (mm)					Dureté LA
	50	40	10	5	0,08	
MS1	100	50 à 100	-	15 à 70	4(2) à 20	< 50
MS2	100	50 à 100	35 à 100	15 à 75	2 à 50	< 60
MS3	100	-	-	-	-	-

- Propreté :

	Critères	Zone climatique		
		H, h	a	d
MS1	6<IP <20 et fx IP <	Roulé	225	250
		IC > 30	200	225
		IC > 100	175	200
MS2	IP <	12	15	20
MS3	IP <	15	20	25

f : pourcentage d'éléments inférieurs à 0,08 mm

Matériaux carbonatés :

Si Ca CO3 > 70 % pas de critère de dureté et propreté pour MS1 et MS2.

LES ASSISES NON TRAITEES



Travaux sur la Couche de base



LES ASSISES NON TRAITEES



Compactage



LES LIANTS HYDROCARBONNES



Définition :

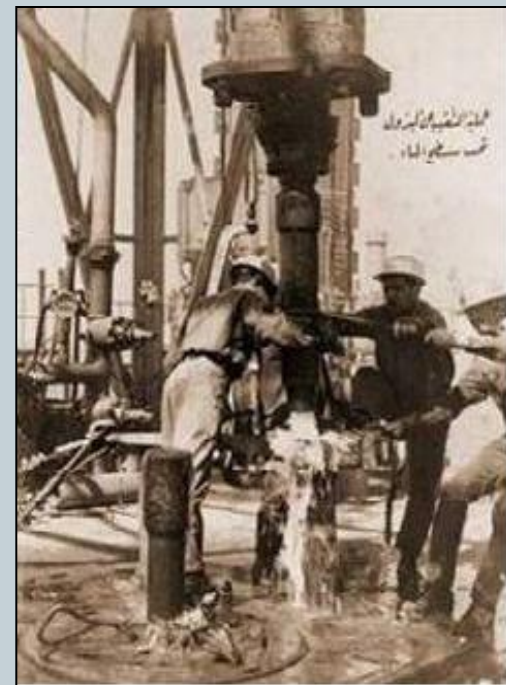
- Liant organique constitué d'hydrocarbures
- à base de Carbone et d'hydrogène
- avec ajout en faible quantité d'oxygène et d'azote.

Les propriétés spécifiques d'un liant sont à la fois de **lier** « phénomène d'adhésion » et de maintenir **réunis** les granulats au sein du composite.

LES LIANTS HYDROCARBONNES

Les bitumes :

Le bitume est la coupe la plus lourde de certains pétroles bruts. Il peut exister à l'état naturel (Asphalte de Trinidad), ou être obtenu par distillation du pétrole brut dans des raffineries



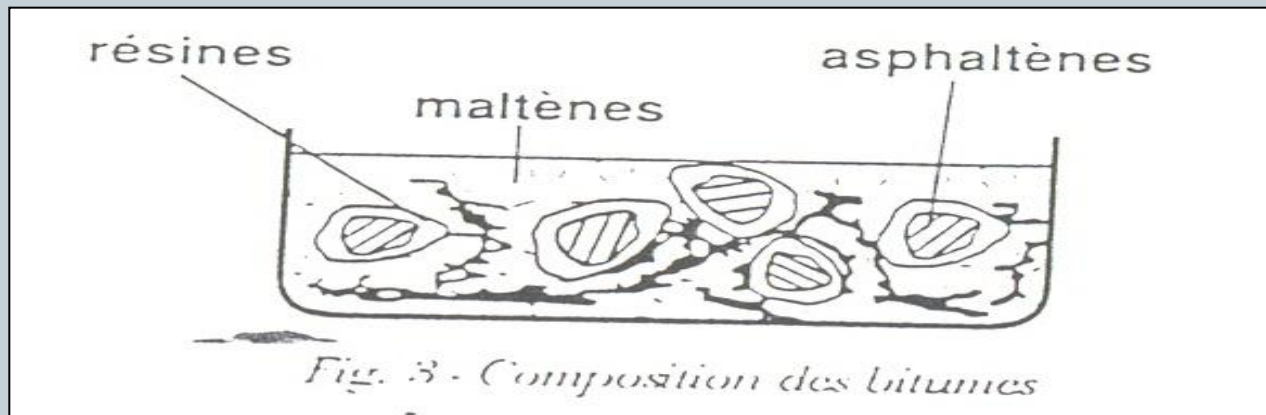
Son utilisation est très ancienne (4 à 5 mille ans av JC), en étanchéité : canaux, bâtiments, bateaux, mais aussi pour cultes (embaumement des corps en Égypte), médecines, orfèvreries...

LES LIANTS HYDROCARBONNES



Les bitumes :

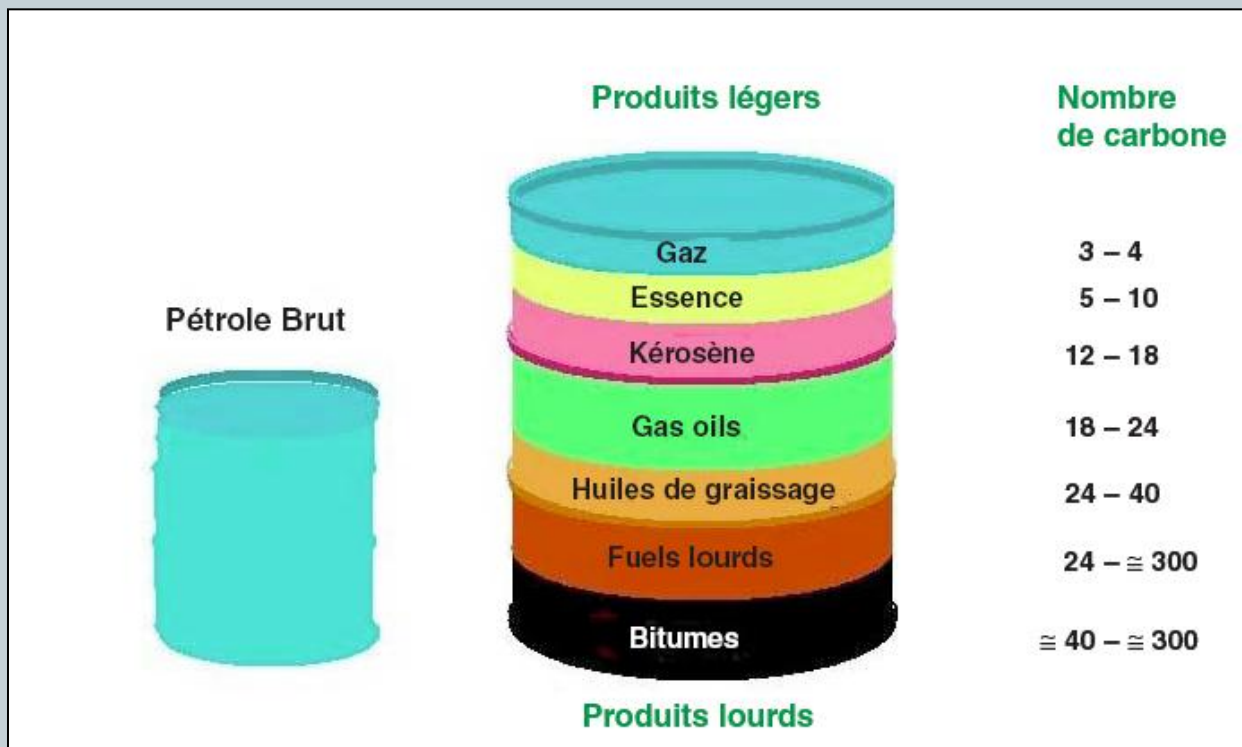
- Les bitumes purs
- Les bitumes fluidifiés ou cut-backs



LES LIANTS HYDROCARBONNES



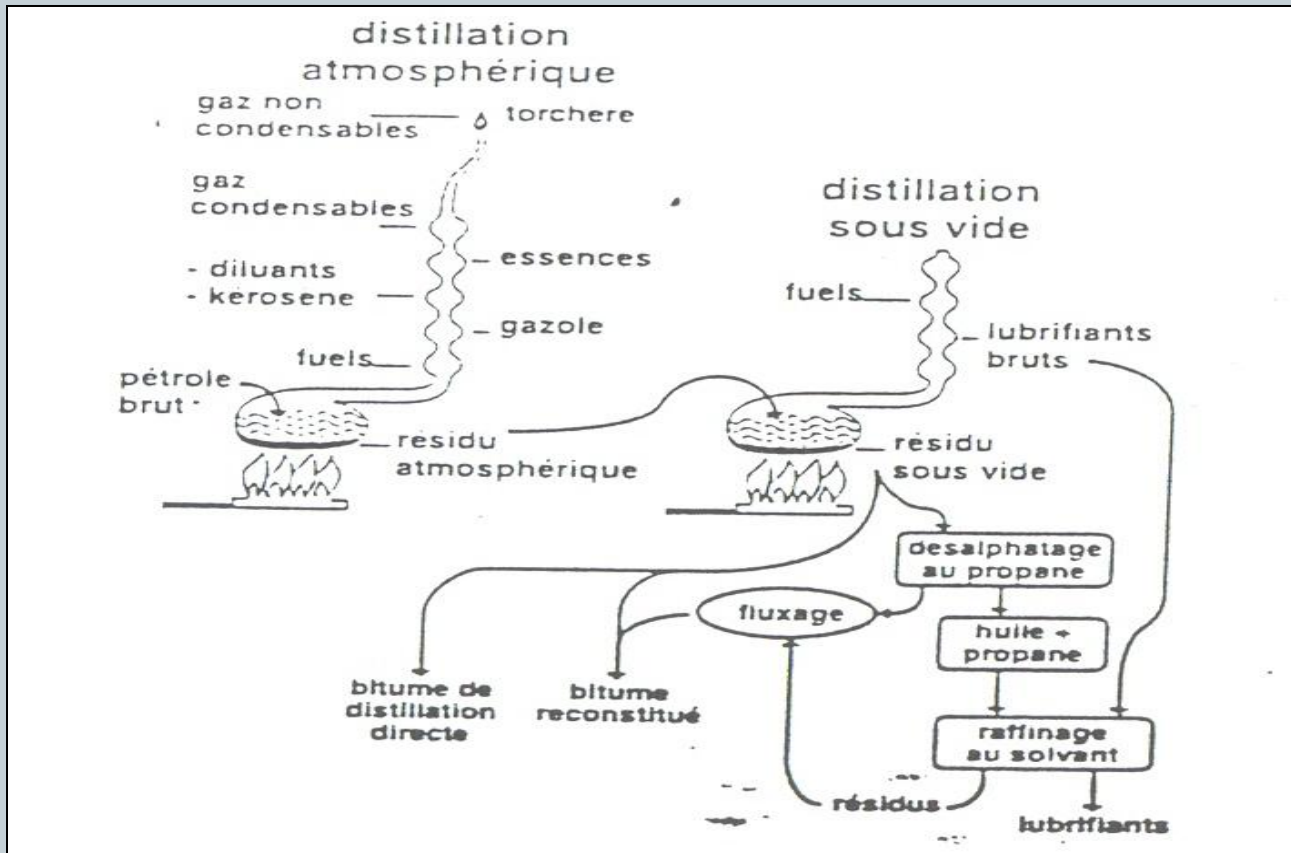
Les bitumes :



LES LIANTS HYDROCARBONNES



Les bitumes :



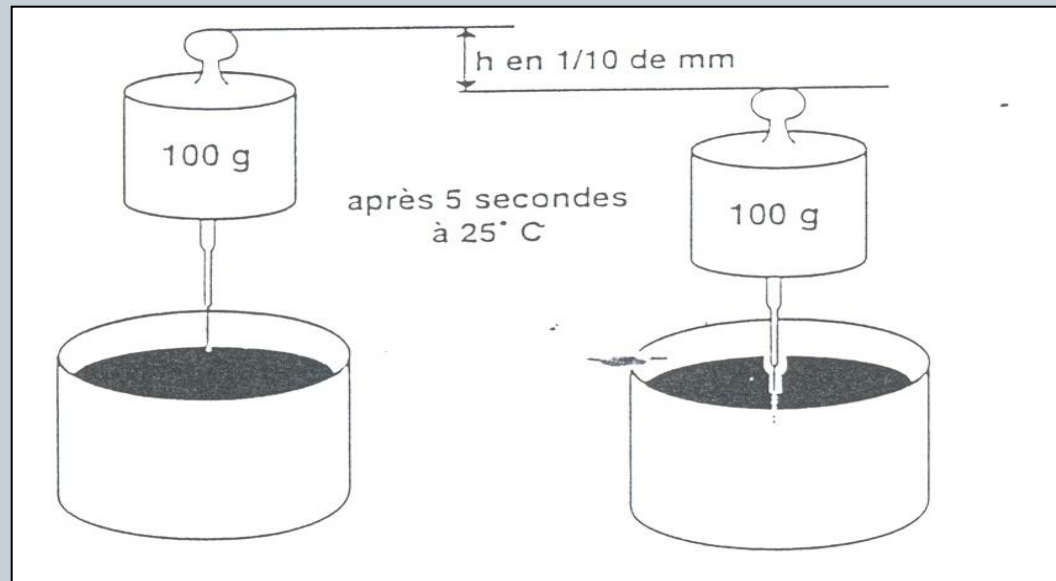
LES LIANTS HYDROCARBONNES



Caractéristiques des bitumes purs :

1- Pénétrabilité à 25 °C

L'essai consiste à mesurer l'enfoncement en dixième de mm d'une aiguille normalisée chargée à 100g dans un godet de bitume placé dans un bain thermostaté à 25 °C pendant 5 s.



Bitume 20/30: l'enfoncement de l'aiguille doit être compris entre 2 et 3 mm

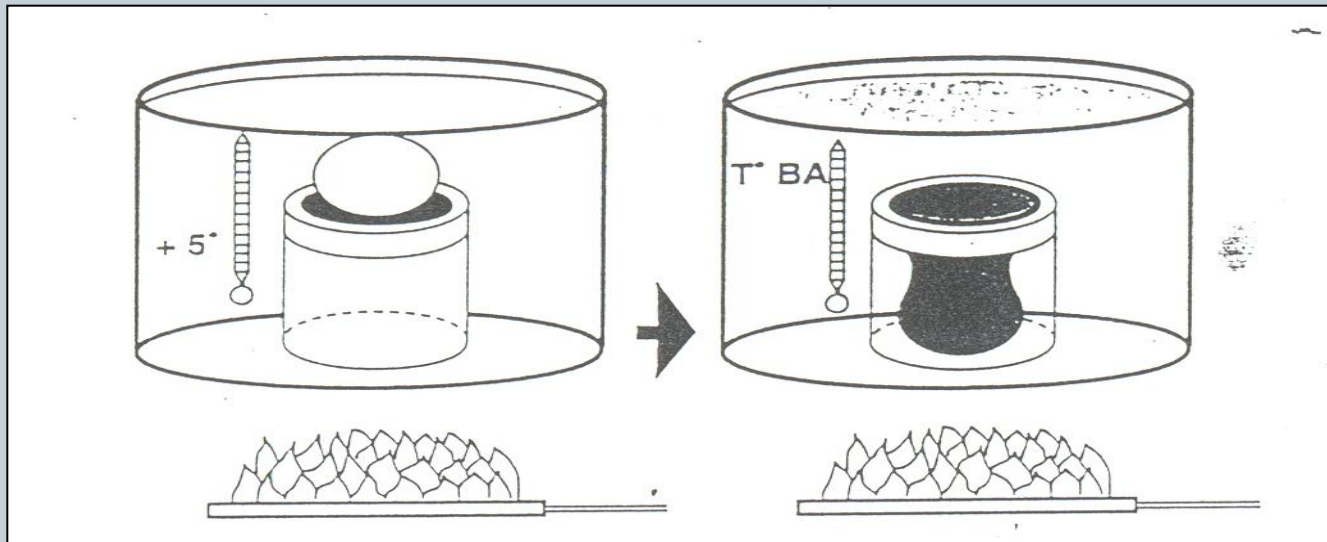
LES LIANTS HYDROCARBONNES



Caractéristiques des bitumes purs :

2- Température bille et anneau TBA

L'essai consiste à mesurer la température à laquelle une bille s'enfonce à travers le bitume remplissant le cercle intérieur d'un anneau de laiton placé dans un bain thermostaté. On monte progressivement la température jusqu'au point où la bille passe à travers l'anneau.



LES LIANTS HYDROCARBONNES



Catégories des bitumes :

Consistance	Dur					Mou
Appellation	20/30	40/50	60/70	80/100	180/220	
Pen25°C	20 à 30	35 à 50	50 à 70	70 à 100	180 à 220	
TBA °C	55 à 63	50 à 56	45 à 51	42 à 48	34 à 43	

LES LIANTS HYDROCARBONNES



Les bitumes fluidifiés ou cut-backs :

Les bitumes fluidifiés sont des liants à base de bitume pur et de solvants pétroliers (kérosène).

Ils sont beaucoup moins visqueux que les bitumes purs et leur viscosité est donnée par le temps d'écoulement en secondes d'une quantité de 200 cm³ à travers un orifice de 10 mm de diamètre à la température de 25°C.

Ainsi le C.B. 400/600 met au moins 400 secondes et au plus 600 secondes à d'écouler.

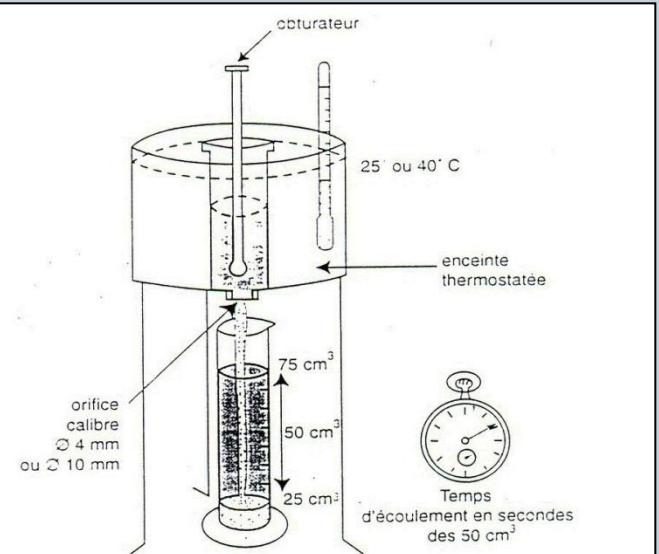


Fig. 1 : Mesure de la pseudo-viscosité des liants anhydres pour enduits superficiels

LES LIANTS HYDROCARBONNES



Les bitumes fluidifiés ou cut-backs :

Viscosité du CB 10 mm 25°	% bitume 80/100 (en poids)	% /solvant (en poid)	Observations
0 /1	64	36	très fluide
10/15	76,5 - 78,5	23,5 - 21,5	semi-fluide
150/250	86,1 - 87,5	13,9 - 12,5	semi-visqueux
400/600	89 - 89,5	11 - 10,5	visqueux
800/1400	90,0 - 90,8	10 - 9,2	visqueux

LES LIANTS HYDROCARBONNES



Les émulsions de bitume :

Une émulsion est une dispersion d'un liquide dans un autre non miscible obtenue généralement au moyen d'un produit appelé émulsifiant.

L'émulsion de bitume est la dispersion de ce dernier dans l'eau à l'aide d'un émulsifiant ayant des affinités avec le bitume de base et l'eau.

Le bitume est fractionné en globules dans l'eau contenant l'émulsifiant qui tapissera la surface de chaque sphère créant entre elles une répulsion électrostatique.

On classe les émulsions suivant leur concentration en bitume, qui peut varier de 60 à 70%. Donc dans une tonne du produit on a au moins 30% d'eau qui après mise en œuvre doit disparaître. Ce qui fait que nous transportons « inutilement » au moins le 1/3 du liant, chose qui affecte le prix de revient de l'utilisation qui en est faite.

LES ENDUITS SUPERFICIELS



Définition :

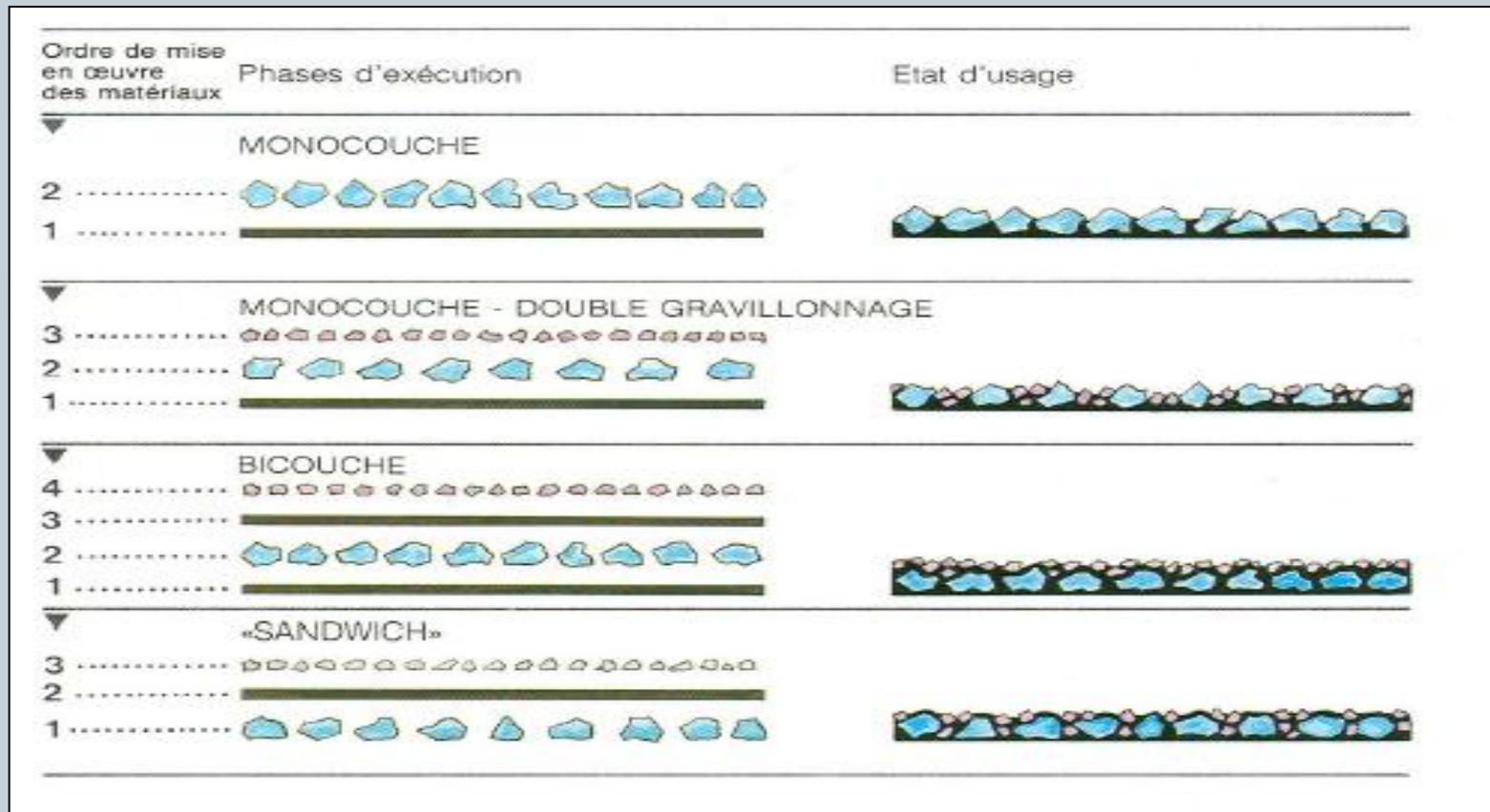
C'est le répandage d'une ou plusieurs couches de liants hydrocarboné, pour empêcher les infiltrations d'eau dans le corps de chaussée, et coller une ou plusieurs couches de gravillons destinés à donner une bonne rugosité à la surface de roulement.

Les granulats doivent supporter seuls les contraintes verticales du trafic. Pour cette raison on n'utilise que les gravillons de bonne ou très bonne qualité.

LES ENDUITS SUPERFICIELS



Différents types d'enduit :



LES ENDUITS SUPERFICIELS



Caractéristiques des granulats :

Coupures granulométriques :

Les granulats pour enduits superficiels seront des gravillons raffinés de concassage ayant les dimensions suivantes (en millimètres de maille de tamis) :

d	D
4	6,3
6,3	10
10	14

Les granulométries employées sont fixées au C.P.S.

Les conditions de refus à D et de tamisât à d doivent être inférieures à 15% et les refus sur le tamis de maille 1,58 D doit être nul.

- Enduit bicouche discontinu 10/14 – 4/6 ,3 pour TPL4 – TPL5 ;
- Enduit bicouche continu 10/14 – 6,3/10 pour TPL1 ou 10/14, 6/10 ;
- Enduit monocouche double gravillonnage 10/14 – 4/6,3 pour TPL1 à TPL3 ;
- Enduit monocouche (10/14 ou 6/10) sur GBB et GE pour TPL2 à TPL4 ;
- Zone de montage utilisation possible de 14/20 – 6,3/10 ou monocouche double gravillonnage ;
- Zone urbaine bicouche continu 6,3/10 – 4/6,3

LES ENDUITS SUPERFICIELS



Caractéristiques des granulats :

Angularité :

Les granulats 4/6,3-6,3/10 et 10/14 sont constitués d'éléments concassés purs. Pour les granulats provenant de ballastière, il doit exister un rapport de 4 entre la dimension minimale du granulat roulé d'origine et la dimension maximale du granulat concassé. Pour les chaussées à trafic rapide ($V > 120$ km/h) il est souhaitable de porter ce rapport à 6.

Adhésivité :

Les granulats doivent présenter des caractéristiques d'adhésivité globale suffisante au liant prévu.

Ils doivent présenter en outre une bonne adhésivité active et adhésivité passive pour éviter leur désenrobage ultérieur.

Adhésivité Active: le liant arrive-il à mouiller le granulat en présence d'eau.

Adhésivité passive: Cette liaison résistera-il à l'action de l'eau qui cherche à prendre la place du liant.

LES ENDUITS SUPERFICIELS



Caractéristiques des granulats :

Trafic	TPL5	TPL4	TPL3	TPL2 et TPL1	Observation
LA MDE₍₁₎	< 20 < 15	< 25 < 20	< 30 < 25	< 35 < 30	Avec compensation de 5 points
Forme	< 20	< 25	< 25	< 30	Voir le pouvoir couvrant
Polissage	> 0,5	> 0,5	> 0,45	> 0,45	Facultatif
Propreté	< 1	< 1	< 1	< 1	Impératif
Adhésivité à l'impression après séchage	6h	24h	24 h		

LES ENDUITS SUPERFICIELS



Caractéristiques du liant :

Les liants utilisés sont des liants obtenus à partir de bitume pur sont trop mou pour être caractérisés par l'essai de pénétrabilité.

On les classe à partir d'une mesure de pseudo-viscosité traduite par le temps d'écoulement d'une certaine quantité de produit 50cm³ à travers un orifice de diamètre normalisé 4 ou 10mm et à une température donnée 25 ou 40°C.

Liant 10/15 temps d'écoulement compris entre 10 et 15 seconde

Les liants à utiliser sont des cut-backs 800/1400 et des émulsions à 65% de bitume.

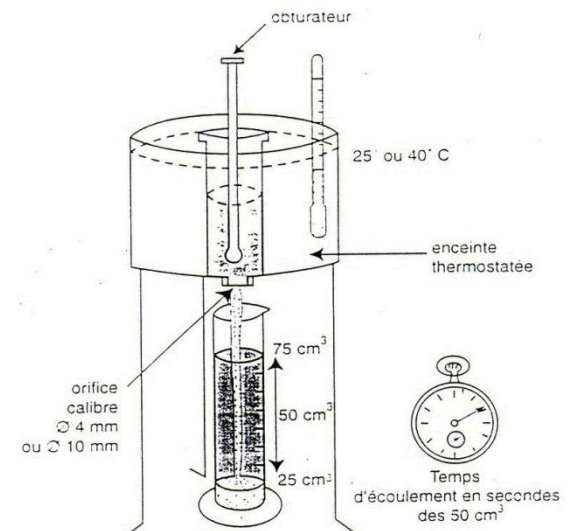


Fig. 1 : Mesure de la pseudo-viscosité des liants anhydres pour enduits superficiels

LES ENDUITS SUPERFICIELS



Formulation des enduits :

On désigne sous ce terme le nombre de couches et la qualité de produit correspondant à chaque couche.

Le liant est caractérisé par son type sa catégorie et son dosage.

Les gravillons sont définis par leur fraction granulométrique et leur dosage en L/m²

Pour le dosage en liant, on applique la règle du 1/10 (par exemple si l'on a 12 L/m² de gravettes 10/14, le dosage de liant correspondant de 1,2 kg/m². Mais une telle formulation doit être corrigée en fonction des facteurs cités auparavant en plus des caractéristiques des granulats.

Ainsi, par exemple s'il on a un support présentant les ressues généralisés, il faut sous doser de 5 à 15%. De même pour un support poreux, on surdose de 10 à 15%.

Le dosage des granulats d/D dans le monocouche et le bicouche généralement adopté est $d+D/2 \pm 1$ à 2 litres/m² (+ pour les monocouches et la deuxième couche du bicouche et – pour la première couche répandue).

LES ENDUITS SUPERFICIELS



Compactage :

Le compactage sera assuré au compacteur à pneus lisses, la pression de gonflage étant adaptée à la dureté des gravillons employés et aussi forte que possible.

Le nombre de passage est au minimum de trois (3) en chaque point de la surface, la vitesse des compacteurs est aussi réduite que possible, au maximum de huit (8) Km/h. Le temps écoulé entre le gravillonnage d'une bande et le premier passage du compacteur ne doit pas dépasser deux minutes.

LES ENDUITS SUPERFICIELS



Travaux de revêtement

Imprégnation : Répandeuse



LES ENDUITS SUPERFICIELS



Travaux de revêtement

Gravilloneuse :



LES ENDUITS SUPERFICIELS



Travaux de revêtement

Compactage :



LES ENROBES A CHAUD



Définition:

Le principe de cette technique consiste à utiliser le fait que le bitume se présente sous forme liquide à des températures de l'ordre de 140 à 160°C et peut être mélangé avec des agrégats sable et gravillons eux-mêmes déshydratés et chauffés à des températures de même ordre.

Différents types d'enrobés :

- Enrobés pour assises de chaussées
- Enrobés pour Couche de liaison
- Enrobés pour couche de roulement

LES ENROBES A CHAUD



La composition granulométrique :

La partie agrégat du mélange est obtenue à partir de différents constituants qui sont en général :

- Sables 0/2 ou 0/4
- Petits gravillons 2/4;2/6,3;4/6,3 ou 4/10 ou 6,3/10
- Gros gravillons 10/14 ou 10/20

Types de courbes :

Les courbes continues: on retrouve toutes les fractions granulométriques de 0 à D.

Les courbes discontinues: elles correspondent à des mélanges où une fraction granulométrique a été supprimée.

Exemple enrobé 0/10 reconstitué à partir de 0/4 du sable et 6,3/10 de gravillon donc discontinu entre 4 et 6,3.

Courbe nougat : courbe riche en sable et pauvre en gravillons.

Courbe grenue : courbe riche en gravillon donc pauvre en sable.

Courbe semi-grenue : courbe intermédiaire entre la courbe nougat et la courbe grenue

LES ENROBES A CHAUD



Caractéristiques des granulats :

Enrobés pour assises - Graves Bitumes GBB :

CLASSE DU FUSEAU	GRANULARITE					Dureté	Propreté		Angularités	
	% passant au tamis de mm					L.A.	I.P.	E.S.	Trafic	I.C.
	25	20	6	2	0,08					
0/25	100	74 à	37 à	24 à	6 à	Inférieur à		Supérieur à	TO	Concassé pur
		100	60	40	10	30	NP	30	T1	100 %
0/20		100	44 à	25 à	6 à				T2	50 % minimum
			65	42	10				T3 et T4	20 % minimum

LES ENROBES A CHAUD



Caractéristiques des granulats :

Enrobés pour Couche de liaison :

Classe Du Fuseau	Granularité % en passant au tamis de en mm					Dureté	Propreté	Angularité
0/14	14	10	6	2	0,08	L.A.	E.S.	I.C.
			50	25	4	Inférieur	Supérieur	Concassé pur
	100	14	à 65	à 38	à 8	à 25	à 40	

LES ENROBES A CHAUD



Caractéristiques des granulats :

Enrobés pour couche de roulement : Enrobés Bitumineux :

Classe Du Fuseau	GRANULARITE % Passant au tamis de en mm				Dureté L.A.	Propreté	Angularité
	10	6	2	0,08		E.S.	I.C.
0/10	100	65 à 80	30 à 45	5 à 9	Inférieur A 25	(Sur fraction 0/5 mm) Supérieur à 40	Concassé pur

LES ENROBES A CHAUD



Teneur en liant :

(Poids du liant/Poids du granulats sec) x100. Un enrobé comportant 6% de bitume contiendra 6 Kg de bitume pour 100Kg de granulat secs ou 106 Kg d'enrobé.

$$\text{Teneur en liant} = \alpha * K * S^{(1/5)}$$

α : Coefficient de correction pour prendre en compte la masse volumique réelle des granulats (MVR).

$$\alpha = 2,65 / \text{MVR granulats}$$

K : module de richesse

S : surface spécifique en $\text{m}^2/\text{Kg} = 0,20g + 2,2e+12s + 135f$, en m^2/kg , avec les

g des éléments supérieurs à 6mm.

e des éléments compris entre 6 et 0,315mm.

s des éléments compris entre 0,315 et 0,08mm.

f des éléments inférieurs à 0,08mm.

LES ENROBES A CHAUD



Liants hydrocarbonés :

Les liants hydrocarbonés entrant dans la composition des graves bitumes et enrobés bitumineux sont choisis dans l'une des classes suivantes :

- Graves bitumes (GBB) : bitume pur 40/50 ou 60/70
- Enrobés bitumineux (EB) : bitume pur 40/50, 60/70 ou 80/100.

LES ENROBES A CHAUD



La compacité :

Compacité = $100 - \% \text{ de vides}$. Un enrobé ayant une compacité de 94% renferme donc 6% de vides. Le % des vides se calcul facilement à partir de la MVR et la MVA de l'enrobé.

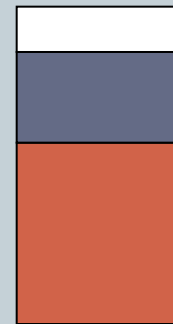
La MVR correspond à la densité qu'aurait l'enrobé sans vides. Elle se calcule à partir de la MVR de chaque constituant et de leur % dans le mélange.

Exemple: Soit un enrobé 0/10 constitué de:

- Concassé 6/10 (MVRg = 2,80) 45%
- Concassé 2/6 (MVRg = 2,80) 20%
- Sable concassé 0/2 (MVRg = 2,60) 35%
- Bitume (MVRb = 1,02) 5,7%

M.V.A

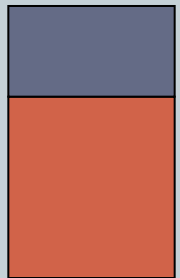
M.V.R



Volume des vides

Volume du bitume

Volume des
granulats



$$(M.V.A/M.V.R) \times 100 = \text{Compacité}$$

LES ENROBES A CHAUD



La compacité :

Pour 105,7Kg d'enrobé, il y a 100Kg de granulats sec et 5,7 Kg de bitume

$MVR \text{ enrobés} = \text{Poids}(\text{granulats} + \text{bitume}) / \text{Volume}(\text{granulats} + \text{bitume})$

$\text{Poids enrobé} = 100 + 5,7 = 105,7 \text{ Kg}$

$\text{Volume enrobé} = 45/2,8 + 20/2,8 + 35/2,6 + 5,7/1,02 = 42,264 \text{ dm}^3$

$MVR = 105,7/42,26 = 2,501 \text{ Kg/dm}^3 \text{ ou t/m}^3$

MVA se mesure soit sur une éprouvette fabriquée en labo soit sur échantillon prélevé sur chaussée.

Une carotte de cet enrobé prélevée sur chaussée pèse 2349g et a un volume de 1010 cm³.

$MVA = 2349/1010 = 2,326$ sa compacité $= (MVA/MVR) * 100 = (2,326/2,501) * 100 = 93\%$

Et son pourcentage de vides $= 100 - 93 = 7\%$

LES ENROBES A CHAUD



Essai à la presse de cisaillement giratoire (PCG) :

L'essai permet d'apprécier la compactabilité d'un enrobé. L'enrobé est compacté à température constante dans un moule cylindrique tournant sur lui même en créant un effet de **pétrissage** simulant l'effet des compacteurs à pneus sur chantier.

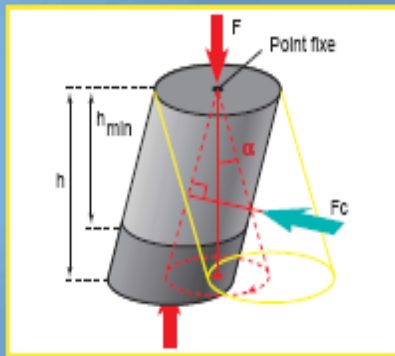
On mesure la hauteur h de l'éprouvette à chaque giration. Ce qui permet de déterminer la compacité de l'enrobé et de représenter graphiquement la variation de compacité en fonction de l'énergie de compactage (ou nombre de giration).

LES ENROBES A CHAUD



Essai à la presse de cisaillement giratoire (PCG) :

Principe de l'essai



h_{min} : hauteur minimale pour 0% de vide

h : hauteur apparente pour N girations

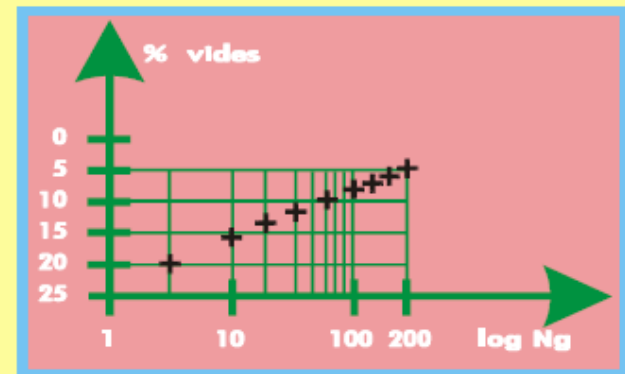
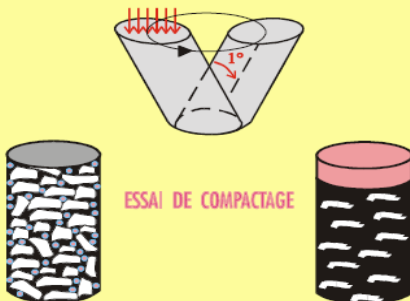
F : force axiale

F_c : force de cisaillement

α : angle d'inclinaison



Presse à Cisaillement Giratoire



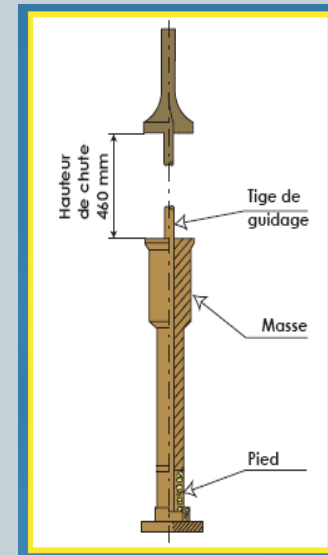
LES ENROBES A CHAUD



Essai Marshall :

L'essai consiste à compacter des éprouvettes d'enrobé dans un moule cylindrique de 10 cm de diamètre environ à l'aide de chocs produit par une dame de poids et hauteur de chute normalisés (50 coups de dame sur chaque face de l'éprouvette. On détermine:

- La stabilité Marshall : Résistance à l'écrasement diamétral entre mâchoires à $T = 60^{\circ}\text{C}$ et vitesse constante
- La compacité Marshall : % des vides de l'éprouvette fabriquée



LES ENROBES A CHAUD



Essai de compression simple LCPC (Essai Duriez) :

Avec cet essai, l'énergie de compactage utilisée pour la confection des éprouvettes est obtenue par une compression statique double effet de l'enrobé à l'intérieur d'un moule cylindrique.

Les éprouvettes confectionnées sont conservées:

- A 18 °C pendant 7 jours à l'air
- A 18 °C pendant 7 jours dans l'eau

Les éprouvettes sont écrasées à 18 °C à vitesse constante en compression simple et on obtient :

- Résistance des éprouvettes conservées dans l'air : R
- Résistance des éprouvettes conservées dans l'eau : r
- r/R : immersion/compression traduit la tenue à l'eau de l'enrobé (adhésivité du bitume aux granulats)

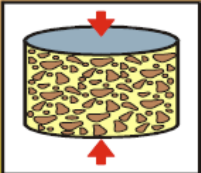
On mesure également la compacité des éprouvettes LCPC. Le résultat appelé compacité LCPC peut être pris comme compacité de référence pour le chantier.

LES ENROBES A CHAUD



Essai de compression simple LCPC (Essai Duriez) :

ESSAI DURIEZ
TENUE A L'EAU



COMPACTAGE DOUBLE EFFET 5 min

	Enrobé D ≤ 14 mm	Enrobé D > 14 mm
φ éprouvette	8 cm	12 cm
Masse	1 kg	3,5 kg
F appliquée	68 kN	180 kN

Conservation 7 jours
Compression simple



à sec : R

r / R

avec immersion : r



LES ENROBES A CHAUD



Performances des GBB :

Bitume	Module de Richesse K	Résistance Compression LCPC à 18°C en Bars	Stabilité Marshall Kg	Fluage Marshall En mm	Compacité		Stabilité A l'eau Rh/Rs
					LCPC	Marshall	
60/70 et 40/50	2 à 2,5	Bitume 60/70 Sup. à 45 Bitume 40/50 Sup. à 50	Bitume 60/70 Sup. à 700 Bitume 40/50 Sup. à 800	Infer. A 4	88 à 95	91 à 97	Super. A 0.65

LES ENROBES A CHAUD



Performances des enrobés :

	Module de Richesse K	Résistance à la stabilité		COMPACITE		Fluage Marshall
		Compression Simple à 18° C En Bars	Marshall En Kg	L.C.P.C.	Marshall	
Couche de Roulement	3,45 à 3,9	Bitume 80/100 Supérieur à 50	Supérieur À 950			
		Bitume 60/70 Supérieur à 55 Bitume 40/50 Supérieur 60 RH/RS > 0,75	Supérieure À 1000	90 à 95%	93 à 97	Inférieur À 4 mm
Couche de Liaison	3,45 à 3,9	Bitume 80/100 Supérieur à 45	Supérieur À 850	88	92	Inférieur à 4 mm
		Bitume 60/70 Supérieur à 55 Bitume 40/50 Supérieur à 60	Supérieur À 900	à 94	à 96	

LES ENROBES A CHAUD



LES ENROBES A CHAUD

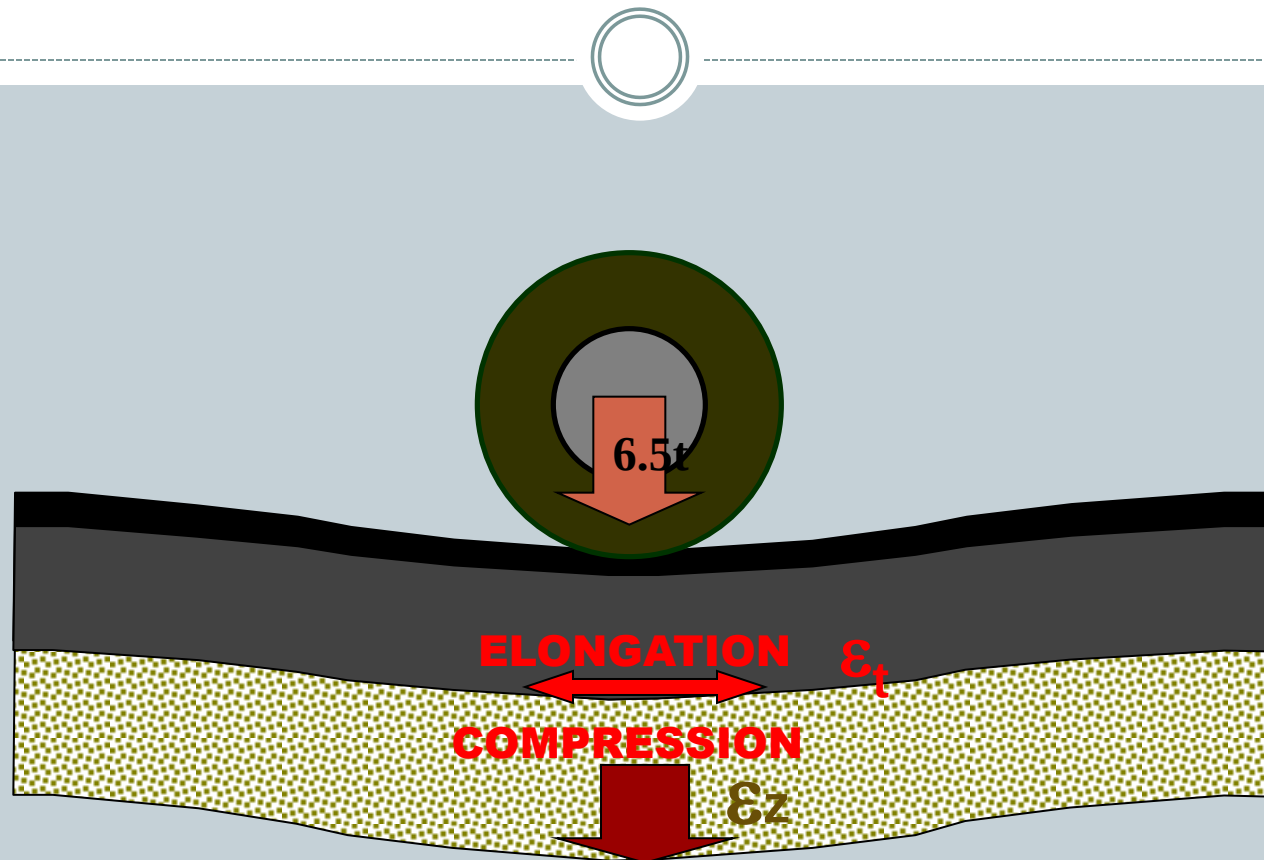




Chapitre 3 :

Dimensionnement des chaussées

Modèle de comportement



$$\epsilon_t < \text{seuil}$$

$$\epsilon_z < \text{seuil}$$

Trafic



Actions du trafic sur la chaussée :

Actions verticales

Les actions verticales sont transmises à la chaussée par les pneumatiques.

La pression q_0 exercée sur la chaussée est approximativement égale à 1,10 fois la pression de gonflage du pneumatique.

La surface de contact pneumatique / Chaussée est quasi-circulaire de rayon a

$$a = \sqrt{Q / \pi \cdot q_0}$$

Q étant la charge par roue.

Trafic

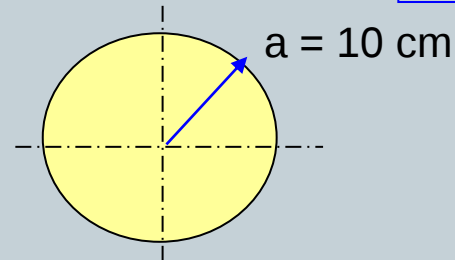


Actions du trafic sur la chaussée :

Actions verticales

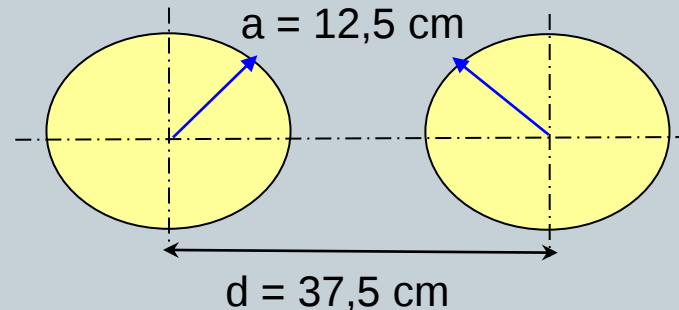
Exemple

Véhicules de tourisme de poids total de 2000 kg soit 500 kg/pneu



$$q_0 = 1,6 \text{ kg/cm}^2$$

Véhicules poids lourds à essieu de 13 t jumelé soit 3,25 T/pneu



$$q_0 = 6,62 \text{ kg/cm}^2$$



Trafic



Actions du trafic sur la chaussée :

Actions verticales

Le pneumatique impose deux types d'efforts verticaux sur la chaussée :

- des efforts de **poinçonnement** à la surface de la chaussée. Ces efforts sont fonction de la pression des pneus. Ces efforts ne sont en fait réellement sensibles que pour des pressions de gonflage supérieures à 7 kg/cm².
- **diffusion** de la charge totale jusqu'au sol de fondation. Ce n'est plus la pression qui est importante mais la charge transmise qui joue le rôle important. Le rôle du corps de chaussée est de diffuser la charge jusqu'au sol de manière à avoir une charge admissible sur le sol support.

Trafic



Actions du trafic sur la chaussée :

Actions tangentielles

Un véhicule en mouvement génère des contraintes tangentielles (latérales et tangentielles) imputables à :

- La transmission de l'effort moteur ou du freinage.
- La mise en rotation des roues non motrices.
- La résistance aux efforts transversaux.
- Ces efforts s'accompagnent de frottements.

Ces contraintes génèrent des efforts de traction à la base des couches liées qui créent des micro dégradations qui s'accumulent et peuvent entraîner la ruine du matériau.

Trafic



Actions du trafic sur la chaussée :

Actions tangentielles

En phases d'accélération et de freinage, les roues motrices tendent à arracher les matériaux et risquent parfois de patiner ou de glisser si la surface de la chaussée n'est pas suffisamment rugueuse.

Les coefficients de frottement qui conditionnent les risques de glissement et les possibilités d'arrêt des véhicules sont de l'ordre de :

• Chaussée sèche, pneu en bonne état	$f = 0,8 \text{ à } 0,9 \text{ voire } 1$
• Chaussée mouillée, pneu en bonne état	$f = 0,6 \text{ à } 0,8$
• Chaussée mouillée, pneu usé	$f = 0,3 \text{ à } 0,4$
• Chaussée lisse mouillée, pneu usé	$f = 0,1 \text{ à } 0,2$
• Verglas ou boue sur la chaussée	$f = 0,05 \text{ à } 0,1$

Trafic



Actions du trafic sur la chaussée :

Actions thermiques

La température a deux effets mécaniques principaux :

- Changement du module du matériau. Un Enrobé Bitumineux que l'on chauffe devient plus « mou ».
- Création de champs de contraintes et déformations au sein du matériau en raison des dilatations et contractions thermiques lors des changements de température.

Trafic



Agressivité du trafic :

L'agressivité (A) est estimée vis-à-vis de l'endommagement par fatigue de la chaussée. Elle correspond au dommage provoqué par le passage d'un essieu de charge (P), par rapport au dommage dû à un passage de l'essieu isolé de référence de charge P_0 .

L'agressivité est calculée par la formule :

$$A = K \times \left(\frac{P}{P_0} \right)^\alpha$$

K est un coefficient permettant de tenir compte du type d'essieu.

K et α dépendent de la nature du matériau et de la structure de chaussée.

Trafic



Agressivité du trafic :

	α	K		
		Essieu simple	Essieu tandem	Essieu tridem
Structures souples et bitumineuses	4	1	0,75	1,1
Structures semi rigides	8	1	12	113
Structures rigides	12	1	12	113

Trafic



Essieu simple :



Trafic



Essieu tandem :



Trafic



Essieu tridem :



Trafic



Agressivité d'un Poids lourd :

L'agressivité d'un poids lourd est égale à la somme des agressivités de ces essieux

Agressivité du trafic :

Connaissant l'histogramme de charge par type d'essieu pour un trafic donné, l'agressivité de ce trafic est qualifiée par le coefficient CAM, correspondant à l'agressivité moyenne du poids lourd composant ce trafic par rapport à l'essieu pris pour référence.

$$CAM = \frac{1}{NPL} \left[\sum_i \sum_{j=1}^3 K_j \times n_{ij} \times \left(\frac{P_i}{P_0} \right)^\alpha \right]$$

NPL : nombre de poids lourds pendant la période de comptage.

K_j coefficient correspondant au type d'essieu.

$j = 1$ essieu simple - 2 essieu tandem - 3 essieu tridem

n_{ij} : nombre d'essieux élémentaires de type j et de classe de charge P_i

Trafic



Exemple de calcul de l'agressivité du trafic :

Pendant cinq jours de comptage, une station de pesage a dénombré le passage de 305 poids lourds représentant :

- 1 854 essieux simples.
- 436 essieux élémentaires en tandem.
- 168 essieux élémentaires en tridem.

La répartition des charges par essieux est donnée dans le tableau suivant :

Trafic



Exemple de calcul de l'agressivité du trafic :

Classe de charge (T)	Centre Classe (T)	Nb. Essieux simples (N1)	Nb. Essieux tandem (N2)	Nb. Essieux tridem (N3)
1-3	2	210	107	48
3-4	3,5	160	78	34
4-5	4,5	100	66	28
5-6	5,5	290	60	22
6-7	6,5	280	50	16
7-8	7,5	216	28	14
8-9	8,5	210	24	4
9-10	9,5	180	8	2
10-11	10,5	68	6	0
11-12	11,5	50	5	
12-13	12,5	40	2	
13-14	13,5	25	1	
14-15	14,5	9	1	
15-16	15,5	7	0	
16-17	16,5	5		
17-18	17,5	2		
18-19	18,5	1		
19-20	19,5	1		
20-21	20,5	0		

Trafic



Le trafic est exprimé en nombre moyen journalier de poids lourds (**PTC > 8 tonnes**) sur les deux sens de circulation (NPL).

Il est réparti en six classes TPL_i ($i = 1$ à 6) :

NPL	0 à 5	5 à 50	50 à 125	125 à 250	250 à 325	325 à 450
Classe	TPL_1	TPL_2	TPL_3	TPL_4	TPL_5	TPL_6

Un PL est tout véhicule dont le poids total en charge est supérieur à 8 tonnes.

L'essieu de référence est l'essieu isolé à roues jumelées de charge 13 tonnes.

Trafic



Hypothèses du catalogue des Structures Types de Chaussées Neuves (Edition 1995)

Largeur de chaussée (L)

TPL 1 : $L \leq 4 \text{ m.}$

TPL2 à TPL6 : $L \geq 6 \text{ m.}$

Agressivité du trafic

TPL	1	2	3	4	5	6
Structure souple et semi-rigide	0.4	0.4	0.5	0.7	0.8	1
Structure rigide	0.7	0.7	0.9	1.2	1.3	1.5

Taux d'accroissement des poids lourds

Il a été pris égal à 4 %

Trafic



Hypothèses du catalogue des Structures Types de Chaussées Neuves (Edition 1995)

Trafic global

Le trafic global est supposé équilibré dans les deux sens de circulation

Durée de vie

- Durée de vie courte : 10 ans.
- Durée de vie longue : 15 à 20 ans.

Trafic



Trafic projet

Si pour un projet donné, les données réelles de trafic diffèrent des hypothèses énoncées ci-dessus, on utilisera le catalogue en calculant le trafic équivalent en essieu de 13 T (NE) cumulé sur la période choisie et en le comparant au tableau ci-dessous :

Structure	Durée de vie	TPL_1	TPL_2	TPL_3	TPL_4	TPL_5	TPL_6
Souple ou semi rigide	Courte	$8,8.10^3$	$4,5.10^4$	$1,4.10^5$	$3,8.10^5$	$5,7.10^5$	1.10^6
	Longue	$2,2.10^4$	$1,1.10^5$	$3,5.10^5$	$9,5.10^5$	$1,4.10^6$	$2,5.10^6$
Rigide	Longue	4.10^4	$2,7.10^5$	$6,1.10^5$	$1,6.10^6$	$2,3.10^6$	$3,7.10^6$

Trafic



Trafic projet

Calcul de NE : $NE = NPL \cdot C_1 \cdot C_2 \cdot C_3 \cdot C_4 \cdot N_4 \cdot C_{VC}$

NPL : Nombre de Poids Lourds (PTC > 8 T) par jour dans les deux sens à l'année de mise en service.

C₁ : largeur de chaussée

$C_1 = 1,5$ si $4 < L < 6$ m

C₂ : Agressivité du trafic

Connaissant l'histogramme de charges par type d'essieu pour un trafic donné, l'agressivité de ce trafic est qualifié par le coefficient **CAM**, correspondant à l'agressivité moyenne du poids lourds composant ce trafic par rapport à l'essieu pris pour référence.

C₃ : Taux d'accroissement des poids lourds :

$\frac{[(1+a)^n - 1]}{a}$.

$[(1,04)^n - 1] / 0,04$

- a : taux d'accroissement
- n : durée de vie

Trafic



Trafic projet

Calcul de NE : $NE = NPL \cdot C_1 \cdot C_2 \cdot C_3 \cdot C_4 \cdot N_4 \cdot C_{VC}$

C_4 – Cas de 2x2 voies

$C_4 = 0,8$.

N_4 : Coefficient de cumul

$$N_4 = 365 \times (1,04^n - 1) / 0,04$$

n : durée de vie

C_{VC} : Répartition du Trafic

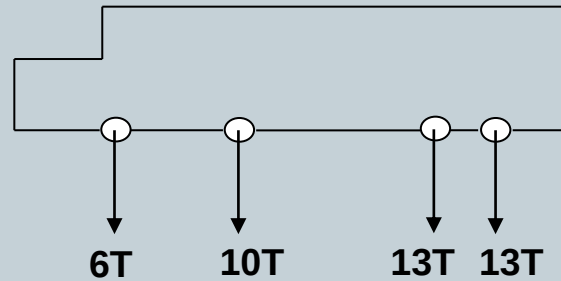
C_{VC} est le pourcentage du trafic sur la voie la plus chargée

Trafic



Exemple d'application

Une route reliant deux localités A et B est empruntée par un trafic de 1250 Véh/j composé de 40% de poids lourds dont le $\frac{1}{4}$ ont un PTC > 8 tonnes et caractérisés par la même silhouette suivante :



- 45% du trafic circule dans le sens A vers B.
- Ce trafic progresse annuellement de 6%.
- La durée de vie est de 10 ans et la chaussée est de type souple.

Déterminer la classe du trafic TPL_i .

FONCTIONNEMENT DANS LA CHAUSSEE

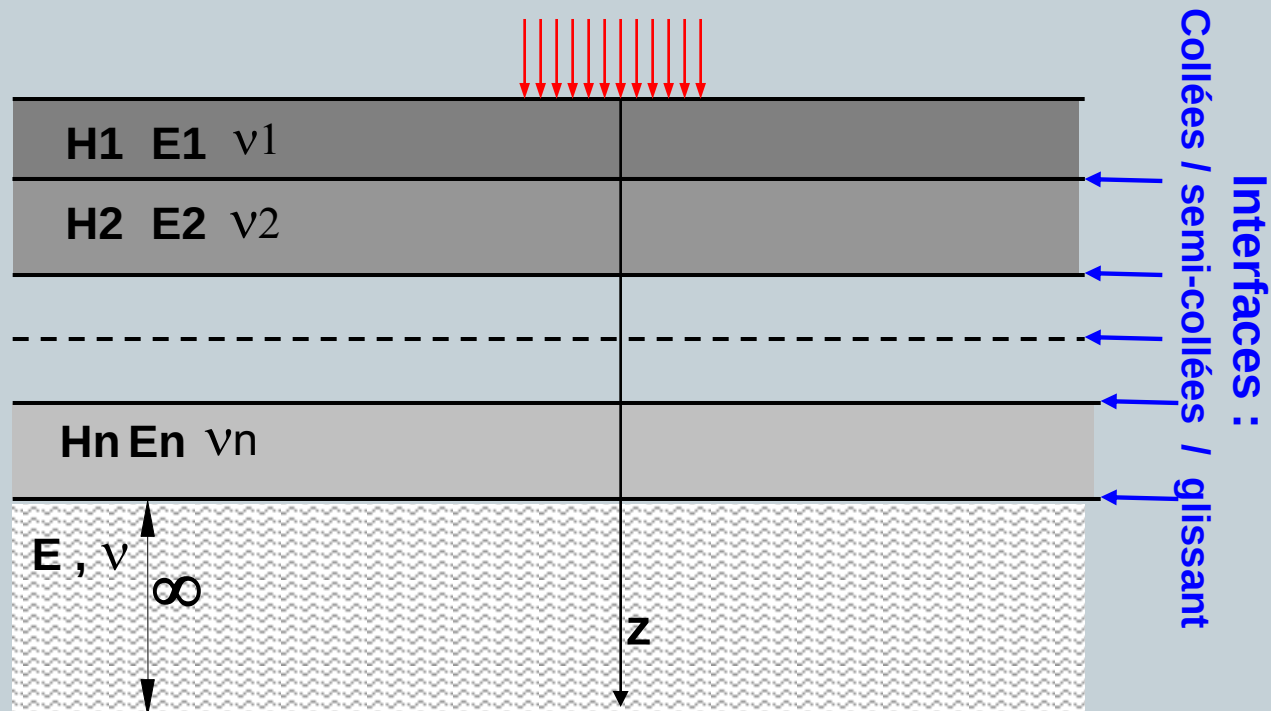


Hypothèses admises :

- ✓ Matériaux élastiques et linéaires
- ✓ Chaussée = plaque infinie
- ✓ Comportement à la fatigue des matériaux
- ✓ Approche probabiliste
- ✓ Méthode rationnelle

FONCTIONNEMENT DANS LA CHAUSSEE

Burmister (1943) : Multi-couches

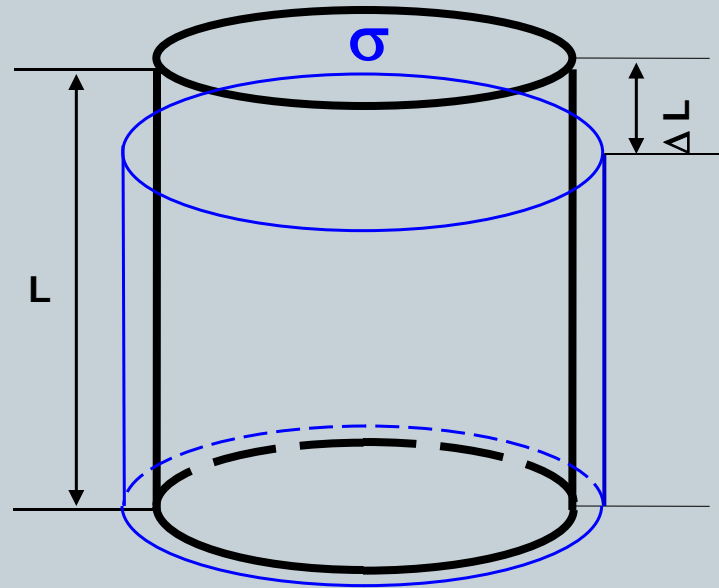


FONCTIONNEMENT DANS LA CHAUSSEE

Module de rigidité élastique :

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L}$$

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon}$$



Matériaux traités aux liants hydrauliques : essai de compression ou de traction. Le coefficient de poisson est souvent pris égal à 0,25.

Matériaux bitumineux : le module dépend de la température et du temps de charge.

FONCTIONNEMENT DANS LA CHAUSSEE



Module de rigidité élastique :

Pour le sol :

Essai triaxial (module réversible) – essai de plaque (in situ) - essai CBR ($E = 5 \text{ CBR}$).

Les différentes classes de plate-forme définies par le GTR sont les suivants :

Classe de la plate forme	P1	P2	P3	P4
Module	20MPa	50 MPa	120 MPa	200 MPa
Coefficient de poisson	0,35	0,35	0,35	0,35

FONCTIONNEMENT DANS LA CHAUSSEE



Module de rigidité élastique :

Pour les matériaux granulaires

On découpe la grave non traitée en tranches de 25 cm d'épaisseur maximale et on affecte à chaque tranche un module égale à trois fois celui de la couche sous-jacentes, plafonné à 360 MPa. On prend 0,35 comme coefficient de poisson.

Exemple : pour 50 cm de grave non traitée sur une plate-forme P2 de module 50 MPa :

couches	épaisseur	calcul	module E	coefficient de poisson
2 ^{ème} couche GNT	25 cm	3 x 150 = 450 Mpa plafonné à	360 MPa	0,35
1 ^{ère} couche GNT	25 cm	3 x 50 = 150 MPa	150 MPa	0,35
Plate-forme P2	infinie	50 MPa	50 MPa	0,35

FONCTIONNEMENT DANS LA CHAUSSEE



Sollicitations admissibles :

Pour les matériaux granulaires

pour les matériaux non traités (graves non traitées et sols) : le modèle adopté est le modèle d'endommagement par accumulation des déformations plastiques irréversibles (orniérage), résultant des sollicitations de compression verticale exercées par le trafic. L'expression des sollicitations de compression verticale admissibles ne découle pas directement d'essais en laboratoire, mais de considérations d'origine empirique :

$$\epsilon_{zadm} = Ax(NE)^b$$

A et b = paramètres d'origine empirique, indépendants du matériau non traité considéré, mais variant en pratique selon la nature de la chaussée et l'intensité du trafic (chaussée neuve ou renforcement, trafic faible ou fort, ...).

NE = nombre d'essieu équivalent calculé sur toute la durée de service assignée à la chaussée.

FONCTIONNEMENT DANS LA CHAUSSEE



Sollicitations admissibles :

Pour les matériaux liés (hydrocarbonés, traités aux liants hydrauliques et les bétons), le modèle adopté est le modèle d'endommagement par fatigue sous les sollicitations répétées de traction par flexion exercées par le trafic (modèle de Wöhler). La sollicitation admissible est une fonction décroissante avec le nombre de chargements appliqués par le trafic, elle s'exprime sous la forme générale :

$$S_{\text{tadm}} = A \cdot P \cdot (NE)^b$$

A et b = paramètres descriptifs du comportement à la fatigue du matériau, résultant d'essais de fatigue sur éprouvettes en laboratoire ($b < 0$).

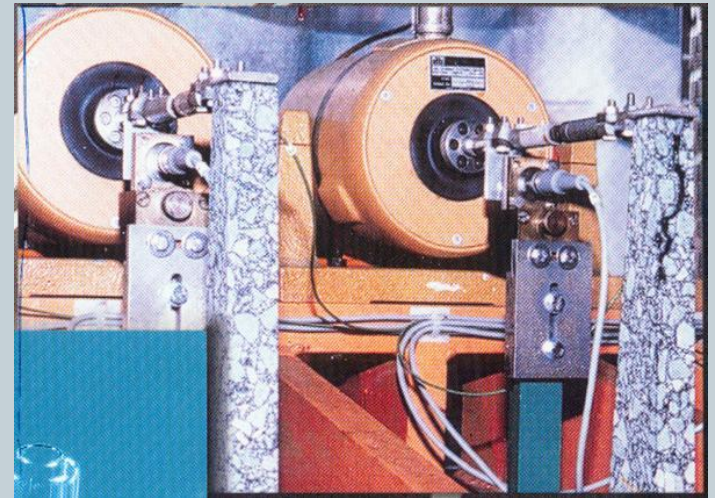
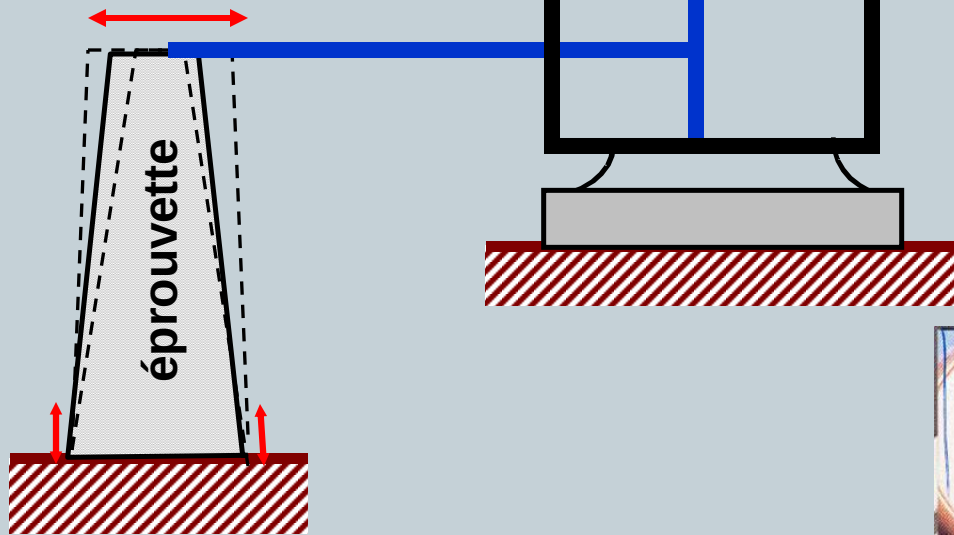
P = coefficients additionnels pour la prise en compte de différents facteurs, non reproduits par les résultats bruts des essais de fatigue en laboratoire.

NE = nombre d'essieu équivalent calculé sur toute la durée de service assignée à la chaussée.

FONCTIONNEMENT DANS LA CHAUSSEE

Sollicitations admissibles :

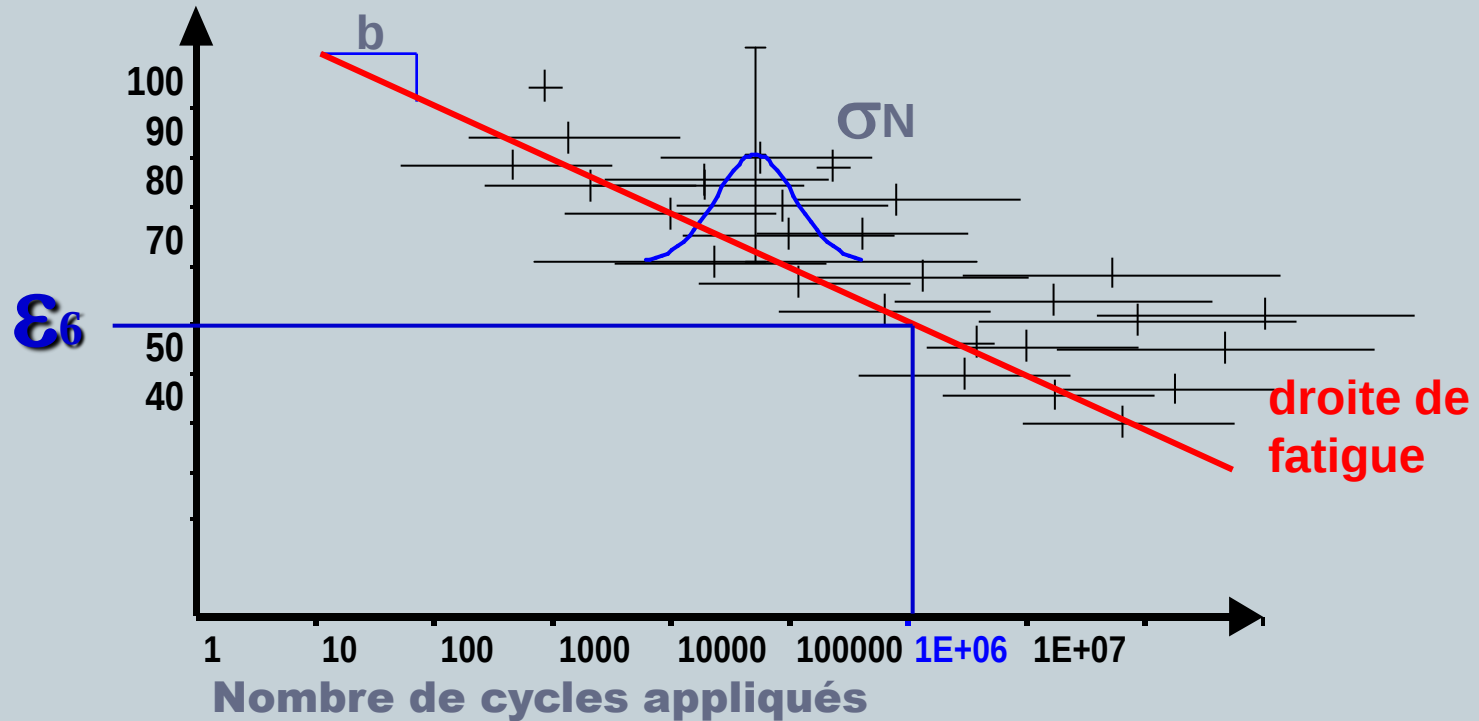
Essai de fatigue



FONCTIONNEMENT DANS LA CHAUSSEE

Sollicitations admissibles :

Résultat de l'essai



FONCTIONNEMENT DANS LA CHAUSSEE



Sollicitations admissibles :

Résultat de l'essai :

- ✓ Contrainte ou déformation admissible pour 1 million de fois : σ_6 ou ε_6
- ✓ Pente de la droite de fatigue : b
- ✓ Dispersion de la tenue en fatigue : σ_N

LE TRAFIC



- PL uniquement
- Taux de croissance : τ
- Fatigue : Durée de service : n
- Essieux de 13t
- Fatigue : Trafic cumulé NE

$$NE = 365.TraficPL.CAM.\frac{(1+\tau)^n - 1}{\tau}$$

CAM : Coefficient d'Agressivité Moyen d'un PL

DIMENSIONNEMENT DES CHAUSSES



Calcul des sollicitations admissibles :

$$\epsilon_{\text{adm.}} = K1 \epsilon_6.$$

$$\left[\frac{NE}{10^6} \right]^b$$

(Nb Essieux equ. NE)

DIMENSIONNEMENT DES CHAUSSEES

Calcul des sollicitations admissibles :

$$\epsilon_{\text{adm.}} = K1 \ K2 \ \epsilon_6.$$

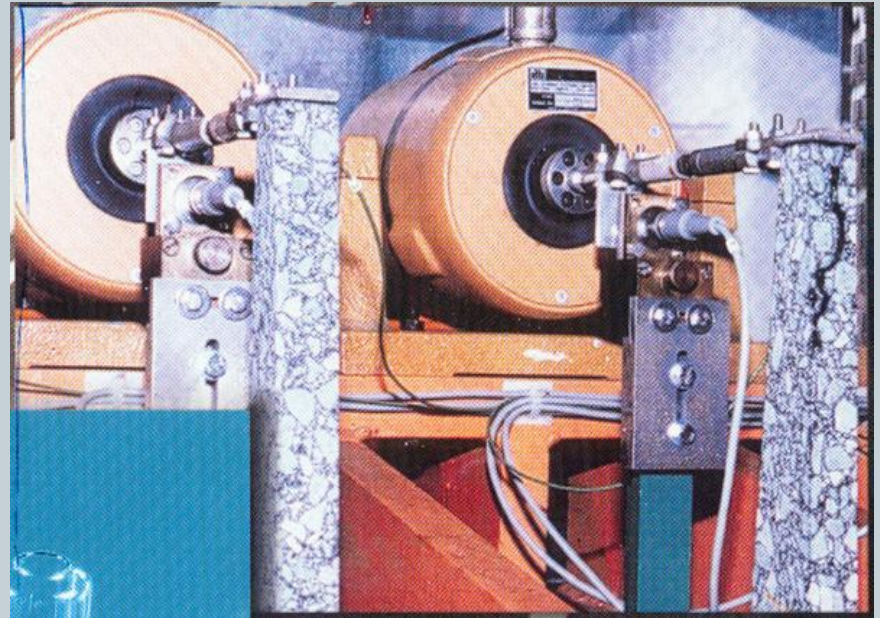
Trafic PL

$$\left[\frac{NE}{10^6} \right]^b$$

Correction 10°C/15°C

Chaussées : 15°C

Essais Labo : 10°C



DIMENSIONNEMENT DES CHAUSSEES



Calcul des sollicitations admissibles :

$$\epsilon_{\text{adm.}} = K1 \ K2 \ Kr \ \epsilon_6.$$

Trafic PL

$$\left[\frac{NE}{10^6} \right]^b$$

Correction 10°C/15°C

Var. fatigue σN

Risque

DIMENSIONNEMENT DES CHAUSSEES

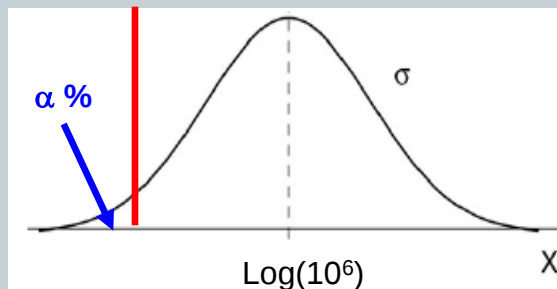
III. La loi normale :

Exemple : 50% de chance pour que le nombre de cycle soit $< 10^6$

$$\epsilon_{\text{adm.}} = K_1 K_2 K_r \epsilon_6$$

$10^\circ\text{C}/15^\circ\text{C}$ → K_1
 Trafic PL → K_2
 RISQUE → K_r
 Var. fatigue σ_N

$$\left[\frac{NE}{10^6} \right]^b$$



On va donc utilisé pour le dimensionnement un nombre de cycle $NC < 10^6$ et on aura à multiplier par un coefficient

$$K_r = (NC/10^6)^b$$

On prend le risque de $\alpha \%$ pour que le nombre de cycle soit inférieur à NC :

$$\text{Log}(\text{Nombre de cycle}) < \text{Log}(NC)$$

$$[\text{Log}(\text{Nombre de cycle}) - \log(10^6)] / \sigma_N < -t_\alpha$$

$$\text{Log}(\text{Nombre de cycle}) < -t_\alpha \sigma_N + \log(10^6)$$

$$\text{Pour le risque de } \alpha \% : \text{Log}(NC) = -t_\alpha \sigma_N + \log(10^6)$$

$$\text{on a } \text{Log}(NC/10^6) = -t_\alpha \sigma_N$$

$$\text{Et } K_r = 10^{-t_\alpha b \sigma_N}$$

x %	2 %	5%	12 %
t	2.05	1.645	1.175

DIMENSIONNEMENT DES CHAUSSEES



Calcul des sollicitations admissibles :

$$\epsilon_{\text{adm.}} = K1 \ K2 \ Kr \ Kc \ \epsilon_6.$$

Calage :
calculs $\Leftrightarrow$ terrain

Trafic PL

Risque

Calage

$$\left[\frac{NE}{10^6} \right]^b$$

Correction 10°C/15°C



DIMENSIONNEMENT DES CHAUSSEES



Calcul des sollicitations admissibles :

$$\epsilon_{\text{adm.}} = K1 \ K2 \ Kr \ Kc \ Ks \ \epsilon_6.$$

Trafic PL

Risque

Support

$$\left[\frac{NE}{10^6} \right]^b$$

Correction 10°C/15°C

Calage

PF	Ks
PF1	1/1.2
PF2	1/1.1
PF3/PF4	1

DIMENSIONNEMENT DES CHAUSSEES

Calcul des sollicitations admissibles :

Pour les graves hydrauliques :

$$\sigma_{\text{adm.}} = K1 \ K2 \ Kr \ Kc \ Ks \ Kd \ \sigma_6.$$

Trafic PL

$$\left[\frac{NE}{10^6} \right]^b$$

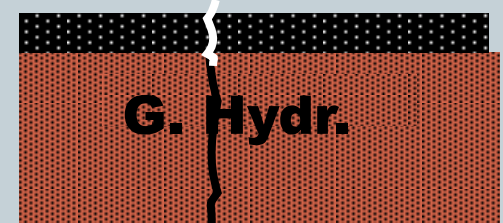
Correction 10°C/15°C

Risque

Calage

Support

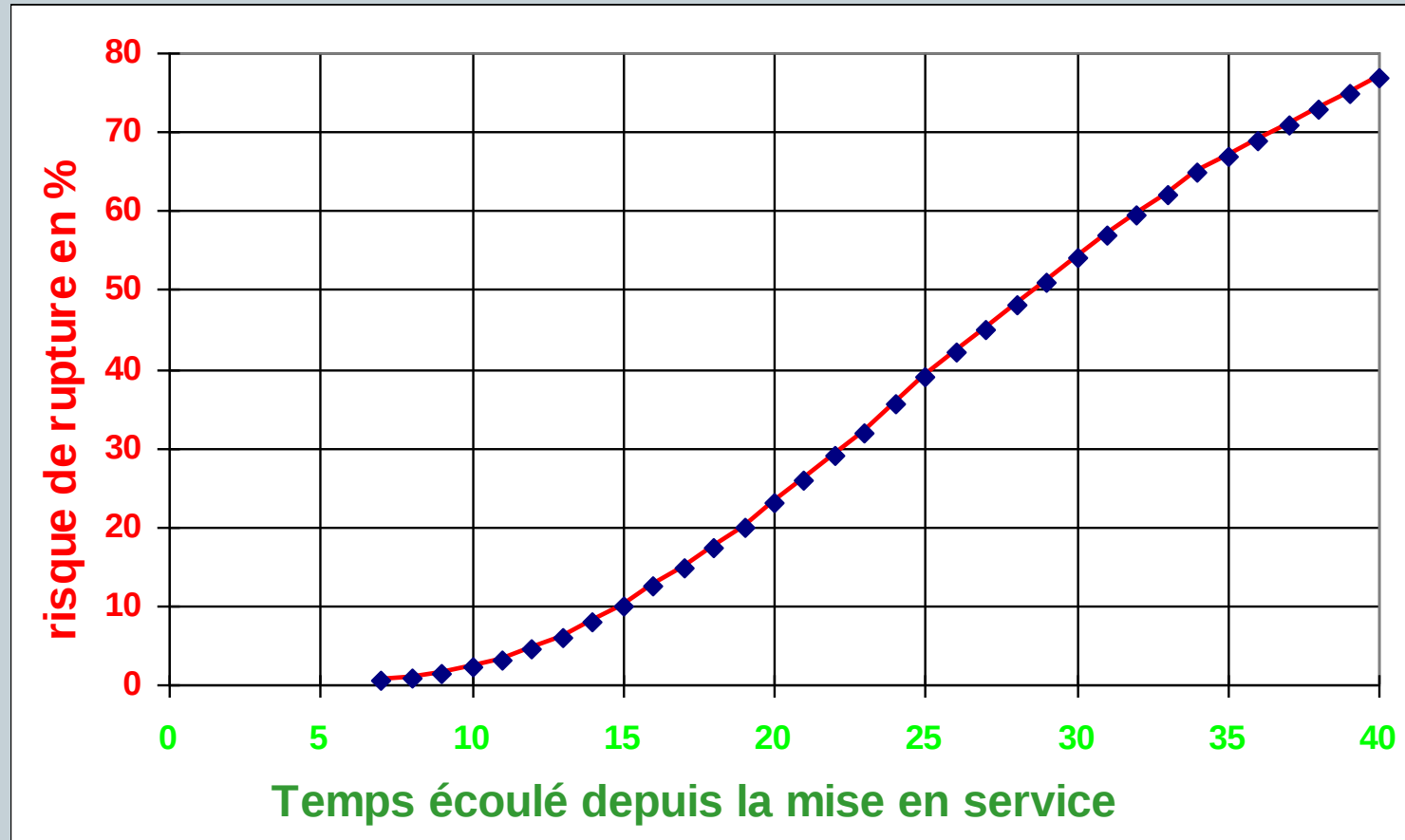
Discontinuite : 0.8



DIMENSIONNEMENT DES CHAUSSEES



Calcul des sollicitations admissibles :



DIMENSIONNEMENT DES CHAUSSEES



Catalogue des Structures Types de Chaussées Neuves (Edition 1995)

Le climat :

Quatre zones sont considérées en fonction de la précipitation annuelle moyenne.

Code	Dénomination	Précipitation
H	Humide	600
h	Semi humide	250 à 600
a	Aride	50 à 250
d	Désertique	< 50

DIMENSIONNEMENT DES CHAUSSEES



Catalogue des Structures Types de Chaussées Neuves (Edition 1995)

Environnement géotechnique :

Deux zones sont considérées :

Zone 1

où les problèmes de stabilité de plateforme sont réglés ou ponctuels.

Zone II

où les problèmes de stabilité de plate-forme ne permettent pas d'assurer un comportement sans risque majeur de structure de chaussée (fissuration, affaissement, etc. ...), c'est le cas des instabilités de versant et de remblai sur sol compressible.

DIMENSIONNEMENT DES CHAUSSEES



Catalogue des Structures Types de Chaussées Neuves (Edition 1995)

La portance de la plate forme support de chaussée :

Dispositifs de drainage

Les dispositifs de drainage sont de :

Type 1

- a) S'ils assurent un rabattement de nappe permanent à -1.00 m sous le niveau 1.
 - b) Si les eaux de ruissellement collectées dans les fossés ne peuvent atteindre en aucun cas les sols de niveau 1.
 - c) Si l'étanchéité de la chaussée et des accotements est assurée et maintenue.
- Ou
- c') Si le cas échéant, la conception du profil en travers prévoit le drainage rapide et sans obstacle de toutes les eaux qui ont pu pénétrer à travers la chaussée et les accotements sans risque d'imbibition des sols rencontrés en partie supérieure du niveau 1.

Type 2

Si les dispositifs de drainage ne répondraient pas aux trois points a, b, c ou c'.

DIMENSIONNEMENT DES CHAUSSEES



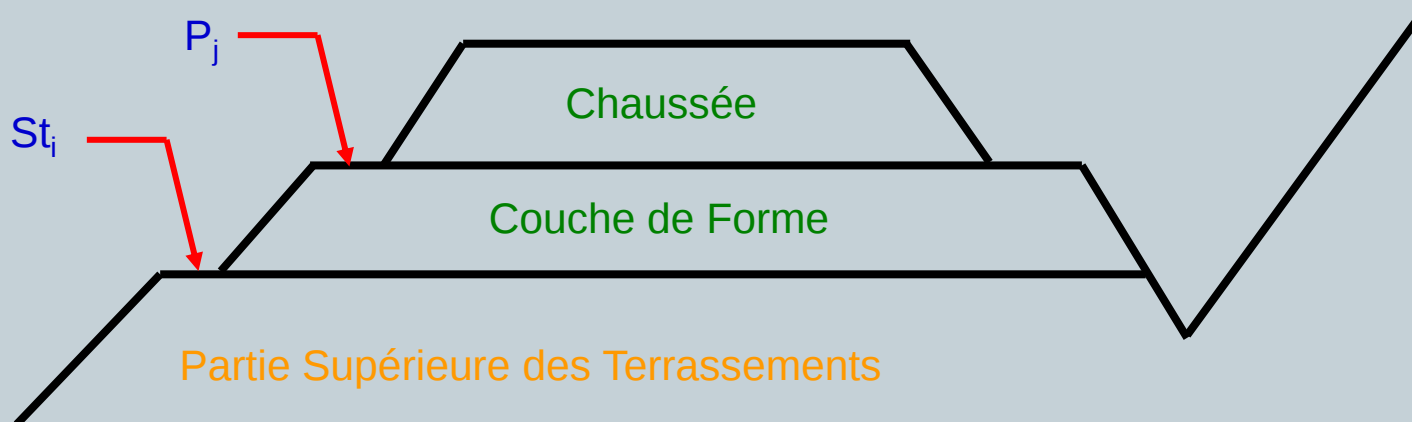
Catalogue des Structures Types de Chaussées Neuves (Edition 1995)

La portance de la plate forme support de chaussée :

C'est la portance à long terme qui est prise en compte pour le dimensionnement d'une structure de chaussée neuve.

Elle est définie :

- Au niveau 1 : partie supérieure des terrassements (St_i)
- Au niveau 2 : au sommet de la couche de forme (P_j)



DIMENSIONNEMENT DES CHAUSSEES



Catalogue des Structures Types de Chaussées Neuves (Edition 1995)

La portance de la plate forme support de chaussée :

Détermination de la portance St_i

La portance St_i est estimée à partir de la connaissance des sols de la PST et en fonction des conditions de drainage et d'environnement.

Elle est déterminée en prenant en compte les trois paramètres suivants :

- ✓ l'environnement climatique zones H, h, a, d.
- ✓ les conditions de drainage (profondeur de nappe et dispositifs de drainage existant et à adopter).
- ✓ la catégorie de sols (I – II – III – IV et V)

La détermination de la portance St_i se fera essentiellement à partir des valeurs de poinçonnement (CBR) et des essais de déformabilité (Module EV_2)

DIMENSIONNEMENT DES CHAUSSEES



Catalogue des Structures Types de Chaussées Neuves (Edition 1995)

La portance de la plate forme support de chaussée :

Détermination de la portance St_i

Catégorie de sol		Description	Classification
N°	Désignation		
I	Sol très sensible à l'eau	Dont la consistance varie très rapidement en présence d'eau	A1, A2, A3, A4, TfAi
II	Moyennement à faiblement sensible à l'eau	Dont la consistance varie plus lentement en présence d'eau	B2, B4, B5, B6, C1Ai, C1B5, C1B6, C2Ai, C2B5, C2B6, TcAi, TfBi, TcB6
III	Non sensible à l'eau	Dont les éléments fins sont insensibles à l'eau	B1, D1, TcB1, TcB2, TcB4, TcB5, D2, B3, TcB3
IV	Grossiers graveleux	Dont les éléments fins sont peu à non argileux ou en proportion très réduite	D3, C1B1, C1B2, C1B3, C1B4, C2B1, C2B2, C2B3, C2B4.
V	Sols volumétriquement instables	Sols tirseux qui présentent très forts retraits (fissuration) lorsque la teneur en eau diminue.	TxA3, TxA4.

DIMENSIONNEMENT DES CHAUSSEES



Catalogue des Structures Types de Chaussées Neuves (Edition 1995)

La portance de la plate forme support de chaussée :

Détermination de la portance St_i

	Zone inondable ou nappe proche (< à 1m)	Hors zone inondable ou nappe profonde (> à 1m)				
Environnement climatique	H, h, a, d	H et h		a		d
Dispositifs de drainage		Type 2	Type 1	Type 2	Type 1	
Sols						
I	St_0	St_0	St_1 (D) St_2 (R)	St_1	St_2 St_3	St_3
II	St_1	St_1	St_2	St_2	St_3	St_3
III	St_2	St_2	St_3 à St_4			
IV	St_2 ou plus					

D : Déblai

R : Remblai

(1) : Le choix St_2 ou St_3 se fait à partir de l'étude CBR avant immersion

(2) : Le choix St_3 ou St_4 se fait par essai de déformabilité

DIMENSIONNEMENT DES CHAUSSEES



Catalogue des Structures Types de Chaussées Neuves (Edition 1995)

La portance de la plate forme support de chaussée :

Détermination de la portance St_i

1 - Cas des sols fins classes A et B :

La portance à long terme des sols fins qui ont moins de 30 % des éléments supérieurs à 20 mm peut être évaluée à l'aide d'un essai CBR.

La valeur d'indice CBR à prendre en compte correspondant à :

- Une compacité de 95 % de l'OPM sur un moulage réalisé à la teneur en eau optimale Proctor et ayant subi une imbibition de 4 jours pour les zones climatiques H, h, a.
- Une compacité de 95 % de l'OPM avec poinçonnement à la teneur en eau de moulage optimum Proctor pour la zone climatique d en dehors des zones inondables.

St_i	St_0	St_1	St_2	St_3	St_4
Indice CBR	≤ 4	≥ 6	≥ 10	≥ 15	≥ 25

DIMENSIONNEMENT DES CHAUSSEES



Catalogue des Structures Types de Chaussées Neuves (Edition 1995)

La portance de la plate forme support de chaussée :

Détermination de la portance St_i

2 - Cas des sols graveleux et grossiers :

Pour les sols à plus de 30 % d'éléments supérieurs à 20 mm et les sols classés C et D, y compris les sables, les essais CBR sont soit non réalisables soit peu représentatifs c'est pourquoi on estime la portance à long terme à partir des essais de déformabilité.

Indice	St_1	St_2	St_3	St_4
Essai à la plaque EV 2 (bars)	100 à 500	500 à 1200	1200 à 2000	> 2000

DIMENSIONNEMENT DES CHAUSSEES



Catalogue des Structures Types de Chaussées Neuves (Edition 1995)

La portance de la plate forme support de chaussée :

Portance minimale

Type de structure	Trafic	Portance P_j minimale
Souple	TPL ₁ à TPL ₃	P_1
	TPL ₄ à TPL ₆	P_2
Semi-rigide	TPL ₃ à TPL ₄	P_3
	TPL ₅ à TPL ₆	P_2
Rigide	Tous trafics	P_1

DIMENSIONNEMENT DES CHAUSSEES



Catalogue des Structures Types de Chaussées Neuves (Edition 1995)

La portance de la plate forme support de chaussée :

Détermination de la portance P_j

La détermination de la portance P_j dépend :

- de la nature et l'épaisseur de la couche de forme ;
- de la portance au niveau 1 (St_i)

■ Si $St_i < P_j$ minimale

Il faut prévoir une couche de forme afin d'atteindre la portance minimale exigée.

Dans ce cas on a :

$$P_j = P_j \text{ minimale}$$

■ Si $St_i \geq P_j$ minimale

la couche de forme n'est pas obligatoire.

Dans ce cas on a :

$$P_j = St_i = P_i$$

DIMENSIONNEMENT DES CHAUSSEES



Catalogue des Structures Types de Chaussées Neuves (Edition 1995)

La portance de la plate forme support de chaussée :

Détermination de la portance P_j

Trafic	Nature des matériaux	Classe St_i	Epaisseur couche de forme	P_j
TPL_1 à TPL_3	F_2	St_0	10 AC + 30 F_2 = 40 cm	P_1
		St_1	10 AC + 20 F_2 = 30 cm	P_2
		St_i ($i > 1$)	+ 30 cm F_2	$P_i + 1$
TPL_4 à TPL_6	F_1	St_0	10 AC + 40 cm F_1	P_2
		St_1	10 AC + 25 cm F_1	P_2
		St_i ($i > 1$)	+ 40 cm F_1	$P_i + 1$
	MT	St_0	40 cm	P_2
		St_1	25 cm	P_2
		St_1	+ 50 cm	P_3

DIMENSIONNEMENT DES CHAUSSEES



Catalogue des Structures Types de Chaussées Neuves (Edition 1995)

La portance de la plate forme support de chaussée :

Matériaux classés en F2 : Parmi les sols susceptibles de répondre aux critères ci-dessus, on peut citer :

- les sols non sensibles à l'eau : B1, D1, TcB, C1B1, C1B3, C2B
- une partie des sols faiblement sensibles à l'eau : TcA, TfB2, TfB4, B2 et B4.

Matériaux graveleux F1 : Sont utilisables en tant que matériaux F1, les sols suivants : B11, B31, B41, D11, D21, D31, C1B1, C1B3, C2B11, C2B31, C2B21, C2B41, C2B51, C2B21, C1B41, C1B51, TcB.

Matériaux MT :

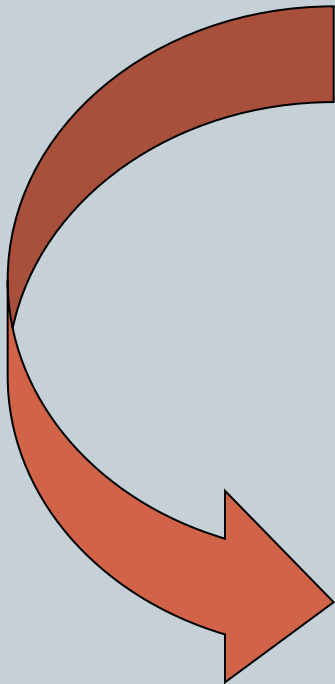
- Les matériaux traités à la chaux sont des sols fins argileux pour lesquels on exige un CBR à 95 % de l'OPM et après quatre jours d'imbibition supérieur à 30 ;
- Les matériaux fins traités à la chaux et au ciment et les matériaux graveleux et sableux traités au ciment pour lesquels un couple module – résistance à la traction (E/R.T) à 90 jours est exigé, comme indiqué dans le graphique ci-dessus.

DIMENSIONNEMENT DES CHAUSSEES



Catalogue des Structures Types de Chaussées Neuves (Edition 1995)

Les structures de chaussées correspondent au couple (TPLi , Pj)



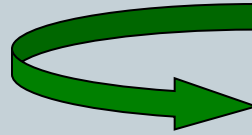
Plusieurs choix de structures sont possibles

6 fiches de structures

DIMENSIONNEMENT DES CHAUSSEES



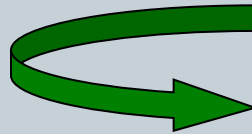
Détermination de la classe de trafic TPL_i



Portance P_j minimale

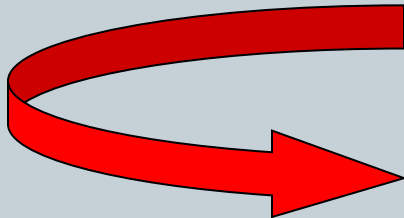
Détermination de la portance St_i

Comparaison de St_i et P_j minimale



Nature et épaisseur de la CdF

Détermination de la portance P_j



Choix des structures possibles



Chapitre 4 :

Conception routière

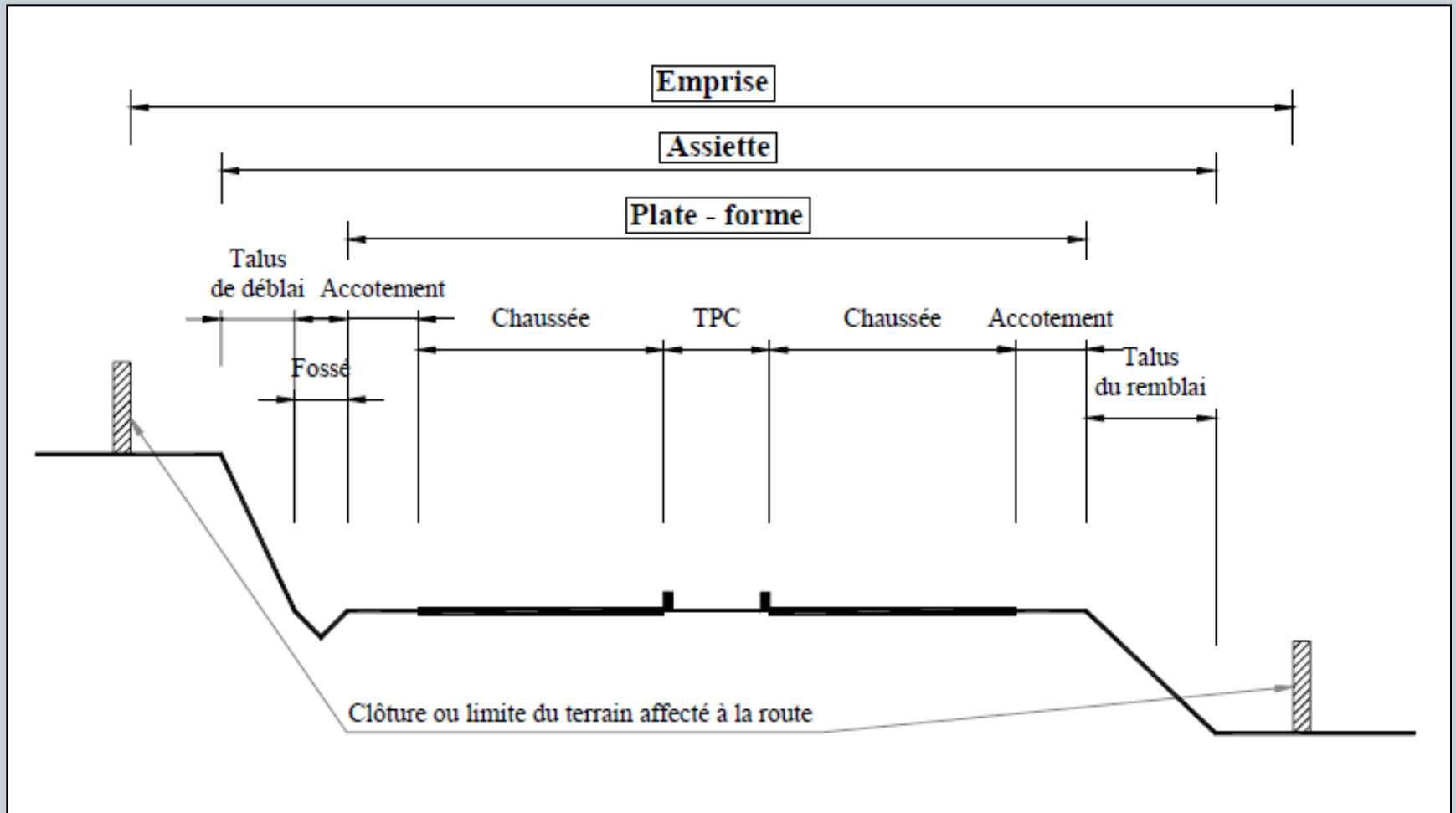
Le tracé routier



Un tracé routier est défini par un certain nombre de plans :

- un tracé en plan avec tous les détails, il devient le plan général.
- un profil en long.
- une succession de profils en travers.

Le tracé routier



Le tracé routier



Critères de base :

Les critères de base qui guident pour le choix des caractéristiques techniques sont :

- La fonction de la route : => classification ;
- Le trafic ;
- L'environnement de la route : (Topo, Géologie, hydrologie,...).

Il est toutefois indispensable, en vue de l'homogénéité du réseau d'introduire une certaine normalisation.

Le tracé routier



Catégories de route :

On considère 4 catégories de routes et des routes hors catégories. Ces dernières sont formées des routes de montagne ou des routes très peu circulées.

Catégorie	Exceptionnelle	1 ^{ère} Catégorie	2 ^{ème} Catégorie	3 ^{ème} Catégorie	Hors Catégorie
Vb (Km/h)	120	100	80	60	40

Le tracé routier



Caractéristiques de base :

- Profil en travers

Largeur de la chaussée, largeur de la plateforme, pente des talus.

- Profil en Long

Déclivités maximales.

Rayons de raccordement saillant et rentrant.

- Tracé en Plan

Rayons de courbure en plan.

- Ouvrages d'assainissement et dispositifs de drainage

Buses, dalots, radiers, OA.

Tranchées drainantes, drains en arrête de poisson, tapis drainants,...

- Structure de chaussée.

Le tracé routier



Distance de freinage :

C'est la distance que parcourt le véhicule pendant le temps de freinage qui annule totalement sa vitesse initiale.

Avec : f : le coefficient de frottement $\Rightarrow f = 0,4$

V : vitesse en m/s = $V/3,6$ km/h

g : l'accélération = $9,81$ m/s²

On a : $d' = V^2/100$

Si la route monte ou descend, i étant la déclivité, la formule s'écrit :

$d' = V^2/100 \times 1/(1 \pm 2,5 i)$

Le tracé routier



Distance d'arrêt :

C'est la distance de freinage ajoutée à la distance parcourue pendant le temps perception - réaction avant le début de freinage.

Le temps perception – réaction est l'intervalle qui s'écoule entre l'instant où devient perceptible l'obstacle et le temps de freinage.

On admet un temps de réaction de *3/4 de seconde quand l'attention du conducteur est concentrée.*

Ce temps est porté à *1,5 s quand l'attention du conducteur est diffuse.*

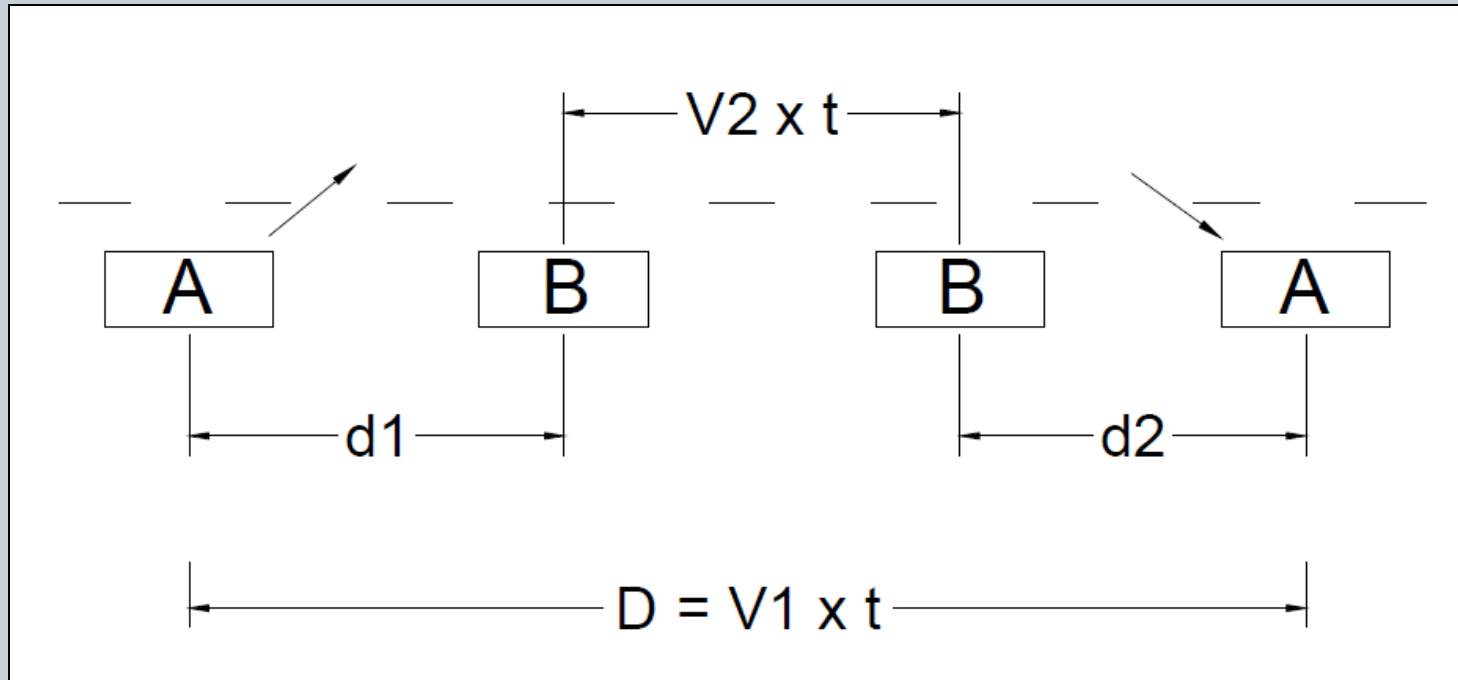
$$d_{ad} = 0,01 V^2 + 0,4 V / \text{Att. Diffuse}$$

$$d_{ac} = 0,01 V^2 + 0,2 V / \text{Att. Concentrée}$$

Le tracé routier



Distance de dépassement :



$$D = \frac{2V_1(0,2V_1 + 8)}{\Delta V}$$

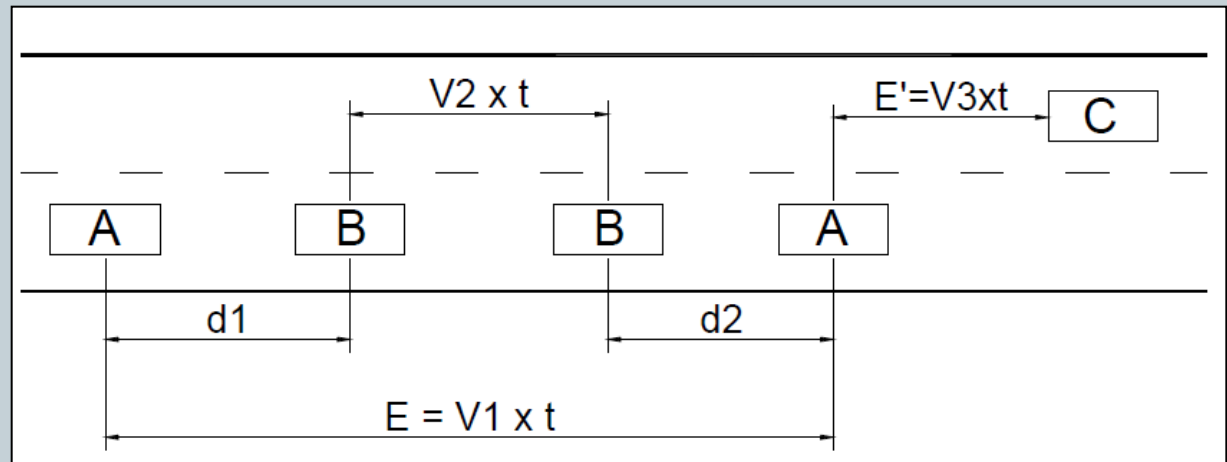
Le tracé routier



Distance de visibilité de dépassement :

Au Maroc, l'encombrement fréquent des artères principales invite à considérer le cas d'un véhicule en attente derrière un véhicule lent plutôt que celui d'un véhicule qui trouve la voie libre et peut doubler sans avoir à ralentir. $D_{vd} = 500$ m avec $V=80$ km/h et $V = 50$ km/h.

$$D_{vd} = \frac{V_1 (d_1 + d_2)}{V_1 - V_2} + \frac{V_3 (d_1 + d_2)}{V_1 - V_2}$$



Obligatoire : permettre à l'usager la visibilité à la distance d'arrêt.

Souhaitable : permettre à l'usager la visibilité à la distance de dépassement.

Le tracé routier



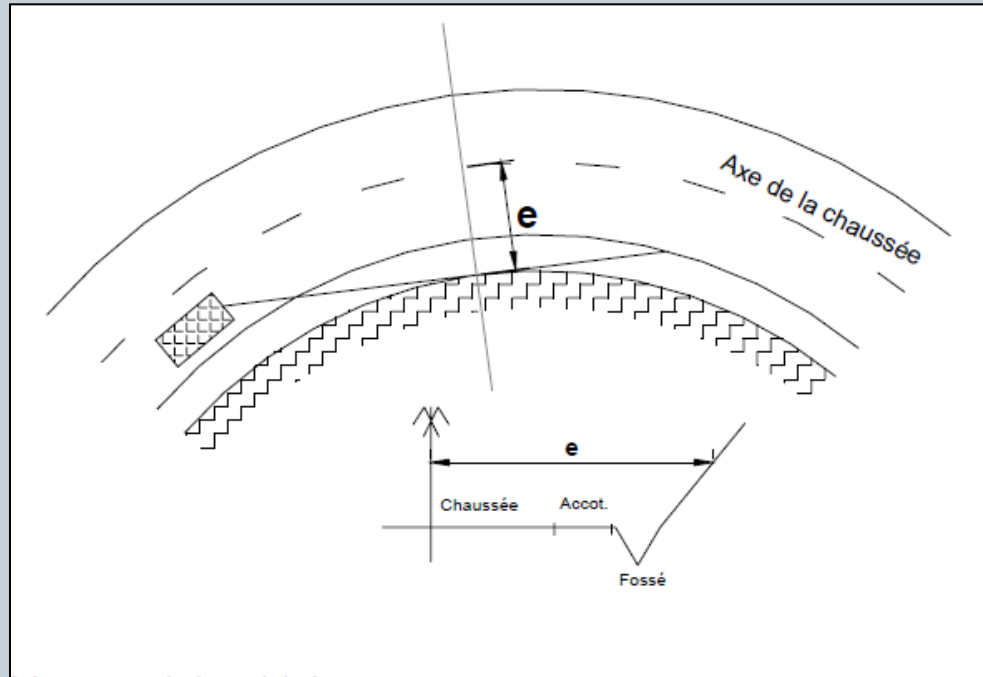
Visibilité à l'intérieur d'un virage :

$$e = da^2/(8R)$$

Avec :

da = distance d'arrêt

e = distance du talus à l'axe de la chaussée (flèche).



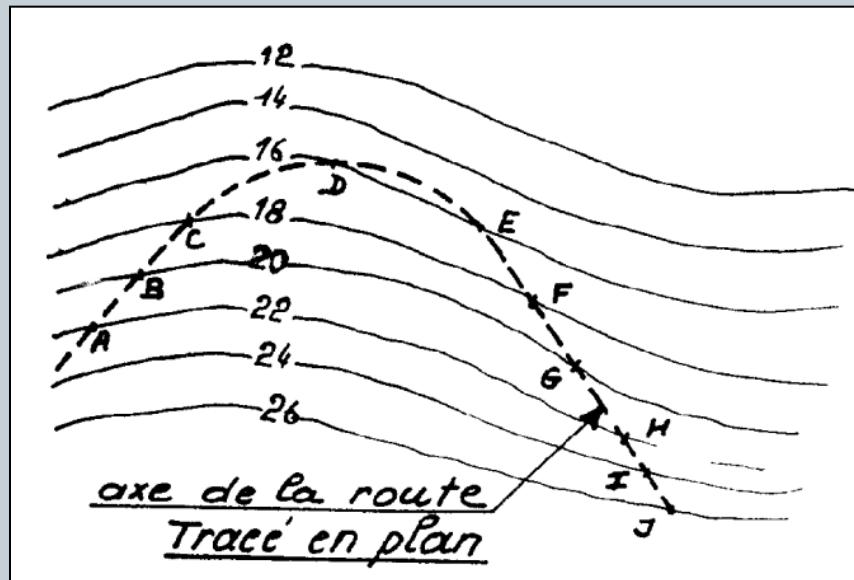
Le tracé routier



Tracé en plan :

L'axe de la route est la courbe gauche située à égale distance des bords extérieurs de la route.

Il s'agit d'une succession d'alignements (lignes droites) et d'arcs circulaires reliés entre eux par des raccordements.



Le tracé routier



Tracé en plan :

Le tracé dépend de très nombreux paramètres :

- catégorie de la route (vitesse de référence).
- passages obligés (villes, échangeurs, ouvrages d'art, etc.)
- zones à éviter (zones protégées, agglomérations, etc.)...

En fait, le tracé final est le résultat d'un long processus de réflexion et reste dans tous les cas un compromis entre :

- « l'idéal » de la ligne droite (monotonie!).
- les contraintes des lignes de niveau (optimisation entre le dénivelé du terrain rencontré et la déclivité maximale possible de l'ouvrage).
- les contraintes des rayons de courbure.
- le coût des terrassements (environ le quart du prix d'un ouvrage type autoroutier) et/ou d'autres ouvrages d'art conséquents.

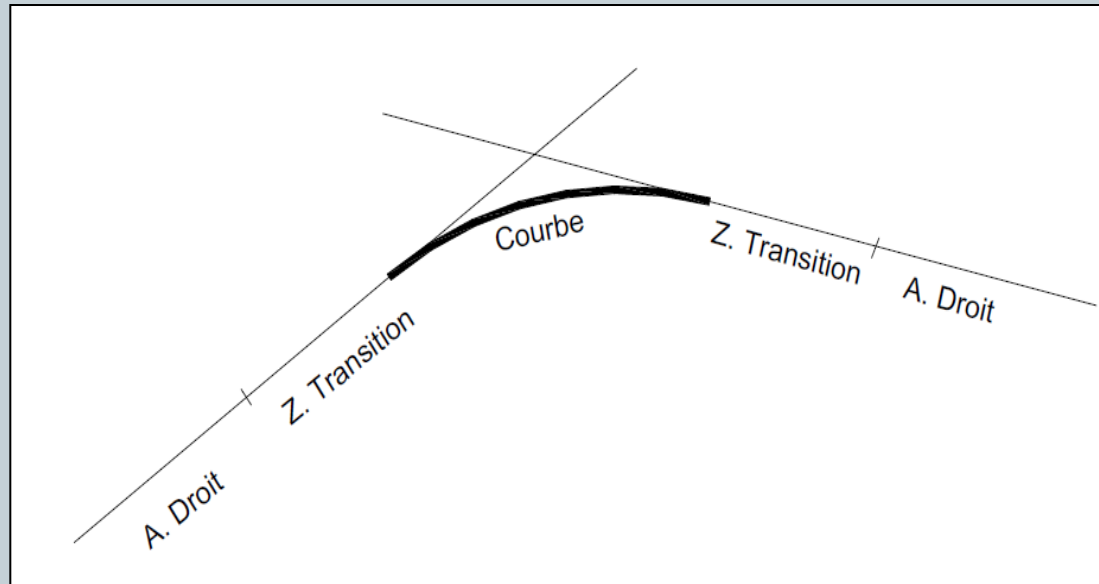
Le tracé routier



Tracé en plan :

La courbure est limitée pour des raisons de :

- visibilité
- stabilité et confort (même si introduction du dévers pour s'opposer à la force centrifuge)
- inscription des véhicules longs (cas particulier des lacets de montagne, etc.)



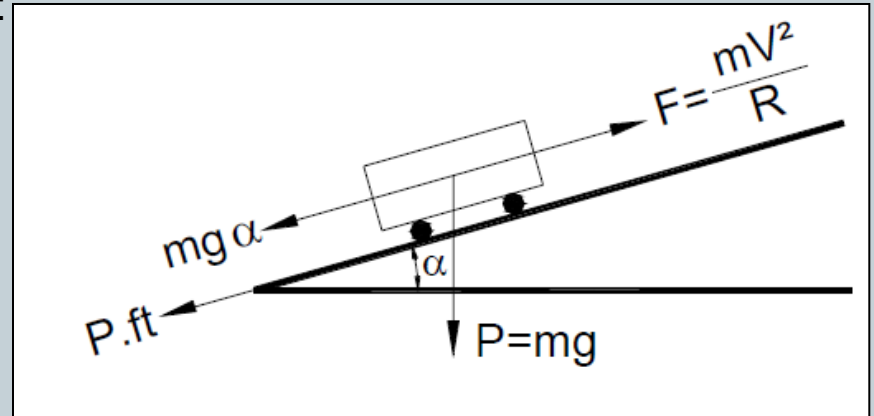
Le tracé routier



Tracé en plan :

Rayon de courbure en plan :

Les forces en présence qui équilibrent le véhicule dans une courbe relevée à l'inclinaison α se présentent suivant le schéma ci-dessous :



Soit : P : le poids du véhicule ($P=mg$).

F : la force centrifuge produite lors du déplacement de la masse m du véhicule à la vitesse V sur la trajectoire circulaire de rayon R .

α : l'angle que fait le plan de roulement par rapport à l'horizontal : **le devers**.

ft : la réaction transversale qui maintient le véhicule sur sa trajectoire.

Le tracé routier



Tracé en plan :

Rayon de courbure en plan :

$$R \geq \frac{V^2}{127 (a + ft)}$$

V en Km/h et a en %.

Pour les Normes Marocaines, on a défini pour chaque catégorie 2 valeurs limites du rayon :

- R_{MN} : qui assure la stabilité d'un véhicule dans une courbe déversée à 4 %.
- R_{MA} : qui assure la stabilité d'un véhicule dans une courbe déversée à 7 %.

Vb / C	120 / Exp	100 / 1 ^{ère} C	80 / 2 ^{ème} C	60 / 3 ^{ème} C	40 / H.C
R_{MN}	1000	500	250	125	30
R_{MA}	700	350	175	75	15

Le tracé routier



Tracé en plan :

- les tracés routiers se composent en première approximation d'alignements droits et de courbes circulaires.
- deux courbes de même sens ou de sens contraire étant obligatoirement séparées par un alignement droit de longueur appropriée.

Dans les alignements droits, les chaussées ont un profil en travers constitué :

- soit de 2 versants plans à 2,5 % de pente vers l'extérieur avec un raccordement parabolique central de 1m de largeur.
- soit d'un versant plan unique à 2,5 % (disposition réservée en principe aux chaussées unidirectionnelles).

Dans les courbes, le profil en travers présente un versant plan de pente uniforme vers l'intérieur de la courbe, dit devers.

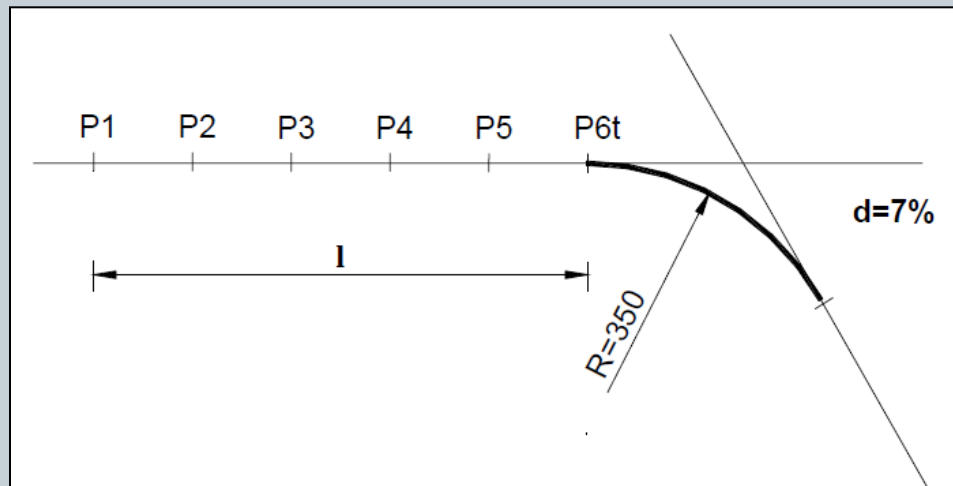
Le tracé routier



Tracé en plan :

Longueur de raccordement devers : l'objectif du raccordement consiste à introduire progressivement l'arc circulaire et son dévers (ou inversement si sortie de courbe) afin d'éviter des modifications brutales de l'équilibre du véhicule (recherche d'une variation progressive et continue de la force centrifuge subie par l'utilisateur).

Pour des raisons de conformité, le devers est introduit à raison de 2% par seconde de temps de parcours à la vitesse de base de la catégorie considérée. Ce taux de variation peut être porté à 4% pour les routes de 3ème Catégorie et Hors catégorie.

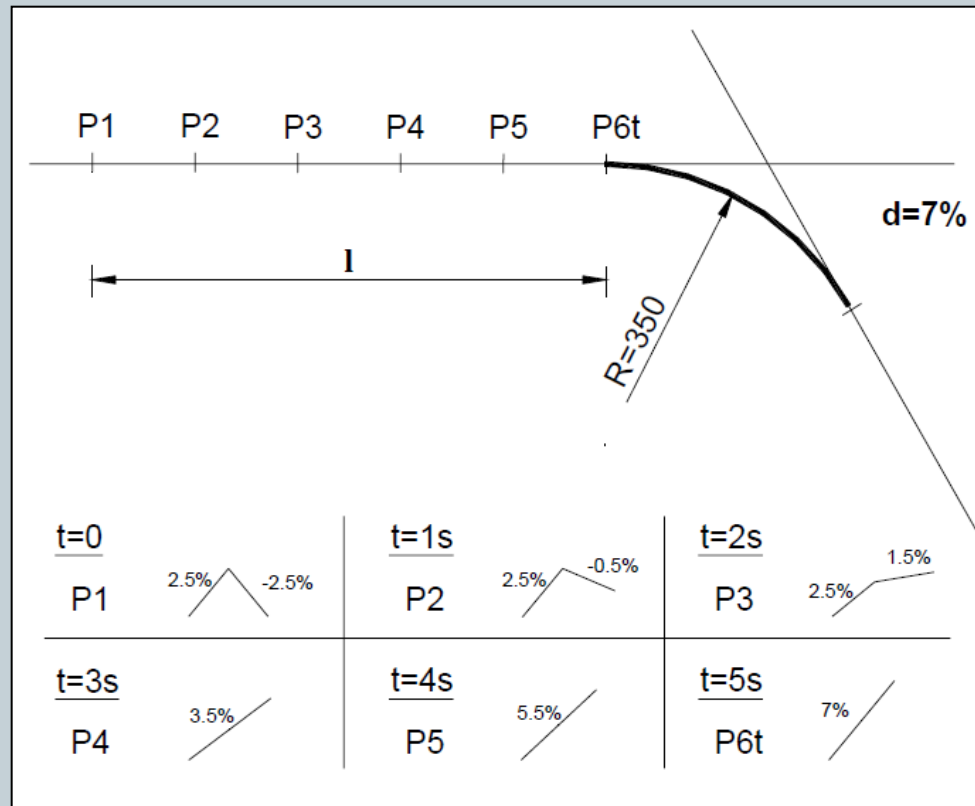


Le tracé routier



Tracé en plan :

Longueur de raccordement devers :



Le tracé routier



Tracé en plan :

Longueur de raccordement devers :

$$1 \text{ s} \longrightarrow 2 \%$$

$$\Rightarrow t = \frac{(d + 2,5)}{2}$$

$$t \text{ s} \longrightarrow (d + 2,5) \%$$

$$\Rightarrow l = V \cdot t = \frac{V}{3,6} \left(\frac{d + 2,5}{2} \right)$$

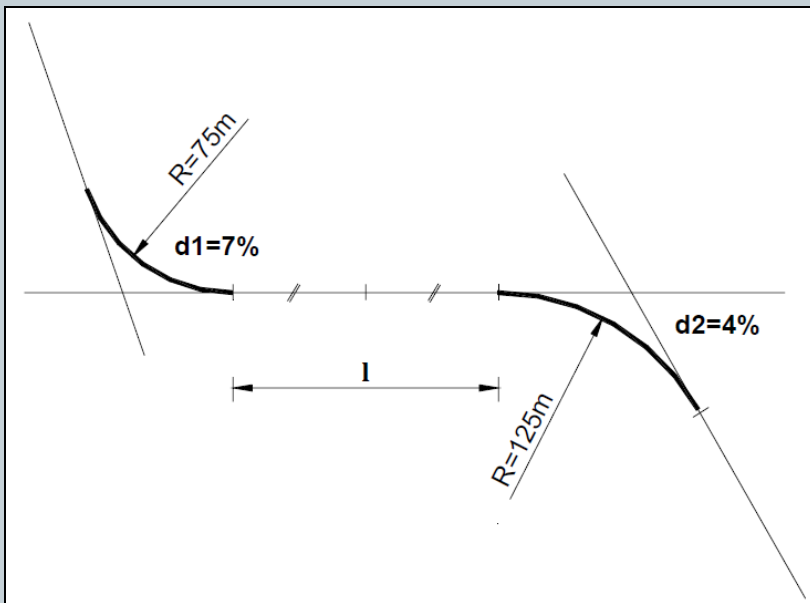
$$\Rightarrow \boxed{l = \frac{V(d + 2,5)}{7,2}}$$

Le tracé routier

Tracé en plan :

Longueur de raccordement devers :

Exemple : 3ème catégorie - introduction à 4%



En T1 : 7% / , en T2 : 4% \

$$l_1 = \frac{V}{3,6} \cdot \frac{d_1}{4}$$

$$l_2 = \frac{V}{3,6} \cdot \frac{d_2}{4}$$

$$\Rightarrow l = \frac{V}{3,6} \cdot \frac{d_1 + d_2}{4}$$

Le tracé routier



Tracé en plan :

Devers - rayon :

Excp		1 ^{ère} C		2 ^{ème} C		3 ^{ème} C	
R	d%	R	d%	R	d%	R	d%
700	7%	350	7%	175	7%	75	7%
750	6%	375	6%	200	5.5%	80	6.5%
800	5.5%	400	5.5%	225	4.5%	90	6%
850	5%	425	5%	250	4%	100	5%
900	4.5%	450	4.5%	275	3.5%	110	4.5%
950	4.5%	475	4.5%	300	3%	120	4%
1000	4%	500	4%	325	3%	125	4%
1050	3.5%	525	3.5%	350	2.5%	130	4%
1100	3.5%	550	3.5%	>350	Prof. Normal	140	3.5%
1150	3.5%	575	3.5%			150	3%
1200	3%	600	3%			160	3%
1250	3%	625	3%			170	2.5%
1300	3%	650	3%			175	2.5%
1350	2.5%	675	2.5%			>175	Prof. Normal
1400 à 2000	2.5%	700 à 1000	2.5%				
>2000	Prof. Normal	>1000	Prof. Normal				

Le tracé routier



Tracé en plan :

Devers - rayon : valeurs intermédiaires :

Les valeurs intermédiaires sont calculées à partir des formules d'interpolation ci-après, et arrondi au plus proche à 0,5% près :

$$d = \frac{1}{0,33 \cdot 10^{-3} \cdot R - 0,092} - 0,2 \quad \text{pour } C. \text{ Exceptionnelle}$$

$$d = \frac{1}{0,66 \cdot 10^{-3} \cdot R - 0,092} - 0,2 \quad \text{pour } 1^{\text{ère}} C$$

$$d = \frac{1}{1,32 \cdot 10^{-3} \cdot R - 0,092} - 0,2 \quad \text{pour } 2^{\text{ème}} C$$

$$d = \frac{1}{1,11 \cdot 10^{-3} \cdot R \pm 0,028} - 2 \quad \text{pour } 3^{\text{ème}} C$$

Le tracé routier



Tracé en plan :

Raccordements à courbure progressive (C P)

C. Exp :

Si $R < 1400\text{m}$ =====> C P

Si $R \geq 1400\text{m}$ =====> C P ou A D

1^{ère} C :

Si $R < 700\text{m}$ =====> C P

Si $R \geq 700\text{m}$ =====> C P ou A D

2^{ème} C :

Si $R < 350\text{m}$ =====> C P

Si $R \geq 350\text{m}$ =====> A D

3^{ème} C :

C P facultatif et si $R < 30\text{m}$ =====> Clothoïdes interdites

Le tracé routier



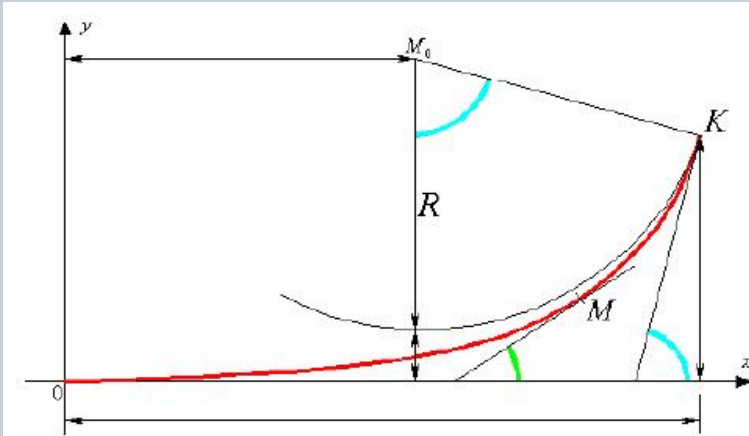
Tracé en plan :

Clothoïde :

La loi de raccordement progressive « Clothoïde » est simple : $R \cdot L = A^2 = \text{constante}$

Avec : A = paramètre-type; L = longueur curviligne; R = rayon du cercle

Elle correspond au cas d'une voiture qui roule à vitesse constante et qui tourne le volant également à vitesse constante.



Le tracé routier



Tracé en plan :

Clothoïde :

Paramètre-type :

Catégorie	Paramètres - type (A)
Excp	360 m
1 ^{ère} C	220 m
2 ^{ème} C	140 m
3 ^{ème} C	80 m
H. C.	40 m (peut être ramené à 1,25R pour les plus petits rayons)

Le tracé routier



Tracé en plan :

Calcul des éléments d'un Tracé en Plan :

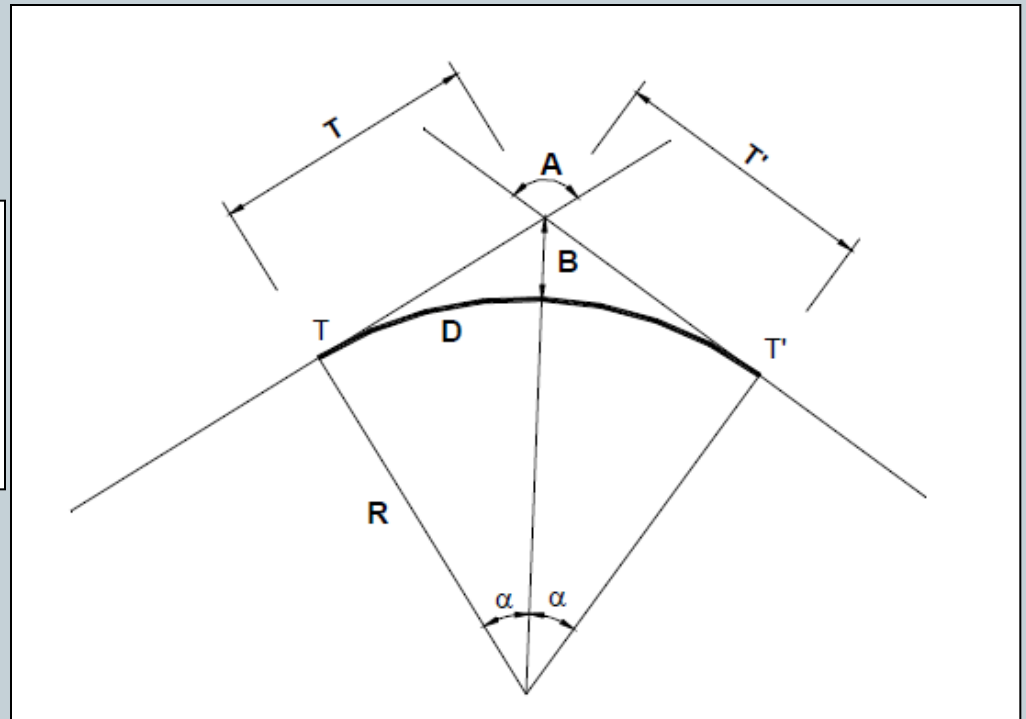
$$\alpha = \frac{200 - A}{2}$$

α et A : en grad

$$T = T' = R \operatorname{tg} \alpha$$

$$B = R \left(\frac{1}{\cos \alpha} - 1 \right) = \sqrt{R^2 + T^2} - R$$

$$D = \frac{\pi R \alpha}{100}$$



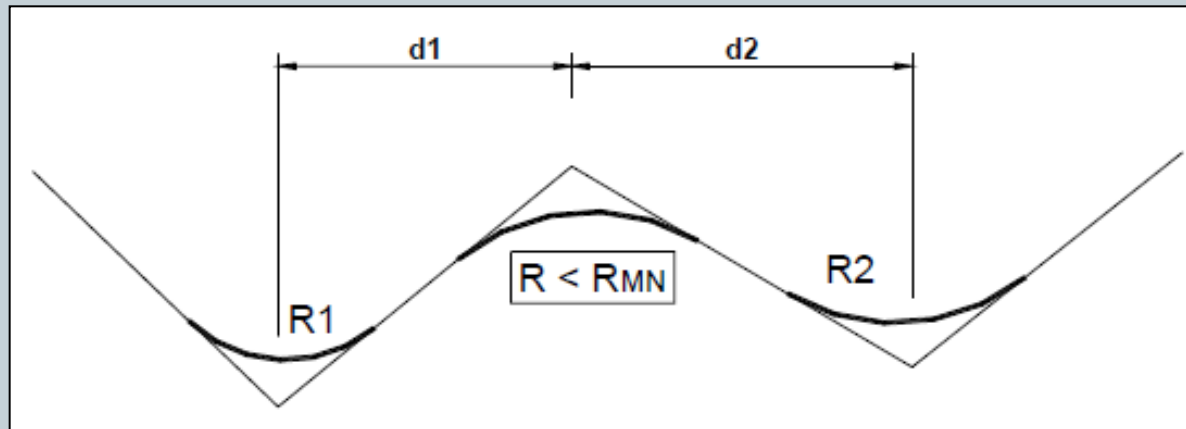
Le tracé routier



Tracé en plan :

Règles de continuité :

pour faire usage d'un rayon $R < R_{MN}$, il faut que : $(R1/R)$ et $(R2/R)$ soit $< (R_{MN}/R_{MA})$



Catégorie	Exp.	1 ^{ère} C	2 ^{ème} C	3 ^{ème} C
R concernés par la règle	1000 m	500 m	250 m	125 m
R_{MN} / R_{MA}	1 / 0,7	1 / 0,7	1 / 0,7	1 / 0,6

Le tracé routier



Tracé en plan :

Règles de continuité :

- d1 et d2 doivent être parcourus en un temps $<$ à 1 minute de temps de parcours à la vitesse de base.
- (d1 et d2 ; distances entre sommets en abscisses curvilignes).

Catégorie	Exp.	1 ^{ère} C	2 ^{ème} C	3 ^{ème} C	H.C
d1 et d2 max	2 km	1,67 km	1,33 km	1 km	0,67 km

Le tracé routier

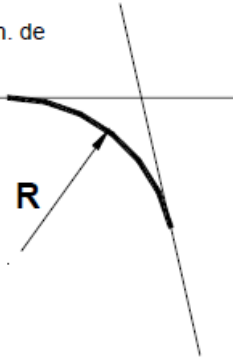


Tracé en plan :

Règles de continuité :

Le rayon d'une courbe rencontrée après un alignement droit (AD) d'une longueur correspondant à plus de 2 min. de temps de parcours à la vitesse de base ne peut être inférieur au R_{MA} de la catégorie immédiatement supérieure.

A.D. (longueur correspond à plus de 2 min. de temps de parcours à V_b)



Catégorie	Excep.	1 ^{ère} C	2 ^{ème} C	3 ^{ème} C	H.C
Longueur de l'AD au-delà de laquelle la règle est appliquée	4 km	3,33 km	2,67 km	2 km	1,34 km
Rmin à appliquer à la sortie de l'AD	-	700 m	350 m	175 m	75 m

Le tracé routier



Tracé en plan :

Règles de continuité :

Grands alignements droits = dangereux en raison de leur monotonie et des risques d'éblouissement : Longueur maximum = **3 à 5 Km**

Angle minimum entre alignements = **3°**

Le tracé routier

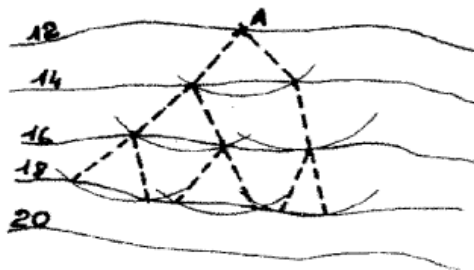
Tracé en plan :

TRACÉ THÉORIQUE

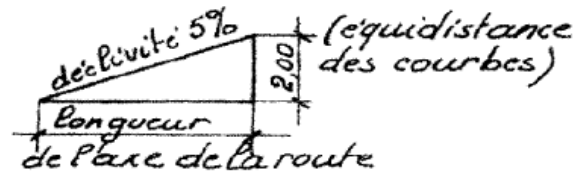
- Ce tracé est le résultat d'un compromis entre 2 solutions :
- la ligne droite : on se base sur la déclivité maxi que l'on veut impliquer à la route
 - la ligne suivant la courbe de niveau.

Principe du tracé : la longueur de l'ouvrage est indéterminée mais la déclivité maximale admise est imposée.

Méthode.



Soit par exemple un plan à l'échelle 1/2000^e comportant des courbes de niveau équidistantes de 2,00. Recherchons le tracé ayant une déclivité maximale de 5%.



Pour franchir une différence de niveau de 2,00 m avec une déclivité de 5%, le tracé doit avoir une longueur de : 40 m.

A partir du point A, on décrit sur le plan un arc de cercle de r_{em} à l'échelle (1/2000^e) qui va couper la ligne de niveau 14 en des points d'où l'on continuera les arcs de cercle. On procède ainsi jusqu'au point d'arrivée.

Le tracé routier

Tracé en plan :

Cette méthode peut conduire à un nombre élevé de solutions. Parmi celles-ci on ne retient pas :

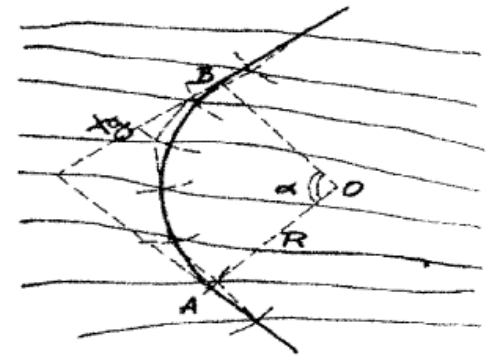
- celles conduisant à une longueur de l'ouvrage trop importante.
- les tracés trop en zig zag.

Finalement, on ne conserve qu'un nombre limité de solutions. Les tracés théoriques serviront de guide pour le tracé définitif.

TRACÉ RÉEL

Le tracé théorique obtenu par la méthode précédente est une ligne brisée qu'il convient de remplacer par des parties rectilignes et des parties courbes.

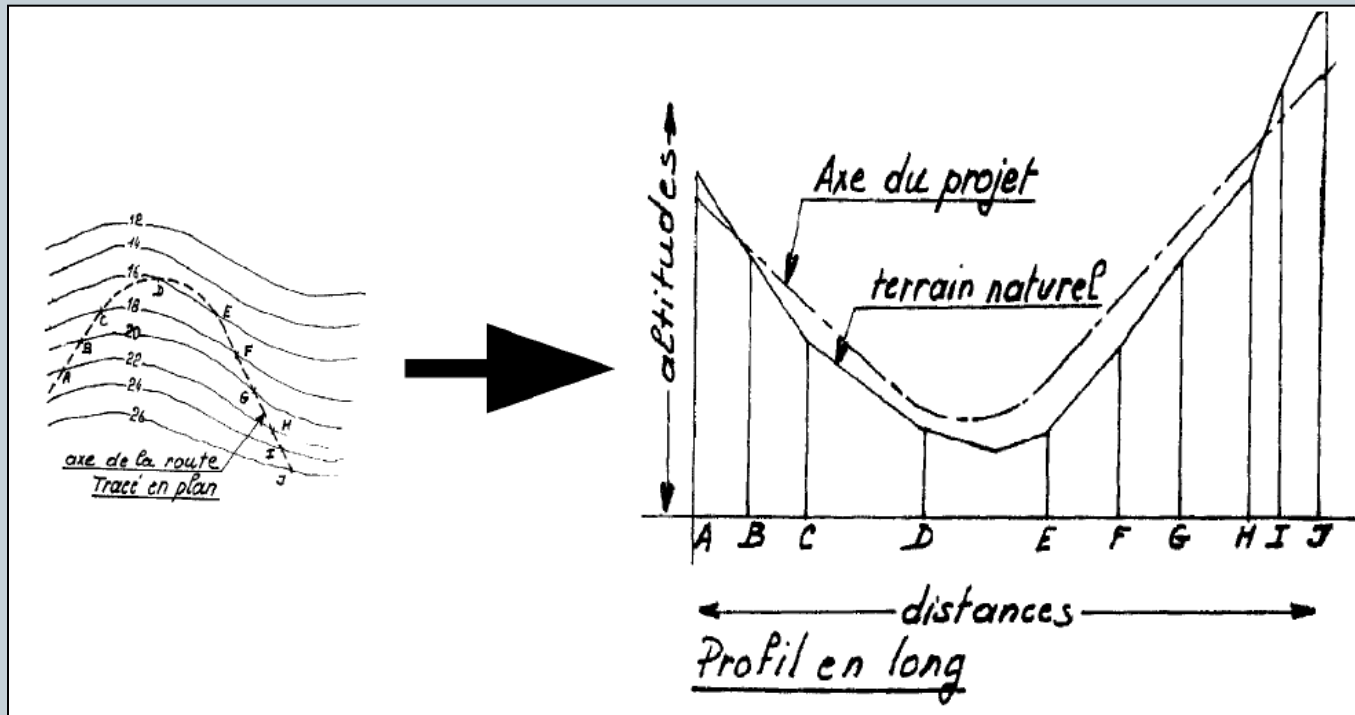
- Alignements droits.
- Courbes.



Le tracé routier

Profil en long :

Le profil en long correspond à la coupe longitudinale du terrain suivant le plan vertical passant par l'axe du tracé.



Le tracé routier



Profil en long :

Etape 1 :

Sur le tracé en plan de l'axe du projet :

- sont mesurées d'une part les distances horizontales séparant les points d'intersection de l'axe de la route avec les courbes de niveau.
- sont relevées les altitudes du terrain naturel (TN) au droit de chacun de ces points.

Etape 2 :

Dans un système d'axe orthonormé :

- report des distances horizontales suivant l'axe horizontal
- report des altitudes du terrain naturel suivant l'axe vertical

Tracé du profil en long du terrain naturel (TN)

Le tracé routier



Profil en long :

Etape 3 :

Détermination du profil en long de l'axe en superposant au profil en long du TN une courbe continue faite de succession de droite et de courbe qui doivent respecter les conditions suivantes :

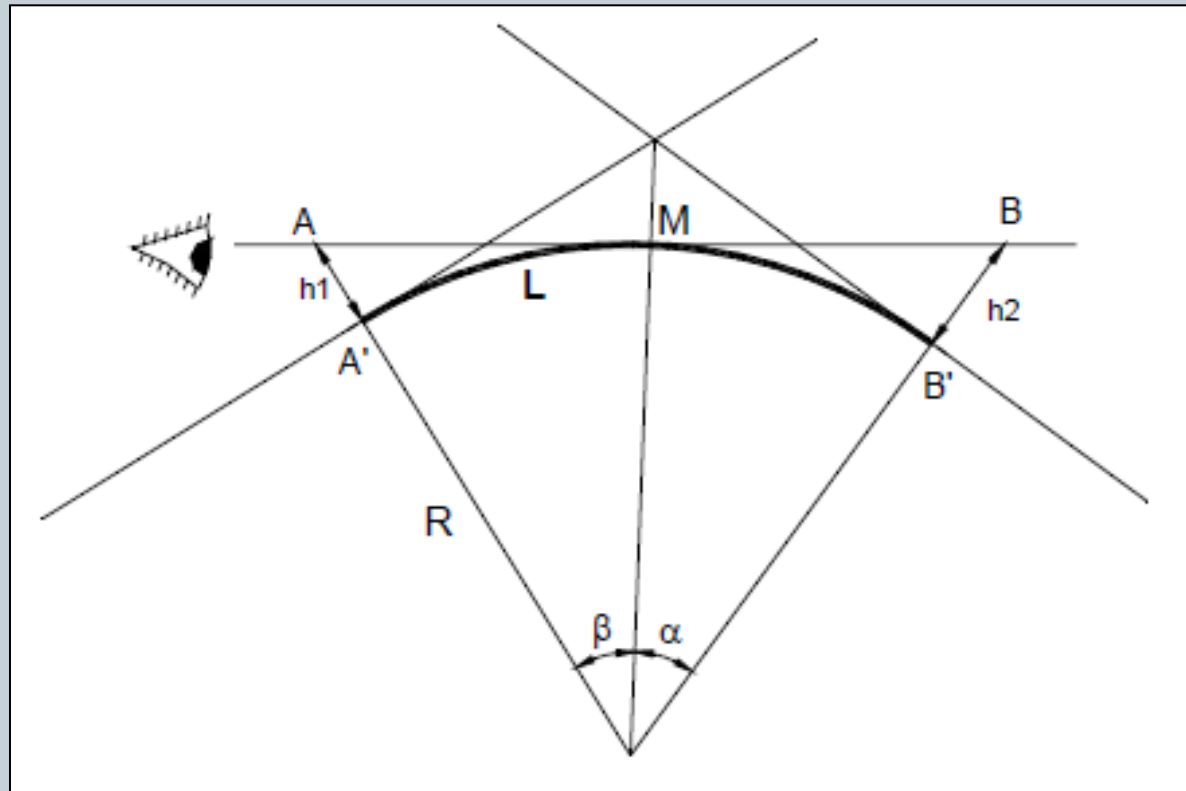
- Respect d'une déclivité maximale en fonction de la catégorie de la route.
- Garantie de visibilité au sommet des cotes,
- Garantie de confort entre deux parties de déclivités différentes et raccordements.

Le tracé routier



Profil en long :

Angles saillants :



Le tracé routier



Profil en long :

Angles saillants :

$$AM^2 = (h_1 + R)^2 - R^2 = h_1 (h_1 + 2R) \approx 2 h_1 R$$

$$BM^2 = 2 h_2 R$$

$$\Rightarrow Dv = AM + BM = \sqrt{2 R} (\sqrt{h_1} + \sqrt{h_2})$$

$$\Rightarrow R = \frac{Dv^2}{2 (h_1 + h_2 + 2\sqrt{h_1 \cdot h_2})}$$

Pour $h_1 = 1.10$ m :

Vb (km/h)	$R_{MN} (h_2=0)$	$R_{MA} (h_2=0,3)$
40	-	1.000
60	2.000	1.500
80	4.000	1.800
100	9.000	4.000
120	16.000	7.000

Les rayons de courbure des raccordements saillants donnent la visibilité à la distance d'arrêt :

- Sur obstacle sans épaisseur avec le R_{MN}
- Sur obstacle de 0,30 m avec le R_{MA}

Le tracé routier



Profil en long :

Angles rentrants : pour des raisons de confort, la valeur du rayon est fixée de manière à limiter l'accélération normale à $g/30$.

$$\gamma_N = \frac{V^2}{R} < \frac{g}{30} \quad \Rightarrow \quad R > \frac{30 V^2}{g}$$

Avec : V : vitesse en m/s = $\frac{V}{3,6}$ km/h

g : l'accélération = $9,81 \text{ m/s}^2$

D'où :

$$R > \frac{30 V^2}{127}$$

Vb	Except.	1 ^{ère} C	2 ^{ème} C	3 ^{ème} C	H.C
R_{MN}	4.000	2.500	1.500	1.000	500

Le tracé routier



Profil en long :

Règles particulières :

- L'usage de déclivité $> 4\%$ (6% pour 3^{ème} C) est interdit, à moins qu'un calcul de rentabilité en prouve le bien fondé. (pour H.C : 7% et 12%) ; Elles ne peuvent en aucun cas régner sur plus de 2km, et seront, s'il y a lieu séparées par des paliers de 2% de déclivité max.
- Les changements de déclivité de moins de 0,46% se feront sans courbes de raccordement en profil en long ($\Delta q < 0,46\% \Rightarrow R=0$).

Le tracé routier



Profil en long :

Récapitulatif des normes fondamentales des Tracés en Plan et Profils en Long :

Excp (Vb=120km/h)			1 ^{ère} C (Vb=100km/h)			2 ^{ème} C (Vb=80km/h)			3 ^{ème} C (Vb=60km/h)								
R	d%	L (2%)	R	d%	L (2%)	R	d%	L (2%)	R	d%	L (2%)	L (4%)					
700	7%	158.33	350	7%	131.94	175	7%	105.56	75	7%	79.17	39.58					
750	6%	141.67	375	6%	118.06	200	5.5%	88.89	80	6.5%	75.00	37.50					
800	5.5%	133.33	400	5.5%	111.11	225	4.5%	77.78	90	6%	70.83	35.42					
850	5%	125.00	425	5%	104.17	250	4%	72.22	100	5%	62.50	31.25					
900	4.5%	116.67	450	4.5%	97.22	275	3.5%	66.67	110	4.5%	58.33	29.17					
950	4.5%	116.67	475	4.5%	97.22	300	3%	61.11	120	4%	54.17	27.08					
1000	4%	108.33	500	4%	90.28	325	3%	61.11	125	4%	54.17	27.08					
1050	3.5%	100.00	525	3.5%	83.33	350	2.5%	55.56	130	4%	54.17	27.08					
1100	3.5%	100.00	550	3.5%	83.33	>350 Prof. Normal			140	3.5%	50.00	25					
1150	3.5%	100.00	575	3.5%	83.33				150	3%	45.83	22.92					
1200	3%	100.00	600	3%	76.39				160	3%	45.83	22.92					
1250	3%	91.67	625	3%	76.39				170	2.5%	41.67	20.83					
1300	3%	91.67	650	3%	76.39				175	2.5%	41.67	20.83					
1350	2.5%	83.33	675	2.5%	69.44				>175 Prof. Normal								
1400 à 2000	2.5%	83.33	700 à 1000	2.5%	69.44												
>2000	Prof. Normal		>1000	Prof. Normal													
Tracé en Plan			Tracé en Plan			Tracé en Plan			Tracé en Plan								
Min. Normal		1.000	Min. Normal		500	Min. Normal		250	Min. Normal		125						
Min. Absolu		700	Min. Absolu		350	Min. Absolu		175	Min. Absolu		75						
Rayons non déversés		2000	Rayons non déversés		1000	Rayons non déversés		350	Rayons non déversés		175						
Profil en Long			Profil en Long			Profil en Long			Profil en Long								
Angle Saillant			Angle Saillant			Angle Saillant			Angle Saillant								
Min. Normal		16.000	Min. Normal		9.000	Min. Normal		4.000	Min. Normal		2.000						
Min. Absolu		7.000	Min. Absolu		4.000	Min. Absolu		1.800	Min. Absolu		1.500						
Angle Rentrant			Angle Rentrant			Angle Rentrant			Angle Rentrant								
Min. Unique		4.000	Min. Unique		2.500	Min. Unique		1.500	Min. Unique		1.000						

Le tracé routier

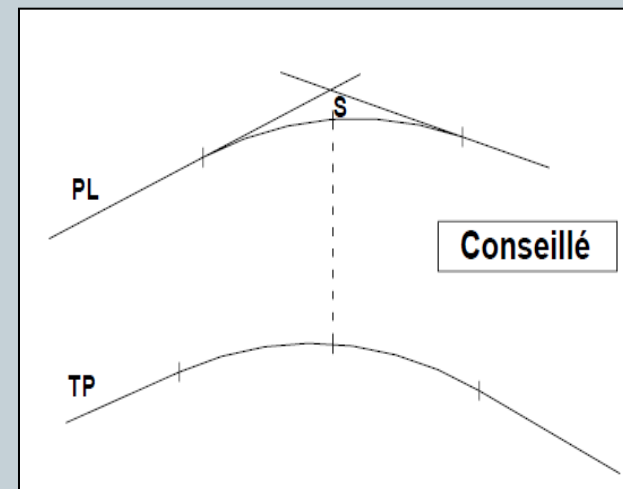
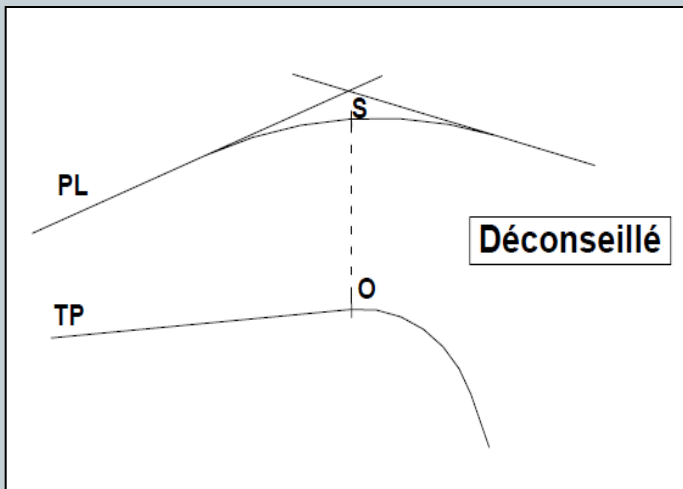


Profil en long :

Coordination du Tracé en Plan et du Profil en Long :

En angle saillant :

- Règle : Il ne faut pas coïncider le sommet de la parabole PL avec l'origine de la courbe en TP.
- Objectif : Eviter que le virage soit masqué par le sommet de la parabole.

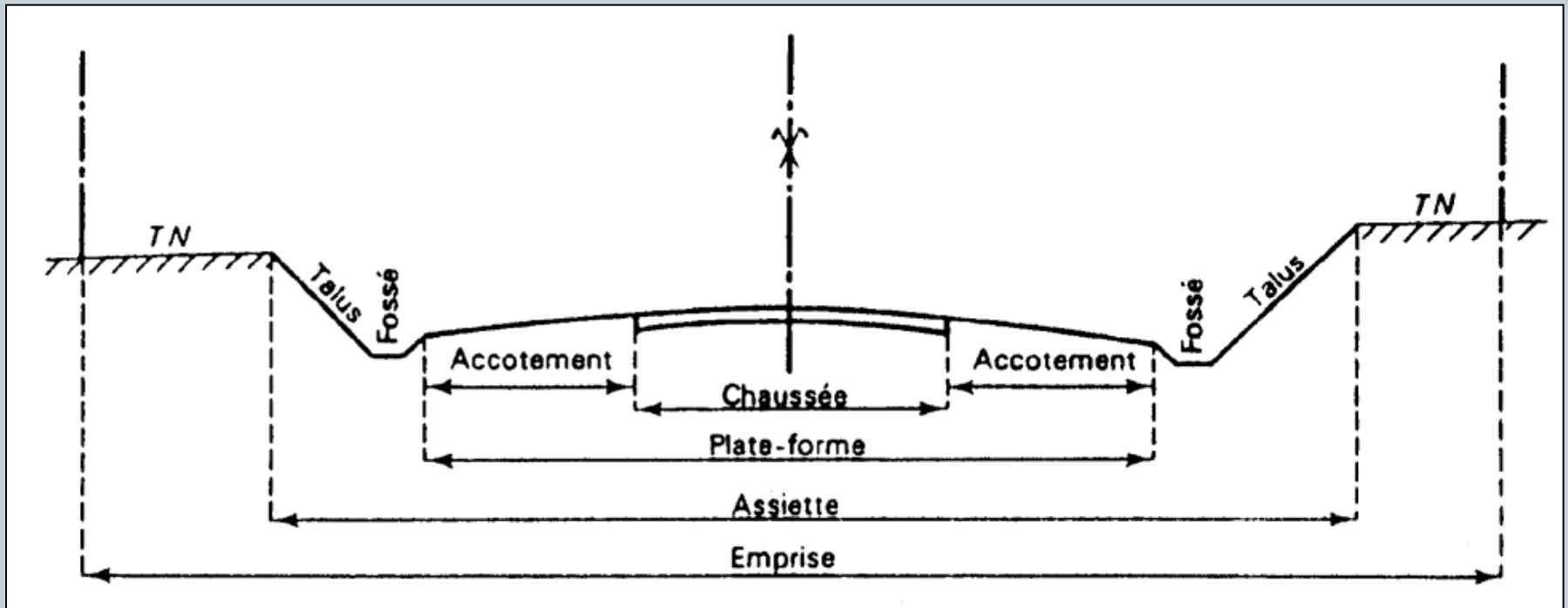


Le tracé routier



Profil en travers :

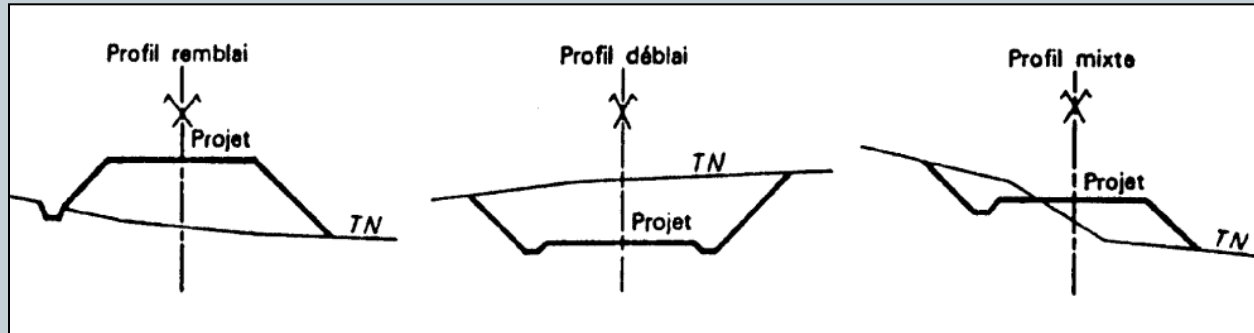
Le profil en travers est une coupe transversale de l'ouvrage selon un plan vertical perpendiculaire à l'axe de la chaussée.



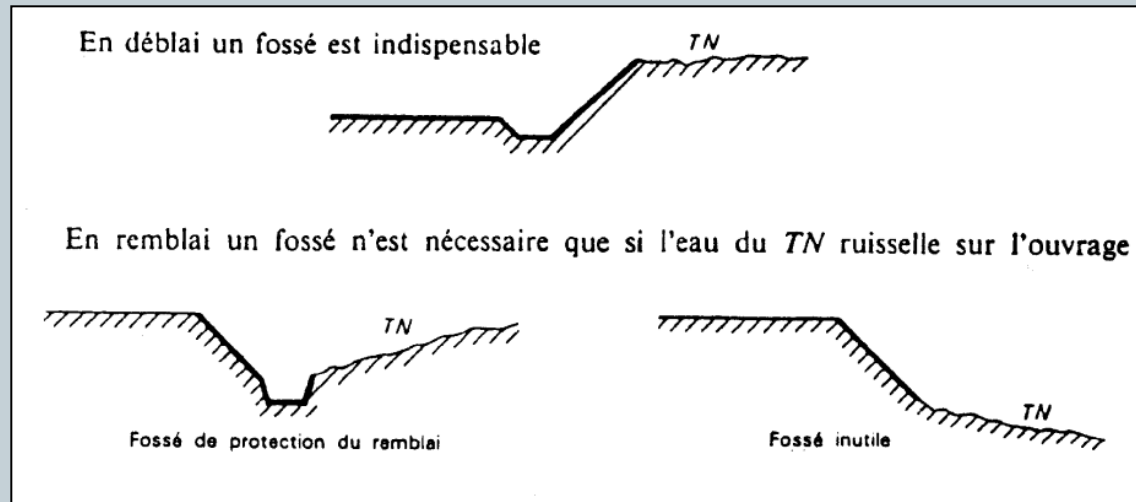
Le tracé routier



Profil en travers :



Fossés : tranchées creusées dans le terrain pour l'écoulement des eaux. Pente longitudinale continue obligatoire.



Le tracé routier



Profil en travers :

Fonctions :

Etablis à partir du profil en long et du plan topographique, les profils en travers décomposent ce dernier en tronçon. Leur position est fonction des dénivelés du terrain et des points singulier (raccordement alignement - courbe,...).

Ils permettent de :

- tracer le plan général.
- définir les conditions des drainages (fossés, pentes).
- calculer les cubatures de terrassement.
- déterminer l'assiette, l'emprise et les terrains à acquérir.

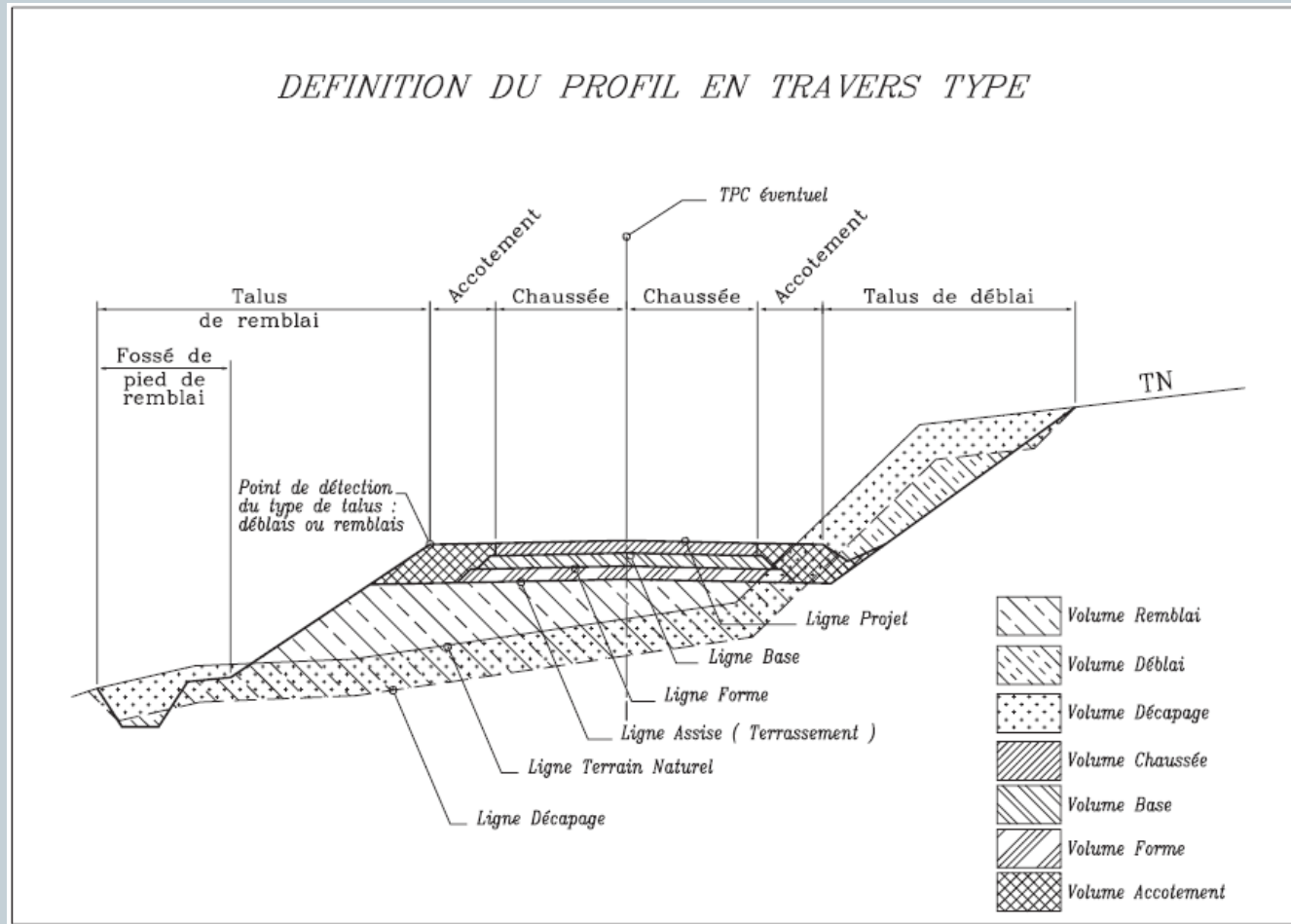
Plan général

Pratiquement, le tracé en plan définitif de l'axe s'insère dans un plan général comprenant :

- tous les détails de la voie projeté (visualisation des remblais, déblais, etc.)
- un fond topographique.

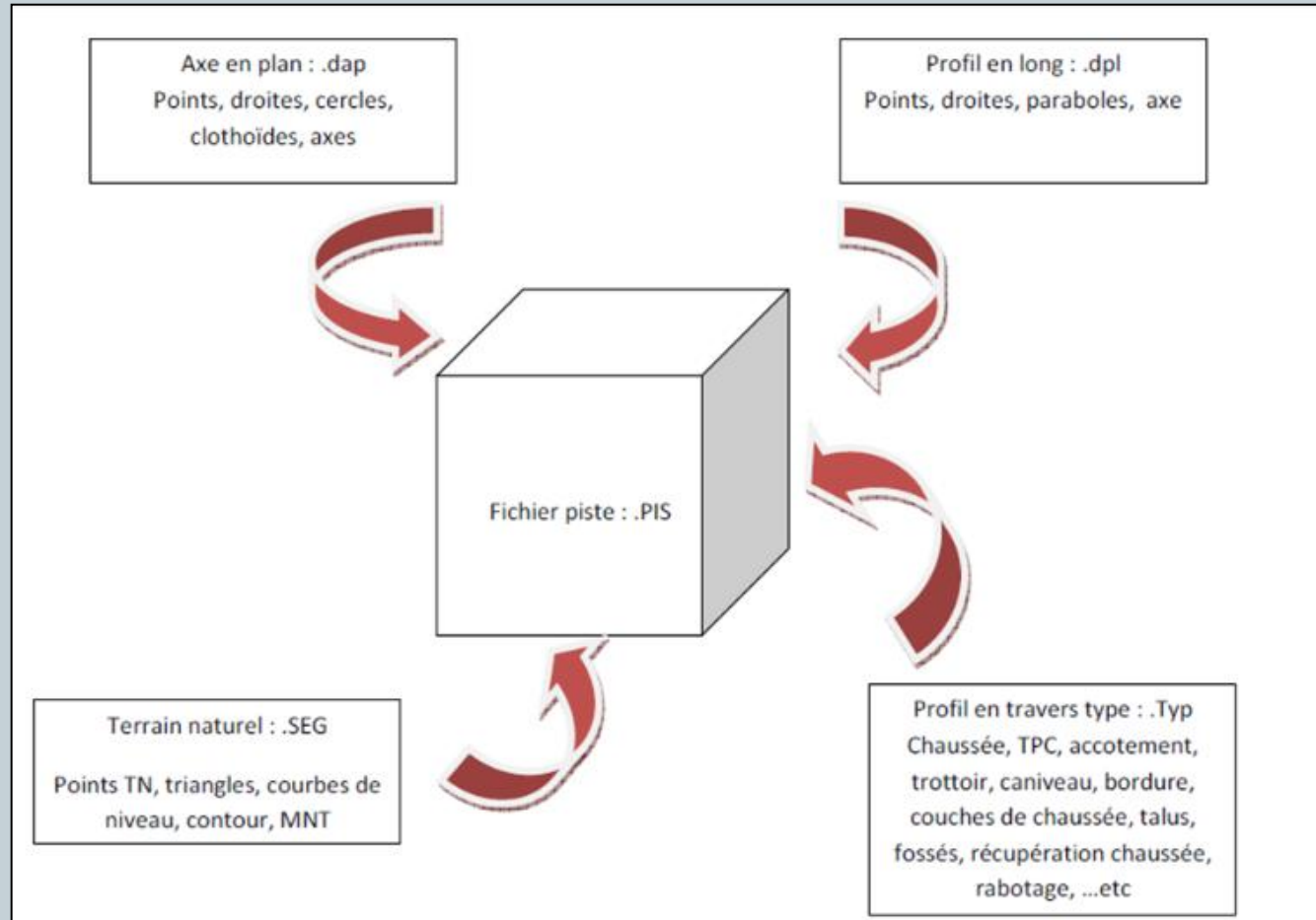
Le tracé routier

Profil en travers :



Le tracé routier

Logiciel PISTE :





Chapitre 5 :

Hydraulique routière

HYDROLOGIE, HYDRAULIQUE & ASSAINISSEMENT



Introduction :

Les ouvrages d'assainissement regroupent les ouvrages hydrauliques (buses, dalots, radiers etc.), qui rétablissent les écoulements franchissant la route et les ouvrages de drainage de l'emprise de la chaussée (fossés de crête, caniveaux pour talus et bermes, bourrelets, etc.).

L'assainissement d'une route vise à la pérenniser en la protégeant des attaques de l'eau.

L'étude hydrologique fournit les données sur les débits et les caractéristiques d'écoulement des cours d'eau. Elle fournit la base du calcul du dimensionnement hydraulique des ouvrages d'assainissement ou de franchissement.

L'étude hydraulique permet, sur la base des résultats de l'étude hydrologique, de dimensionner les ouvrages.

HYDROLOGIE, HYDRAULIQUE & ASSAINISSEMENT



Débit de projet :

Il est recommandé d'adopter (sauf dans le cas des ouvrages d'art) :

- Pour les ouvrages hydrauliques, une période de retour de **10 ans et vérifier que** le niveau d'eau n'atteint pas le corps de chaussée pour une période de retour de **25 ans**.
- Pour les ouvrages de drainage, une période de retour de **10 ans et vérifier que le** niveau d'eau n'atteint pas le corps de chaussée pour une période de retour de **25 ans**.

La détermination d'un débit de pointe prend en compte plusieurs facteurs traduisant les paramètres d'ordres climatique et morphologique, se rattachant au bassin d'apport et au cours d'eau drainant. Le débit de projet correspondant à une période de retour donnée, de l'événement crue, peut être calculé de deux manières :

- statistiquement, en utilisant les lois d'ajustement des valeurs mesurées directement sur le cours d'eau alimenté par le bassin versant à l'étude (hydrologie statistique),
- par constitution de l'hydro-gramme de la crue à partir des données observées, afférentes aux précipitations et aux caractéristiques dudit bassin versant (hydrologie analytique).

HYDROLOGIE, HYDRAULIQUE & ASSAINISSEMENT



Débit du projet :

On considère 4 catégories de routes et des routes hors catégories. Ces dernières sont formées des routes de montagne ou des routes très peu circulées.

Formules	Surface < 1 km ²	1 < Surface < 10 km ²	Surface > 10 km ²
Mac-Math	Oui	-	-
Burkli-Ziegler	Oui	Oui	-
Rationnelle	Oui	Oui	-
Mallet-Gauthier	-	-	Oui
Fuller II	-	-	Oui
Régionale	-	-	Oui

HYDROLOGIE, HYDRAULIQUE & ASSAINISSEMENT



Débit du projet (formule rationnelle) :

$$Q_T = (1/3.6) C.I.A$$

Q_T = Débit de période de retour T (en m^3/s)

A = Surface du BV (en km^2)

I = Intensité de pluie pour temps de concentration (en mm/h)

C = coefficient de ruissèlement

C est estimé par
le tableau suivant :

Couverture végétale	Morphologie	Pente (%)	Sable grossier	Argileux limoneux	Argileux compact
Bois	Presque plat	0 à 5	0,10	0,30	0,40
	Ondulé	5 à 10	0,25	0,35	0,50
	Montagneux	10 à 30	0,30	0,50	0,60
Pâturage	Presque plat	0 à 5	0,10	0,30	0,40
	Ondulé	5 à 10	0,15	0,36	0,55
	Montagneux	10 à 30	0,22	0,42	0,60
Culture	Presque plat	0 à 5	0,30	0,50	0,60
	Ondulé	5 à 10	0,40	0,60	0,70
	Montagneux	10 à 30	0,52	0,72	0,82

HYDROLOGIE, HYDRAULIQUE & ASSAINISSEMENT



Débit du projet (formule rationnelle) :

Pour le calcul des temps de concentration, aucune formule n'étant a priori meilleure que les autres, la valeur à prendre est la moyenne des résultats des huit formules suivantes, après élimination des valeurs extrêmes (aberrantes) :

Formule Espagnole	$T_c = 60 \times 0.3 \times \left(\frac{L}{I^{0.25}} \right)^{0.77}$	Formule Californienne	$T_c = 60 \times 0.1452 \times \left(\frac{L}{\sqrt{I}} \right)^{0.77}$
Formule de Giandoti	$T_c = 60 \times \left(\frac{4 \times \sqrt{A} + (1.5 \times L)}{0.8 \times \sqrt{H}} \right)$	Formule de Kirpich	$T_c = \frac{1}{52} \times \left(\frac{L}{\sqrt{I}} \right)^{0.77}$
Formule de Van Te Chow	$T_c = 60 \times 0.123 \times \left(\frac{L}{\sqrt{I}} \right)^{0.64}$	Formule de Ventura	$T_c = 76.32 \times \sqrt{\frac{A}{100 \times I}}$

T_c = Temps de concentration en mn ; L = Longueur du drain en km ; I = Pente en m/m ;
 A = Surface en km² ; H = Dénivelée totale en m.

HYDROLOGIE, HYDRAULIQUE & ASSAINISSEMENT



Débit du projet (formule rationnelle) :

L'intensité de pluie en fonction du temps de concentration :

Stations	Période (ans)	T de 0 à 90 min		T de 90 à 1 440 min	
		Hauteur (h)	Intensité (I)	Hauteur (h)	Intensité (I)
TANGER	11	$5,56T^{0,49}$	$5,56T^{-0,51}$	$11,7T^{0,314}$	$11,7T^{-0,686}$
OUJDA	10	$4,54T^{0,33}$	$4,54T^{-0,67}$	$1,63T^{0,54}$	$1,63T^{-0,46}$
RABAT	11	$2,47T^{0,77}$	$2,47T^{-0,23}$	-	-
FES	10	$6,96T^{0,33}$	$6,96T^{-0,67}$	$12,47T^{0,25}$	$12,47T^{-0,75}$
MEKNES	10	$6,24T^{0,45}$	$6,24T^{-0,55}$	$11,25T^{0,31}$	$11,25T^{-0,69}$
CASA 0-20 mm	11	$2,15T^{0,89}$	$2,25T^{-0,11}$	$8,71T^{0,31}$	$8,71T^{-0,69}$
CASA 20-90 mm	11	$16,2T^{0,19}$	$16,2T^{-0,81}$	-	-
MIDELT	9	$2,78T^{0,44}$	$2,78T^{-0,56}$	$2,04T^{0,48}$	$2,04T^{-0,52}$
KASBAT TADLA	7	$3,26T^{0,45}$	$3,26T^{-0,55}$	$2,47T^{0,51}$	$2,47T^{-0,49}$
SAFI	10	$7,41T^{0,35}$	$7,41T^{-0,65}$	-	-
MARRAKECH	10	$9,48T^{0,22}$	$9,48T^{-0,78}$	$12,6T^{0,145}$	$12,6T^{-0,855}$
AGADIR	11	$4,08T^{0,44}$	$4,08T^{-0,56}$	$5,37T^{0,4}$	$5,37T^{-0,6}$

HYDROLOGIE, HYDRAULIQUE & ASSAINISSEMENT



Débit du projet (formule rationnelle) :

Pente des bassins versants : En pratique, on procède au calcul de la pente sur un certain nombre de tronçon (i) de longueur L_i ; la pente moyenne est alors donnée par la formule

$$I_m = \left[\frac{L}{\sum \frac{L_i}{\sqrt{I_i}}} \right]^2$$

L : Longueur de BV ,

L_i : Longueur du tronçon i de BV ,

I_i : La pente du tronçon i.

HYDROLOGIE, HYDRAULIQUE & ASSAINISSEMENT



Débit du projet (formule de Mac-Math) :

L'expression de cette équation se présente sous la forme suivante :

$$Q = K \times P \times A^{0,58} \times I^{0,42}$$

Q : débit à évacuer (en l/s)

P : hauteur maximale (en mm) de pluie tombée en 24 h sur le bassin versant

A : Surface du bassin versant (en ha)

I : pente du bassin versant (en mm/m)

K : coefficient dépendant de la nature de la surface du bassin versant compris entre 0,11 et 0,43.

Le coefficient K dépend du couvert et de la topographie du bassin versant.

Bassins versants de grandes dimensions et bien couvert en végétation	0,11
Superficies cultivées et terrains vagues en zones suburbaines	0,22
☐ Terrains non aménagés non rocheux et de pente moyenne ☐ Faubourgs non pavés	0,32
Terrains non aménagés rocheux et à forte pente	0,43

HYDROLOGIE, HYDRAULIQUE & ASSAINISSEMENT



Débit du projet (formule de Burkli-Ziegler) :

$$QT = 0,0039 \times C \times H_{1h} \times A^{0,75} \times P^{0,25}$$

Avec :

QT = débit maximal (en m³/s) de fréquence 1/T

H_{1h} = précipitation maximale (en mm) en 1H

A = surface du bassin versant (en ha)

C = coefficient de ruissellement

P = pente moyenne du bassin versant (en mm/m).

HYDROLOGIE, HYDRAULIQUE & ASSAINISSEMENT



Débit du projet (formule de Mallet-Gauthier) :

L'expression de cette équation se présente sous la forme suivante :

$$Q_T = 2k \log(1 + aH) \frac{A}{\sqrt{L}} \sqrt{1 + 4 \log T - \log A}$$

Avec :

$a = 20$

T = période de retour (en ans)

H = pluviométrie annuelle moyenne (en m)

A = surface du bassin versant (en km²)

$K = 2$ (valeur variant de 0,5 à 6. Il a été décrété de la prendre égale à 2 au Maroc depuis les inondations de 1996).

HYDROLOGIE, HYDRAULIQUE & ASSAINISSEMENT



Débit du projet (formule Fuller I) :

L'expression de cette équation se présente sous la forme suivante :

$$Q_T = (1 + a \log T) \left(A^{0,8} + \frac{8}{3} A^{0,5} \right) \frac{4}{3} \frac{N}{100}$$

Avec

T = est la période de retour (en ans)

a = coefficient variant de 0,7 à 3,5 en fonction de la pluviosité :

0,7 – 0,8 pour les grands bassins versants et les régions bien arrosées ; Jusqu'à 2 pour les régions arides ; pour le Sud du Maroc a varie de 3 à 3,5.

N= est un coefficient variant de 80 à 100 en fonction de la morphologie du BV :

80 pour la plaine

85 pour les régions accidentées

100 en montagne

A = surface du bassin versant (en km²).

HYDROLOGIE, HYDRAULIQUE & ASSAINISSEMENT



Débit du projet (formules régionales) :

S : superficie du bassin versant

REGIONS	FORMULES
Côtes Méditerranéennes et haut Loukkos (Ceuta à Targuist) Sol imperméable à mi-perméable Très fortes pluviosités	$Q_{10} = 16 \cdot S^{0,75}$
Tangérois sud-est Sol mi-imperméable Forte à moyenne pluviosité	$Q_{10} = 10 \cdot S^{0,75}$
Côtières centraux (Rabat à Casa) Sol mi-imperméable Moyenne pluviosité	$Q_{10} = 3 \cdot S^{0,75}$
Zone de Draa aval à Tarfaya Sol mi-imperméable à perméable Faible pluviosité	$Q_{10} = 0,5 \cdot S^{0,75}$

Les formules régionales utilisées au Maroc

HYDROLOGIE, HYDRAULIQUE & ASSAINISSEMENT



Ouvrages hydrauliques :

La fonction principale de tels ouvrages étant de permettre le passage d'un cours d'eau sous un remblai et de supporter les charges mortes et vives qui le sollicitent, sa conception implique donc des considérations hydrauliques et structurales. Parmi les considérations relevant de l'hydraulique, le passage de l'eau doit être réalisé sans occasionner de submersion ou des conditions d'écoulement inadmissibles.

Deux méthodes peuvent être utilisées pour le dimensionnement des ouvrages hydrauliques :

- Méthode de Delorme : par application d'une formule de pré-dimensionnement qui se base sur le calcul des débits capables des ouvrages hydraulique. À utiliser, surtout pour la phase étude de définition.
- Méthode de vérification amont et aval qui se base sur la formule de Manning-Strickler et l'équation de l'énergie critique.

HYDROLOGIE, HYDRAULIQUE & ASSAINISSEMENT



Ouvrages hydrauliques (méthode de DELORME) :

Il s'agit d'une méthode simple et elle est la plus utilisée pour le pré-dimensionnement des ouvrages hydrauliques. Les débits capables des ouvrages sont donnés par des débits qui correspondent aux débits critiques déterminés par la formule de Delorme.

$Q_c = 2,464 \times R \times H^{1,5}$ pour les buses,

$Q_c = 1,50 \times L \times H^{4/3}$ pour les dalots.

Avec : Q_c = débit critique évacué en m^3/s

R = rayon des buses en m

L = ouverture droite des dalots en m

H = hauteur des piédroits sous dalles pour les dalots en m,
diamètre intérieur pour les buses en m.

Cette formule engendre un surdimensionnement dans le calcul notamment pour les débits importants (dépassant $2,5 m^3/s$) car elle néglige l'influence de l'écoulement à l'aval de l'ouvrage sur celui dans l'ouvrage. C'est pourquoi le recours à la méthode du contrôle amont et aval est nécessaire pour le dimensionnement des ouvrages d'assainissement.

HYDROLOGIE, HYDRAULIQUE & ASSAINISSEMENT



Ouvrages hydrauliques (méthode du contrôle amont et aval) :

On traitera uniquement le cas d'une sortie dénoyée pour un dalot ou une buse. Pour les autres configurations, se référer aux ouvrages cités dans le cours.

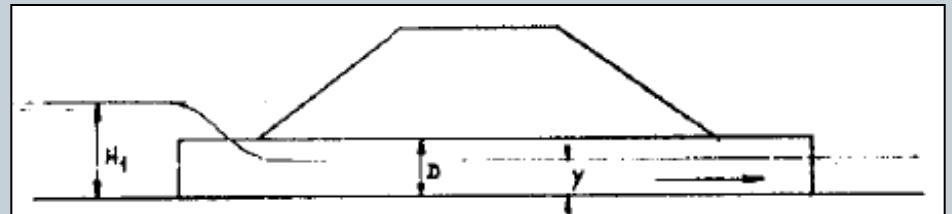
✓ Pour une buse :

Si $H_t < 1,25 D$ l'écoulement se fait à surface libre dans l'ouvrage, après la formation d'une section de contrôle où apparaissent les conditions d'écoulement critique.

Le débit est obtenu par une relation : $Q = (2gD^5)^{1/2} F(H_1/D)$ ou $Q^* = (2gD^5)^{1/2} F(H_1^*)$ avec $Q^* = Q / (2gD^5)^{1/2}$ et $H_1^* = H/D$.

Si $H_t > 1,25 D$ l'écoulement peut se faire à surface libre ou à plein section. Le débit est obtenu par une relation : $Q = (2gD^5)^{1/2} F(H_1/D)$ ou $Q^* = (2gD^5)^{1/2} F(H_1^*)$ avec $Q^* = Q / (2gD^5)^{1/2}$ et $H_1^* = H/D$.

✓ Pour les dalots des sections A les paramètres adimensionnelles sont : $H_1^* = H/D$ et $Q^* = Q/A (2gD)^{1/2}$



HYDROLOGIE, HYDRAULIQUE & ASSAINISSEMENT



Ouvrages hydrauliques (méthode du contrôle amont et aval) :

Les fonctions G et G sont déterminées sous formes d'abaques pour les buses et les dalots. Connaissant le débit Q à évacuer, et se fixant une première valeur du diamètre D (en se basant sur les vitesses critiques ou la formule de Delorme), on calcule alors $Q^* = Q / (2gD^5)^{1/2}$ (ou $Q/A (2gD)^{1/2}$ pour un dalot de section A) et on détermine, à partir de l'abaque appropriée H_1^* et ensuite H_1 dont on jugera la compatibilité avec le projet.

Il conviendra ensuite de calculer la pente critique correspondante puis la vitesse de l'eau dans la buse pour vérifier si elle est inférieure à la vitesse critique. Sion, soit on prend une valeur de diamètre supérieure à la première valeur D essayée, soit on augmente le nombre de buses.

Nous utiliseront également, pour le calcul de la pente critique, les variables adimensionnelles qui permettent de regrouper les paramètres définissant le phénomène.

Pour les buses : $I^* = \text{Fonction}(Q^*)$ (à partir d'abaques) avec $Q^* = Q / (gR^5)^{1/2}$ et $I_c^* = I_c / (g/K^2 R^{1/3})$ $K = 37$ pour les buses métalliques et $K = 67$ pour les buses en béton.

Pour les dalots : $I^* = \text{Fonction}(Q^*)$ (à partir d'abaques) avec $Q^* = Q / (gB^5)^{1/2}$ et $I_c^* = I_c / (g/K^2 B^{1/3})$ $K = 67$ pour les dalots en béton.

HYDROLOGIE, HYDRAULIQUE & ASSAINISSEMENT



Ouvrages hydrauliques (méthode du contrôle amont et aval) :

Nous utiliseront enfin, pour le calcul des vitesses, les variables adimensionnelles suivantes :

Pour les buses : $V^* = \text{Fonction}(Q^*)$ (à partir d'abaques) avec $Q^* = Q / (K R^{8/3} I_c^{1/2})$ et $V^* = V / (K R^{2/3} I_c^{1/2})$ $K = 37$ pour les buses métalliques et $K = 67$ pour les buses en béton.

Pour les dalots : $I^* = \text{Fonction}(Q^*)$ (à partir d'abaques) avec $Q^* = Q / (K B^{8/3} I_c^{1/2})$ et $V^* = V / (K B^{2/3} I_c^{1/2})$ $K = 67$ pour les dalots en béton.