

INTITUT NATIONAL POLYTECHNIQUE FELIX HOUPHOUET BOIGNY

INP-HB

Département Infrastructures et Transports

SUPPORT PEDAGOGIQUE

COURS DE ROUTE 1 ET 2

Par : M. Yacouba KONATE
Ingénieur de Conception des Travaux Publics
Master Complémentaire en Gestion des Transports

SOMMAIRE

PREMIERE PARTIE : LE VEHICULE ET LA ROUTE.....	5
1-1 LE VEHICULE.....	5
1-1-1 Généralités - définitions	5
1-1-2 Caractéristiques des véhicules.....	5
1-1-3 Les pneumatiques.....	7
1-1-4 Accélération / Freinage	9
1-1-5 Envirage	10
1-1-6 Confort et sécurité.....	12
1-2 ETUDE DU TRAFIC	13
1-2-1 Objet et définitions.....	13
1-2-2 Ecoulement du trafic sur une route	13
1-2-3 Formulation de la demande du trafic sur une route.....	15
1-2-4 Méthodes d'observation du trafic.....	16
1-2-5 Prévision du trafic.....	16
1-2-6 Configuration des essieux et silhouettes des véhicules	17
1-2-7 Notion d'agressivité	17
1-2-8 Le trafic équivalent en nombre d'essieux	18
1-2-9 Formulation de l'offre de trafic : Calcul de la capacité d'une route.....	19
DEUXIEME PARTIE : LA GEOMETRIE ROUTIERE.....	24
CHAPITRE 1 : LES NORMES GEOMETRIQUES DES ROUTES	24
1-1 DEFINITION DU PROJET DE ROUTE	24
1-2 NOTION DE VITESSE DE REFERENCE	24
1-3 LES NORMES SUR LE TRACE EN PLAN ET LE PROFIL EN LONG	25
1-3-1 Le tracé en plan.....	25
1-3-2 Le profil en long.....	27
1-4 LES PARAMETRES FONDAMENTAUX DES PROJETS ROUTIERS	29
1-5 LES PARAMETRES CINEMATiques DES PROJETS ROUTIERS	29
CHAPITRE 2 : LA RECHERCHE DE TRACE.....	30
2-1 GENERALITES.....	30
2-2 LES DIFFERENTES ETAPES D'UNE ETUDE ROUTIERE	30
2-2-1 Les études préliminaires.....	30
2-2-2 L'Avant-projet Sommaire (APS)	31
2-2-3 L'Avant-projet Détaillé (APD)	31
2-3 CAS SPECIFIQUE D'UNE ROUTE EXISTANTE.....	32
CHAPITRE 3 : DEVERS – VARIATION DE DEVERS.....	33
3-1 DEFINITION ET ROLE DU DEVERS	33
3-1-1 Définition	33
3-1-2 Rôle du dévers.....	33
3-2 REGLES D'EMPLOI ET PRINCIPE DE VARIATION DES DEVERS	34
3-2-1 Principe de variation de dévers	34
3-2-2 Ligne de rotation des dévers	34
3-2-3 Disposition de détail	34
3-2-4 Diagramme de variation de dévers.....	34
CHAPITRE 4 : CALCUL DU TRACE EN PLAN.....	36
4-1 GENERALITES.....	36

4-2 TRACE DES DROITES - CERCLES	36
4-3 LES RACCORDEMENTS PROGRESSIFS : CLOTHOÏDES.....	38
4-3-1 Formule de la clothoïde.....	38
4-3-2 Utilisation des clothoïdes	38
4-3-3 Conditions générales	39
4-3-4 Utilisation des tables de clothoïdes.....	39
CHAPITRE 5 : REPRESENTATION ET CALCUL DU PROFIL EN LONG	43
5-1 GENERALITES.....	43
5-2 REPRESENTATION DU TERRAIN NATUREL (TN)	43
5-2-1 Règles générales.....	43
5-2-2 Echelles utilisées.....	43
5-2-3 Représentation graphique.....	43
5-3 REPRESENTATION DU PROJET	44
5-4 CALCUL DU PROFIL EN LONG.....	44
5-4-1 Calculs sur les pentes et les rampes	45
5-4-2 Calculs sur les paraboles	45
CHAPITRE 6 : COORDINATION DU TRACE EN PLAN ET DU PROFIL EN LONG	48
6-1 GENERALITES.....	48
6-2 RAPPEL DES REGLES ELEMENTAIRES	48
CHAPITRE 7 : PROFIL EN TRAVERS.....	55
7-1 DEFINITION	55
7-2 DIFFERENTS TYPES D'AMENAGEMENTS.....	55
7-2-1 Aménagement immédiat	55
7-2-2 Aménagement normal	55
7-2-3 Aménagement futur	55
7-3 DETERMINATION DU NOMBRE DE VOIES DU PROFIL EN TRAVERS.....	55
7-3-1 Trafic équivalent en voitures particulières.....	55
7-3-2 Evaluation de la demande du débit de trafic Q	56
7-3-3 Evaluation de l'offre (capacité de route).....	57
7-3-4 Détermination du nombre de voies	58
7-4 PROFILS EN TRAVERS TYPES	59
7-4-1 Schématisation	59
7-4-2 Définitions	59
7-4-3 Largeur de chaussée	60
7-4-4 Largeur d'accotement	60
7-4-5 Largeur des plates-formes en section courante	61
7-4-6 Pententes transversales des éléments constitutifs du profil en travers	62
7-5 PROFILS EN TRAVERS SUR OUVRAGES D'ART.....	62
7-5-1 Description générales.....	62
7-5-2 Routes à chaussées bidirectionnelles	63
7-6 PROFILS EN TRAVERS SOUS OUVRAGES D'ART.....	63
7-6-1 Description générales.....	63
7-6-2 Routes à chaussées bidirectionnelles	63
7-6-3 Tirant d'air (gabarits).....	64
CHAPITRE 8 : DISPOSITION DE DETAIL DES PROFILS EN TRAVERS.....	65
8-1 COLLECTE ET EVACUATION DES EAUX DE RUISSELEMENT	65
8-1-1 Généralités	65

8-1-2 Dispositifs latéraux	65
8-1-3 Dispositifs dans le terre-plein central.....	66
8-1-4 Ouvrages extérieurs à la plate forme.....	66
8-2 DRAINAGE INTERNE SOUS PLATE FORME	66
8-2-1 Dispositions Générales.....	66
8-2-2 Routes à chaussées bidirectionnelles	67
8-2-3 Routes à deux chaussées unidirectionnelles	67
8-3 DISPOSITIONS CONSTRUCTIVES DES ASSISES DE CHAUSSEES	68
8-3-1 Généralités	68
8-3-2 Disposition constructives en alignement droit	69
8-3-3 Disposition constructives en dévers	71
8-4 DISPOSITIFS DE SECURITE.....	72
8-4-1 Rôles et types de dispositifs de sécurité.....	72
8-4-2 Règles d'emploi des glissières de sécurité	72
8-4-3 Choix du type de dispositifs de sécurité pour le terre-plein central	73
CHAPITRE 9 : CUBATURES DES TERRASSEMENTS – MOUVEMENT DES TERRES	74
9-1 GENERALITES.....	74
9-1-1 Avant métré, métré.....	74
9-1-2 Cubature ou métré des terrassements	74
9-1-3 Mouvement des terres	74
9-2 CUBATURES DES TERRASSEMENTS	74
9-2-1 Calcul des surfaces.....	75
9-2-2 Calcul des volumes de terre	75
9-3 MOUVEMENTS DES TERRES	76
9-3-1 Généralités	76
9-3-2 Distance de transport.....	76
9-3-3 Epure de Lalanne	77
TROISIEME PARTIE : GEOTECHNIQUE ROUTIERE ET MATERIAUX DE CHAUSSEES	86
CHAPITRE 1 : LA GEOTECHNIQUE ROUTIERE	86
1-1 DEFINITION ET OBJET	86
1-2 LES SOLS	86
1-3 STRUCTURE SCHEMATIQUE DU SOL	86
1-4 PRINCIPAUX ESSAIS D'IDENTIFICATION DES SOLS- CLASSIFICATION	87
1-4-1 L'analyse granulométrique	87
1-4-2 Limites d'Atterberg.....	89
1-4-3 Equivalent de sable (ES).....	89
1-4-4 Teneur en eau.....	90
1-4-5 Teneur en matière organiques (MO).....	90
1-5 CLASSIFICATION DES SOLS	90
1-5-1 Classification Américaine du Highway Research Board (HRB)	90
1-5-2 Classification LPC ou USCS	91
1-5-3 Classification LBTP.....	91
1-6 COMPACTAGE	91
1-6-1 Définition.....	91
1-6-2 Essai proctor	92
1-6-3 Influence du compactage et de l'énergie de compactage	92
1-6-4 Influence du compactage	93
1-7 PORTANCE DES SOLS	94

1-7-1 L'essai CBR.....	94
1-7-2 Essai triaxial.....	94
1-7-3 Essai de plaque.....	94
1-8 COUPES DES SOLS EN COTE D'IVOIRE.....	95
1-8 APPLICATION PRATIQUE DE LA GEOTECHNIQUE ROUTIERE.....	95
CHAPITRE 2 : LES MATERIAUX DE CHAUSSEES.....	96
2-1 GENERALITES.....	96
2-2 CARACTERISTIQUES DES COUCHES D'ASSISE DE CHAUSSEE.....	96
2-2-1 Le sol de plate forme.....	96
2-2-1 La couche de fondation.....	96
2-2-2 La couche de base.....	97
2-3 LES MATERIAUX NATURELS.....	97
2-3-1 Caractéristiques des matériaux naturels.....	97
2-3-2 Recommandations générales sur les matériaux naturels en Côte d'Ivoire.....	97
2-4 LES MATERIAUX TRAITES.....	98
2-4-1 Les matériaux traités aux liants hydrauliques.....	98
2-4-2 Les matériaux traités aux liants hydrocarbonés.....	99
2-5 PROPRIETES DES MATERIAUX.....	100
2-5-1 Relation contrainte - déformation – module de déformation.....	100
QUATRIEME PARTIE : DIMENSIONNEMENT DE CHAUSSEES.....	101
CHAPITRE 1 : GENERALITES.....	101
1-1 CONSTITUTION DES CHAUSSEES.....	101
1-1-1 Différentes couches.....	101
1-1-2 Rôle des différentes couches de chaussée.....	101
1-1-3 Analyse fonctionnelle d'une chaussée.....	102
1-2 TYPES DE CHAUSSEES.....	104
1-2-1 Chaussées classiques.....	104
1-2-2 Chaussées inverses ou « chaussées sandwich ».....	104
1-3 FACTEURS DE BASES DU DIMENSIONNEMENT DES CHAUSSEES.....	105
1-3-1 Le trafic.....	105
1-3-2 Matériaux de chaussées.....	107
1-3-3. Sol de plate forme.....	108
1-3-4 Climat.....	108
CHAPITRE 2 : METHODES DE DIMENSIONNEMENT DES CHAUSSEES.....	109
2-1 METHODES EMPIRIQUES.....	109
2-1-1 Principe général.....	109
2-1-2 Principales méthodes empiriques.....	109
2-1-3 Méthodes basés sur des formules et des abaques.....	110
2-1-4 Les méthodes basées sur les catalogues de structures.....	115
2-2 METHODES RATIONNELLES.....	117
2-2-1 Principe général.....	117
2-2-2 Démarche générale du dimensionnement rationnel des chaussées.....	117

PREMIERE PARTIE : LE VEHICULE ET LA ROUTE

La route est une surface aménagée pour permettre la circulation des véhicules automobiles. Le terme "chaussée" désigne la partie de la route normalement utilisée pour la circulation des véhicules.

La voie est l'une quelconque de la subdivision de la chaussée ayant une largeur suffisante pour la circulation d'une file de véhicule. Une route comporte donc une chaussée avec une ou des voies.

Il ne peut avoir sur une route de véhicule sans conducteur. Le conducteur est une personne qui assure la direction d'un véhicule.

1-1 LE VEHICULE

1-1-1 Généralités - définitions

Les véhicules admis à circuler sur les routes dans chaque pays doivent respecter la réglementation de ce pays (code de la route). En effet la convention internationale sur la circulation routière signée à Genève en 1949 et révisée en novembre 1968 à Vienne a posé des principes généraux tout en laissant à chaque état le soin d'établir sa réglementation.

Le décret 64-212 du 26 mai 1964 portant réglementation de l'usage des voies routières ouvertes à la circulation publique en Côte d'Ivoire définit les différents types de véhicules et leurs caractéristiques, ainsi la réglementation ivoirienne définit :

- d'une part le terme véhicule automobile qui désigne tout véhicule pourvu d'un dispositif mécanique de propulsion circulant sur la route par des moyens propres et servant normalement au transport de personnes et de marchandises.
- et d'autre part le terme cycle qui désigne tout engin qui a deux roues au moins et qui est propulsé exclusivement par l'énergie musculaire de l'utilisateur à l'aide de pédale ou de manivelle.

Il existe aussi des cycles pourvus d'un dispositif automoteur (motocyclettes, vélomoteur, etc.).

Cette réglementation dit que tout véhicule ou ensemble de véhicules couplés marchant isolément doit avoir un conducteur (art 2).

Les animaux de traits, de charges, de selle ou même les bestiaux isolés doivent avoir un conducteur (art 3).

1-1-2 Caractéristiques des véhicules

Le véhicule est caractérisé par :

A°) Le genre

Camion, camionnette, ensemble articulé ou véhicule particulier

B°) Le type de carrosserie

Conduite intérieure, plateau (bachet), ridelles¹ (semi-remorque), fardier² (pour le transport des grumes), porte char, etc.

¹ Balustrade, pleine ou à claire-voie, placée sur les côtés du tablier d'une charrette, d'une remorque, d'un camion ou d'un chariot de manutention, et destinée à contenir les marchandises

C°) Les charges

C'est l'élément essentiel qui intervient dans le dimensionnement des chaussées.

- le poids total autorisé en charge (P.T.A.C). C'est le poids à vide + celui du chargement (le poids du conducteur et toutes les personnes transportées en même temps).
- Le poids à vide du véhicule (P.V). C'est le poids du véhicule en ordre de marche comprenant les équipements normaux, les roues et pneus de secours et l'outillage courant normalement livré avec le véhicule.
- La charge utile (C.U). C'est la différence entre le P.T.AC et le $C.U = P.T.AC - P.V$

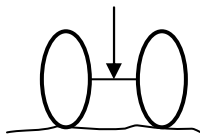
Les véhicules de tourisme ou véhicules légers du fait des charges faibles qu'ils transportent ne jouent aucun rôle dans la tenue des chaussées, leurs poids total est inférieur à 2 tonnes soit 500 Kg par roue et les pressions dans les pneus atteignent rarement 2 Kg/cm².

Les véhicules utilitaires ou poids lourds sont les véhicules de référence utilisés pour la construction des chaussées.

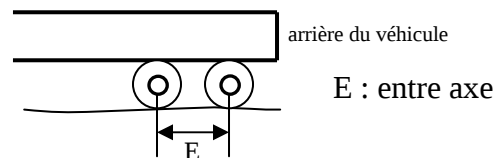
Poids de l'essieu :

En Côte d'Ivoire, on désigne par poids lourds un véhicule de plus de 1,5 tonne de charge utile (soit 3 à 3,5 tonnes de PTAC). Les charges maxima légales par essieu sont :

- Essieu simple : 10 tonnes (France 13T, USA 8,2T)
- Essieu tandem : 13 tonnes si entraxe 0,90 m
17 tonnes si entraxe 1,35 m



Essieu simple : 13T



Essieu tandem si $E < 1,35$
Si $E > 1,35$: deux essieux simples

Les poids totaux roulant autorisés en Côte d'Ivoire varient de 16 tonnes à 41 tonnes en fonction de la configuration des essieux.

- Véhicule à 2 essieux : 16 tonnes
- Véhicule à 3 essieux : 23 tonnes ou 25 tonnes
- Véhicule de plus de 4 essieux : 38 tonnes ou 41 tonnes

La réglementation définit aussi le gabarit du véhicule.

D°) Le gabarit

Le gabarit représente les mensurations du véhicule. La largeur totale mesurée tous saillies comprises d'un véhicule dans une section transversale quelconque ne doit pas dépasser 2,5 mètres (USA 2,88 mètres).

² Voiture à roues très basses qui sert au transport de charges très lourdes

La longueur d'un véhicule isolé ne doit dépasser 11 mètres, et celle d'un véhicule articulé varie en fonction des différents types d'ensemble :

- véhicule articulé : 15 mètres
- véhicule avec remorque : 18 mètres
- Train routier : 22 mètres

Dérogation : la longueur des véhicules de transport de voyageurs peut dépasser 11 mètres sans excéder 12 mètres sous réserve que le porte-à-faux arrière ne dépasse pas 6/10 de l'empattement de la longueur absolue de 3,50 mètres.

E°) Les bandages pneumatiques

Le pneumatique est le lien entre le véhicule et la chaussée, il transmet les charges à la chaussée et assure en plus une bonne partie du confort. Il conditionne la tenue de route du véhicule ainsi que l'efficacité du freinage et la stabilité dans les virages. L'ensemble pneumatique – chaussée constitue une crémaillère grâce à laquelle le véhicule peut se mouvoir en toute circonstance.

Les roues des véhicules automobiles doivent être munies de bandages pneumatiques ou de dispositifs reconnus suffisant par la réglementation. Il est interdit d'introduire dans la surface de roulement des pneumatiques des éléments métalliques susceptibles de faire saillie.

1-1-3 Les pneumatiques

1-1-3-1 Constitution

Le pneumatique est une enveloppe souple de surface para torique (évoluant vers l'anneau) dans laquelle on maintient une pression de gonflage grâce à une chambre à air. Il est composé de deux (2) parties :

- une bande de roulement en surface, sculptée ;
- Une enveloppe en caoutchouc à âme de rayonne³ ;

L'âme textile est constituée de nappes superposées dont l'angle de croisement influe sur la raideur du pneumatique.

Les sculptures de la bande de roulement ont un rôle fondamental dans l'évacuation de l'eau des chaussées mouillées et l'adhérence du pneumatique à la chaussée. Leur dessin est important

(Faire schéma page 4 doc Diabaté)

1-1-3-2 Comportement des pneumatiques sous charges verticales

Le pneumatique transmet à la chaussée deux type d'efforts :

- o les efforts de poinçonnement à la surface, dépendent de la pression de gonflage et des sculptures
- o les efforts transmis au sol de plate forme de façon diffuse.

³ Fil textile continu cellulosique, réalisé généralement selon le procédé viscose : étoffe tissée avec ce fil

Lorsque l'on fait croître la charge appliquée sur l'essieu, on note en première approximation que la pression moyenne appliquée sur la chaussée dans l'empreinte du pneumatique est constante et sensiblement égale à la pression de gonflage de la chambre à air.

Mais la réalité est plus complexe. En effet, lorsque la charge sur l'essieu augmente, la surface de contact avec la chaussée augmente également mais la rigidité des flancs tend à s'opposer à l'expansion transversale de la surface de contact. Ce qui fait que la surface de contact varie beaucoup moins que la charge appliquée.

Par ailleurs, la rigidité des flancs introduit des concentrations de contraintes. Sur les bords latéraux de la surface de contact, l'existence de concentration peut modifier les sollicitations de couche.

NB : pour les calculs des chaussées, on considère l'empreinte comme circulaire.

1-1-3-3 Comportement des pneumatiques sous les efforts de cisaillement. Reptation (action de ramper)

Lorsqu'un pneumatique chargé roule sur une chaussée, la longueur de parcours divisée par le nombre d de tours de roue, donne le périmètre du cercle de roulement.

Ce cercle est plus petit que l'équateur de la surface de révolution que constitue le pneumatique non chargé. Cela traduit évidemment des contraintes dans le pneumatique, mais aussi des cisaillements longitudinaux au contact avec la chaussée. Si pour simplifier, on assimile le pneumatique à un tore, on voit que la bande équatoriale est soumise à des cisaillements vers l'avant et les zones latérales de contact à des cisaillements vers l'arrière (fig. 1).

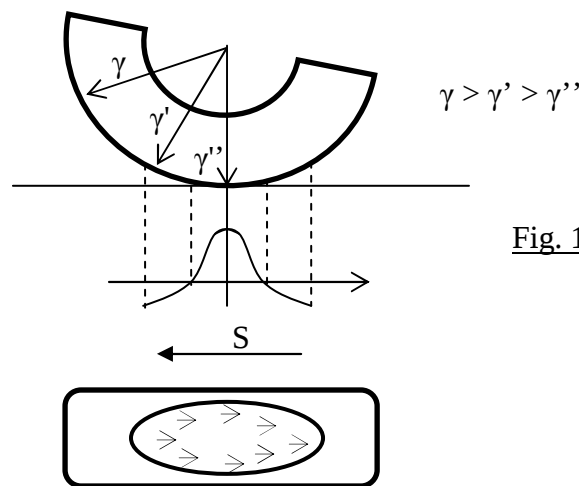


Fig. 1 : Cisaillements longitudinaux sous pneumatiques

Si l'on examine maintenant les vitesses des éléments du pneumatique par rapport à la chaussée dans la bande équatoriale, on voit qu'à l'avant dans le sens de la marche, la vitesse est dirigée vers l'arrière, et c'est l'inverse à la sortie de la surface de contact.

En conclusion, sous une roue non soumise à un effort moteur, il existe des cisaillements de somme géométrique nulle, sensiblement distribués comme indiqué sur la figure 1. Ce sont ces cisaillements qui usent les revêtements et polissent les gravillons.

Lorsqu'un effort moteur ou retardateur (freinage) existe, la somme géométrique des cisaillements n'est plus nulle et la zone centrale se déplace.

1-1-4 Accélération / Freinage

1-1-4-1 Accélération

En principe l'accélération étant inférieure à g , celle-ci ne joue pas un rôle fondamental, sauf dans des cas particuliers. Exemple : les chaussées non revêtues qui souffrent de cisaillements superficiels.

1-1-4-2 Freinage

Le freinage des véhicules routiers est obtenu par frottement entre une partie mobile liée à la roue (le tambour ou disque) et une partie fixe liée à la caisse (garniture). La force fixe du véhicule est transformée en chaleur.

Lorsque le conducteur freine, il y a deux situations possibles :

- soit les roues bloquent et le pneumatique glisse sur la chaussée
- soit, les roues continuent de tourner sans que les pneumatiques glissent sur la chaussée.

Si F_t et F_n sont les réactions tangentielles et normales sous les pneumatiques, on a en première approximation $F_t = f F_n$

Dans le premier cas f est le coefficient de frottement classique ; Dans le deuxième cas f est un simple coefficient.

f varie énormément selon l'état de la chaussée et des pneumatiques, allant de 0,05 à 1

a°) Facteurs influant sur le freinage des véhicules

Le coefficient de frottement est la notion adoptée pour mesurer et apprécier la décélération maximale du véhicule. Ce coefficient dépend :

- de la nature du pneumatique : nature de la gomme et de la sculpture.
Les sculptures facilitent l'écoulement des films d'eau. Leur intérêt dépend de l'état de surface de la chaussée. Si la chaussée est rugueuse avec des pierres polies, les sculptures ne jouent presque pas de rôle. Mais si, au contraire, la chaussée est lisse, les sculptures jouent leur rôle
- de l'état de la chaussée : géométrie des reliefs et surtout de la présence ou non d'eau.
La présence d'eau sur une chaussée reste l'une des causes les plus importantes de diminution du coefficient de frottement. En effet, si un film d'eau s'insère entre deux surfaces lisses (chaussée et pneumatiques) seule la viscosité de l'eau intervient et le frottement s'effondre alors à des valeurs quasi-nulles, il se produit ce qu'on appelle l'aquaplanage. Par contre si le film d'eau est crevé et drainé le contact s'établit entre le pneumatique et les matériaux pierreux de la chaussée et on aura un frottement humide. S'il y a des aspérités sur la chaussée, le film d'eau sera percé et l'eau expulsée pourra être drainée. Cela dépend de
 - l'épaisseur du film
 - microreliefs
 - type de sculpture
 - vitesse du véhicule

- de la vitesse du véhicule, de la durée de freinage et de l'appareillage de mesure.
La vitesse abaisse le coefficient de frottement de façon notable (cet abaissement est d'autant plus important que le pneumatique est lisse).

b°) Distance d'arrêt

Si V_1 est la vitesse du véhicule au début du freinage et si celui-ci est constant, la distance parcourue L_1 avant l'arrêt est :

$$L_1 = \frac{1}{2} \frac{V_1^2}{G} \text{ ou } \frac{1}{2} \frac{V_1^2}{fg} \text{ où } f \text{ est le coefficient de frottement généralisé}$$

Mais entre le moment où l'obstacle est perçu et le moment où le freinage commence, il s'écoule un temps t et le véhicule parcourt une distance $L_2 = V_1 t$

La distance d'arrêt sera :

$$D = L_1 + L_2 = V_1 t + \frac{1}{2} \frac{V_1^2}{fg}$$

Dans la réalité, les manœuvres de freinage sont plus complexes, on peut commencer par freiner sur le moteur seul et l'effort de freinage maximal n'est jamais appliqué brutalement. Le freinage réel est toujours progressif. En France les dispositions pratiques admises le sont :

- pour le temps t de perception de l'obstacle
2s si $V_1 < 100$ km/h
1s si $V_1 > 100$ km/h
- pour le coefficient de frottement

f	0,46	0,46	0,42	0,38	0,34
V_1 (km/h)	40	60	80	100	120

t est majoré de 25% dans une courbe si le rayon R (en m) est inférieur à $5 V_1$ (en km/h)

1-1-5 Envirage

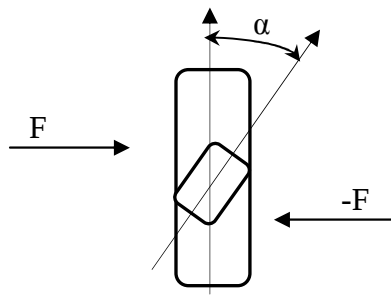
1-1-5-1 Définition

Lorsque le véhicule est en circulation sur la chaussée et qu'il a tendance à quitter sa trajectoire du fait d'une sollicitation agissant perpendiculairement à sa trajectoire, le conducteur cherche à le redresser en appliquant un couple au volant. Car la roue chargée subit un effort transversal perpendiculaire au plan de rotation et a tendance :

- à tourner pour se mettre dans le plan vertical passant par la force perturbatrice
- à dévier de sa trajectoire dans le sens de la sollicitation

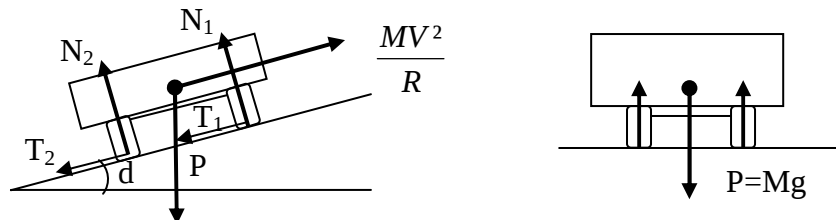
Ce phénomène est appelé envirage du pneumatique ou dérive. Il dépend de la charge et de la structure du pneumatique.

L'envirage est le fait que les forces centrifuges tendent à faire dérober le pneumatique dans les zones de virages.



α : angle d'envergure
 F : force transversale

1-1-5-2 Stabilité d'un véhicule dans un virage



Lorsqu'un véhicule circule dans un virage de rayon R relevé à l'inclinaison d , il est soumis :

- à son propre poids $P = Mg$
- aux réactions de la chaussée sur les 4 roues
- à la force centrifuge $F = \frac{MV^2}{R}$

Pour que le véhicule reste en équilibre, il faut que la somme de toutes ces forces s'annule.

- ❖ Le poids se décompose en :
 $P_1 = Mg \sin d = Mgd$
 $P_2 = Mg \cos d = Mg$
- ❖ Les réactions sur les roues se décomposent en :
 $T_1 T_2 T_3 T_4$ parallèles à la chaussée (réaction et frottement)
 $N_1 N_2 N_3 N_4$ perpendiculaires à la chaussée
- ❖ La force centrifuge est parallèle à la chaussée.

Le véhicule est donc soumis à :

1. un système de forces perpendiculaire à la chaussée qui comprend les forces Mg , N_1 , N_2 , N_3 , N_4 dont la somme algébrique $Mg + \sum N_n$ est nulle.
2. un système de forces parallèles la chaussée qui comprend les forces Mgd , T_1 , T_2 , T_3 , T_4 et $\frac{MV^2}{R}$ dont la somme algébrique est nulle.

En négligeant les frottements, le système des forces agissant parallèlement à la chaussée se réduisent à Mgd et $\frac{MV^2}{R}$. La résultante de ces deux forces est : $\frac{MV^2}{R} - Mgd = M \left[\frac{V^2}{R} - gd \right]$

Avec $d > 0$ si le dévers est dans le bon sens, et $d < 0$ si le dévers est dans le mauvais sens.

Le dévers a pour conséquence :

- de limiter l'effet de la force centrifuge quand il est dans le bon sens
- d'augmenter cet effet quand il est dans le mauvais sens

On pourrait songer à annuler par le dévers l'effet de la force centrifuge. Dans ce cas on doit

$$\text{avoir : } \frac{V^2}{R} - gd = 0 \implies d = \frac{V^2}{Rg}$$

Exemple : $V = 140 \text{ km/h}$ soit 40 m/s , $g = 10$

$$R = 1000 \text{ m} \quad d = \frac{40^2}{1000 \times 10} = 0,16 \text{ soit un dévers voisin de } 16\%.$$

tels dévers ne sont pas réalisés dans la pratique sauf sur les autodromes. Il est en effet inacceptable pour les véhicules lents.

Le véhicule entraîné vers l'extérieur de la courbe par la force $M(\frac{V^2}{R} - gd)$ est retenu par la réaction de frottement.

Pour que le véhicule ne dérape pas, il faut que la résultante des forces qui l'entraîne vers l'extérieur du virage soit inférieure ou au plus égale à la valeur maximum des réactions de frottement qui le retient sur sa trajectoire

$$\text{On doit avoir : } M(\frac{V^2}{R} - gd) \leq Mgf$$

$$\text{Soit } R \geq \frac{V^2}{(f + d)g}$$

A l'aide de cette formule, on peut calculer la valeur minimum du rayon d'un virage pour qu'il soit pris sans déraiper à une vitesse donnée. On peut également connaître à quelle vitesse maximum on peut prendre un virage de rayon R .

1-1-6 Confort et sécurité

Le confort de l'utilisateur d'un véhicule dépend d'abord du véhicule (sièges, suspension, aménagement intérieur, visibilité) et ensuite de la route. Il faut noter que la sécurité de conduite est étroitement liée au confort.

L'influence de la route dans le confort est certes liée à l'état de l'uni de la chaussée (secousses imposées aux passagers) mais aussi aux caractéristiques géométriques (homogénéité des caractéristiques sur de grandes sections, meilleures visibilité, qualité du tracé) et à la signalisation.

1-2 ETUDE DU TRAFIC

1-2-1 Objet et définitions

L'aménagement et l'exploitation des infrastructures routières nécessitent de connaître tous les aspects de la circulation des automobiles. L'étude du trafic est importante :

- pour éclairer certaines décisions politiques
- pour apprécier, estimer la rentabilité des projets routiers
- pour apprécier la valeur économique des projets

Pour ce faire il faut pouvoir prévoir le trafic lors de l'étude du projet. La prévision du trafic peut être déterminée à travers la connaissance des paramètres suivants :

- **l'accroissement normal du trafic** : dû au fait de l'activité économique de la région qui crée une certaine richesse
- **l'accroissement de transfert** : du fait que l'on abandonne un itinéraire au profit d'un autre
- **l'accroissement induit** : qui résulte de la révélation des potentialités économiques cachées d'une région

En observation aérienne, le mouvement des véhicules sur une route sans être brownien (mouvement incessant de particules microscopiques d'un gaz ou d'un liquide) est complexe. L'analyse du trafic est très délicate, mais des approches théoriques ont été tentées par analogie avec les théories de transport des fluides. C'est ce qui justifie l'utilisation dans les études de trafic de certains vocables en usage dans ces théories.

Définitions

Concentration : on appelle concentration en un point et à un instant donné, le nombre de véhicule par unité de longueur de la route ou de la voie. Si f le nombre de véhicule qui au temps t ont une vitesse comprise entre v et $v+dv$, on a la concentration qui est :

$$K(x,t) = \int_0^{\infty} f dv$$

Débit : On appelle débit en un point x le nombre de véhicule passant durant l'unité de temps (en général l'heure)

$$q(x,t) = \int_0^{\infty} f.v dv$$

Vitesse moyenne : la vitesse moyenne des véhicules à l'instant t sur un tronçon est la vitesse de véhicules qui passent au point d'abscisse x durant un certains temps

$$V(x,t) = \frac{q(x,t)}{K(x,t)}$$

On peut écrire l'équation de continuité : $\frac{\partial K}{\partial t} + \frac{\partial q}{\partial x} = 0$

1-2-2 Ecoulement du trafic sur une route

Si on considère une circulation dite fluide, elle sera caractérisée par :

- un débit faible
- une dispersion assez grande des vitesses de véhicule
- l'absence de queue ou peloton de véhicules
- un faible nombre de dépassement

Lorsque le trafic augmente on note une réduction des espacements, la concentration va augmenter (les véhicules rapides vont être gênés), la dispersion des vitesses va diminuer et le débit va croître.

Si les conditions de circulation restent convenables, l'écoulement est stable et répond à certaines lois statistiques.

Avec une augmentation supplémentaire du trafic, la situation devient critique. On assiste à un écoulement stable mais il n'est pas possible de faire croître le débit. Il s'ensuit une diminution simultanée de la vitesse et du débit des véhicules qui circulent alors à une vitesse quasi constante.

La vitesse « praticable » sur la section va décroître jusqu'à une valeur critique correspondant au débit maximum de la section de la route. Ce débit maximum qui se situe à la limite d'une zone de stabilité de régime est appelé **capacité** de la route.

La capacité est le débit horaire maximum qu'une route peut supporter, les véhicules pouvant circuler dans des conditions acceptables. Elle dépend de la largeur de la route, du nombre de voies, de la largeur des accotements ou dégagements latéraux, de la composition du trafic (proportion des poids lourds).

Cette capacité permet de caractériser le niveau de service (ou service offert à l'utilisateur) ou la faciliter de circulation.

Dans les conditions idéales (pas de camions, en plaine, bonne visibilité, route revêtue) une route a une capacité de :

- ❖ - 2voies : 2000 véh/h au total
- ❖ 3 voies : 4000 véh/h au total
- ❖ Autoroute : 2000 véh/h par voie

On introduit un coefficient de réduction de la capacité en fonction du pourcentage de camions, de la topographie et d'autres paramètres (largeur des voies, existence aux bords de ces voies de bornes, poteaux, arbres assez proches, illusion d'optique).

Le Highway Capacity Manual des USA définit 6 niveaux de services (niveau adopté par les pays européens) :

- Niveau A :** Circulation absolument libre. Vitesse praticable égale à la vitesse de base. Débit de service environ 700 u.v.p/h par voie
- Niveau B :** Circulation très aisée. Vitesse praticable égale au moins à 90 km/h. Débit par de service 1000 u.v.p/h par voies en moyenne
- Niveau C :** Ecoulement stable : vitesse de l'ordre de 80 km/h. Débit de service : introduction de l'étude de l'intensité de pointe (sur 5 mn), qui ne doit pas dépasser 1500 u.v.p/h par voie.
- Niveau D :** Ecoulement approchant de l'instabilité. Vitesse praticable de l'ordre de 60 km/h. Intensité de pointe de l'ordre de 1800 u.v.p/h par voie.

Niveau E : Ecoulement instable. Vitesses maximales de l'ordre de 50 km/h. débit atteignant parfois la capacité. L'intensité de pointe perd son importance du faite de la relative constance du débit.

Niveau F : Niveau de service inacceptable. Ecoulement forcé. Les vitesses et les débits sont essentiellement fonction des goulots situés en aval.

1-2-3 Formulation de la demande du trafic sur une route

Les demandes sont essentiellement des débits mais on s'intéresse au débit moyen, débit mesuré durant une période de temps plus ou moins significative, par exemple l'heure. On parle de débit horaire moyen.

Pour examiner la demande, les débits horaires sont classés comme les débits d'une rivière ou les intensités de pluie. On établit un classement statistique des débits. Ainsi on a le débit dépassé 1h, 2h, 3h ou 500h par an.

Pour un itinéraire, on dresse l'histogramme des débits horaires. On enregistre donc les débits horaires qui se manifestent durant une année soit 8760 heures et on les classe sur l'échelle des temps ou sur l'échelle des usagers.

On définit :

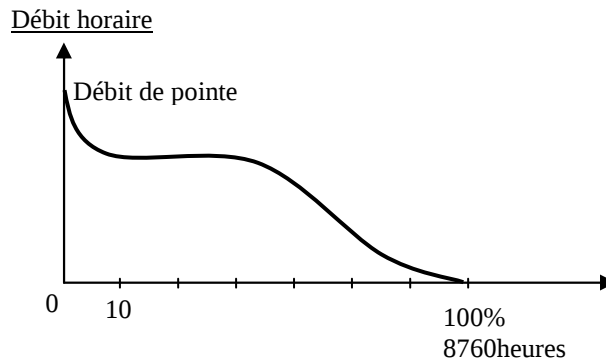
- le débit horaire moyen de l'année : $\bar{Q}$
- le débit journalier moyen de l'année : $J = 24\bar{Q}$
(appelé aussi moyenne journalière annuelle : *MJA*)
- le débit horaire uniforme équivalent : N

Des observations faites sur de nombreuses routes en Europe et aux USA ont permis d'établir certaines conclusions statistiques dans le cas d'une route non saturée. En résumé, il a été établi que :

- Le quart du trafic d'une année s'écoule en moins de 10% du temps, avec des débits horaires au moins égaux à $2\bar{Q}$ (débit de la 800^e heure)
- La moitié du trafic d'une année s'écoule dans un peu moins du quart du temps avec des débits au moins égaux à $1,5\bar{Q}$ (débit de la 200^e heure)
- Les $\frac{3}{4}$ du trafic de l'année s'écoulent en moins de la moitié du temps à des débits au moins égaux à $\bar{Q}$ (4000^e heure).

En rase campagne, le débit Q_{30} de la 30^e heure est de l'ordre de $4,2\bar{Q}$. Il est dépassé durant 0,34% du temps par environ 2% des usagers.

On dit grossièrement que le débit de la 30^e heure (correspondant au niveau B) est égal au 1/6 du débit journalier : $Q_{30} = \frac{1}{6} MJA$



1-2-4 Méthodes d'observation du trafic

Plusieurs méthodes d'observation du trafic existent, mais les recherches actuelles sont surtout fondées sur les méthodes permettant une description précise du trafic avec des techniques de dépouillement et traitement automatiques des enregistrements. Parmi les méthodes utilisées on peut citer :

- les méthodes cinématographiques : station fixe en élévation permettant d'identifier les véhicules ;
- les méthodes ultrasonores : on place en divers points d'une section et au dessus de celle-ci des émetteurs-récepteurs qui captent les échos renvoyés par les véhicules passants ;
- les méthodes d'insertion de véhicules dans le trafic et munis d'appareils d'enregistrement.

Pour rendre compte de l'évolution de la circulation routière en vue de l'amélioration du réseau routier (aménagement des voies, création de routes nouvelles), il est indispensable de procéder à des comptages et à des enquêtes :

Le comptage consiste à recenser les véhicules. Il peut être fait soit manuellement soit automatiquement.

Comptages manuels : ils sont effectués par des agents recenseurs qui déterminent aussi bien le volume global du trafic que sa structuration en poids lourds et en trafic léger. Les comptages se font périodiquement en des points fixés d'avance. En Côte d'Ivoire, les comptages devraient se dérouler sur l'ensemble du territoire à des époques bien déterminées correspondant à des maxima et minima du trafic.

Comptages automatiques : ils sont exécutés par des appareils automatiques. Ces appareils totalisent ou enregistrent pendant un intervalle de temps donné tous les véhicules ayant franchi un point appelé poste de comptage. Ces appareils bien que donnant le volume global du trafic ne donnent aucune information sur les différentes catégories de véhicules en circulation.

1-2-5 Prévision du trafic

La prévision du trafic sur un réseau routier doit tenir compte de plusieurs facteurs (transport de matières premières ou de produits finis entre zone de production et zone de traitement ou de consommation, transport de domicile au lieu de travail et vice-versa, transport scolaires).

La première approche de prévision de trafic peut être faite par une étude sociologique pour apprécier le comportement des usagers.

Le modèle le plus simple et le plus ancien est celui qui représente la demande T de transport à la distance D , entre deux centres urbains de population P_1 et P_2 .

$$T = K \frac{(P_1 P_2)^a}{D^b}$$

D : distance de transport

a et b sont des paramètres ($0,6 < a < 0,75$ $1,65 < b < 2$)

K coefficient dépendant de l'activité économique de la région

La prévision du trafic (T_n) pour un itinéraire donné consiste à prolonger dans le temps le trafic observé par le passé en tenant compte du facteur de croissance : $T_n = T_0 (1 + a)^n$

1-2-6 Configuration des essieux et silhouettes des véhicules

La transmission des charges du véhicule à la route se fait par l'intermédiaire de ses essieux. Un véhicule comporte un ou plusieurs ensembles d'essieux. Ces essieux sont soit simples, soit associés en tandem ou tridem. La configuration et le nombre d'essieux du véhicule lui confèrent une silhouette particulière. Par exemple :

11	-	2 essieux simples (AR et AV)
12	-	1 essieu simple AV, 1 essieu tandem AR
123	-	1 essieu simple AV, 1 essieu tandem central, 1 essieu tridem AR

L'essieu peut comporter soit des roues simples, soit des roues jumelées

1-2-7 Notion d'agressivité

La notion d'agressivité est très importante dans la conception routière. Elle est liée au trafic et dépend fortement de sa composition (proportion des véhicules lourds).

On définit l'agressivité d'un essieu, d'un véhicule et celui d'un trafic donné.

a) Agressivité d'un essieu

L'agressivité A d'un essieu est le rapport du dommage susceptible d'être causé à la chaussée par cet essieu à celui qui serait causé par un essieu de référence P_0

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

K est un coefficient permettant de tenir compte du type d'essieu (simple, isolé, tandem, tridem)

K et α dépendent de la structure de chaussée. Le Guide Technique de conception et dimensionnement des structures de chaussées du SETRA-LCPC donne les valeurs suivantes en fonction de la nature de des essieux et du type de structure de chaussée.

		K		
Structures	α	Essieu simple	Essieu tandem	Essieu tridem
Structures souples et bitumineuses	5	1	0,75	1,1
Structures semi-rigides	12	1	12	113
Structures en béton				
- Dalle	12	1	12	113
- Béton armé	12	1	-	-

En Côte d'Ivoire le calcul d'agressivité est jusqu'à aujourd'hui effectué avec la formule dite de la « puissance 4 »

$$A = \left(\frac{P}{P_0} \right)^4$$

b) Aggressivité d'un véhicule

L'agressivité du véhicule est la somme des agressivités de ses essieux.

c) Aggressivité d'un trafic

L'agressivité d'un trafic est égale à l'agressivité moyenne des véhicules composant ce trafic par rapport à l'essieu pris pour référence.

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

Où :

CAM : coefficient d'agressivité moyen

N_{PL} : nombre de poids lourds pendant la période de comptage

K_j : coefficient correspondant au type d'essieu

j = 1 essieu simple

j = 2 essieu tandem

j = 3 essieu tridem

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

P_i

P₀ : charge de l'essieu de référence

1-2-8 Le trafic équivalent en nombre d'essieux

Il s'agit du nombre équivalent d'essieux de référence correspondant au trafic poids lourd cumulé sur la durée initiale de calcul retenue. En Côte d'Ivoire l'essieu de référence est l'essieu de 13 tonnes.

Le trafic équivalent est fonction :

- des valeurs escomptées du trafic à la mise en service de la route et du taux de croissance τ pendant la durée initiale de calcul,
- de la composition du trafic (distribution des natures d'essieux et charges à l'essieu)
- de la structure de la chaussée

Il est calculé par la relation :

$$NE = N_{cum} \times CAM$$

Où NE est le nombre d'essieu équivalent

CAM : Coefficient d'Agressivité Moyen des poids lourds par rapport à l'essieu de référence

N_{cum} : Nombre cumulé de poids lourds pour la période de calcul de n années

Calcul de N_{cum}

$$N_{cum} = 365 \times T_{jPL} \times R,$$

Où R est le facteur de cumul sur la période de calcul

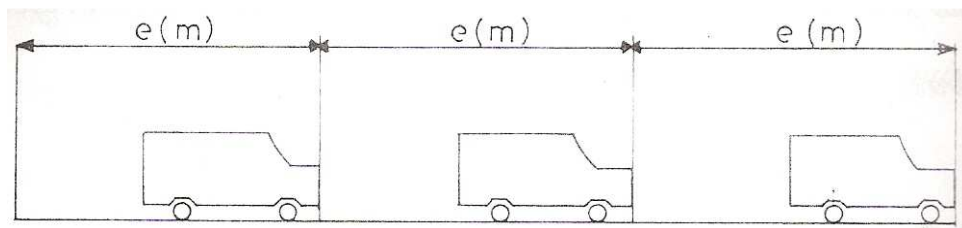
T_{jPL} : est le trafic journalier de poids lourds à l'année de mise en service.

Pour n années et un taux de croissance géométrique τ constant sur cette période, la valeur de

$$R \text{ s'obtient par : } R = \frac{[(1 + \tau)^n - 1]}{\tau}$$

1-2-9 Formulation de l'offre de trafic : Calcul de la capacité d'une route

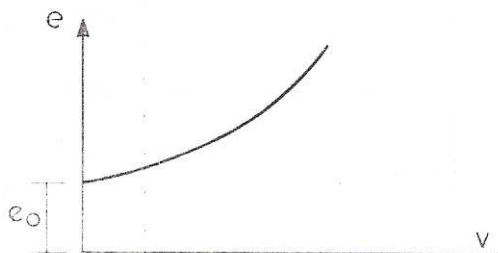
1-2-9-1 Illustration



On considère une file de véhicules marchant tous à la vitesse V (en km/h) avec le même espacement e (en mètre) de pare-choc-avant à pare-choc-avant.

Le débit Q sur la voie est donné par $Q = \frac{1000 \times V}{e}$

Pour des raisons de sécurité, l'espacement e doit être ajusté à la vitesse selon une relation qui peut être représentée graphiquement par la courbe ci-après



e doit être au moins égal à longueur des véhicules e_0 , et doit prendre en compte le temps de réaction du conducteur du véhicule suivant. On obtient ainsi une expression de e en fonction de la vitesse. Selon Coquand $e(V) = 8 + 0,2V + 0,03V^2$

Pour la relation $Q = \frac{1000 \times V}{e}$ et pour une vitesse de 50 Km/h on obtient un maximum de débit $Q = 1960$ véhicules/heure. On arrondit à 2000 v/h

1-2-9-2 Différents types de capacités

a) La capacité limite

C'est le nombre maximum de véhicules pouvant circuler sur une route pendant un temps donné, lorsque la circulation se fait dans des conditions optimales. Une telle circulation n'est obtenue que si tous les véhicules sont des voitures de tourisme et circulent à la même vitesse de 50 km/h et se suivent à la même vitesse de 25 m. La capacité dans ces conditions pour une voie de circulation est de 2000 véh/h

b) Capacité possible

La capacité possible est le nombre maximum de voitures pouvant circuler sur la route pendant un temps donné. La circulation ayant les caractéristiques optimales. Puisque qu'il n'est pas possible d'obliger toutes les voitures à circuler à la même allure, notamment les véhicules rapides à circuler à 80 km/h, la congestion de l'itinéraire reste incomplète. De façon à laisser un minimum de liberté de manœuvre aux véhicules rapides leur permettant de circuler dans des conditions acceptables.

1-2-9-3 Calcul de la capacité

Les capacités des routes sont influencées par un certain nombre de facteurs qui sont :

- La largeur des voies
- La largeur des accotements ou dégagements latéraux sans obstacles
- La proportion des poids lourds

a) Méthode de calcul

La méthode de calcul de la capacité consiste à multiplier la capacité théorique unitaire C_0 soit 2000UVP/h par voie, par le nombre de voies. On obtient ainsi la capacité théorique de la route. Pour obtenir la capacité réelle on applique un coefficient réducteur

On a le débit de service $DS = 2000 \times n \times \frac{d}{c} \times p \times C_n$

Où n : nombre de voies dans une direction

$\frac{d}{c}$: rapport du débit à la capacité réelle

p : facteur d'ajustement concernant la largeur des voies et le dégagement

C_n : facteur d'ajustement concernant les camions

b) Eléments de correction

Le trafic intervient par l'application de coefficient d'équivalence qui permet de traduire tous les véhicules composant le trafic en Unité de Voitures Particulières (UVP).

Les valeurs des coefficients sont données dans les tableaux suivants :

Pente en %	Coefficient d'équivalence	
	Niveau de service A et C	Niveau de service D et B
0 - 4	1,6	1,6
5	4	2
6	7	4
7	12	10

% Camion	Facteur Cn pour tous les niveaux		
	Profil		
	Plaine	Vallonné	Montagneux
1	0,99	0,97	0,93
2	0,98	0,94	0,88
3	0,97	0,92	0,83
4	0,96	0,89	0,78
5	0,95	0,87	0,74
10	0,91	0,77	0,59
15	0,87	0,69	0,49
20	0,83	0,63	0,42

Facteur d'ajustement pour des voies de largeur respective 3,6 m et 3,00 m

Distance séparant le bord de la chaussée à l'obstacle (m)	Facteur d'Ajustement			
	Obstacles existant sur un seul côté d'une chaussée unidimensionnelle		Obstacles existant des 2 côtés d'une chaussée unidimensionnelle	
1,80	1,00	0,91	1,00	0,91
1,20	0,99	0,90	0,98	0,89
0,60	0,97	0,88	0,94	0,86
0	0,90	0,82	0,81	0,74

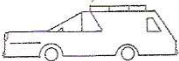
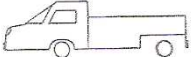
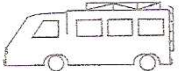
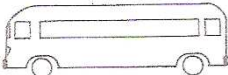
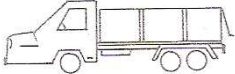
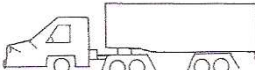
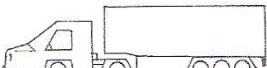
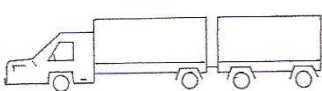
TABLEAU 1

SILHOUETTES, CONFIGURATIONS ET PROPORTIONS
DES DIFFERENTS TYPES DE VEHICULES

Silhouette N°	Illustration	Configuration Symbole (essieux)	Proportions respectives	
			Par rapport au total	Par rapport au groupe
1	<u>Voitures</u> 	11	25 %	VEHICULES LEGRS 34 %
2		11	25 %	
3	<u>Camionnettes</u> 	11	8 %	
4		11	16 %	
			V.L = 100 %	
5	<u>Autobus</u> 	11	2,4 %	7,7 %
6		11	p.m (ABIDJAN)	
7	<u>Camions</u> 	11	13 %	POIDS LOURDS 52,2 %
8		12	0,6 %	
9	<u>Semi-remorques</u> 	111	0,1 %	
10		112	2,4 %	
11		122	6,9 %	
12		113	0,3 %	
13		123	0,1 %	26,2 %
14		1111	0,2 %	1,2 %
			100 %	0,7 %
			P.L = 100 %	
<u>Nota</u> • Les lettres sous les roues indiquent si la roue est simple (S) ou jumelée (J) • 1 = Essieu simple 2 = Essieu tandem 3 = Essieu tridem				

Tableau 2

Poids totaux en circulation par type de silhouette et répartition des charges sur les essieux

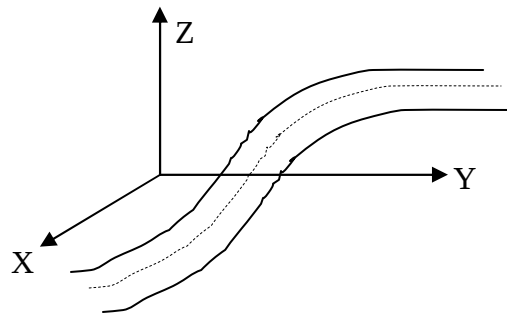
Silhouette N°	Illustration	Poids total roulant moyen (tonne)	Répartition de la charge (PTR) sur les essieux
1		1,5	50% 50% ↓ ↓
2		2,0	40% 60% ↓ ↓
3		3,0	34% 66% ↓ ↓
4		4,0	34% 66% ↓ ↓
5		8	37% 63% ↓ ↓
6		14	37% 63% ↓ ↓
7		12	37% 63% ↓ ↓
8		18	35% 65% ↓ ↓
9		25	16% 42% 42% ↓ ↓ ↓
10		31	19% 36% 45% ↓ ↓ ↓
11		38	16% 42% 42% ↓ ↓ ↓
12		44	14% 32% 54% ↓ ↓ ↓
13		48	13% 35% 52% ↓ ↓ ↓
14		27, 4	22% 36% 22% 20% ↓ ↓ ↓ ↓

DEUXIEME PARTIE : LA GEOMETRIE ROUTIERE

CHAPITRE 1 : LES NORMES GEOMETRIQUES DES ROUTES

1-1 DEFINITION DU PROJET DE ROUTE

Une route est une surface gauche dont les différents points constitutifs pourraient être repérés dans un système de coordonnées tridimensionnelles.



- X et Y désignent les coordonnées planimétriques dans le système MTU en Cote d'Ivoire
- Z est la coordonnée altimétrique dans le système N.G.CI (Nivellement général de la Cote d'Ivoire)

La géométrie routière est l'ensemble des techniques ou outils mathématiques permettant de définir les caractéristiques du projet routier en respectant les conditions de confort et de sécurité de l'utilisateur.

Dans la pratique, la route est définie par un ensemble de trois paramètres :

- Le tracé en plan : c'est la projection verticale de la route sur un plan horizontal imaginaire.
- Le profil en long : c'est le développement de l'intersection de la route avec une surface courbe à génératrice verticale passant par l'axe de la route.
- Le profil en travers : c'est une coupe transversale perpendiculaire à l'axe de la route.

1-2 NOTION DE VITESSE DE REFERENCE

La vitesse de référence V_r est une vitesse conventionnelle, définie par le maître d'ouvrage (le Ministère chargé des Infrastructures Economiques) en fonction des catégories de voies et qui permet de définir les caractéristiques minimales d'aménagement des points particuliers de la route (virage, rampes). Elle confère donc à la route des caractéristiques homogènes mettant l'utilisateur à l'abri de surprise.

La vitesse de référence est toujours un multiple de 20. En Cote d'Ivoire on a

- sur l'autoroute : $100 \text{ km/h} < V_r < 120 \text{ km/h}$
- sur les voies interurbaines $80 \text{ km/h} < V_r < 100 \text{ km/h}$

- sur les voies urbaines $40 \text{ km/h} < V_r < 80 \text{ km/h}$

1-3 LES NORMES SUR LE TRACE EN PLAN ET LE PROFIL EN LONG

1-3-1 Le tracé en plan

1-3-1-1 Rayons minima

Les normes prévoient quatre natures de rayon minimum

1°) le **rayon minimal absolu R_{Hm}** : rayon en dessous duquel on ne peut en aucun cas descendre.

2°) Le **rayon minimal normal R_{HN}** : rayon en dessous duquel on ne descend normalement pas.

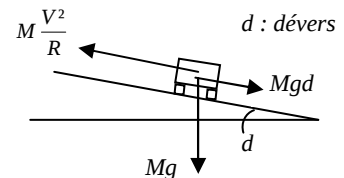
3°) Le **rayon au dévers minimal $R_{H''}$** : rayon en dessous duquel la route est obligatoirement déversée.

4°) Le **rayon non déversé $R_{H'}$** : rayon au-delà duquel on n'est pas obligé de déverser la route.

Aux différents rayons sont associés différents dévers. Pour chaque vitesse de référence les abaques donnent Rayon – Dévers.

1-3-1-2 Les raccords progressifs

Un raisonnement théorique simpliste amènerait à conclure que les véhicules quittant un alignement droit (AD) pour entrer dans une courbe circulaire adjacente subiraient une variation d'accélération transversale γ_T



Dans la pratique, l'automobiliste utilise toute la largeur de sa voie de circulation pour "négocier" son virage. En fait, il se définit ainsi une trajectoire à courbure progressive qui répartit la variation d'accélération transversale sur une certaine longueur.

Les normes prévoient des raccords à courbures progressives entre les courbes circulaires et les alignements droits. Ces raccords progressifs permettent d'assurer, avec l'introduction progressive du dévers et de la courbure, des conditions de stabilité et de confort dynamique lesquelles limitent par unité de temps la variation de sollicitation transversale des véhicules. Longueurs correspondantes

a)- **Choix de la courbe de transition**

En règle générale, on utilise la clothoïde d'équation :

$$R \times L = A^2 \quad \begin{array}{l} A : \text{paramètre de la clothoïde} \\ L : \text{abscisse curviligne} \\ R : \text{rayon du cercle} \end{array}$$

b)- **Longueur des raccordements**

Elle dépend des deux conditions ci-dessus :

1°) **Condition de confort dynamique**

Elle limite la variation de dévers de la chaussée parcourue à la vitesse V_r à 2% par seconde.

$$L \geq \frac{d_2 - d_1}{2} \times \frac{V_r}{3,6} \quad d_1 - d_2 = \Delta d$$

Δd : variation de dévers entre l'AD et le cercle

V_r : vitesse de référence en km/h

L : longueur du raccordement progressif

2°) **Condition de confort optique**

On admet en général que pour être perceptible un raccordement progressif doit correspondre à un changement de direction supérieur ou égal 3°

$$\left. \begin{array}{l} \Delta R \geq 0,50 \text{ m} \\ \text{si } \tau \geq 3\% \quad \Delta R \approx \frac{L^2}{24R} \end{array} \right\} \boxed{L \geq \sqrt{12R}} \quad \tau \text{ est la déclivité}$$

Remarque : la condition de confort dynamique est déterminante pour les petits rayons, ensuite c'est la condition de confort optique qui est prépondérante.

1-3-1-3 **Choix de largeur dans la courbe de transition**

Lorsqu'un véhicule entre dans une courbe, il occupe une largeur de voie plus grande que sur l'alignement droit. En effet, à cause de l'empattement du véhicule, les roues arrière n'épousent pas le tracé de celles de l'avant.

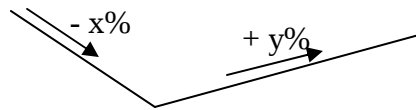
Pour les rayons < 200 m, la surlargeur en courbe par voie de circulation est calculée par la formule :

$$S = \frac{50}{R}$$

1-3-2 Le profil en long

1-3-2-1 Caractéristiques du profil en long

Le profil en long, représentation plane sur la surface à génératrice verticale contenant l'axe de la route, est constitué de droites raccordées en point haut (angle saillant) et en point bas (angle rentrant) à l'aide de courbe circulaires ou paraboliques.



Terminologie :

Rampe : déclivité positive

Pente : déclivité négative

1-3-2-2 Éléments de calcul du profil en long

Le dimensionnement des éléments mathématiques constitutifs du profil en long résulte de la prise en compte de vitesses touchant, soit au confort de l'utilisateur, soit à la garantie des conditions de visibilité autorisant l'accomplissement de certaines opérations de conduite (arrêt, dépassement, déviation d'obstacles, etc.)

a)- Déclivité maximale en rampe

Elle est fixée à partir des caractéristiques dynamiques des profils en long et par rapport au niveau de service affecté à chaque catégorie de route. (Voir §°1-4)

b)- Rayons en angle saillant (voir §°1-4)

Un rayon en angle saillant (convexe) constitue un masque longitudinal qui limite le champ de vision de l'automobiliste. On définit :

1°) Rayon minimal absolu RV_{m1}

Il assure la visibilité à la distance d'arrêt sur obstacles fixes

2°) Rayon minimal normal RV_{N1}

Utilisé pour les routes à quatre voies ou à deux chaussées (2x2)

3°) Rayon minimal absolu RV_{m2}

Il assure la distance de visibilité de manœuvre de dépassement, autorise en toute sécurité l'interruption ou la poursuite du dépassement, selon que le véhicule adverse termine ou abandonne une manœuvre identique.

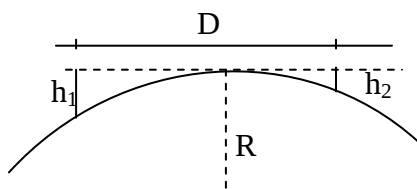
4°) Rayon minimal normal RV_{N2}

Routes à deux voies

5°) Rayon de distance de dépassement minimale sur routes à 2 ou 3 voies RDV

Il assure la distance de visibilité de dépassement minimale.

La détermination de ces rayons se fait à partir des paramètres cinématiques ; elle résulte des considérations géométriques figurant sur le schéma suivant :



Les conventions relatives aux hauteurs de l'œil et des obstacles sont les suivantes :

- h1 = 1 m (hauteur de l'œil)
- h2 = 0,15 m pour un obstacle fixe au sol
- h2 = 1,20 m pour un véhicule adverse

$$2R = \frac{D^2}{(\sqrt{h_1} + \sqrt{h_2})^2}$$

c)- Rayons en angle rentrant (voir §°1-4)

1°) Rayon minimal absolu RV_{m'}

Il découle de considérations relatives à la visibilité de nuit (éclairage du faisceau des phares) pour $V < 80$ km/h, ou de confort dynamique (limitation de l'accélération verticale à $g/40$) pour $V \geq 80$ km/h.

2°) Rayon minimal normal RV_{N'}

1-4 LES PARAMETRES FONDAMENTAUX DES PROJETS ROUTIERS

DESIGNATION DU PARAMETRE				SYMBOLE ET UNITE	VITESSE DE REFERENCE VR (KM/H)				
					40	60	80	100	120
TRACE EN PLAN	Dévers maximal			δM (%)	7	7	7	7	7
	Rayon en plan RH (m)	minimal absolu (dévers δM)		RHm	40	120	240	425	665
		minimal normal (dévers)		RHN (δ%)	120 (5%)	240 (5%)	425 (5%)	665 (4%)	1000 (4%)
		au dévers minimal (*)		RH'' (2,5%) RH'' (2%)	250 300	450 500	650 700	900 1000	1500 1600
		non déversé		RH'	400	600	900	1300	1800
PROFIL EN LONG	Déclivité maximale en rampe			π m (%)	8	7	6	5	4
	Rayon en angle saillant RV (m)	Chaussée unidirectionnelle	minimal absolu	RVm ₁	500	1500	3000	6000	12000
			minimal normal	RVN ₁	1500	3000	6000	12000	12000
		Chaussées bidirectionnelles (route à 2 ou 3 voies)	minimal absolu	RVm ₂	500	1600	4500	10000	
			minimal normal	RVN ₂	1600	4500	10000	17000	
	Rayon en angle rentrant RV' (m)	minimal absolu		RVm'	700	1500	2200	3000	4200
		minimal normal		RVN'	1500	2200	3000	4200	6000
	Rayon assurant la distance de visibilité de dépassement minimale sur route à 2 ou 3 voies			RDV (m)	2500	6500	11000	17000	28000

(*) le devers minimal est de 2,5% pour les chaussées en béton bitumineux, 2% pour les chaussées en béton de ciment

1-5 LES PARAMETRES CINEMATQUES DES PROJETS ROUTIERS

Vitesse du véhicule		V (km/h)	40	60	80	100	120
Longueur de freinage		d _δ (m)	15	35	60	105	170
Distance d'arrêt en AD		d ₁ (m)	40	70	105	160	230
Distance d'arrêt en courbe		d ₂ (m)	45	80	120	180	280
Distance de visibilité de dépassement	minimal	d ₄ (m)	150	250	325	400	500
	normal	d _D (m)	250	350	500	625	800
Distance de visibilité de manœuvre de dépassement		dM _d (m)	70	120	200	300	400

CHAPITRE 2 : LA RECHERCHE DE TRACE

2-1 GENERALITES

Pour construire une voie de communication répondant à des caractéristiques géométriques données entre une localité située à un point A (origine) et une autre située en B (extrémité), on peut être amené :

- soit à créer une nouvelle voie
- soit à améliorer les caractéristiques d'une voie existante

Le tracé de la route projet se fera de telle sorte que :

- il soit le plus direct possible afin de réduire les distances de parcours, tout en respectant les impératifs liés aux points de passage obligé et les obstacles à éviter.
- les destructions soient minimisées (impact environnemental) et que le tracé épouse le plus possible le niveau du terrain naturel.

2-2 LES DIFFERENTES ETAPES D'UNE ETUDE ROUTIERE

Une étude routière s'effectue en trois étapes fondamentales :

2-2-1 Les études préliminaires

Elles comportent les reconnaissances et la recherche de documentations : cartes topo, cartes géologiques et hydrologiques (cartes au 1/50 000^e ou 1/20 000^e) et les photos aériennes). On procède à cette phase à :

- une première reconnaissance sur le terrain afin d'avoir un premier aperçu des lieux
- repérer sur les cartes, les points de passages obligés et les obstacles à éviter.
- une esquisse du tracé en fonction des connaissances géologiques, hydrologiques et des contraintes politiques),

2-2-1-1 Le tracé en plan

On effectue un premier tracé à main levée en tenant compte de certaines règles de base :

- éviter les très longs alignements droits (< 2 km)
- suivre les lignes de niveaux en terrain fortement vallonné

2-2-1-2 Le profil en long

On exécute un profil en long succinct du terrain naturel suivant le tracé en plan, en respectant :

- le tracé de la voie existante, soit pour s'y raccorder, soit pour passer à niveaux séparés
- les gabarits (cours d'eau, chemin de fer, etc.)
- les cotes d'inondation de certains terrains
- le niveau de la roche dure afin d'éviter les déblais à explosif

On termine les études préliminaires par une estimation sommaire du projet.

2-2-2 L'Avant-projet Sommaire (APS)

Les études préliminaires permettent de délimiter une bande de terrain de 500 m sur laquelle des levées topographiques au 1/10 000^e ou 1/5 000^e seront effectuées. L'APS comporte les étapes suivantes :

2-2-2-1 La reconnaissance du site

Le projeteur doit se déplacer sur le site pour reconnaître le terrain (faire à pieds l'ensemble du tracé).

2-2-2-2 L'établissement des plans

Idem que pour les études préliminaires mais avec une précision nettement améliorée.

2-2-2-3 Le calcul des cubatures

Pour le calcul des cubatures on définit une bande de 200 m de large sur laquelle seront effectuées des levées topographiques au 1/2 000^e ou 1/1 000^e.

2-2-3 L'Avant-projet Détaillé (APD)

L'Avant-projet Détaillé consiste à :

- retenir une solution définitive qu'on reproduit dans le détail sur des plans au 1/2 000^e ou au 1/1 000^e. On indiquera des profils en travers tous les 20, 25 ou 40 m.
- examiner le dossier géotechnique et à adapter le tracé en plan et le profil en long en fonction des contraintes géotechniques.
- calculer le volume des terrassements (remblais, déblais)

- déterminer la position des ouvrages art puis leur dimensionnement.

2-3 CAS SPECIFIQUE D'UNE ROUTE EXISTANTE

Si on conserve une route existante, son aménagement consistera le plus souvent :

- à l'élargir pour tenir compte du trafic
- à lui conférer des caractéristiques compatibles avec la vitesse de référence.

La méthode de l'étude consiste :

1°) à calculer les de la route existante

2°) à faire l'étude d'une variante du tracé neuf. Ce dernier peut parfois être plus économique que la rectification successive ne conservant pratiquement rien de la route existante.

3°) à faire la rectification de l'existant. A ce niveau la difficulté est de pouvoir conserver les limites d'emprise et de respecter les éléments de base (courbes et AD imposés de fait)

Parfois il n'est pas toujours possible de respecter les caractéristiques minimales.

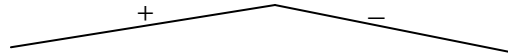
CHAPITRE 3 : DEVERS – VARIATION DE DEVERS

3-1 DEFINITION ET ROLE DU DEVERS

3-1-1 Définition

Le dévers représente l'angle que fait la partie supérieure de la chaussée avec l'horizontale. Il s'exprime en pourcentage (%).

Convention de signe :



3-1-2 Rôle du dévers

3-1-2-1 En alignement droit

De façon générale, en alignement droit le dévers a pour but principalement de permettre le bon écoulement des eaux de ruissellement. La valeur de dévers retenue en AD est de $\pm 3\%$.

3-1-2-2 En courbe

En courbe, en plus de permettre le bon écoulement des eaux de ruissellement, le dévers assure :

- la compensation d'une fraction de la force centrifuge afin de garantir la stabilité dynamique des véhicules
- l'amélioration du guidage optique.

Les valeurs retenues sont :

- Dévers minimal : il est nécessaire au bon écoulement des eaux superficielles. En AD le dévers est pris égal à $\pm 3\%$ (en Cote d'Ivoire il est associé au rayon au dévers minimal RH'')
- Dévers maximal : il est limité par les conditions de stabilité des véhicules lents ou à l'arrêt. Il est pris égal à $\pm 7\%$. Ce dévers est associé au rayon minimal absolu RHm
- Dévers associé au rayon minimal normal RH_N : il est pris égal à $\pm 5\%$ pour $V_r < 100$ km/h et $\pm 4\%$ pour $V_r \geq 100$ km/h.

Remarque :

- Pour les rayons compris entre RHm et RH_N, puis entre RH_N et RH'', les dévers associés aux différents rayons varient linéairement avec eux.

- Pour les rayons compris entre RH'' et RH' , le dévers est pris égal à $\pm 3\%$, selon l'orientation de la courbe.
- Pour les rayons supérieurs à RH' , le projeteur peut choisir de ne pas déverser la route.

3-2 REGLES D'EMPLOI ET PRINCIPE DE VARIATION DES DEVERS

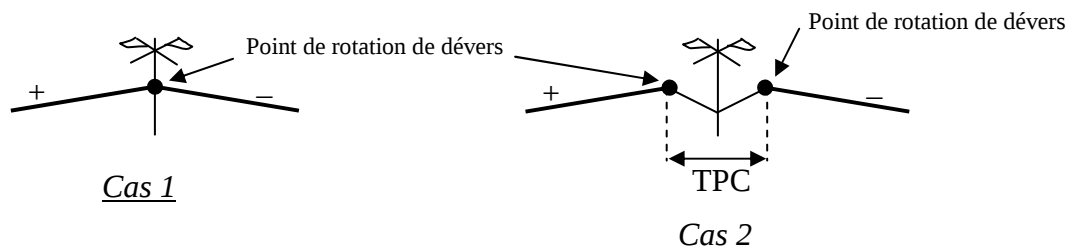
3-2-1 Principe de variation de dévers

Le dévers doit être constant en toute la partie circulaire de la courbe. Les variations de dévers se font sur des raccordements progressifs appelés clothoïde.

3-2-2 Ligne de rotation des dévers

Les rotations s'effectuent autour d'une ligne fictive qui suit le profil en long théorique de la route. Cette ligne est en règle générale :

- l'axe de la chaussée pour une route bidirectionnelle
- le bord intérieur de chacune des deux chaussées pour une route comportant 2 chaussées unidirectionnelles à 2 voies



Remarques : Parfois, pour des considérations d'assainissement ou d'organisation de chantier, on peut être amené à choisir une autre ligne de rotation (voir différentes options Géodis)

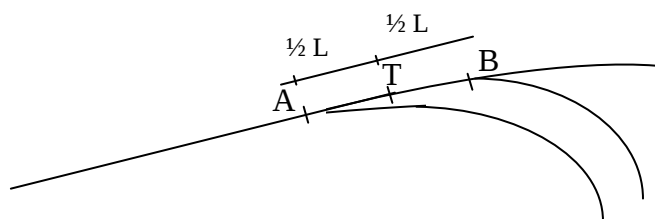
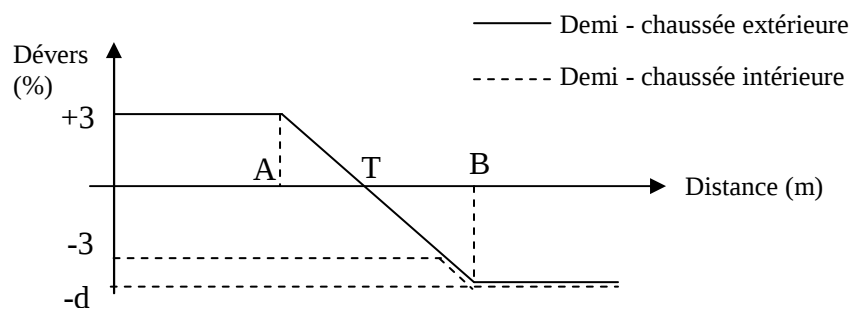
3-2-3 Disposition de détail

Au voisinage des zones de dévers nul, il convient de vérifier que la pente relative entre les bords de chaussée et l'axe théorique de la route est $\geq 0,5\%$. (pour permettre l'écoulement des eaux).

3-2-4 Diagramme de variation de dévers

Dans la pratique :

- On calcule la longueur de variation du dévers L
- On commence la variation de dévers en A de façon à ce que le point de tangence T droite-cercle se trouve à $L/2$ de A et B

Représentation graphique : cas droite-cercle.Vue en plan

CHAPITRE 4 : CALCUL DU TRACE EN PLAN

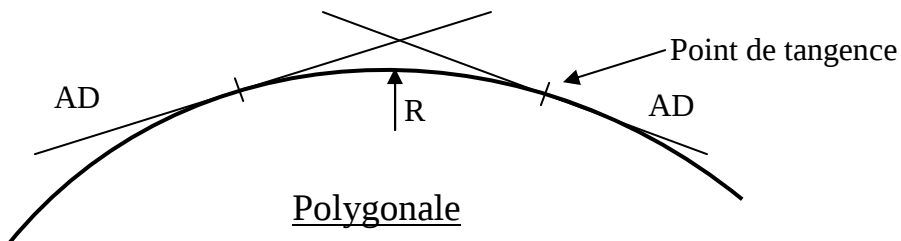
4-1 GENERALITES

Le tracé en plan d'une route est constitué d'alignements droits (AD), de cercles et dans la plupart des cas de raccordements progressifs (clothoïde).

Le repère est défini sur le terrain à l'aide de bornes fixes qui permettent d'implanter les différents points de la route.

La méthode à suivre est la suivante :

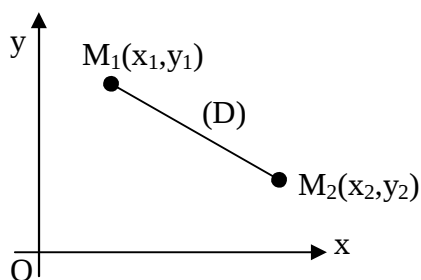
- 1°) construire la polygonale dans laquelle s'inscriront les courbes
- 2°) calculer les segments et les angles
- 3°) trouver les points de tangence des cercles
- 4°) placer éventuellement les clothoïdes



4-2 TRACE DES DROITES - CERCLES

4-2-1 Les droites

Dans un plan, une droite est définie par la connaissance de 2 de ses points. Soit une droite (D). si $M_1(x_1, y_1)$ et $M_2(x_2, y_2)$ deux points définissant la droite (D).



L'équation de la droite (D) s'écrit :

$$y - y_1 = \frac{y_1 - y_2}{x_1 - x_2} (x - x_1)$$

ou encore :

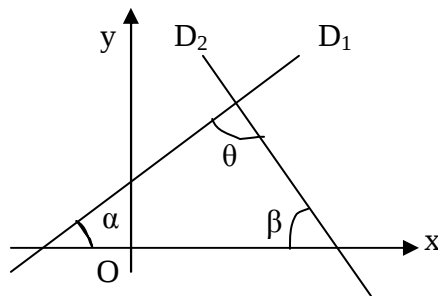
$$y = \left(\frac{y_1 - y_2}{x_1 - x_2} \right) x + \frac{y_2 x_1 - y_1 x_2}{x_1 - x_2}$$

La polygonale est une succession de segments de droites dont on peut calculer tous les éléments. En effet :

- Ayant l'équation des droites, on obtient les points d'intersection (ou sommets de la polygonale)
- La distance entre deux sommets s'obtient en appliquant la distance entre deux points dans un repère orthonormé :

$d = \sqrt{(x_1 - x_2)^2 + (y_1 - y_2)^2}$ avec x_i et y_i les coordonnées des sommets

- Les angles sont obtenus à partir des coefficients directeurs des droites. En effet si deux droites D_1 et D_2 ont pour équations respectives : $y = a_1x + b_1$ et $y = a_2x + b_2$ dans un repère orthonormé $(O; x; y)$ alors :
 $\alpha = \arctan(a_1)$ $\beta = \arctan(a_2)$ et $\theta = \pi - (\alpha + \beta)$

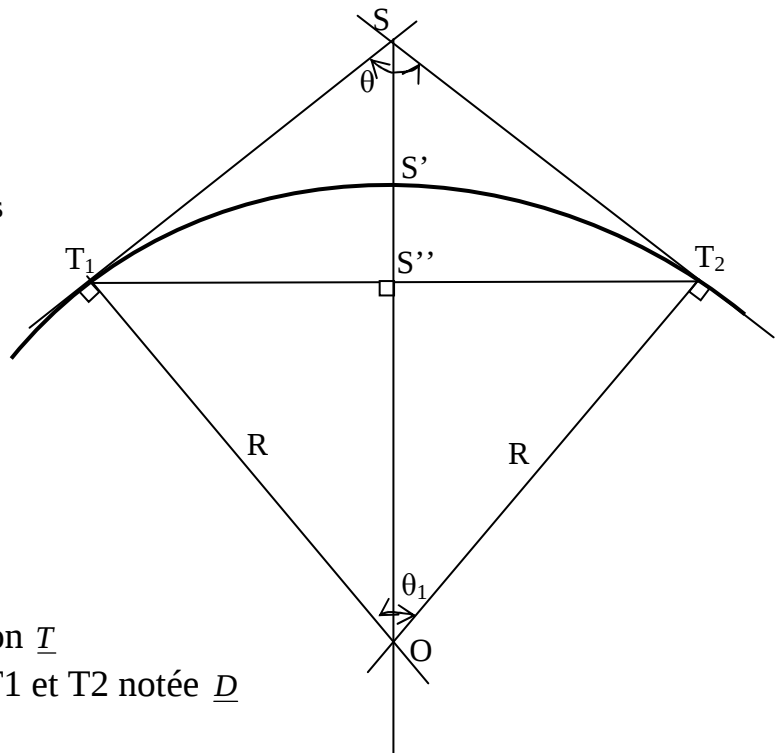


$D_1 : y = a_1x + b_1$ $D_2 : y = a_2x + b_2$ $\alpha = \arctan(a_1)$ $\beta = \arctan(a_2)$ $\theta = \pi - (\alpha + \beta)$
--

4-2-2 Les cercles

Les cercles s'inscrivent dans la polygonale. Ils sont tangents à deux segments successifs.

R et θ sont connus



Il s'agit de calculer :

- ST_1 ($= ST_2$) noté par convention $\underline{T}$
- la développée de la courbe en T_1 et T_2 notée $\underline{D}$
- la contre flèche SS' notée $\underline{CF}$
- la corde T_1T_2 notée $\underline{C}$
- et la flèche $S'S''$ notée $\underline{F}$

On déduit à partir de relations mathématiques simples que :

(1) $\theta = \pi - \theta_1$

$$(2) \underline{T} = R \tan\left(\frac{\theta_1}{2}\right) = R \tan\left(\frac{\pi - \theta}{2}\right)$$

$$(3) \underline{D} = R \theta_1 \text{ avec } \theta_1 \text{ en radian}$$

$$(4) \underline{CF} = R \left[\frac{1}{\cos\left(\frac{\theta_1}{2}\right)} - 1 \right]$$

$$(5) \underline{C} = 2R \sin\left(\frac{\theta_1}{2}\right)$$

$$(6) \underline{F} = R \left[1 - \cos\left(\frac{\theta_1}{2}\right) \right]$$

4-3 LES RACCORDEMENTS PROGRESSIFS : CLOTHOÏDES

4-3-1 Formule de la clothoïde

$$\boxed{A^2 = R \times L} \quad \left\{ \begin{array}{l} A : \text{paramètre de la clothoïde} \\ R : \text{rayon de courbure} \\ L : \text{abscisse curviligne} \end{array} \right.$$

4-3-2 Utilisation des clothoïdes

De façon général la clothoïde est un élément de raccordement entre un AD et un arc de cercle extérieurs l'un à l'autre (voir fig. 1). Mais selon la configuration du terrain on peut obtenir plusieurs courbes :

4-3-2-1 Courbe à sommet (fig. 2)

Deux arcs de clothoïdes, de concavité identiques, tangents entre eux au point où le rayon de courbure est identique et raccordant deux AD.

4-3-2-2 Courbe en C (fig. 4)

Idem que ci-dessus, mais raccordant deux arcs de cercle extérieurs ou sécants l'un à l'autre

4-3-2-3 Courbe en S (fig. 3)

Deux arcs de clothoïdes de concavité opposées, tangents entre eux au point où leur rayons de courbure est égal à l'infini et tangents à deux arcs de cercle.

4-3-2-4 Ove (fig5)

Arc de clothoïde raccordant deux arcs de cercle non concentriques et dont l'un est intérieur à l'autre.

4-3-3 Conditions générales

Voir paragraphe 1-3-2.

4-3-4 Utilisation des tables de clothoïdes

4-3-4-1 Table de clothoïde unité (Table KLAUSS)

Toutes les clothoïdes étant homothétiques, elles se déduisent de la clothoïde unité ($A = 1$), en multipliant les données de cette dernière par la valeur numérique A du paramètre : *valeur de taille*. Seuls les angles restent inchangés : *valeur de forme*.

4-3-4-2 Table de clothoïdes normalisées ("Die Klothoïde" KRENZ et OSTERLOH)

Connaissant deux données de la clothoïde cherchée, les inconnues de cette clothoïde peuvent être déterminée par lecture directe.

N.B. : les notations conventionnelles figurent en annexe 1

4-3-4-3 Applications pratiques – calculs

a°) Détermination de la clothoïde

- 1^{ère} phase : déterminer le point d'intersection D des deux AD successifs et mesurer l'angle au sommet α (opération effectuée par le topographe ou calculer à partir des coordonnées).
- 2^{ème} phase : déterminer les points de contacts fictifs A et C du raccordement circulaire avec les deux AD considérés.
- 3^{ème} phase : calculer les éléments de la clothoïde. A partir de deux données, on en déduit toutes les autres. En général, on part de R et de L, ou de R et de A.
- 4^{ème} phase : construction (voir annexe 3)
 - A partir du point A, on reporte vers le côté opposé au point D, le point O situé à la distance X_m de A sur la tangente DA. O est le point origine de la clothoïde

- Du point O, sur la tangente OAD, mais vers D, on marque le point V situé à la distance X. A partir du point V on abaisse vers l'intérieur de la courbe au point I, situé à la distance Y. Le point I est le 2^e point de la clothoïde : c'est le point de contact de la clothoïde et de l'arc de cercle IJ.
- Si $\tau \leq 60^\circ$, un 3^e point (le point G) peut être implanté approximativement : ce point est situé sur la perpendiculaire en A à OAD, vers l'intérieur avec $AG \approx \frac{\Delta R}{2}$
- pour plus de précision on peut utiliser les tables adéquates qui donnent les relations X_i, Y_i

b°) **Arc de cercle IJ compris entre les deux clothoïdes** (voir fig.1 annexe 3)

- l'angle β , angle des deux tangentes IZ et JZ est égal à $\beta = \alpha + 2\tau$ avec τ donné par les tables.
- Position du point Z : $DZ = DD' + D'B + BZ$

$$DZ = \frac{\Delta R}{\sin(\frac{\alpha}{2})} + R \left[\frac{1}{\cos(\frac{\pi - \alpha}{2})} - \frac{1}{\cos(\frac{\pi - \beta}{2})} \right]$$

Figure 1

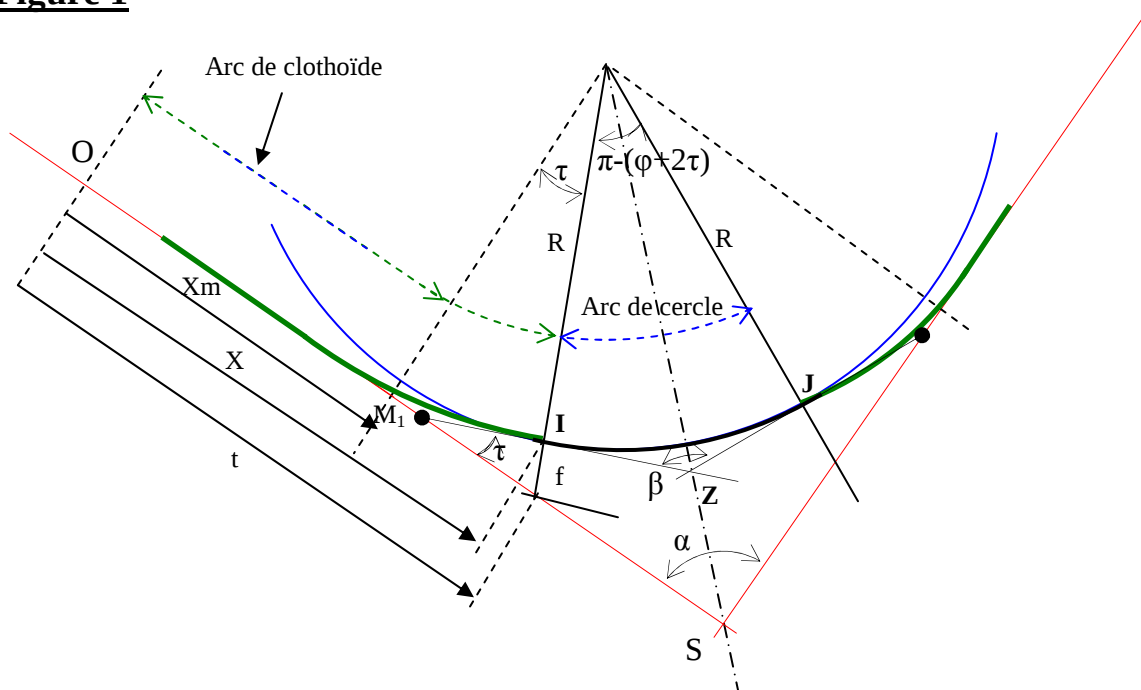


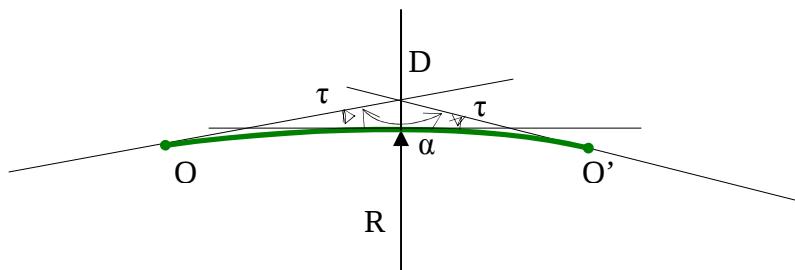
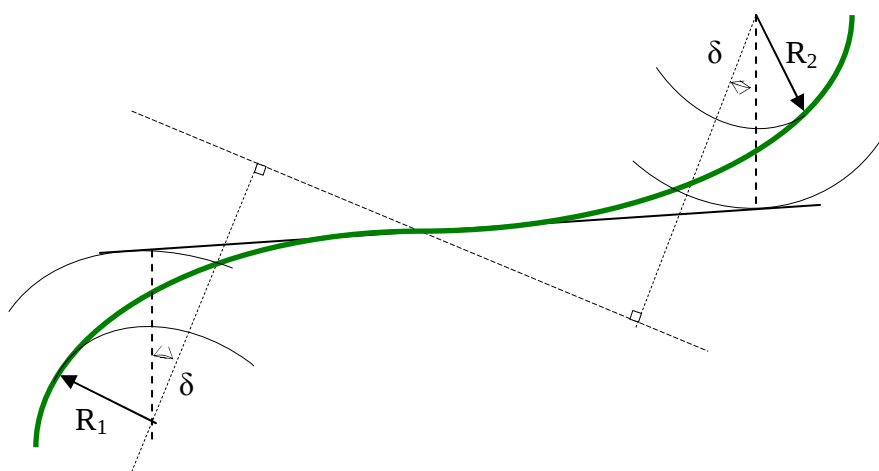
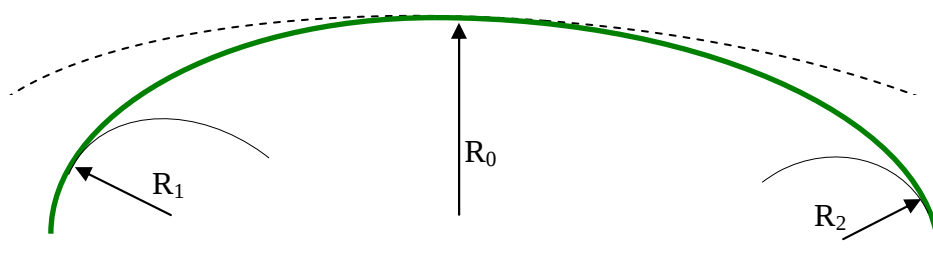
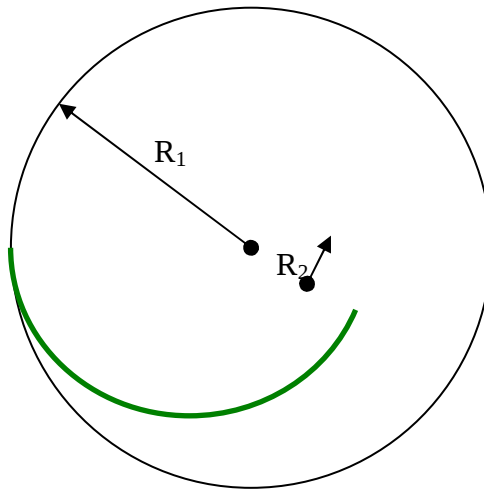
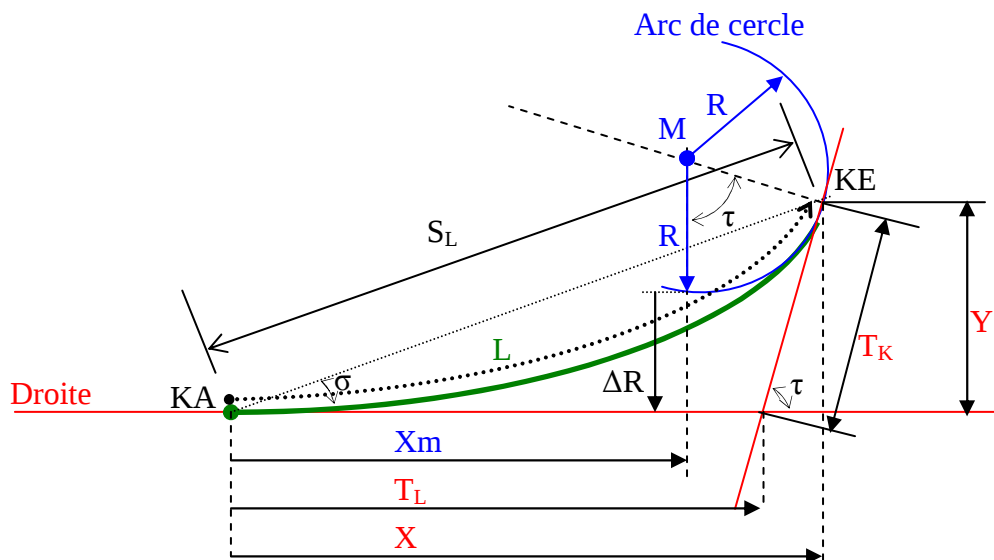
Figure 2 : courbe à sommet**Figure 3 : courbe en S****Figure 4 : courbe en C**

Figure 5 : courbe en ove**Figure 6 : Schématisation de la clothoïde****Éléments de la clothoïde**

A :	Paramètre	τ :	angle des tangentes
M :	centre du cercle	X :	abscisse de KE
R :	rayon du cercle	Y :	ordonnée de KE
KA :	origine de la clothoïde	T_K :	tangente courte
KE :	extrémité de la clothoïde	T_L :	tangente longue
L :	longueur de la branche de clothoïde	S_L :	corde KA-KE
ΔR :	mesure du décalage entre l'élément droit et l'arc de cercle	σ :	angle polaire (angle de la corde avec la tangente)

CHAPITRE 5 : REPRESENTATION ET CALCUL DU PROFIL EN LONG

5-1 GENERALITES

La vue en plan n'est pas suffisante pour représenter le tracé routier, car elle ne fait pas apparaître le relief. On coupe le tracé routier exactement suivant le tracé en plan par une surface verticale. Cette intersection, reportée sur un plan vertical, donne le profil en long de la route.

5-2 REPRESENTATION DU TERRAIN NATUREL (TN)

5-2-1 Règles générales

Le dessin du terrain naturel se fait en utilisant un plan coté, donnant en abscisse les distances cumulées et en ordonnées les cotes (altitudes)

On note les points d'intersections (appelés profils) du tracé en plan avec les courbes de niveau ; on mesure les distances entre chaque intersection, ainsi que les cotes de ces points et on reporte ensuite sur le plan.

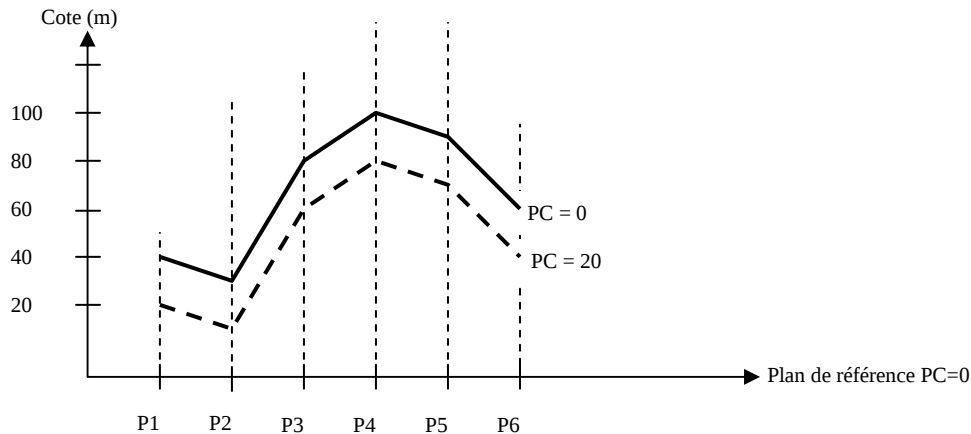
N.B : on reportera les points successifs au moyen de distances cumulées et non de distances partielles, avec des règles à l'échelle du dessin)

5-2-2 Echelles utilisées

Pour les abscisses, l'échelle utilisée est celle du tracé en plan. En ordonnées (donnant les cotes des points) il convient de prendre une échelle 10 fois plus petite que celle des distances. Le but étant d'avoir un document plus lisible.

5-2-3 Représentation graphique

Pour la représentation graphique on se choisit un plan de référence. En général on prend comme référence le niveau 0 (zéro) qui correspond au niveau de la mer. Mais avec ce plan les hauteurs peuvent atteindre des valeurs de l'ordre de plusieurs centaines de mètres. Pour faciliter la représentation graphique on se choisit un plan de comparaisons à partir duquel on reporte les cotes.



Remarque :

1. *il est inutile de représenter les profils qui ne sont pas obtenus par intersection avec les courbes de niveau. On admet que la pente entre deux courbes est régulière et on représente le TN par un segment de droite.*
2. *Si on ne dispose pas de courbes de niveaux, mais simplement de points côtés, on peut :*
 - *soit tracer les courbes de niveau et on se retrouve au 1)*
 - *soit joindre deux à deux les points les plus proches situés de part et d'autre du tracé en plan, et interpoler en supposant la pente du terrain constante entre ces points.*

5-3 REPRESENTATION DU PROJET

Le profil en long du projet (appelé encore « ligne rouge ») est constitué de rampes et de pentes, qui sont des droites reliées par des courbes.

Contrairement au tracé en plan, les courbes de raccordement ne sont pas des cercles (bien que l'on parle de rayon), mais des paraboles.

L'utilisation des paraboles se justifie par les considérations suivantes :

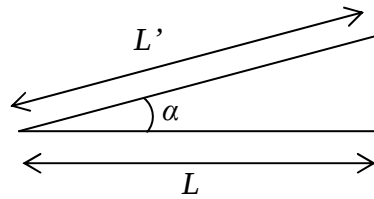
- l'emploi des cercles est long, car il fait appel à des calculs trigonométriques
- au voisinage du sommet, la courbure de la parabole est très proche de celle du cercle
- les pentes étant inférieures à 8%, les raccordements s'effectuent près du sommet

5-4 CALCUL DU PROFIL EN LONG

Dans la suite du cours, les longueurs mesurées sur les pentes sont assimilées aux longueurs mesurées suivant l'horizontale. Approximation qui peut être faite tant que les déclivités sont inférieures ou égales à 2%.

Dans le cas de déclivités comprises entre 2% et 6%, pour avoir les longueurs exactes on fera appel à la formule trigonométrique :

$$\cos \alpha = \frac{L}{L'}$$



5-4-1 Calculs sur les pentes et les rampes

Une droite est définie dès que l'on connaît deux de ces points, ou bien un de ses points et sa pente.

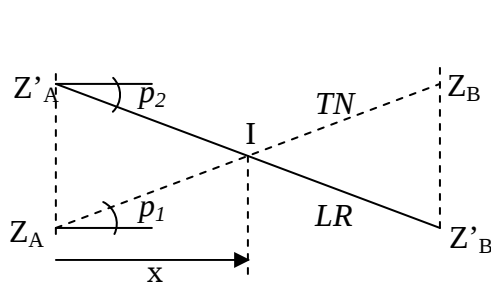
Dans un repère orthonormé, si h_A et h_B sont les cotes de deux points A et B et D_{AB} la distance horizontale entre ces points alors l'on peut calculer la pente p de

la droite AB en appliquant la formule : $p = \frac{h_A - h_B}{D_{AB}}$

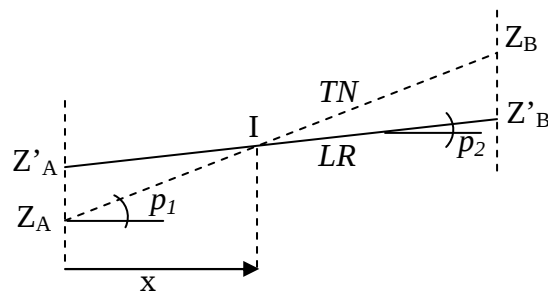
Connaissant la pente de la droite, pour avoir la cote de n'importe quel point C situé sur la droite il suffit d'appliquer la formule : $h_C = h_A + p \times D_{AC}$ où D_{AC} est la distance horizontale entre A et C

On détermine par cette méthode les cotes du projet au droit de tous les profils. Dans le cas où la ligne rouge rencontre le profile en long du terrain naturel en un point I, il est important de connaître l'abscisse et la cote de ce point I (appelé « profil fictif » ou « entrée en terre »)

La détermination des coordonnées du point I revient à trouver l'intersection de deux droites dont on connaît pour chacune d'elle deux points, donc par conséquent les déclivités respectives.



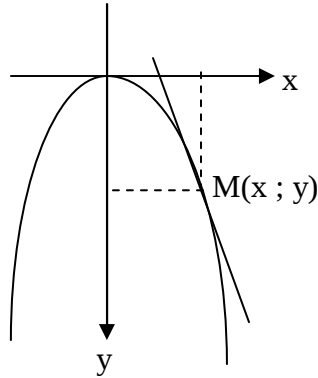
$$X = \frac{Z'_A - Z_A}{p_1 - p_2}$$



p_1 et p_2 peuvent être négatives ou positive

5-4-2 Calculs sur les paraboles

Pour les raccordements des droites du profil en long on choisira toujours des paraboles à axe vertical. L'équation d'une telle parabole à la forme $y = \frac{x^2}{2n}$ dans un système d'axes tel que celui de la figure ci-dessous.



$\frac{1}{2n}$ étant le paramètre de la parabole

En tout point le rayon a une courbure

$$r = n \sqrt{\left(1 + \frac{x^2}{n^2}\right)^3}$$

En particulier, près du sommet $x = 0$ donc $r = n = R$. l'équation dévient : $y = \frac{x^2}{2R}$

La pente de la tangente en un point M de la parabole s'obtient en dérivant l'équation du second degré

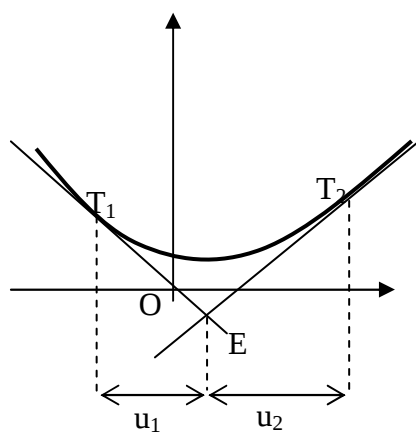
$p = \frac{x}{R} \quad \Longrightarrow \quad x = p.R$
$y = \frac{x^2}{2R} \quad \Longrightarrow \quad y = \frac{p^2 R}{2}$

Le problème de base revient à déterminer le sommet d'une parabole et les coordonnées des points de tangence.

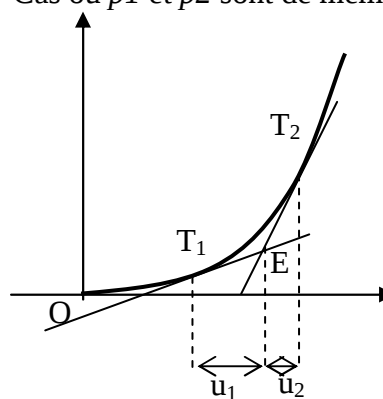
Démarche :

- A partir de la polygonale du profil en long et des pentes successives, on détermine tout d'abord les coordonnées du point E d'intersection des droites. On recherche ensuite les points T_1 et T_2 de tangence de la parabole avec les deux droites en utilisant les valeurs de $u_1 = u_2 = \frac{R}{2} |p_1 - p_2|$
- Puis le point O à partir des points T_1 et T_2

Cas où p_1 et p_2 sont de signes contraires



Cas où p_1 et p_2 sont de même signes



CHAPITRE 6 : COORDINATION DU TRACÉ EN PLAN ET DU PROFIL EN LONG

6-1 GENERALITES

Le respect des normes du tracé en plan et du profil en long seulement ne conduit pas obligatoirement à un bon tracé routier. Il faut en plus avoir le souci de la sécurité de l'usager. Par conséquent le tracé routier doit être conçu et analysé comme une courbe dans l'espace, et non comme deux courbes planes.

Il y a lieu donc de faire la coordination plan – profil long du tracé afin qu'en chaque point de son parcours l'usager puisse :

- distinguer la chaussée et les obstacles éventuels à une distance suffisamment grande pour s'arrêter ou manœuvrer.
- distinguer clairement les dispositions des points singuliers (bifurcations, échangeurs, etc.)
- prévoir l'évolution du tracé
- apprécier l'adaptation du terrain sans être gêné par des courbes, des brisures ou des discontinuités désagréables.

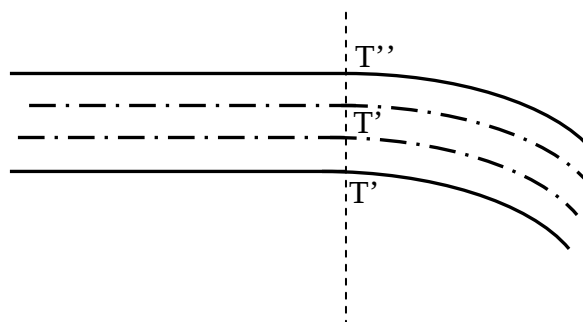
6-2 RAPPEL DES REGLES ELEMENTAIRES

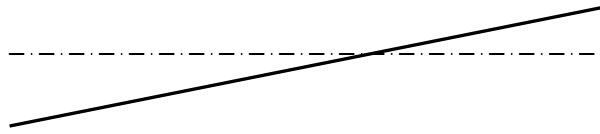
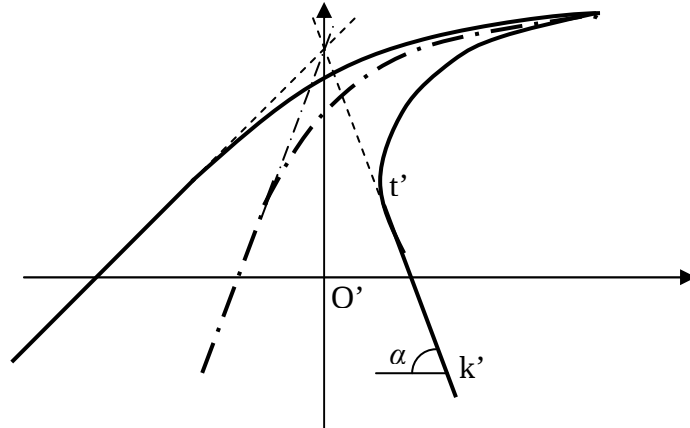
Les défauts de coordination entre le tracé en plan et le profil en long consistent en l'altération de la vision perspective du tracé en plan par l'incidence toujours néfaste des ondulations du profil en long. Or c'est de la perception et de l'appréciation des courbures horizontales que découle la sécurité de la conduite. Ces défauts résultent essentiellement d'une hétérogénéité de la position et de dimensionnement entre les éléments de l'axe en plan et ceux du profil en long.

Les schémas suivants présentent les cas les plus fréquents qui se posent au concepteur :

1°) Tracé en plan en alignement droit suivi d'une courbe et profil en long en rampe croissante

Plan

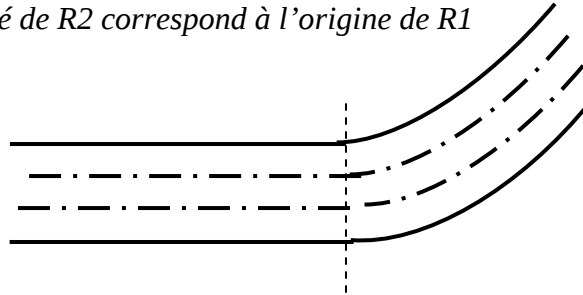
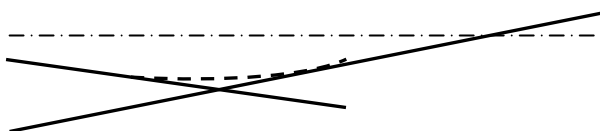
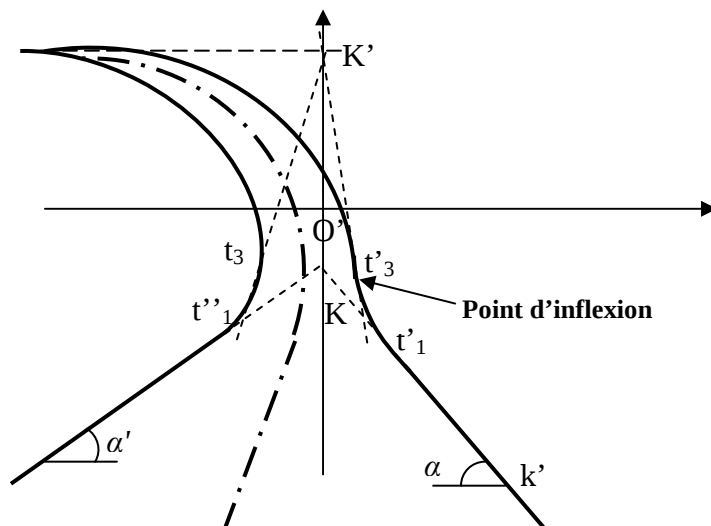


Profil en long**Perspective**

Solution : une clothoïde entre l'AD et le cercle atténue la brisure au point de contact.

2°) Tracé en plan : virage de rayon R1 / Profil en long : pente et rampe raccordées par un rayon R2 concave

Coordination : l'extrémité de R2 correspond à l'origine de R1

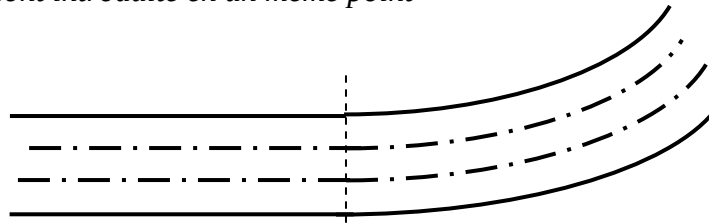
Plan**Profil en long****Perspective**

Un tracé dont ni le plan ni le profil en long ne présente d'inflexion, peut avoir un point d'inflexion artificiel en perspective affectant le bord droit de la chaussée si la courbe en plan est à gauche, et le bord gauche de la chaussée si la courbe en plan est à droite.

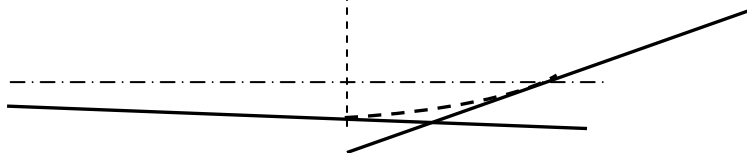
3°) Tracé en plan : virage de rayon R_1 / Profil en long : pente et rampe raccordée par un rayon R_2 concave

Coordination : R_1 et R_2 sont introduite en un même point

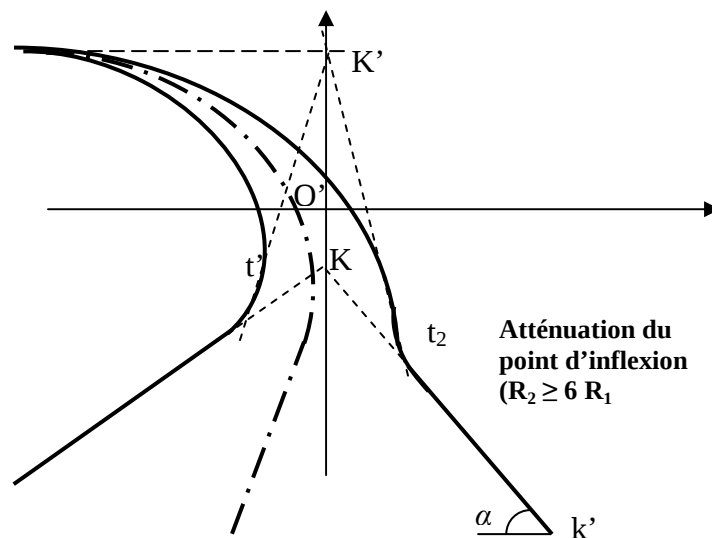
Plan



Profil en long



Perspective



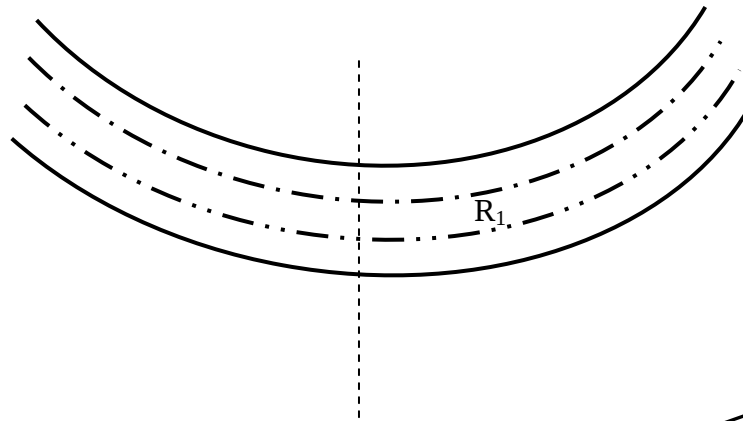
On s'efforcera de faire coïncider les deux rayons. Les rayons RV (profil en long) et RH (tracé en plan) doivent de plus respecter les valeurs suivantes.

Largeur de chaussée (m)	5	6	7	10,5	12	14
RV >	3 RH	4 RH	5RH	8,5 RH	10 RH	12 RH

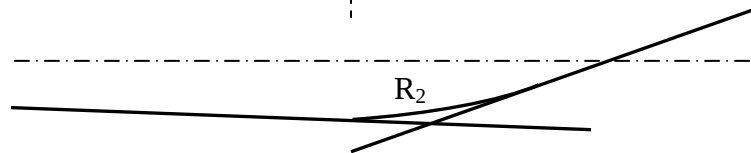
4°) Tracé e plan : virage de rayon R1 / Profil en long : pente et rampe raccordées par un rayon R2 concave

Coordination : R2 dans R1

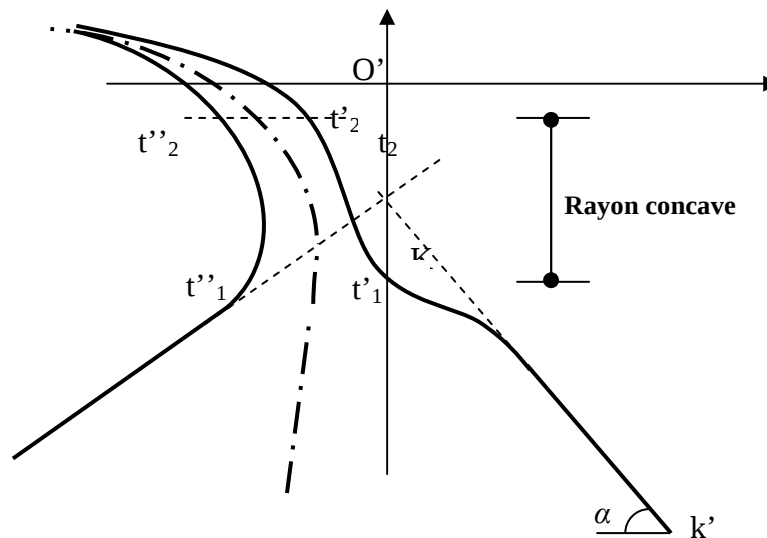
Plan



Profil en long



Perspective



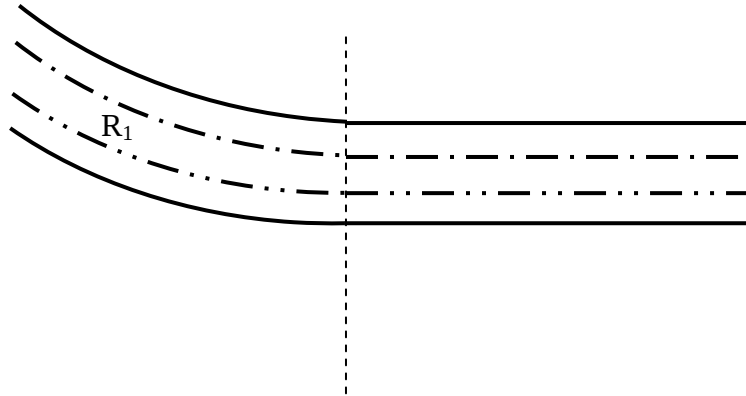
A chaque position de l'observateur correspond un rapport $\frac{R_2}{R_1}$ différent et l'inflexion ne pourra être évitée.

On évitera donc cette coordination mais si c'est impossible, on essaiera d'avoir le rapport $\frac{R_2}{R_1}$ le plus grand possible.

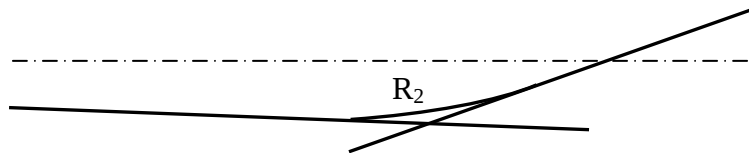
5°) Tracé en plan : virage de rayon R_1 / Profil en long : pente et rampe raccordées par un rayon R_2 concave

Coordination : la courbe de rayon R_2 succède à la courbe en plan

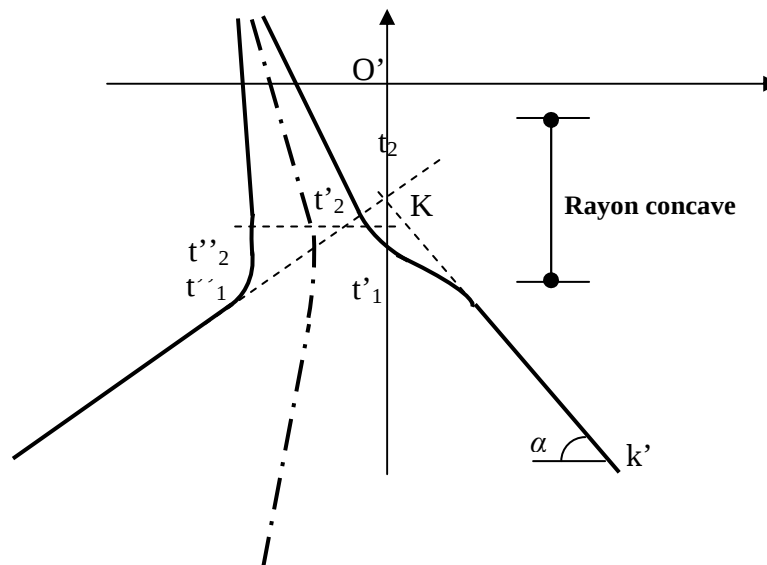
Plan



Profil en long



Perspective

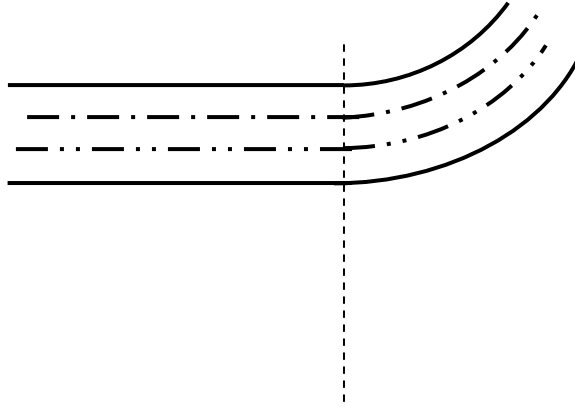


On évitera de décaler, même partiellement, la courbe en plan de la courbe en profil en long.

6°) Tracé en plan : virage rayon R1 / Profil en long : rampe et pente raccordées par un rayon R2 convexe

Coordination : R2 dans R1

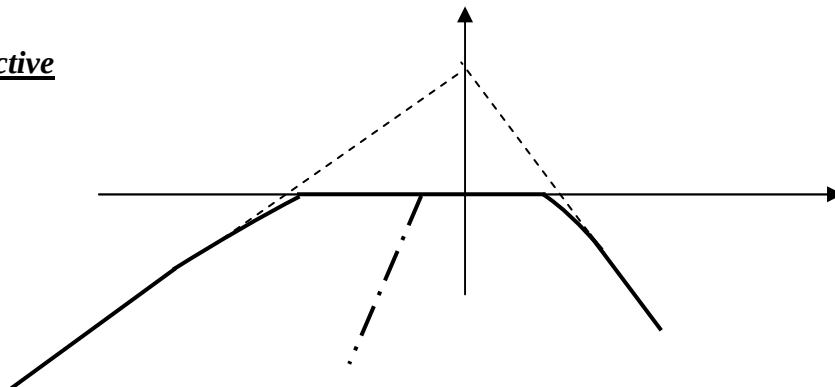
Plan



Profil en long



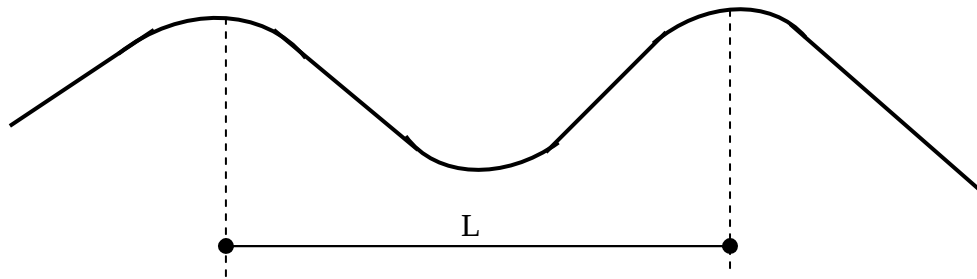
Perspective



Pour éviter l'effet de surprise que cause l'apparition d'un virage au-delà du point haut, on introduira la courbe en plan soit avant ce point, soit loin après.

Si les deux raccordements sont introduits au même point, la coordination doit respecter les conditions de la page 19

7°) Perte de tracé



On évitera les réapparitions de tracé à moins de L

Vitesse de référence V_r (km/h)	40	60	80	100	120
L (m)	200	300	400	600	800

Dans les reliefs de plaine ou les caractéristiques en plan sont grandes et les profils en long monotones, les problèmes de raccordement ne se posent pratiquement pas.

Les tracés routiers difficiles à traiter se situent dans les zones de relief montagneux où il n'existe pas de lignes préférentielles de tracé.

CHAPITRE 7 : PROFIL EN TRAVERS

7-1 DEFINITION

Le profil en travers est une coupe de la route perpendiculairement à son axe. Définir un profil en travers c'est faire ressortir le nombre de voies (en fonction du nombre de véhicules pouvant passer simultanément). Pour une route donnée, le choix du profil en travers dépend du niveau de service et donc du type aménagement choisi.

7-2 DIFFERENTS TYPES D'AMENAGEMENTS

La possibilité d'adapter les infrastructures routières à l'évolution des trafics peut conduire le décideur choisir l'aménagement progressif d'un itinéraire en tenant compte des contraintes budgétaires. On peut dans ce cas envisager trois étapes d'aménagement :

7-2-1 Aménagement immédiat

C'est un aménagement à court terme qui doit répondre, au moins, aux besoins de la circulation actuelle.

7-2-2 Aménagement normal

Il s'agit de donner à l'itinéraire des caractéristiques adaptées à la circulation à moyen terme (dans une quinzaine d'années) c'est-à-dire 10 ans après la mise en circulation du nouvel aménagement.

7-2-3 Aménagement futur

L'aménagement doit correspondre à la circulation envisageable à long terme (30 ans par exemple).

7-3 DETERMINATION DU NOMBRE DE VOIES DU PROFIL EN TRAVERS

La détermination du nombre de voies du profil en travers tient compte de plusieurs paramètres dont notamment le trafic (sa nature, son débit, etc.)

7-3-1 Trafic équivalent en voitures particulières

La présence de véhicules lourds (et lents) réduit d'autant plus le débit des routes que le profil en long de celle-ci est accentué au niveau des rampes et des pentes.

L'encombrement d'un véhicule lourd (VL : véhicule lourd, poids > 3,5 t) est évalué comme « équivalent » à $pV.P$ (V.P : véhicule particulière) ; p est appelé coefficient d'équivalence.

Le trafic équivalent s'exprime en unité de voitures particulières : unité est UVP

$$1 \text{ Poids Lourd} \approx \begin{cases} 2 \text{ à } 4 \text{ V.P en terrain plat} \\ 4 \text{ à } 6 \text{ V.P en terrain vallonné} \\ 8 \text{ à } 12 \text{ V.P en terrain montagneux} \end{cases}$$

En général en Côte d'Ivoire $1 \text{ P.L} \approx 6 \text{ UVP}$

7-3-2 Evaluation de la demande du débit de trafic Q

7-3-2-1 Prévision du trafic

Les études d'aménagement routier requièrent la précision des circulations futures. Deux cas se présentent en général selon que l'itinéraire existe ou non.

1°) Itinéraire existant

La prévision se fait à partir des comptages périodiques ou courants, des enquêtes de circulation, des mesures de vitesses et des pesés. L'exploitation de ces données permet de définir le volume du trafic et sa nature, de même que l'évolution de ces deux paramètres.

2°) Itinéraire nouveau

Les prévisions des circulations futures se feront sur la base d'enquêtes mettant en évidence les besoins chez des usagers connus ou des études économiques. Elles tiendront également compte du taux de développement des zones intéressées, de l'aspect des trafics issus de ces zones et de leur distribution.

Le trafic obtenu à partir de ces études a des variations horaires, journalières et saisonnières importantes.

7-3-2-2 Trafic moyen journalier : T.M.J.A

(Voir TFE pour la définition)
(en véhicule/jour)

7-2-2-3 Trafic équivalent : T

$$T = [(1 - Z) + pZ] \times T.M.J.A$$

$$\text{Avec } \begin{cases} Z : \% \text{ de poids lourd} \\ p : \text{coefficient d'équivalence} \\ T : \text{trafic journalier annuel équivalent} \end{cases}$$

7-3-2-4 Débit horaire normal : Q

On parle de débit horaire normal lorsque l'infrastructure arrive à écouler avec un niveau de service satisfaisant la demande de trafic pendant la majeure partie de la journée.

Le débit horaire normal est déterminé d'après l'analyse de la courbe des débits horaires classés, et correspond à une fraction du trafic moyen journalier annuel.

$$Q = \frac{1}{n} T$$

$$\text{avec } n \approx \begin{cases} 6 \text{ à } 8 \text{ en rase campagne} \\ 10 \text{ à } 15 \text{ en milieu urbain} \end{cases}$$

7-3-3 Evaluation de l'offre (capacité de route)

7-3-3-1 Capacité théorique d'une route : C_0

Il s'agit d'une notion très complexe qui varie d'un pays à un autre. Sa détermination se fait par des études théoriques ou des études expérimentales (cas des USA : Highway Capacity Manual). Il subsiste cependant des différences importantes entre les résultats de ces deux types d'approche.

Capacités théoriques (Highway Capacity Manual)

	Route bidirectionnelle			Route unidirectionnelle
	6	7	10,5	Par voie de circulation (autoroute)
Largeur de voie (m)	2x3,00	2x3,50	3x3,50	
Capacité théorique (U.V.P/h)	1 600	2 000	3 200	1 800

7-3-3-2 Capacité effective d'une route : C

La capacité effective d'une route dépend essentiellement de la géométrie de la route (dégagement latéral, rampes, etc.) et de la composition du trafic.

On montre que $C = K \times C_0$ avec $0,75 \leq K \leq 1$

7-3-3-3 Notion de niveau de service d'une route

Dans le cadre d'un projet routier, le niveau de service recherché pour une route est la capacité de celle-ci à assurer le trafic projeté dans des conditions de confort (vitesse, liberté de manœuvre), de sécurité et d'économie.

On distingue sept niveaux de service différents allant du niveau A (circulation très fluide) au niveau F (écoulement forcé à faible vitesse). (Voir chapitre 1).

En Côte d'Ivoire et en France on adopte les définitions suivantes :

- Capacité physique ou débit de saturation : c'est le plus fort débit que l'on puisse observer.
- Seuil de congestion : il correspond à des écoulements à une vitesse de 50 km/h, dans des conditions acceptables pour les usagers, mais comportant fréquemment des arrêts d'écoulement plus ou moins prolongés.
- Débit de base : il correspond à un écoulement fluide et continu à une vitesse de 50 à 60 km/h,

7-3-3-4 Débit horaire admissible

Il est fonction de la capacité effective C de la route et du niveau de service visé à l'horizon considéré.

$$d = k \times C$$

En général : $k = 1$ (saturation) à 25 ans d'exploitation

$k = 0,7$ à $0,8$ (saturation) à 10 ans d'exploitation

7-3-4 Détermination du nombre de voies

7-3-4-1 Cas d'une chaussée bidirectionnelle

Pour la détermination du nombre de voie, on compare le débit de pointe horaire Q au débit admissible d . On adopte le profil auquel correspond la valeur de d la plus proche par défaut de Q . Dans certains cas le débit de pointe horaire Q dépassera légèrement le débit admissible d au détriment du niveau de service pendant quelques heures supplémentaires par an.

7-3-4-2 Cas de deux chaussées unidirectionnelles

La capacité théorique d'une voie unitaire est de $C_0 = 1\,800$ UVP/h. Les conditions géométriques étant en générales bonnes, la capacité effective d'une voie unitaire peut être prise égale C_0

Le débit horaire admissible est : $d_0 = k \times C_0$

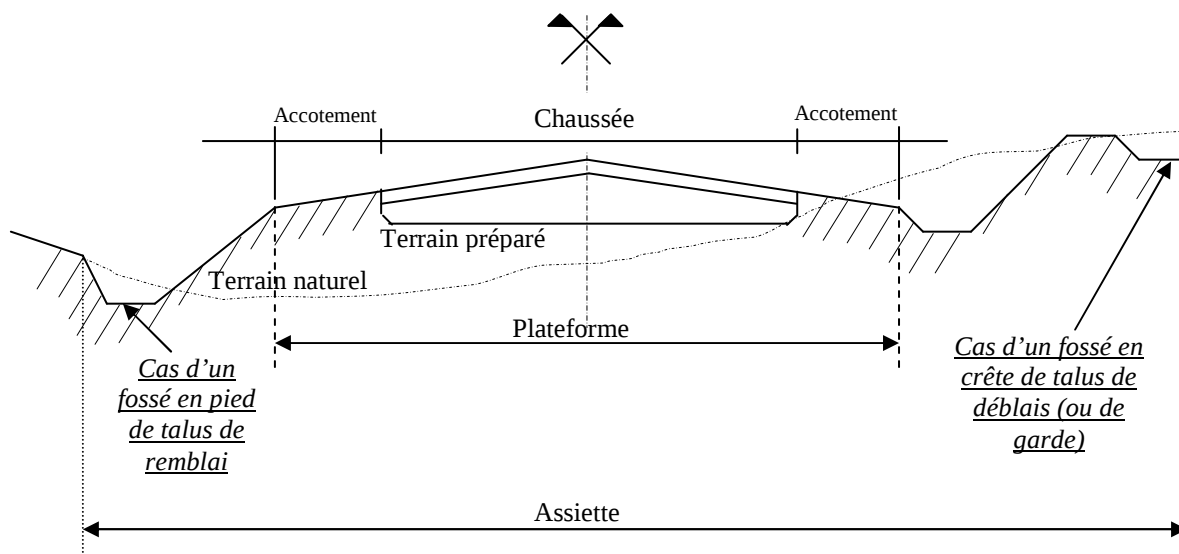
On introduit un coefficient s tenant compte de la dissymétrie des trafics pour une route à chaussées séparées pour évaluer le débit horaire normal q dans un seul sens

$q = s \times Q$, où Q est la demande dans les deux sens. En général $s = 0,5$

Le nombre de voie à retenir pour chacune des chaussées est le nombre entier le plus voisin par excès du rapport $\frac{s \times Q}{d_0}$.

7-4 PROFILS EN TRAVERS TYPES

7-4-1 Schématisation



Assiette de la route dans deux cas particuliers

7-4-2 Définitions

7-4-2-1 Profil en remblai (R)

On dit que le profil en travers de la chaussée est en remblais si le niveau de la plateforme est situé au dessus du terrain naturel.

7-4-2-2 Profil en déblai (D)

On dit que le profil en travers est en déblais si le niveau de la plateforme est en dessous du niveau du terrain naturel.

7-4-2-3 Profil en terrain naturel (TN)

On dit que le profil en travers est en terrain naturel si la plateforme de la chaussée se trouve au niveau du terrain naturel

7-4-2-4 Profil mixte (PM)

On dit que le profil en travers de la chaussée est mixte s'il présente de part et d'autre de l'axe de la route des profils différents

7-4-3 Largeur de chaussée

Les largeurs de chaussées varient selon que l'on se trouve en rase campagne ou en milieu urbain.

- en rase campagne : 3,50 m par voie
- en milieu urbain ou pour les très faible trafics : 3,00 m par voie.

Dans certains cas l'on adopte des largeurs particulières :

- o Voies supplémentaires en rampe pour véhicules lents (envisagées pour les déclivités > 2,5%)

La largeur de section courante est de 3,00 m ; même structure que la chaussée. La bande de guidage de droite est conservée à son emplacement normal avec un espacement différent des parties peintes.

- o Surlargeur dans les virages

$$S = \frac{50}{R} \quad R \leq 200 \text{ m}$$

Cette surlargeur est appliquée :

- sur toute la longueur de la courbe à l'intérieur du virage
- sur chaque voie de façon progressive, en même temps que le dévers

Pour éviter d'élargir la plate-forme, la surlargeur sera prise sur la largeur des accotements, à condition que ceux-ci conservent une largeur ≥ 1 m

7-4-4 Largeur d'accotement

Les accotements sont les zones latérales situées sur les côtés de la chaussée et aménagées pour la circulation des piétons ou de certains cycles.

En rase campagne les accotements comportent, en plus, les éléments suivants :

- une bande de guidage : 0,30 m (parfois à 0,20 m)
- une bande d'arrêt d'urgence (B.A.U) comprenant en plus de la bande de guidage, une bande dérasée, stabilisée ou non.

Les largeurs (en mètre) sont données dans le tableau ci-dessous :

Vitesse de référence V_r \ Largeur de chaussée	6 m	7 m	10,5 m	14 m Ou 2 x 7 m
40 km/h	2 ou 0	2 ou 0		2,5
60 km/h	2 ou 0	2 ou 0	2,25 ou 0	2,5
80 km/h	2 ou 0	2 ou 0	2,25 ou 0	2,5
100 km/h		2 ou 0	2,25 ou 0	2,5
120 km/h			2,25 ou 0	2,5

- Berme extérieure (chemin laissé entre le bord d'un canal ou d'un fossé et une levée)
 - de 0,75 m s'il existe une B.A.U (bande d'arrêt d'urgence)
 - supérieur à 1,25 m si la circulation des piétons est importante
 - de 1,00 m à 2,00 m (bande de guidage compris) s'il n'existe pas de bande d'arrêt et si la circulation piétonne est négligeable.

7-4-5 Largeur des plates-formes en section courante

La plate-forme est la surface occupée par la ou les chaussées, les accotements ou trottoir et éventuellement les terres pleins et les pistes spéciales.

Les largeurs sont données dans le tableau ci-dessous :

Bande d'arrêt	Voie supplémentaire L = 3,0 m	Piste piétons L = 1,5 m	Glissière de sécurité	Largeur de plate-forme (m) en fonction de la largeur de chaussée (m)				
				6	7	10,5	14	2x7 TPC 6 m
OUI		NON	NON	11,5	12,5	16,5	20,5	26,5
			OUI					
		OUI	NON	13,0	14,0	18,0	22,0	28,0
			OUI	14,0	15,0	19,0	23,0	29,0
NON	OUI	NON	NON	-	7,55*	9,30*	11,05*	14,05*
			OUI					
		OUI	NON	-	8,50*	10,25*	12,00*	15,00*
			OUI	-	9,00*	10,75*	12,50*	15,50*
	NON	NON	NON	9,0	11,0	14,5	-	--
			OUI					
		OUI	NON	10,0	11,5	15,0	-	-
			OUI derrière	10,5	11,5	15,0	-	-
			OUI devant	11,5	12,5	16,0	-	-

* demi-largeur de plate-forme avec voie supplémentaire de 1,00 m.

7-4-6 Pentes transversales des éléments constitutifs du profil en travers

Intérieur des courbes			Axe	Extérieur des courbes		
Berme	Piste pour piétons (éventuellement)	Bande d'arrêt (1) d' = 5%	Chaussée (y compris surlargeurs)	Bande d'arrêt (1) d' = 5%	Piste pour piétons (éventuellement)	Berme
		Bande cyclable d' = 4%		Bande cyclable d' = 4%		
1- En alignement droit						
+ 8%	+ d'%	+ d'% 	+ d% - d%	- d'% 	- d'% - 8%	
2- En courbe						
2.1 Dévers intérieur inférieur à d' %			Devers extérieur inférieur à d'' %			
+ 8%	+ d'% 	+ d'% 	+ d% ≤ d' + d% ≤ d''	- d'% 	- d''% - 8%	
2.2 Dévers intérieur supérieur à d' %			Dévers extérieur supérieur à d'' % - avec bande d'arrêt (surface traitée)			
			+ d% ≥ d'' 	d + 2%	- 8%	
			- avec bande cyclable			
+ 8%	+ d'% 	+ d'% 	+ d% + d% ≥ d''	- (8-d)% - (8-d)%	- 8%	

La bande d'arrêt (non revêtue) présente un décrochement de 2 à 4 cm par rapport à la chaussée

7-5 PROFILS EN TRAVERS SUR OUVRAGES D'ART

7-5-1 Description générales

En général, le profil en travers sur ouvrage est plus étroit qu'en section courante.
Mais :

- la largeur de la chaussée est conservée ou augmentée

- les bandes d'arrêt sont soit conservées (avec une pente transversale analogue à celle de la chaussée), soit supprimées ;
- le reste des accotements est remplacé par les éléments du tablier nécessaires pour y placer les dispositifs de sécurité, les gardes corps et pour assurer le passage des piétons.

7-5-2 Routes à chaussées bidirectionnelles

Bande d'arrêt ou cyclable	Piéton sur bande d'arrêt	Equipement	Vitesse de référence Vr (km/h)		avec chaussée de			
					Largeur roulable (LR) Largeur utile (LU)			
					6 m	7 m	10,5 m	14,0 m
OUI	OUI	Butes roues ou glissière		LR	10,00 m	11,00 m	15,00 m	19,00 m
				LU	11,00 m	12,00 m	15,00 m	20,00 m
		Barrière		LR	10,00 m	11,00 m	15,00 m	19,00 m
				LU	10,00 m	11,00 m	15,00 m	19,00 m
	NON	Bordure		LR	10,00 m	11,00 m	15,00 m	19,00 m
				LU	12,00 m	13,00 m	17,00 m	21,00 m
		Glissière		LR	10,00 m	11,00 m	15,00 m	19,00 m
				LU	12,50 m	13,50 m	17,50 m	24,50 m
NON		Bordures	≤ 80	LR	6,50 m	7,50 m	11,00 m	14,50 m
				LU	8,50 m	9,50 m	13,00 m	16,50 m
			≥ 100	LR	-	8,00 m	11,50 m	15,00 m
				LU	-	10,00 m	13,50 m	17,00 m
		Glissière	≤ 80	LR	7,00 m	9,00 m	11,50 m	15,00 m
				LU	9,50 m	10,50 m	14,00 m	17,50 m
			≥ 100	LR	-	8,50 m	12,00 m	15,50 m
				LU	-	11,00 m	14,50 m	18,00 m

7-6 PROFILS EN TRAVERS SOUS OUVRAGES D'ART

7-6-1 Description générales

Les bandes d'arrêt en section courante sont maintenues sous ouvrages d'art sans réduction de largeur.

7-6-2 Routes à chaussées bidirectionnelles

Bande d'arrêt ou cyclable	Piéton sur bande d'arrêt	Glissière	Trottoirs	Vitesse de référence Vr (km/h)	avec chaussée de			
					Largeur roulable (LR) Largeur utile (LU)			
					6 m	7 m	10,5 m	14,0 m
OUI	OUI		NON		10,00 m	11,00 m	15,00 m	19,00 m
					11,00 m	12,00 m	15,50 m	19,00 m
	NON	NON	OUI		10,00 m	11,00 m	15,00 m	19,00 m
					12,00 m	13,00 m	17,00 m	21,00 m
		OUI	NON		10,00 m	11,00 m	15,00 m	19,00 m
					12,50 m	13,50 m	17,50 m	21,50 m

Bande d'arrêt ou	Piéton sur bande	Glissière	Trottoirs	Vitesse de référence	Largeur roulable (LR) avec chaussée de Largeur utile (LU)			
NON		NON	NON	≤ 80	8,50 m	9,50 m	13,00 m	16,50 m
					8,50 m	9,50 m	13,00 m	16,50 m
				≥ 100	-	10,00 m	13,50 m	17,00 m
			OUI			10,00 m	13,50 m	17,00 m
				≤ 80	6,50 m	7,50 m	11,00 m	14,50 m
					8,50 m	9,50 m	13,00 m	16,50 m
		OUI Sans protection des piétons	NON	≥ 100	-	8,00 m	11,50 m	15,00 m
						10,00 m	13,50 m	17,00 m
				≤ 80	8,00 m	9,00 m	12,50 m	16,00 m
			OUI		8,50 m	9,50 m	13,00 m	16,50 m
				≥ 100	-	9,50 m	13,00 m	16,50 m
						10,00 m	13,50 m	17,00 m
		OUI Avec protection des piétons	OUI	≤ 80	7,00 m	8,00 m	11,50 m	15,00 m
					9,50 m	10,50 m	14,00 m	17,50 m
				≥ 100	-	9,50 m	12,00	15,50 m
						11,00 m	14,50 m	18,00 m

7-6-3 Tirant d'air (gabarits)

Les normes donnent les gabarits suivants :

- Itinéraires de trafic international : 4,75 m
- Autres itinéraires sauf dérogation : 4,30 m
- Itinéraires devant supporter de fréquents convois exceptionnels et faisant l'objet d'une instruction spéciale, le tirant d'air est de 6,00 m

Il faut prévoir dans tous les cas une sur hauteur à la construction pour tenir compte des rechargements ultérieurs.

CHAPITRE 8 : DISPOSITION DE DETAIL DES PROFILS EN TRAVERS

8-1 COLLECTE ET EVACUATION DES EAUX DE RUISSELEMENT

8-1-1 Généralités

Les dispositions préconisées pour l'assainissement des routes sont conformes aux principes suivants :

- il est illusoire et dangereux d'utiliser les fossés pour évacuer les eaux de drainage interne des chaussées
- les fossés présentent un danger pour la circulation, sauf s'ils sont en pente faible. Leur entretien est d'autant plus difficile plus ils sont étroits et profonds.
- l'évacuation des eaux doit se faire le plus souvent possible avec des ouvrages superficiels
- l'utilisation des canalisations enterrées ne se fera que si les ouvrages superficiels sont saturés
- chercher à évacuer, par tous les moyens possibles, les eaux à l'extérieur de la plate-forme.

8-1-2 Dispositifs latéraux

8-1-2-1 En déblai et au niveau du TN

Cunettes ou fossés en terre engazonnés ou bétonnés. Plusieurs formes existent.

8-1-2-2 En remblai

La hauteur de remblai à partir de laquelle il est nécessaire de canaliser les eaux dépend de la nature des talus, de leur revêtement et de l'intensité des pluies de la région.

En général on se fixe des hauteurs de 4 m à 5 m suivant les régions et la nature du matériau constitutif du remblai.

- En crête de ces remblais, les eaux de ruissellement peuvent être canalisées par un bourrelet en enrobés ou un ouvrages équivalent préfabriqué ou coulé sur place (file de bordures en béton espacé de descente d'eau à environ chaque 50 m)
- Les descentes d'eau sont constituées par des éléments préfabriqués emboîtables les uns aux autres et posés sur le talus soit directement, soit par l'intermédiaire d'une couche de béton.

8-1-3 Dispositifs dans le terre-plein central

8-1-3-1 En alignement droit

Si le terre-plein central est en toit (donc revêtu), les eaux de ruissellement sont évacuées vers les ouvrages latéraux de collecte.

Dans le cas contraire, le terre-plein central sera muni :

- d'un drainage longitudinal (cunette, caniveau, fossé, etc.) et d'une évacuation des eaux aux points bas du profil en long si le terre-plein central a une largeur inférieure à 6 m
- d'une évacuation des eaux de ruissellement par regard et demi traversée de chaussée tous les 200 m environ si le terre-plein central a une largeur de plus de 6 m.

8-1-3-2 En courbe

Les eaux de ruissellement sur la chaussée extérieure ou virage sont collectées par un ouvrage (fossé, cunette, caniveau, etc.) dans les parties centrales du terre-plein central, avec évacuation tous les 200 m environ.

8-1-4 Ouvrages extérieurs à la plate forme

8-1-4-1 En déblai

Si le terrain naturel est en pente vers la plate forme, il y a nécessité de positionner un fossé de crête de talus de déblai (ou fossé de garde).

8-1-4-2 En remblais

Idem. Fossé de pied de talus de remblais.

8-2 DRAINAGE INTERNE SOUS PLATE FORME

Le drainage sous la plate forme est très important pour la survie de la route. Il est indispensable quelque soit la situation pluviométrique, que la plate forme soit mise hors d'eau. Cela doit se faire par la mise en œuvre de dispositifs de drainage afin d'éviter que l'eau remonte (remontée capillaire) par la plate forme jusqu'à la structure de chaussée.

8-2-1 Dispositions Générales

Le drainage interne des chaussées doit faire l'objet d'une étude spécifique tenant compte :

- du régime hydraulique des sols
- de la perméabilité des assises de fondation de la partie supérieure de la plate forme.
- de l'influence de la teneur en eau sur la portance de la couche de fondation

Si nécessaire le drainage sera réalisé à l'aide d'ouvrages longitudinaux enterrés, constitués par une canalisation en béton poreux ou en tuyaux plastique à fentes ou à trous, entouré d'un massif filtrant, le diamètre Φ est d'environ 10 à 15 cm.

Remarque : *Les drains ne doivent pas être implantés sous la chaussée proprement dite pour permettre leur remise en état en cas d'obturation. Pour cela il faut construire des regards de visite et de contrôle de fonctionnement.*

Les drains doivent être implantés :

- plus bas que la surface de contact terrain – couche de forme ou terrain – couche de fondation si celle-ci est constituée de matériaux relativement perméables.
- sur toute l'épaisseur de la couche de fondation si le matériau à une faible perméabilité pour faciliter l'évacuation des eaux d'infiltration.

8-2-2 Routes à chaussées bidirectionnelles

La forme de l'arase des terrassements est en toit comme la chaussée, la pente transversale superficielle pouvant être égale à celle de la chaussée (3% en AD) dans le cas des terrains très perméables, ou supérieure (4 à 5%) dans le cas des terrains imperméables.

Cette forme de l'arase des terrassements à pour avantages également de faciliter l'évacuation des eaux en cours de travaux.

Les ouvrages de drainage sont constitués en déblai, par deux drains longitudinaux implantés en bordure d'accotement.

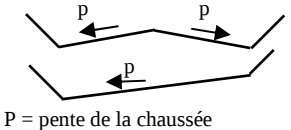
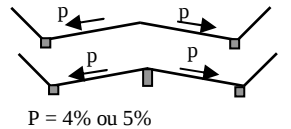
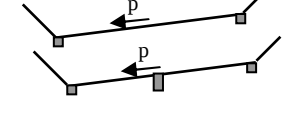
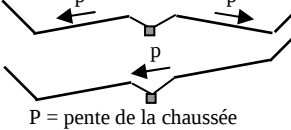
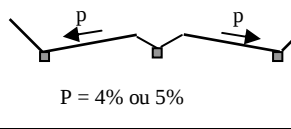
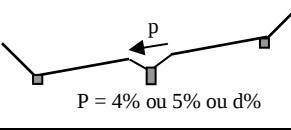
8-2-3 Routes à deux chaussées unidirectionnelles

Pour ce qui est du drainage latéral, le principe est le même que précédemment. Quant au drainage du terre-plein central :

- si le terre-plein central est non revêtu alors les eaux superficielles sont collectées et s'infiltrant dans l'axe de la plate forme
- si terre-plein central est revêtu, on peut maintenir le drainage interne localement dans les cas suivants :

- les zones de points bas de l'arase des terrassements lorsque la pente du profil en long est supérieure à 2% de part et d'autre
- en dévers lorsque la couche de fondation ou couche de forme est constituée par un matériau relativement perméable (couche drainante) facilitant la diffusion des eaux d'infiltration en provenance de l'accotement.

Les dispositions de la forme des terrassements sont schématisées dans le tableau ci-dessous

TERRE PEIN CENTRAL	Nature du terrain	Position	Schématisation
Revêtu	Terrain très perméable	En alignement droit et en dévers	 P = pente de la chaussée
	Terrain peu perméable	En alignement droit	 P = 4% ou 5%
		En dévers (d%)	
Non revêtu avec fil d'eau	Terrain très perméable	En alignement et en dévers	 P = pente de la chaussée
	Terrain peu perméable	En alignement	 P = 4% ou 5%
		En dévers (d%)	 P = 4% ou 5% ou d%

8-3 DISPOSITIONS CONSTRUCTIVES DES ASSISES DE CHAUSSEES

8-3-1 Généralités

8-3-1-1 Cas des structures souples

a) Couche de fondation

Elle est constituée par une ou plusieurs couches successives en matériaux naturels ou traités aux liants hydrauliques. L'épaisseur de chaque couche est

fixée en fonction des possibilités de compactage et de la nature des sols sous-jacents (on prend en moyenne 10 à 30 cm)

b) Couche de base

Elle constituée par une couche en matériaux naturels stabilisée mécaniquement (chaussée à faible trafic), ou traité au liant hydraulique ou hydrocarboné Une sur largeur de 30 à 50 cm est nécessaire pour assurer un compactage correct des bords. Les matériaux en excès sont repris à la niveleuse et mis en dépôt ou utilisés sur l'accotement.

c) Couche de surface

Constituée par des enduits d'usures en matériaux enrobés en tapis mince (épaisseur variant de 2 à 4 cm) pour les sables enrobé (Sand Asphalte) ou en tapis épais pour les bétons bitumineux.

8-3-1-2 Cas des structures rigides

a) Couche de fondation

Constituée par une ou plusieurs assises successives.

b) Couche de base et de surface

Constituée par une dalle en béton de ciment d'épaisseur variable (25 cm environ)

8-3-2 Disposition constructives en alignement droit

L'arase des terrassements doit être réglée de manière à assurer à la fois l'écoulement des eaux superficielles avant la construction de la chaussée et l'évacuation des eaux d'infiltration vers les drains après la construction de celle-ci.

8-3-2-1 Routes à chaussée bidirectionnelle

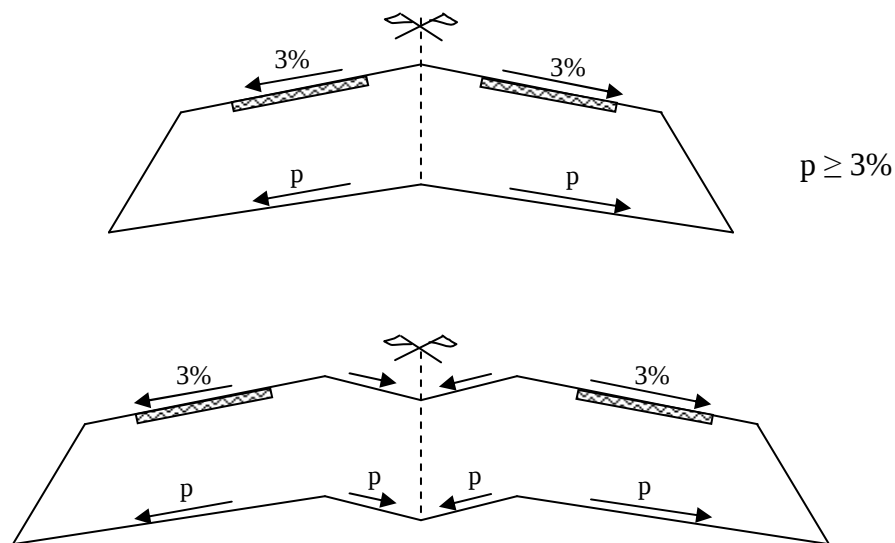
- la forme de l'arase des terrassements est en toit. Le point haut se trouvant dans l'axe de la plate forme.
- l'épaisseur de la couche de fondation est fixée :
 - ❖ dans l'axe pour les routes à deux (2) voies
 - ❖ aux bords de la voie centrale pour les routes à trois (3) voies
 - ❖ aux bords gauches des voies lentes pour les routes à quatre (4) voies

Dans ce cas l'épaisseur dans l'axe doit rester supérieure à une valeur limite fonction de la granulométrie des matériaux et des risques de pollution par le sol sous-jacent.

8-3-2-2 Routes à 2 chaussées unidirectionnelles

Si le terre-plein central est avec fil d'eau, le drainage interne dans l'axe est nécessaire. La forme de l'arase des terrassements a un profil constitué par une ligne brisée comportant deux points hauts situés de part et d'autre de l'axe de la route et un point bas dans l'axe du terre-plein central.

Schématisation :



Position des points hauts des terrassements : principes directeurs

1. Economie du projet : le volume des matériaux à mettre en œuvre dans la couche de chaussée d'épaisseur variable doit être aussi faible que possible.
2. Condition d'écoulement des eaux : les eaux d'infiltration du terre-plein central doivent être drainées au contact de l'arase des terrassements généralement peu perméable vers le drain axial et ne doivent pas circuler sous le corps de chaussée vers les accotements.

Le tableau ci-dessous donné à titre indicatif fixe la position des points hauts de l'arase des terrassements par rapport à l'axe et en fonction de la largeur du terre-plein central.

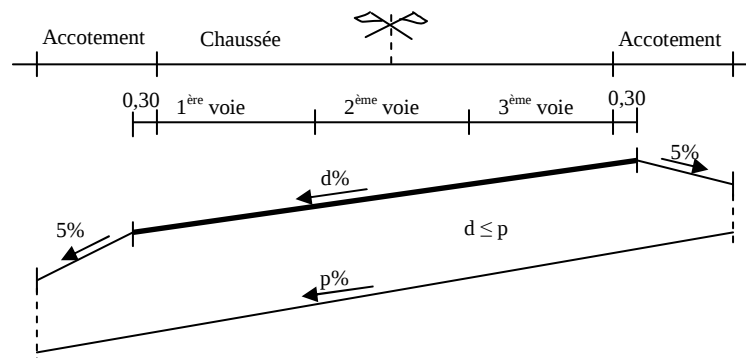
Types de voies	Pente de terrassement	Largeur du terre-plein central		
		3,00	6,00	13,00
2x2 voies	3%	1,50	3,00	6,50
	4%	2,50	3,00	6,50
	5%	3,00	3,00	6,50
2x3 voies	3%	1,50	3,00	6,50
	4%	3,00	3,00	6,50
	5%	4,00	4,50	6,50

8-3-3 Disposition constructives en dévers

8-3-3-1 En courbe

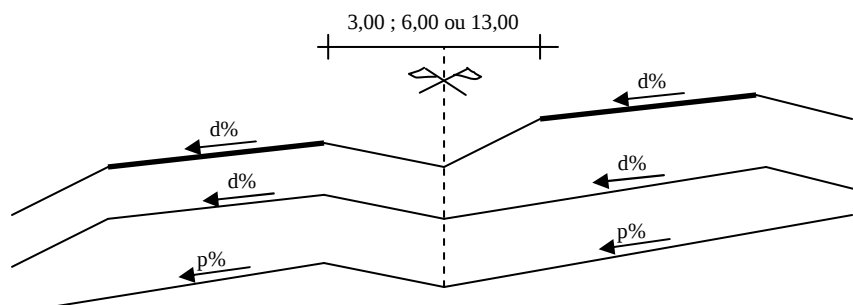
a) Route à chaussée bidirectionnelle

- Si le dévers est inférieur à la pente minimale choisie pour la forme de l'arase des terrassements, la pente de celle-ci en AD est conservée, mais le point haut est déplacé dans le profil en travers (en général, sous le bord géométrique extérieur de la chaussée).
- Si le dévers est supérieur à la pente minimale choisie, la pente de celle-ci est fixée égale au dévers. Le point haut est placé comme indiqué ci-dessous :



b) Routes à 2 chaussées unidirectionnelles

- Si le terre-plein central est avec une ligne de crête, les dispositions ci-dessus sont maintenues.
- Si le terre-plein central est à fil d'eau, voir schémas ci-dessous.



Il existe également d'autres cas de figures.

8-3-3-2 En raccordement progressif

L'écoulement des eaux sur la chaussée nécessite :

- de limiter strictement la largeur de la zone proche du dévers nul (en général 28 cm pour passer de -1% à +1%)
- de conférer à l'arase des terrassements une pente assez élevée. Le rattrapage des épaisseurs se fait en général sur la couche de fondation car le coût est le plus économique.

8-4 DISPOSITIFS DE SECURITE

8-4-1 Rôles et types de dispositifs de sécurité

Les dispositifs de sécurité ont un rôle de protection des véhicules en circulation afin de garantir la sécurité des usagers. Leur implantation est fonction du type de la route, du risque et du taux d'accident, du terre-plein central, de la largeur des accotements, etc.

On distingue plusieurs types de dispositifs de sécurité :

- Glissière de sécurité : elle est utilisée pour retenir les véhicules légers (1,5 à 1,8 tonnes) en cas de choc sous un angle d'incidence inférieur à 30°
- Barrières (légères, normales, lourdes) : elles permettent de retenir respectivement les poids lourds de poids en charge de 3,5 T, 12 T et 35 T
- Murs en béton

8-4-2 Règles d'emploi des glissières de sécurité

8-4-2-1 Sur le terre-plein central

La glissière de sécurité est utilisée dans les conditions suivantes :

- si la largeur du terre-plein central est $< 4,50$ m
- si la largeur du terre-plein central est comprise entre 4,50 et 6,00 m et que le trafic moyen prévisible 5 ans après l'ouverture à la circulation est $> 4\,000$ véh/jour par voie élémentaire de chaussée.
- à l'intérieur des courbes si le rayon de courbure est $< R_{HN}$ (rayon normal)

8-4-2-2 Sur l'accotement

Sur l'accotement les glissières sont à prévoir dans les cas suivants :

- à l'extérieur des courbes si le rayon de courbure est $< R_{HN}$, en remblais
- si la hauteur de remblai est $> 4,00$ m sur une longueur de plus de 30 m
- au droit des piles de ponts singuliers

NB. : Une glissière isolée doit être de longueur ≥ 60 m, et deux files de glissières dont les extrémités voisines sont distants de moins de 100 m doivent être raccordées.

8-4-3 Choix du type de dispositifs de sécurité pour le terre-plein central

8-4-3-1 Absence d'obstacles répétés

Utilisation de glissières doubles

8-4-3-2 Présence d'obstacles répétés

Deux files de glissières simples doivent être implantées à 1 m minimum du bord de la chaussée.

8-4-3-3 Pour les terre-pleins centraux étroits

Utilisation de séparateur central en béton.

CHAPITRE 9 : CUBATURES DES TERRASSEMENTS – MOUVEMENT DES TERRES

9-1 GENERALITES

9-1-1 Avant métré, métré

L'avant métré consiste à évaluer quantitativement les travaux à faire en fonction des mesures indiquées sur les plans.

Le métré, encore appelé administrativement attachement, est l'évaluation des quantités de travaux exécutés, par mesure de l'ouvrage en construction, au fur et à mesure de leur avancement, ou après leur achèvement.

9-1-2 Cubature ou métré des terrassements

C'est la part du métré (ou de l'avant métré) relative aux terrassements. C'est-à-dire l'évaluation des volumes des déblais et des remblais.

L'évaluation de ces quantités présente des difficultés car les corps à métrer comporte une face non géométrique qui est le terrain naturel. Le principe consiste à morceler le profil en long par des plans verticaux, de façon que la surface des terrains qu'ils entourent soit suffisamment réduite pour pouvoir être assimilée soit à un plan, soit à des surface gauche (surface réglée).

9-1-3 Mouvement des terres

L'apport de terre à partir de zones d'emprunts de même que l'évacuation des excédents de terres de déblais comportent des transports. De même que l'utilisation en remblais des terres provenant des zones de déblais.

L'étude dite "des mouvements des terres" nécessite la détermination des volumes transportés et les distances auxquelles ils le sont, c'est-à-dire les mouvements auxquels donnent lieu les déplacements des terres.

Plusieurs méthodes existent pour l'étude des mouvements des terres. Nous donnerons un aperçu de la méthode dite de l'Epure de Lalanne.

9-2 CUBATURES DES TERRASSEMENTS

Les données indispensables pour la détermination des cubatures sont le profil en long et le profil en travers du terrain naturel et du projet (voir chapitre correspondants).

9-2-1 Calcul des surfaces

Les lignes à prendre en compte pour la détermination des surfaces sont :

- la ligne du projet sous corps de chaussée
- la ligne du T.N sous terre végétale (en effet le volume de terre végétale sera estimé séparément)

9-2-1-1 Méthode classique de calcul

La méthode consiste à décomposer les surfaces de déblais ou de remblais en surfaces élémentaires : triangles, trapèze, rectangles à côtés verticaux ou horizontaux.

Le calcul de ces surfaces est indiqué au-dessus et au-dessous de chaque profil. Les calculs sont généralement faits par demi-profils.

9-2-1-2 Méthode simplifiée de calcul

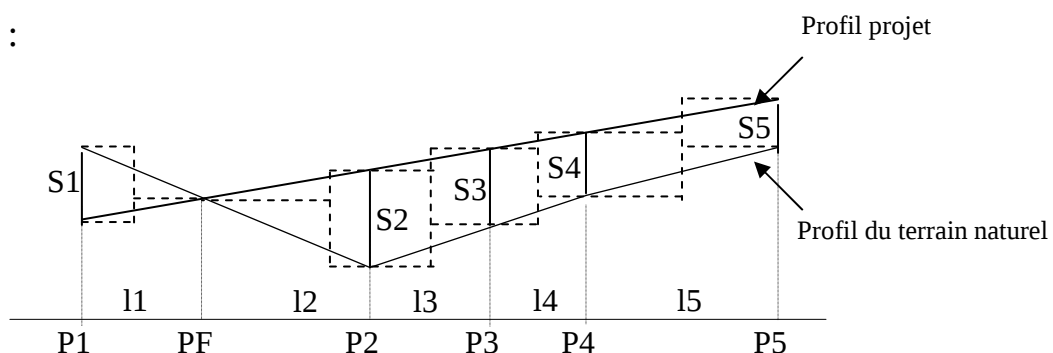
Le principe de la méthode consiste à déterminer isolément les surfaces comprises entre le plan horizontal de côte nulle et :

- d'une part la ligne projet sous corps de chaussée
- d'autre part la ligne du T.N sous terre végétale

9-2-2 Calcul des volumes de terre

Les volumes peuvent être calculés par la méthode de la moyenne des aires. Elle consiste à évaluer approximativement le volume des terres compris entre deux profils, en faisant le produit de la moyenne des surfaces de chacun d'eux par la longueur de l'entre profil.

Exemple :



On aura :

$$V = \left(\frac{S_1 + PF}{2} \right) \cdot l_1 + \left(\frac{PF + S_2}{2} \right) \cdot l_2 + \dots + \left(\frac{S_4 + S_5}{2} \right) \cdot l_5$$

Ou encore

$$V = \frac{S_1 \cdot l_1}{2} + \frac{PF \cdot (l_1 + l_2)}{2} + \dots + \frac{S_i \cdot (l_{i+1} + l_i)}{2}$$

Remarque : PF dit “profil fictif” peut être affecté d’une surface de déblai ou de remblai après compensation dans le profil. Cette surface suit exactement les mêmes règles de calcul et de prise en compte pour les volumes que les profils courants.

⚠ Parfois, il y a nécessité de distinguer les différentes natures de déblais (réutilisables ou non en remblais) ainsi que les différents prix de terrassement, etc.

9-3 MOUVEMENTS DES TERRES

9-3-1 Généralités

Le mouvement des terres est l’ensemble des opérations qui consiste à exécuter au moyens de matériels adéquats (pelles manuelles ou mécaniques, brouettes, camions, dampers, bulldozers, scrapeurs, etc.) le transport des matériaux des zones de déblai ou d’emprunt aux zones de remblai ou de dépôt.

Le choix des engins à mettre en œuvre est fonction de la nature des terres, du volume à transporter et de la distance de transport.

Remarque : L’étude du mouvement des terres a eu une importance considérable lorsque les transports étaient lents du fait de l’utilisation de moyens peu performants. Avec l’emploi des moyens de transports automobiles et des engins mécaniques de déblaiement, cette importance a diminué.

Il est inutile d’estimer des distances de transport à quelques mètres près, car de telles variations n’ont qu’une influence minime sur le coût d’un grand projet.

Cependant, il reste intéressant de connaître les méthodes d’étude du mouvement des terres (projet d’importance réduite, travaux en zones urbaines ou les parcs sont difficiles par suite de gênes de circulation des engins)

9-3-2 Distance de transport

9-3-2-1 Moment de transport

Si un volume V est à porter à une distance d, on appelle « moment de transport » le produit Vxd

9-3-2-2 Distance moyenne de transport

Soit plusieurs volumes $V_1, V_2, \dots, V_n$ à transporter respectivement à $d_1, d_2, \dots, d_n$, on appelle distance moyenne de transport d , le rapport :

$$d = \frac{\sum V_i d_i}{\sum V_i}$$

Au lieu d'étudier séparément le prix de transport de $V_1(m^3)$ à $d_1(m)$, et de faire la somme, on étudie le prix de transport de $V(m) = \sum V_i$ à la distance moyenne $d(m)$. Les prix sont équivalents. Le problème revient à déterminer la distance moyenne de transport des terres d'un projet.

9-3-2-3 Distance moyenne généralisée

Les prix de transport des terres varient en fonction du véhicule. En connaissant les volumes de terre transportés par nature de véhicule utilisé, on détermine pour chaque type de véhicule la distance moyenne de transport. La distance moyenne généralisée sera alors la moyenne des distances moyennes de transport par type véhicule.

Exemple :

$V_s(m^3)$ volume de terre porté à une distance d_s par les scrapers

$V_b(m^3)$ volume de terre porté à une distance d_b par les bulldozers

$V_c(m^3)$ volume de terre porté à une distance d_c par les camions

La distance moyenne générale d est : $d = \frac{V_s d_s + V_b d_b + V_c d_c}{V_s + V_b + V_c} = \frac{V_s d_s + V_b d_b + V_c d_c}{V}$

Dans l'exécution du projet routier, les zones de déblai sont alternées avec les zones de remblai. On a donc le choix de plusieurs lieux de remblai pour transporter un même déblai. Suivant que l'on choisira tel ou tel lieu de transport, on fera varier la distance moyenne de transport. Le prix de transport étant fonction de cette distance, on cherchera donc à organiser les transports pour avoir la distance moyenne la plus réduite. C'est le but de l'étude des mouvements des terres.

9-3-3 Epure de Lalanne

9-3-3-1 Définitions

a) Foisonnement

Le foisonnement est l'action foisonner c'est dire de pulluler, d'abonder, d'augmenter de volume. Un volume V de déblai après fouille donnera plus du

volume V de terre utilisables en remblai. L'excédent est dû au phénomène de foisonnement. Il varie avec la nature des terres, surtout avec leur cohésion.

Exemple :

Type de sol	Coefficient de foisonnement
Sable	0
Terre végétale	1/6 à 1/7 (15%)
Sol argileux	1/5 à 1/3 (20 à 35%)
Roche	1/3 (35%)

Les volumes de déblai à transporter à partir des profils en travers doivent être majorés du fait du foisonnement.

Si V_p : volume de déblai au profil et V_t volume à transporté, on a :

$$f = \frac{V_t - V_p}{V_p}$$

b) Tassement, compactage

Un volume V de terre transporté donnera après mise en œuvre en remblai moins du volume V. Cela résulte du phénomène de tassement du sol. Avec les moyens modernes utilisés actuellement on peut obtenir un tassement très important des terres par ce qu'on appelle « le compactage ».

Par le compactage, l'on peut obtenir des terres en remblai aussi compactes, sinon plus, que les terres en places.

9-3-3-2 Principe de la méthode

Pour appliquer la méthode de Lalanne pour les mouvements de terres on part des hypothèses suivantes :

1- on suppose chaque volume de déblai et de remblai concentré au profil correspondant,

2- on ne tient pas compte des volumes à réemployer dans un même profil ; ainsi, si un profil dit « mixte » comporte à la fois un volume de D de déblai et un volume R de remblai, on compense R par D et on considère le profil comme étant :

- en déblai avec un volume D-R si $D > R$
- en remblai avec un volume R-D si $R > D$

3- On ne tient pas compte des profils fictifs, où nous avons déjà supposé qu'il n'y a ni déblai, ni remblai.

9-3-3-3 Tableau des épures de mouvement des terres

La méthode de Lalanne est une méthode graphique. La détermination de la distance moyenne se fait au moyen d'une épure. A celle-ci est joint un tableau

dit « mouvement des terres ». Voir tableau ci-dessous où en colonne 1 à 6, se trouvent les éléments nécessaires à la construction de l'épure et en colonne 7 à 15, sont présentés les résultats donnés par l'épure.

	Volume de déblais	Volume de remblais	Volumes à employer dans le même profil	Excès de volumes de déblai sur les remblais	Excès de volumes de remblai sur les déblais	Déblai à porter en remblai	Déblai à porter en dépôt	Emprunts pour remblais	Indication des lieux d'emploi ou de dépôt des déblais ou remblais	Distance de transport	Transports				Observations
											Au scraper (jusqu'à 200m)		Au camion		
											Volume	Moments	Volume	Moments	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
1	146			146		146			Au P2	125	146	18 250			
2		288			288			75	146 du P1 75 de l'emprunt 67 du P4	875			75	65 625	
3		167			162				du P4						
4	229			229		67 162			au P2 au P3	175					
5	74	235													
6	16	147	16												
7		1 208													
8		353													
9	155	58	97												

9-3-3-4 Construction de l'épure

La construction de l'épure se fait en portant en abscisse les distances entre les profils et en ordonnées les valeurs des déblais et des remblais (ordonnées positives pour les déblais, négatives pour les remblais)

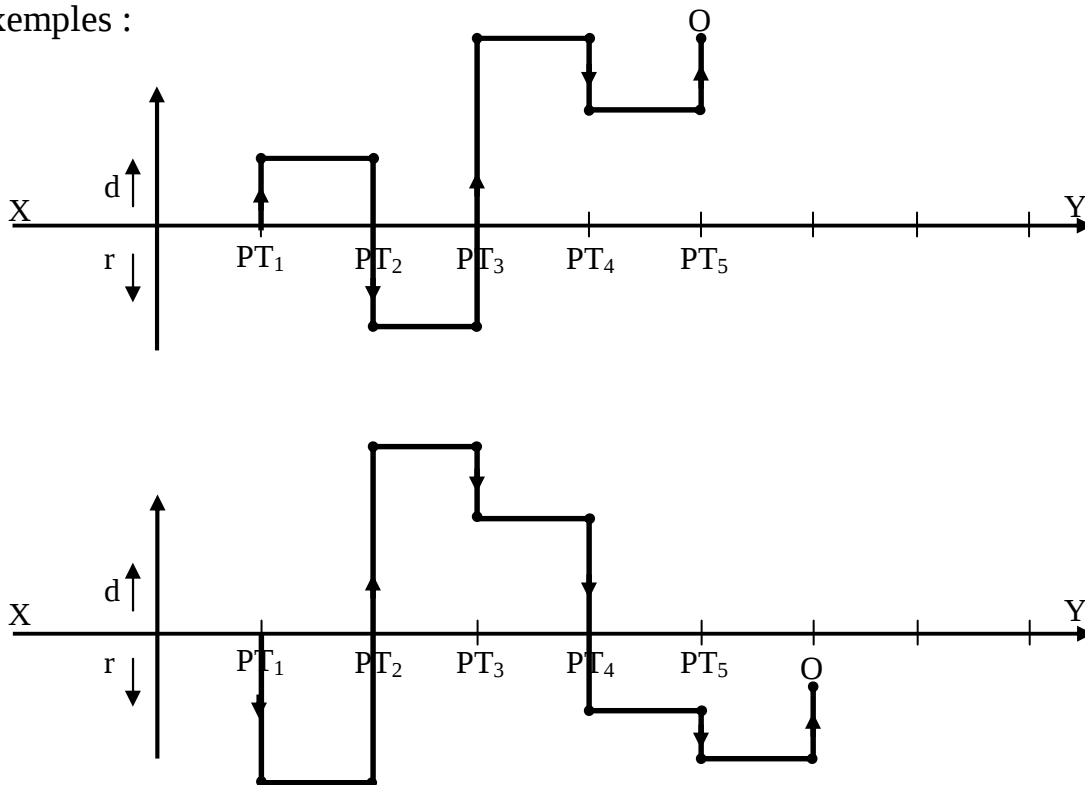
L'axe des abscisses s'appelle « ligne de terre »

On porte sur l'ordonnée de chaque profil, la somme algébrique du volume des déblais et remblais depuis l'origine jusqu'au profil considéré. Ces volumes peuvent être calculés, ou obtenus directement par la construction de l'épure. En général c'est la deuxième solution (graphique) qui est adoptée.

L'épure se termine en un point O situé :

- soit sur l'axe des abscisses, dans ce cas le volume des déblais s'équilibre avec celui des remblais. On dit qu'il y a compensation
- soit au dessus de l'axe des abscisses ; le volume des déblais dépasse celui des remblais. On dit qu'il y a mise en dépôt
- soit en dessous de l'axe des abscisses ; le volume des déblais ne vaut pas celui de remblais. On dit qu'il y a emprunt.

Exemples :

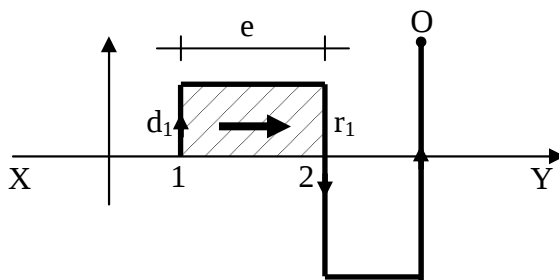


Les transports se font des déblais vers les remblais. Sur l'épure, les volumes de déblais représentés par les segments verticaux ascendants seront transportés aux remblais représentés par les segments égaux verticaux descendants qui leur font face.

Pour les discussions de l'épure, on fait varier une ligne horizontale en travers de l'épure, et on voit que les sens de transport sont inversés au dessus et en dessous :

- en dessous : de droite à gauche
- au dessus : de gauche à droite

Cette ligne horizontale est appelée « ligne de répartition ». Le but de l'épure est de rechercher la distance moyenne minimale de transport, dm . Cela revient à rechercher le minimum de la somme des moments de transport, c'est-à-dire rechercher le minimum de la somme des rectangles donnés par la ligne de répartition.



On constate :

- 1°) qu'il suffit de faire varier la ligne XY entre la ligne de terre (passant par le point central) et la ligne horizontale passant par le point O.
- 2°) qu'il suffit de comparer les horizontales passant par des segments d'horizontales de l'épure.
- 3°) que les comparaisons doivent se faire en allant de la ligne initiale vers la ligne finale
- 4°) que les variations de la ligne de répartition deviennent inutiles lorsque l'étude faite avec la dernière position donne un résultat moins économique que celui obtenu avec la position précédente

9-3-3-5 Emprunts ou dépôts

L'on a recours à un dépôt quand il y a excès de déblais, et à un emprunt quand il y a un excès de remblais.

a°) Les dépôts

Les dépôts peuvent être faits en des endroits bien déterminés. Ils sont situés, soit sur le tracé, soit en dehors. **On peut les considérer comme des profils en remblai où n'importe quel cube peut être apporté.**

On introduira dans l'épure un profil dit dépôt, à l'emplacement fixé. Si celui-ci est supposé en dehors du tracé, pour faire intervenir la distance du tracé au dépôt, on ajoutera cette distance dans l'épure.

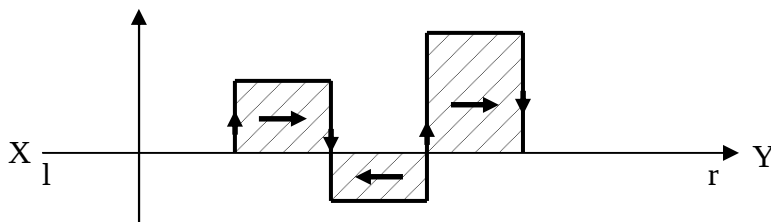
Les dépôts peuvent être faits également le long du tracé, au droit des profils où se produisent des excédents de déblais non réutilisables en remblai, on dit que les dépôts sont « indéterminés »

b°) Les remblais

Idem que pour les dépôts. Les emprunts peuvent être considérés comme des profils en déblai ou n'importe quel cube peut être enlevé.

Suivants les cas, les schémas ci-après indiquent la position de la ligne de répartition lr

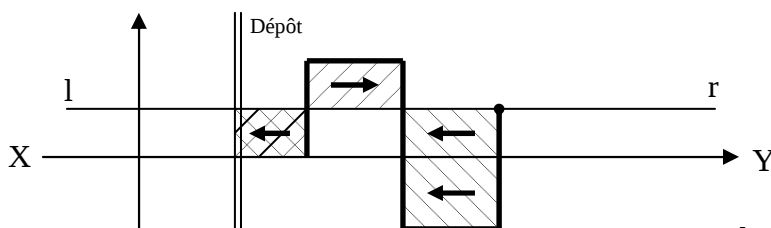
Cas 1 : le volume de remblais = au volume de déblais (on dit qu'il y a compensation)



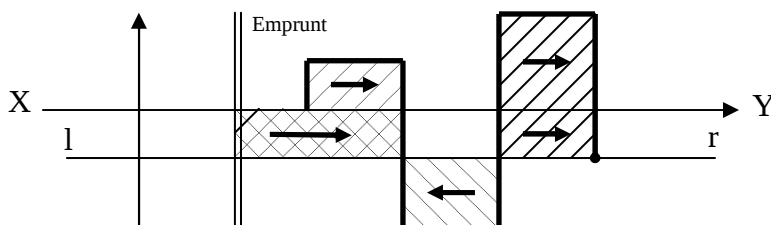
Pas de discussion possible

Cas 2 : le volume de remblais $\neq$ du volume de déblais (avec un dépôt ou un emprunt)

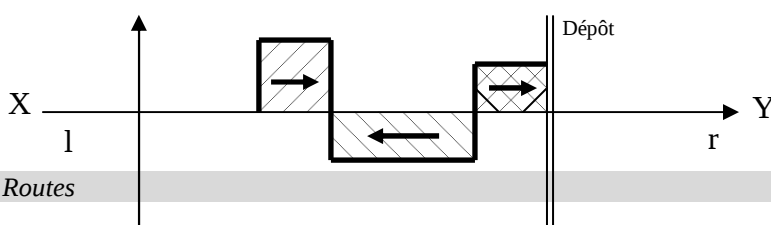
Cas 2.1 : Dépôt ou emprunt à gauche de l'épure



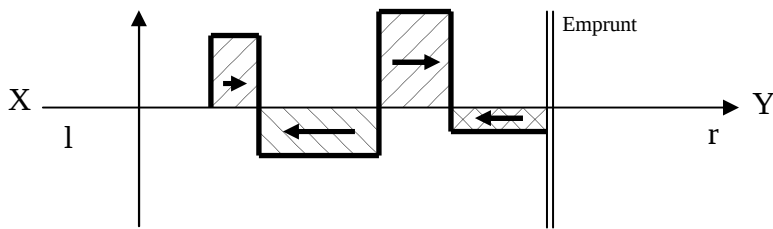
Dans les deux cas la ligne de répartition est la ligne finale



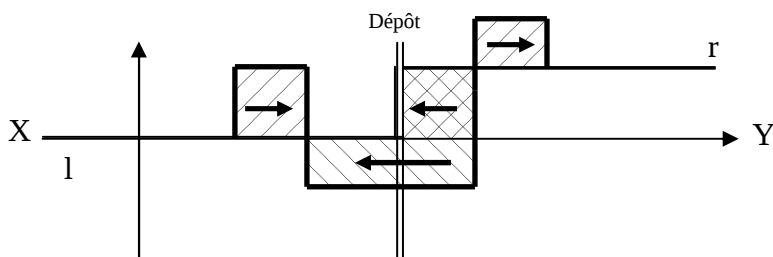
Cas 2.2 : Dépôt ou emprunt à droite de l'épure



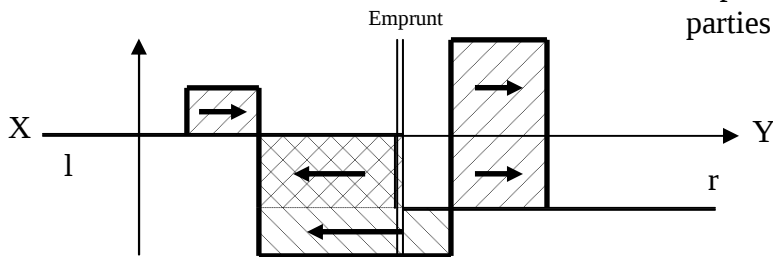
Dans les deux cas la ligne de répartition est la ligne initiale



Cas 2.3 : Dépôt ou emprunt à l'intérieur de l'épure

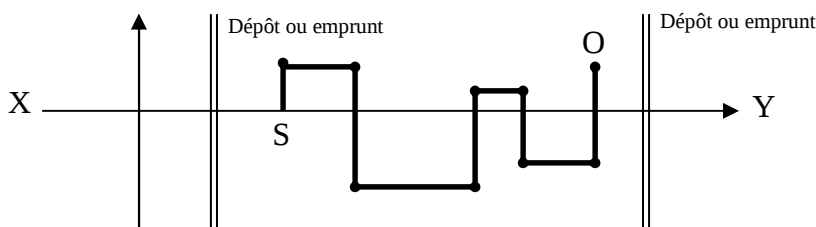


Tout se passe comme si l'épure était divisée en deux parties



Cas 3 : le volume de remblais $\neq$ du volume de déblais (avec deux dépôts ou deux emprunts)

Cas 3.1 : Dépôts ou emprunts à l'extérieur de l'épure

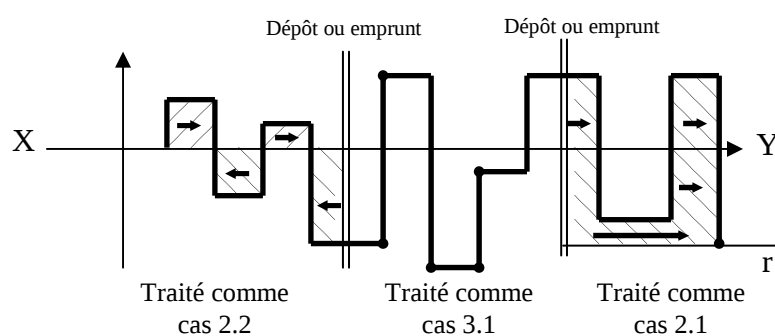


On essaiera plusieurs lignes de répartition lr entre les points S et O et on prendra celle qui donne le moment de transport le plus avantageux.

C'est le cas le plus général ou l'on applique à la lettre la règle indiquée précédemment.

On commence par l'horizontale passant par S et on chemine vers l'horizontale passant par O

Cas 3.2 : Dépôts ou emprunts à l'intérieur de l'épure



TROISIEME PARTIE : GEOTECHNIQUE ROUTIERE ET MATERIAUX DE CHAUSSEES

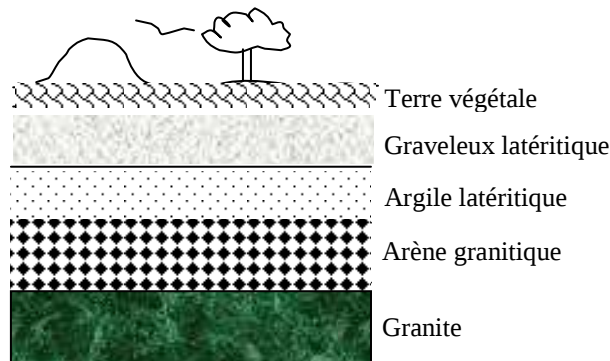
CHAPITRE 1 : LA GEOTECHNIQUE ROUTIERE

1-1 DEFINITION ET OBJET

La géotechnique est l'étude des propriétés mécaniques, physiques et hydraulique des sols en vue de leur utilisation dans la réalisation des ouvrages de génie civil.

L'objet de la géotechnique routière est de prévoir le comportement des sols, soit à l'occasion des travaux de terrassement, soit lorsque la chaussée est en service et que le sol supporte des charges répétées et subit l'influence des intempéries. La géotechnique permet également de choisir les matériaux adéquats pour assurer une longue durée de vie à l'ouvrage.

1-2 LES SOLS



Le sol est un agglomérat naturel de grains minéraux qui peuvent être séparés par de légères actions mécaniques. Il résulte de l'altération chimique (oxydation), physique (ex : variation de température) ou mécanique (érosion) des roches. Le mode de formation et l'origine géologique des sols ont une influence sur les caractéristiques géotechniques.

On distingue deux types de sols :

- les sols résiduels : formés à partir de la désintégration de la roche mère avec pour agents d'altération l'eau, les intempéries. Les produits obtenus sont déposés sur place et entre les particules de ces sols il y'a une cimentation.
- les sols sédimentaires : le principal agent de la sédimentation est l'eau. Quelques exemples de ces sols sont : les galets, les graviers, les sables, les limons, les argiles (kaolinite : distance entre deux plaquettes $7\text{\AA}$; montmorillonite : distance entre deux plaquettes $14\text{\AA}$)

L'étude de ces propriétés est faite à partir des résultats d'un certain nombre d'essais.

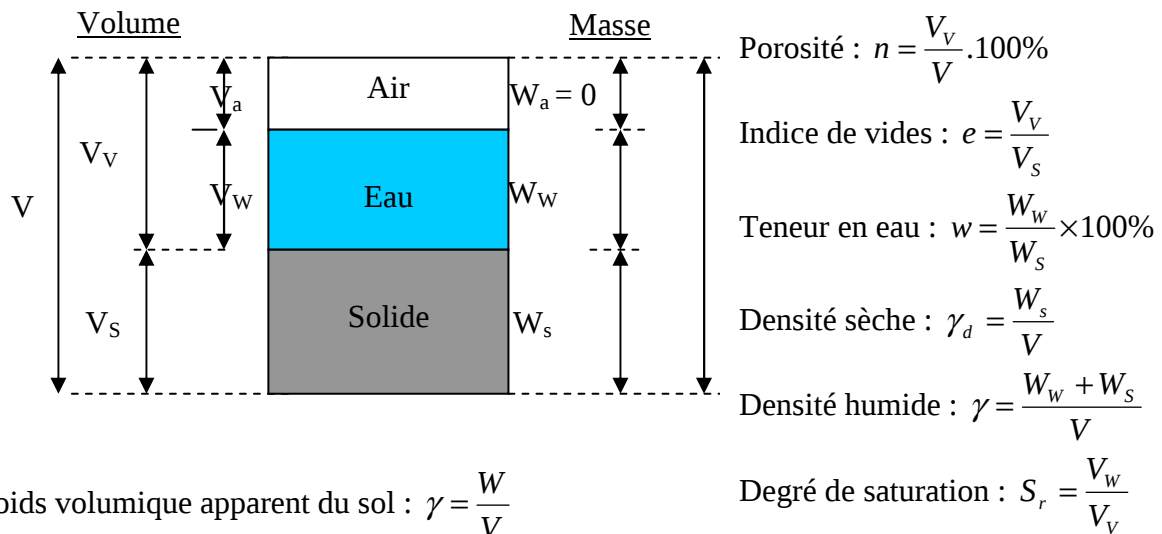
1-3 STRUCTURE SCHEMATIQUE DU SOL

Le sol est un système à 3 phases :

- une phase solide : les grains solides
- une phase liquide : l'eau interstitielle
- une phase gazeuse : l'air des vides non remplis d'eau

Les proportions relatives de ces trois phases dans un sol donné influent sur l'état de celui-ci.

Une représentation schématique de la composition d'un sol permet ici d'introduire les principales caractéristiques et leurs relations (définitions)



Poids volumique apparent du sol : $\gamma = \frac{W}{V}$

Poids volumique des grains : $\gamma_s = \frac{W_s}{V_s}$ (au pycnomètre)

Poids volumique de l'eau : $\gamma_w = \frac{W_w}{V_w}$ (10 kN/m³)

Relation entre les différents paramètres

$\gamma = \gamma_d (1 + w)$ avec $\gamma_d = \frac{W_s}{V}$ poids volumique du sol sec

$$n = \frac{e}{(1 + e)} \quad e = \frac{n}{(1 - n)}$$

$$S_r = \frac{V_w}{V_v} = \frac{w}{\gamma_w \left(\frac{1}{\gamma_d} - \frac{1}{\gamma_s} \right)}$$

1-4 PRINCIPAUX ESSAIS D'IDENTIFICATION DES SOLS- CLASSIFICATION

La première étape dans l'étude d'un sol est de procéder à son identification. Il existe au laboratoire des essais standard normalisés permettant d'identifier les sols. Ce sont :

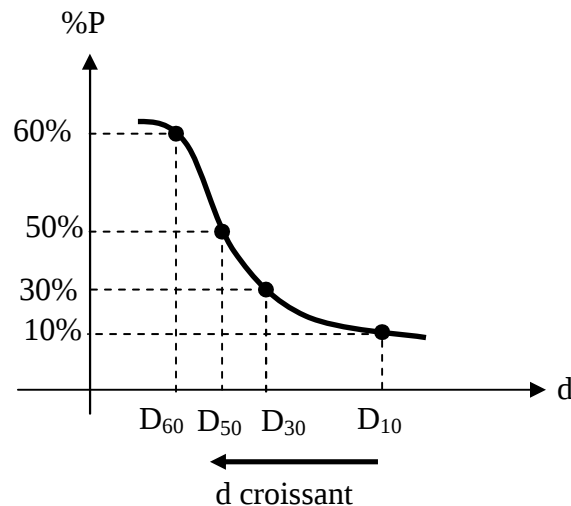
- l'analyse granulométrique
- les limites d'Atterberg
- l'équivalent de sable
- la teneur en matière organique

1-4-1 L'analyse granulométrique

Elle consiste à répartir les grains d'un sol, à l'aide de passoirs et de tamis utilisés pour effectuer leur ségrégation, en fonction de leur diamètre.

On a : $P = 1.258 \times T$ (où P est le diamètre du passoire et T le diamètre du tamis)

On obtient la représentation graphique de cet essai appelé courbe granulométrique et ayant la forme suivante :



Les éléments caractéristiques de cette courbe sont :

- le pourcentage de passant au tamis de 80 μ appelé fines (pour $d < 2\mu$: pourcentage de la fraction argileuse)
- le coefficient d'uniformité $CU = \frac{D_{60}}{D_{10}}$ dont la valeur donne une idée de la stabilité du matériau.
 γ_d croît avec CU. Elle est maximum autour de CU égal à 6. $CU < 2$: granulométrie uniforme, $CU > 2$: granulométrie étalée
- le coefficient de courbure C_c : $C_c = \frac{(D_{30})^2}{D_{10} \times D_{60}}$, C_c doit être compris entre 1 et 3 (
 $C_c > 1$: concavité tournée vers le haut, $C_c < 1$: concavité tournée vers le bas, $C_c = 1$: courbe rectiligne)

On définit les classes granulométriques suivantes :

Diamètre des grains	Classe du sol
$d > 200$ mm	Enrochement
20 mm $< d < 200$ mm	Cailloux
2 mm $< d < 20$ mm	Graviers
$0,2$ mm $< d < 2$ mm	Gros sables
$0,02$ mm $< d < 0,2$ mm	Sables fins
$0,002$ mm $< d < 0,02$ mm	limons
$d < 0,002$ mm	Argiles

La courbe granulométrique du matériau est une caractéristique essentielle en technique routière ; ainsi des concepts de courbe idéale ont été introduits.

La courbe idéale pour une compacité maximum est donnée par les courbes de Falbot dont les équations sont :

$$P = 100 \left(\frac{d}{D} \right)^n \quad \text{où} \quad \begin{cases} n : \text{variant de } 0,2 \text{ à } 0,6 \\ D : \text{dimension maximum du matériau} \\ \text{et } P : \text{pourcentage passant au tamis de maille } d \end{cases}$$

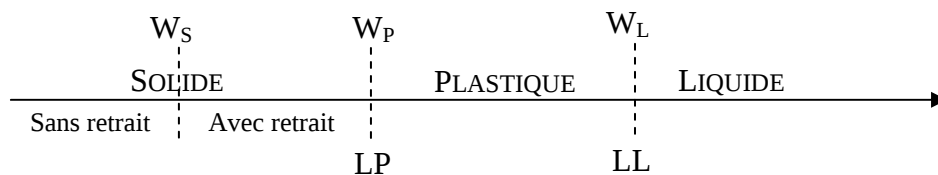
Cette courbe idéale n'est pas facilement applicable aux matériaux à granulométrie évolutive tels que les graveleux latéritiques à grains plus ou moins friables. Les courbes granulométriques d'un matériau devant constituer une couche de chaussée doivent rester dans l'intervalle d'une enveloppe appelée fuseau granulométrique.

1-4-2 Limites d'Atterberg

On distingue 4 états de consistance des sols :

- l'état liquide dans lequel le sol a la consistance d'une boue
- l'état plastique, le sol a la consistance d'une pâte à modeler
- l'état solide avec retrait
- l'état solide sans retrait

La consistance d'un sol évolue avec sa teneur en eau. Lorsque celui-ci augmente, le sol passe de l'état solide à l'état plastique puis liquide.



Les teneurs en eau de passage d'un état de consistance à un autre sont conventionnelles et déterminées au laboratoire par des tests normalisés sur le mortier (passant au tamis de 0,4 mm). Ce sont les limites d'Atterberg :

- la limite de liquidité LL (ou W_L) : passage de l'état plastique à l'état liquide
- la limite de plasticité LP (ou W_P) : passage de l'état solide à l'état plastique
- la limite de retrait

On définit à partir de ces limites les indices suivants :

- l'indice de plasticité $I_p = W_L - W_P$. Cet indice de plasticité I_p , variation de teneur en eau est à peu près une variation de volume. Dans la majorité des cas, un sol à I_p élevé aura une importante variation de volume lorsqu'il passera de l'état plastique à l'état liquide. L'indice de plasticité indique donc la sensibilité du matériau à l'eau.
- l'indice de liquidité : $I_L = \frac{W - W_P}{I_p}$
- L'indice de consistance : $I_C = \frac{W_L - W}{I_p} = \frac{LL - W}{I_p}$

$I_C < 0$ et $I_L > 1$	Etat liquide
$0 < I_C < 1$ et $0 < I_L < 1$	Etat plastique
$I_C > 1$ et $I_L < 0$	Etat solide

1-4-3 Equivalent de sable (ES)

Il s'agit d'un essai qui permet d'évaluer l'importance et l'activité des éléments très fins (silt et argile) par rapport aux éléments grossiers et inertes (sables) d'un matériau.

$ES = 100$	Matériau propre
$ES < 20$	Matériau très argileux

Par exemple $ES > 80$ pour les sables à béton

1-4-4 Teneur en eau

Mesure la quantité d'eau rapportée au poids sec du matériau et exprimé en pourcentage. Elle donne une idée de l'importance de la phase liquide.

1-4-5 Teneur en matière organiques (MO)

Il arrive souvent que pour les besoins de la cause l'on soit amené à déterminer la teneur en matière organique. Pour les sols routiers par exemple, il faut $MO < 3\%$

1-5 CLASSIFICATION DES SOLS

Classer un sol c'est le ranger dans une catégorie de sols ayant des propriétés bien déterminées. En fonction du but qu'on veut atteindre on peut regrouper des classes de sols. Il existe de nombreuses classifications adaptées à des problèmes spécifiques et plus ou moins dans chaque pays.

Il existe en géotechnique :

- la classification HRB (Highway Research Board), américaine, peu utilisée maintenant.
- la classification USCS : (ou l'adaptation française de l'USCS et dite LPC), américaine, elle est basée surtout sur l'analyse granulométrique et les limites d'Atterberg. Elle est utilisable pour les couches de chaussées et les problèmes de fondations.
- la classification RTR des sols ; française, adaptée aux sols en vue de leur utilisation en travaux de terrassements routiers. Cette classification est basée sur les critères de nature (dimensions, IP par exemple) et des paramètres d'état ou de comportement. Exemple : état d'humidité, IC, proctor)

Ces différentes classifications surtout les deux premières sont utilisées avec plus ou moins de bonheur en Afrique. Mais diverses classifications ont vu le jour pour tenir compte de la spécificité des sols tropicaux.

Ainsi nous avons :

- en Côte d'Ivoire : la classification LBTP des sols graveleux latéritiques
- la classification ORSTOM-ALAN basée d'abord sur la classification LPC et tenant ensuite compte du processus pédogénétique qui conduit à la formation de ce sol.
- Ailleurs, la plupart des classifications des sols tropicaux partent de considération d'ordre géopédologique.

Exemple : celle de l'Ingénieur Brésilien Nogami qui en vue d'une utilisation routière, distingue deux types de sols : les sols superficiels et les sols saproliques.

1-5-1 Classification Américaine du Highway Research Board (HRB)

Elle est basée à la fois sur la granulométrie et la plasticité. Cette classification utilise une analyse granulométrique simplifiée (tamis de 2 mm, 0,40 mm et 80μ) ainsi que de la limite de liquidité et de l'indice de plasticité.

Le tamisage au tamis de 80 μ permet de distinguer les sols fins (catégorie A4 à A7) des sols grenus (catégories A1, A2 et A3) suivant que le tamis est supérieur ou inférieur à 35%.

Dans les sols grenus on distingue les groupes A1 (cailloux, gravier et sable) et A3 (sable fin), qui sont dépourvus de plasticité, ou presque, du groupe A2 qui comprend des mélanges de graviers et sables limoneux ou argileux. Le groupe A2 est d'ailleurs divisé en quatre sous-groupes (de A2-4 à A2-7) suivant les mêmes critères que les sols fins.

Tableau de classification des sols (H.R.B)

Classification générale	Matériaux granuleux de 35% < 0,08 mm							Matériaux limoneux-argileux Plus de 35% < 0,08 mm				
Subdivision	A-1		A-3	A-2				A-4	A-5	A-6	A-7	
	A-1-a	A-1-b		A-2-4	A-2-5	A-2-6	A-2-7				A-7-5	A-7-6
Granulométrie passant à : 2 mm (n°10) 0,40 mm (n°40) 0,06 mm (n°20)	50max 30max 15	50max 25max	35max	35max	35max	35max	35max	35min	35min	35min	35min	35min
Plasticité Limite de liquidité Indice de plasticité	max6	max6		40max 10max	41min 10max	40max 10min	40min 10min	40max 10max	40max 10max	40max 10min	min40 min10 IP<LL-30	min40 min10 IP>LL-30
Indice de groupe	0	0	0	0	0	4max	4max	8max	12max	16max	20max	
Appellation générale	Pierres, graviers et sables	Pierres, graviers et sables	Sables fins	Graviers et sables limoneux ou argileux	Graviers et sables limoneux ou argileux	Graviers et sables limoneux ou argileux	Graviers et sables limoneux ou argileux	Sols limoneux	Sols limoneux	Sols argileux	Sols argileux	

1-5-2 Classification LPC ou USCS

Les caractéristiques de bases retenues pour la classification sont :

- la composition granulométrique
- la plasticité
- la teneur en matière organique

Cette classification distingue deux grandes catégories de sols à partir de la composition granulométrique :

- les sols grenus, ceux qui ont plus de 50% d'éléments de diamètre supérieur à 0,08 mm (graves et sables)
- les sols fins, ceux qui ont plus de 50% d'éléments de diamètre inférieurs à 0,08 mm (argiles peu plastiques, limons et sols organiques peu plastiques, argiles très plastiques, limons très plastiques, sols organiques très plastiques)

(Voir annexe)

1-5-3 Classification LBTP

Le Laboratoire du Bâtiment et des Travaux Publics (LBTP) d'Abidjan a élaboré une classification des sols ivoiriens. Cette classification est basée sur le pourcentage de fines ($d < 80\mu$), l'IP, l'indice CBR à 95% OMP à 96h d'imbibition. (Voir doc annexe).

1-6 COMPACTAGE

1-6-1 Définition

Le compactage est l'ensemble des opérations mécaniques qui conduisent à modifier instantanément et de façon irréversible la structure du sol. C'est-à-dire, réduire le volume des vides en resserrant la texture du matériau, sans élimination d'eau (l'eau jouant un rôle de lubrifiant).

Par le compactage on réduit significativement les possibilités de déformation ultérieure du sol (amélioration du module d'élasticité et du module œdométrique, réduction de la compressibilité) et on améliore sa capacité portante.

Les procédés de compactage sont variés : charge vibrante, pression, chocs, etc. Le compactage est fonction des facteurs suivant :

- la nature du matériau
- l'état d'humidité de ce matériau
- et l'énergie de compactage utilisée.

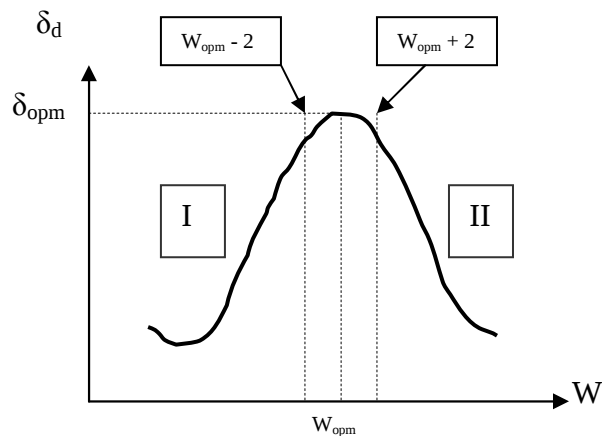
1-6-2 Essai proctor

L'étude du compactage d'un sol est faite au laboratoire à partir d'un essai normalisé dit essai proctor. Il vise à déterminer pour une énergie de compactage donnée, la teneur en eau à laquelle doit être compacté le sol pour obtenir la densité sèche maximum.

En laboratoire on pratique l'essai proctor en reproduisant plus ou moins les conditions de compactage sur le chantier. Il existe des types d'essai : le proctor normal et le proctor modifié. Les caractéristiques de ces deux essais de compactage sont les suivants :

	Essai proctor normal	Essai proctor modifié
Masse de la dame	2,480 Kg	4,535 Kg
Hauteur de chute	305 mm	457 mm
Nombre de couches	3	5
Nombre de coups par couche	25	55

On obtient une courbe proctor donnant la densité sèche en fonction de la teneur en eau



Courbe proctor

- I

L'eau joue le rôle de lubrifiant

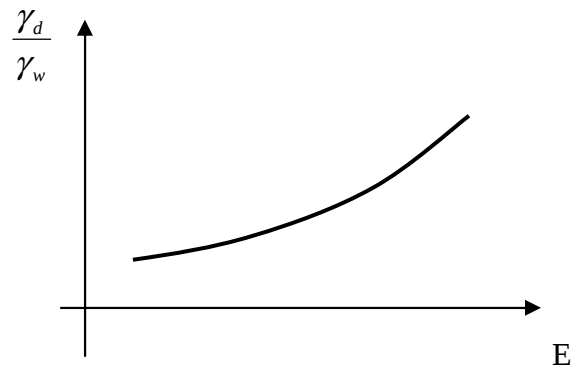
II

Les charges dynamiques créent des pressions interstitielles qui décompactent le sol

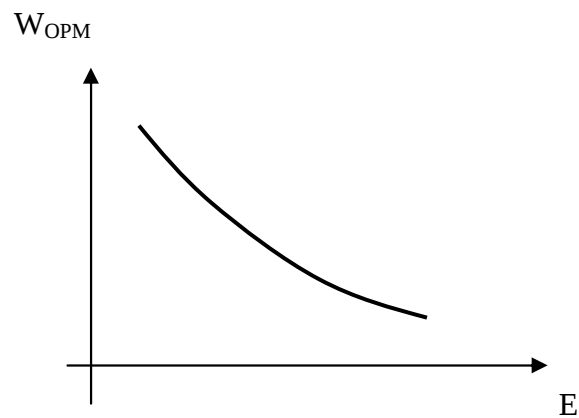
La teneur en eau ainsi déterminée est appelée teneur en eau optimum proctor

1-6-3 Influence du compactage et de l'énergie de compactage

- La densité du sol croît avec l'énergie de compactage

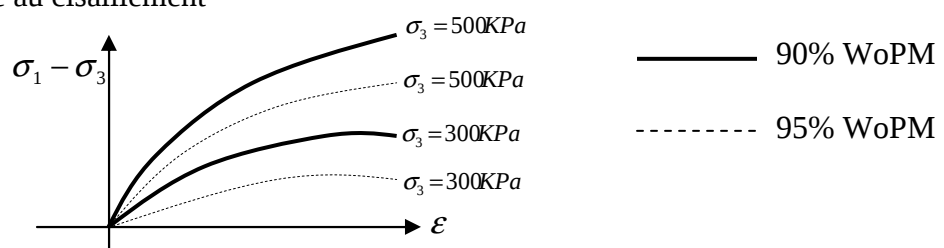


- La teneur en eau de l'OPM décroît avec l'accroissement de l'énergie de compactage

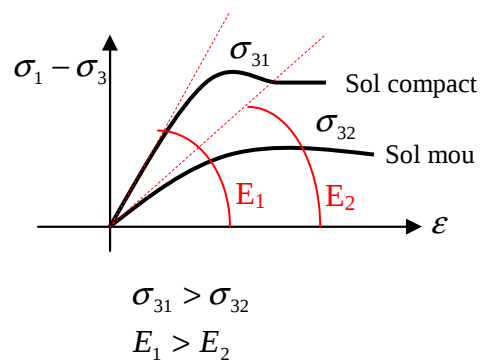


1-6-4 Influence du compactage

- Résistance au cisaillement



- Module d'élasticité



1-7 PORTANCE DES SOLS

L'un des objectifs de la géotechnique routière est de prévoir le comportement des sols sous les sollicitations du trafic. Ainsi, un certain nombre d'essai permettent une approche pratique de la loi rhéologique.

1-7-1 L'essai CBR

Dans les travaux routiers, où l'on ne peut admettre que de faibles déformations du sol, on détermine la portance du sol, c'est-à-dire sa résistance à la rupture, par un essai particulier appelé essai CBR (Californian Bearing Ratio) ou essai de portance Californien. Il s'agit d'un essai de poinçonnement à l'aide d'une presse standard (presse CBR) à vitesse constante (1,27 tr/mn et le diamètre du piston 19,6 cm).

Le matériau à étudier est placé dans un moule dans un état donné de densité et de teneur en eau. Il est ensuite poinçonné par la presse standard.

L'indice de portance ou CBR exprimé en % est le rapport entre les pressions produisant dans le même temps un enfoncement donné dans le sol étudié d'une part et dans un matériau type d'autre part. Par définition cet indice est pris égal à la plus grande des valeurs suivantes :

$$\frac{\text{Pression à 2,5 mm d'enfoncement} \times 100}{0,70}$$

$$\frac{\text{Pression à 5 mm d'enfoncement} \times 100}{1,05}$$

Le pouvoir portant du sol est d'autant meilleur que le CBR est grand.

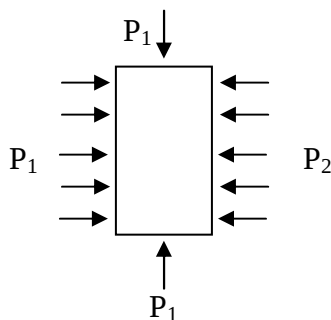
Relation CBR – Module de Young (E)

$$E = 65 \cdot CBR^{0,65} \text{ (Jeuffroy – Bachel)}$$

$$E = 100 \cdot CBR \text{ (Heukelon)}$$

$$E = 50 \cdot CBR \text{ (Méthode Russe)}$$

1-7-2 Essai triaxial

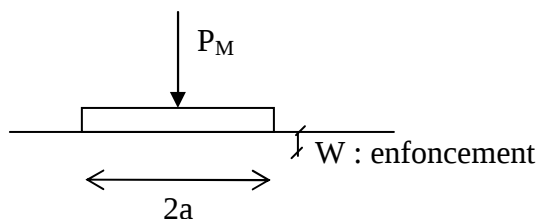


Essai triaxial à contrainte latérale variable : 2^{ème} essai dérivant de l'essai triaxial à contrainte latérale constante. Cet essai caractérise mieux les matériaux de chaussées. On fait varier P1 et P2 pour tenir compte du trafic routier.

1-7-3 Essai de plaque

C'est un essai qui permet de connaître les caractéristiques mécaniques. Il consiste à appliquer au sol des sollicitations du même ordre de grandeur que celles du trafic. On applique au sol e

place la force P par l'intermédiaire d'une plaque rigide de diamètre $2a$. On mesure l'enfoncement de la plaque et on détermine un module de déformation.



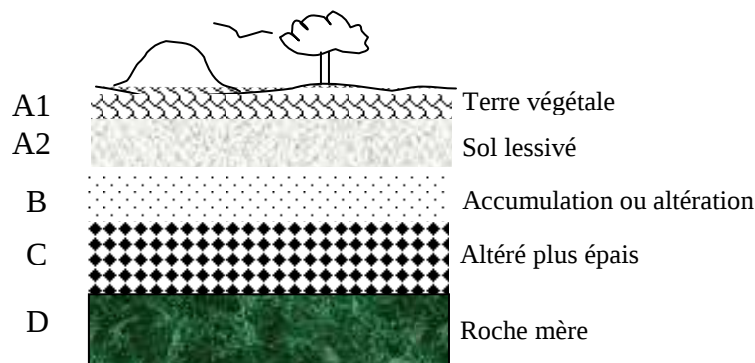
Elasticité linéaire

$$E = \frac{\pi}{2} (1 - \nu^2) \frac{a \cdot P_M}{W} \quad (\text{Monocouche de Boussinesq) Multicouches élastiques}$$

1-8 COUPES DES SOLS EN COTE D'IVOIRE

Une coupe transversale de sols ivoiriens fait apparaître quatre niveaux fondamentaux qui sont :

- Niveau A : la partie supérieure A1 est l'horizon de la terre végétale et la partie inférieure A2 est le sol lessivé
- Niveau B : horizon d'accumulation ou d'altération
- Niveau C : horizon altéré plus épais
- Niveau D : niveau de la roche mère



1-8 APPLICATION PRATIQUE DE LA GEOTECHNIQUE ROUTIERE

La géotechnique intervient au niveau de :

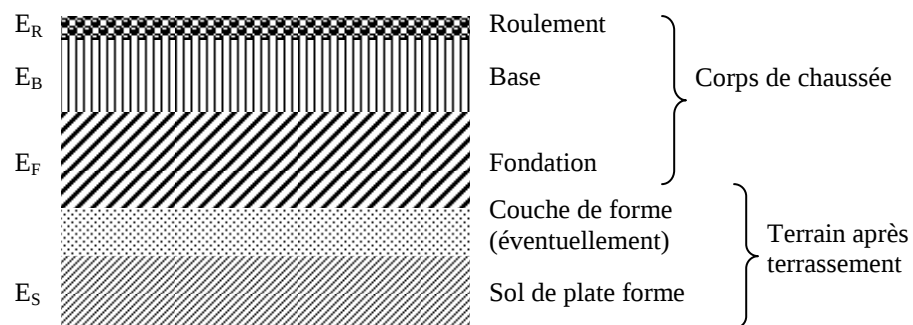
- calcul des épaisseurs de chaussées (détermine les propriétés mécaniques des sols de plate forme et des matériaux constitutifs : CBR, essai de plaque, plasticité)
- l'exécution des terrassements (détermine la nature et l'état des sols, identifie les difficultés extraction des emprunts en proposant des techniques et matériels adaptés, précise la réutilisation ou non en remblais des sols extraits des déblais, détermine les densités humides des sols en place, des sols dans les devis et les sols après compactage)
- la recherche de gisement de matériaux (*les matériaux de chaussée représentent environ 20% du coût total de la chaussée*, identifie les sites de matériaux de viabilité)
- calcul des tassements des remblais

CHAPITRE 2 : LES MATERIAUX DE CHAUSSEES

2-1 GENERALITES

Le corps de chaussée a pour but par la répartition des efforts localisés exercés en surface par les véhicules, d'atténuer suffisamment les fatigues imposées au terrain de fondation (par l'intermédiaire, éventuellement, d'une couche de forme).

Le corps de chaussée comporte : une couche de base d'environ 20 cm d'épaisseur, reposant sur une couche de fondation (20 à 30 cm) elle-même reposant éventuellement sur des couches drainantes ou anticontaminantes. Et une couche de roulement reposant sur la couche de base. Elle est directement exposée aux efforts localisés des véhicules et a pour but de résister aux efforts normaux et tangentiels et d'atténuer suffisamment par la répartition de ces efforts les fatigues transmises à la couche de base. Elle est constituée en général de matériaux traités au liant hydrocarbonés



On a : $E_R > E_B > E_F > E_S$ où les E_I sont les module de rigidité des couches I

On distingue deux familles de matériaux :

- les matériaux naturels
- et les matériaux traités

2-2 CARACTERISTIQUES DES COUCHES D'ASSISE DE CHAUSSEE

2-2-1 Le sol de plate forme

Il s'agit des 30 premiers cm de couche naturel sous la terre végétale (socle)

- il doit avoir un $CBR > 5$. Sinon il sera substitué par une couche de forme ayant un $CBR > 5$.

2-2-1 La couche de fondation

- il faut une bonne résistance au cisaillement (C , Φ élevé)
- le matériau constitutif doit être peu sensible à l'eau (% de fine peu élevé)
- la portance doit être assez élevée ($CBR > 30$)
- Il faut une conservation des propriétés physiques et mécanique au cours du temps. Il faut donc protéger la couche par l'utilisation des drains

2-2-2 La couche de base

- il faut une très bonne résistance au cisaillement
- une faible sensibilité à l'eau ($I_p < 10$)
- avoir une portance suffisante en fonction du trafic ($CBR > 60$)
- Il faut que le diamètre du plus gros grain du matériau soit inférieur à 3 cm, avec un pourcentage de fine inférieur à 18%.

2-3 LES MATERIAUX NATURELS

Ils sont constitués de sols fins et de matériaux granulaires. La caractéristique mécanique principale de ces matériaux est qu'ils fluent (tassent) sous chargement. En Côte d'Ivoire, il s'agit :

- des sables argileux du continental terminal
- des sables (marins)
- des graveleux latéritiques situé sur le socle (à 30 cm de la couche végétale, avec des épaisseurs comprises entre 0,80 à 1,00 m)
- des graviers
- des concassés et graviers alluvionnaires
- les argiles d'altération

Dans d'autres régions africaines l'on rencontre certains autres matériaux tels que le banco coquillage, les scories volcaniques, etc.

2-3-1 Caractéristiques des matériaux naturels

Pour leur utilisation dans les couches de chaussées, ces matériaux font l'objet de spécifications ou recommandations précises sur la stabilité mécanique, appréciée par certaines mesures obtenues à partir d'essais au laboratoire :

- la granulométrie : il est essentiel que la courbe granulométrique permette d'obtenir une compacité suffisante pour éviter les tassements ultérieurs sous le trafic (Annexe des fuseaux granulométriques). En cas de défaut de granularité l'on procèdera à une amélioration granulométrique (exemple : correction granulométrique du sable argileux par apport de sable propre)
- les limites d'Atterberg
- l'essai proctor en vue de déterminer les conditions de compactage efficace (teneur en eau et énergie de compactage)
- la dureté (appréciée par les essais Los Angelès, le Deval ou le Micro Deval) et la forme (ou angularité, instruisant sur la difficulté de compactage) des grains des matériaux granulaire
- l'essai CBR, essai triaxial, essai de plaque, en vue de la détermination de la portance

Dans les pays tempérés l'essai de gélivité des matériaux est une caractéristique essentielle.

2-3-2 Recommandations générales sur les matériaux naturels en Côte d'Ivoire

Les recommandations tiennent compte de la classe de trafic et de la nature de la couche à mettre en œuvre (voir tableaux p 118-p 119) ; Elles indiquent pour chaque couche constitutive de la chaussée et en fonction des matériaux les valeurs minimales de :

Pour le graveleux latéritique et le sable argileux :

- l'indice CBR,
- teneur en Fines
- l'indice de plasticité,
- la densité sèche

Pour la grave concassée ou tout-venant de concassage :

- la classe granulaire
- l'indice de plasticité
- l'Equivalent de sable
- la dureté Los Angeles
- l'indice de concassage

2-4 LES MATERIAUX TRAITES

Ils sont constitués de deux groupes :

- les matériaux traités aux liants hydrauliques
- et les matériaux traités aux liants hydrocarbonés

2-4-1 Les matériaux traités aux liants hydrauliques

2-4-1-1 Différents types de liants hydrauliques

Ces sont :

- le ciment
- la chaux
- les cendres volantes
- les laitiers (En métallurgie : sous produit industriel résiduel apparaissant à la surface des métaux en fusion et utilisé en construction, *ciment de laitier*)

2-4-1-2 Objectifs du traitement

Les objectifs sont :

- rendre insensible à l'eau des matériaux à forte plasticité
- donner une cohésion à certains matériaux fins (sable, ...) impropres à constituer une couche de chaussée à l'état naturel
- augmenter les performances mécaniques (modules de rigidité, ...) des matériaux de bonne granulométrie pouvant constituer les couches de chaussées à forts trafics (autoroutes, ...).

Pour mesurer les performances mécaniques de ces matériaux, on utilise les essais de compression, de traction et de torsion.

2-4-1-3 Quelques types de matériaux traité aux liants hydrauliques

Ce sont :

	En Europe	En Afrique
En couche de fondation	Sable laitier	Banco coquillage ciment

	Grave laitier Sable ciment	Sol ciment Sol chaux
En couche de base	Grave ciment Grave laitier Grave cendres volantes	Graveleux latéritiques ciment Sable argileux ciment Grave concassé ciment Sol ciment

Ces matériaux sont généralement traités à 4% du ciment

2-4-1-4 Caractéristiques limites des sols stabilisables au ciment

Caractéristiques	Valeurs limites
Granulométrie : dimensionnement	75 mm
% d'éléments passant à 5 mm	mini 50
% d'éléments passant à 0,5 mm	mini 15
% d'éléments passant à 0,08 mm	mini 50
Particules plus petites que 2 μ	maxi 30
Limites d'Atterberg (HRB)	
Limite de liquidité LL	maxi 40%
Limite de plasticité LP	maxi 22%
Indice de plasticité IP	maxi 18%
IP (Peltier et Bonnenfant)	mini 2 à 4
Equivalent de sable (Peltier et Bonnenfant)	30% < ES < 50%
Teneur en matières organiques	maxi 2 avec addition de correcteurs

2-4-2 Les matériaux traités aux liants hydrocarbonés

2-4-2-1 Différents types de liants hydrocarbonés

Ces sont :

a) le bitume,

Définition : C'est un corps noir qui se solidifie à la température ambiante. Il résulte de la distillation fractionnée d'un pétrole brut. Utilisé dans le traitement des matériaux, il leur confère une cohésion à la température ordinaire. Il est visqueux et présente pour les travaux routiers des caractéristiques intéressantes.

Caractéristiques : Il est thixotropique (augmentation de la cohésion avec le temps) avec une forte cohésion. Sous l'effet des charges, il se comporte comme un solide. Il est très adhésif et très étanche. Pour permettre sa mise en œuvre, il doit être fluidifié au préalable soit par chauffage, soit par fluxage (mélange avec des produits dérivés du pétrole ; on obtient le Cut back), soit par émulsion (injection du bitume dans l'eau sous forte pression en ajoutant des produits appelés émulsifs)

Classes de bitumes : il existe plusieurs classes de bitumes. Pour définir la classe du bitume, on fait l'essai de pénétrabilité sous une charge de 100 g pendant 5 secondes à une température de 25°C. Exprimées au dixième de mm, on distingue les classes suivantes : 180/220 ; 100/120 ; 80/100 ; 60/70 ; 40/50 ; 20/30.

b) le goudron

C'est une substance noirâtre et visqueuse obtenue en distillant des matières organiques telle que la houille ou certains bois.

2-4-1-3 Quelques types de matériaux traités aux liants hydrocarbonés

Les plus couramment utilisés sont les matériaux bitumineux qui sont des mélanges de matériaux (granulat pierreux, sable, sol, etc...) et de bitume obtenus à chaud (ou à froid) avec des conditions de composition bien définies.

Les matériaux bitumineux se définissent en fonction de la taille des grains solides qui les constituent. Si D est la taille du plus gros grain, ce sont :

- la grave bitume si $D > 20$ mm (pour couche de base et de fondation)
Les classes granulaires fréquent sont : 0/20 ; 0/31,5 et 0/40. Pour avoir la dureté des granulats on effectue les essais Los Angeles, Déval, Micro Déval ou Fragmentation dynamique.
- les enrobés si $6,3 \text{ mm} < D < 20$ mm (couche de roulement)
- sable bitume, sable enrobé (le sand asphalt) si $D < 6,3$ mm (couche de roulement)

On les classe également en fonction du pourcentage de vide. On distingue :

Enrobés denses : béton bitumineux, enduit superficiel, $0 < \% \text{ des vides} < 10$

Enrobés semi-denses : $10 < \% \text{ des vides} < 15$

Enrobés ouverts : $15 < \% \text{ des vides}$

(Caractéristiques des enrobés bitumineux : voir note sur les chaussées tome 1 (M. Messou))

L'utilisation des matériaux dans les structures de chaussée se fait en fonction de leur disponibilité et du trafic prévisionnel à supporter. Il arrive que des matériaux disponibles ne satisfassent pas aux exigences mécaniques de mise en œuvre. De plus la prise en compte systématique des impacts environnementaux dans les projets routiers peut rendre indisponible des matériaux naturels de qualité. L'on a recours aux matériaux traités pour améliorer les caractéristiques mécaniques des matériaux disponibles.

2-5 PROPRIÉTÉS DES MATÉRIEAUX

Des logiciels de calcul ont été développés pour le dimensionnement des chaussées. L'utilisation de ces logiciels nécessite la connaissance expérimentale des propriétés mécaniques des matériaux utilisés (valeur limite admissible des contraintes et déformation, nature des relations entre contrainte et déformation, résistance aux diverses sollicitations)

2-5-1 Relation contrainte - déformation – module de déformation**2-5-1-1 Cas des sols et matériaux granulaires**

On utilise une relation empirique entre le CBR et la contrainte verticale, relation obtenue à partir de structures existantes et jugées satisfaisantes :

QUATRIEME PARTIE : DIMENSIONNEMENT DES CHAUSSEES

CHAPITRE 1 : GENERALITES

La chaussée est une surface spécialement aménagée sur le sol ou sur un ouvrage pour la circulation des véhicules automobiles.

On aménage la route pour qu'elle :

- ☞ soit circulaire en toute saison;
- ☞ assure le confort et la sécurité des usagers.

Les différentes sollicitations au niveau des chaussées sont :

- ☞ le trafic ;
- ☞ le climat.

1-1 CONSTITUTION DES CHAUSSEES

1-1-1 Différentes couches

- **CHAUSSEE**
 - o **SURFACE : Couche de roulement ou revêtement**
 - o **ASSISE :**
 - **Couche de base**
 - **Couche de fondation**
- **COUCHE DE FORME** (cette couche est mise en place lorsque le sol en place n'est pas de bonne qualité)
- **SOL SUPPORT**

1-1-2 Rôle des différentes couches de chaussée

La couche de surface (revêtement) reçoit les effets directs de la circulation (efforts verticaux et tangentiels) et de l'environnement (climat). Elle protège les couches sous-jacentes contre les eaux pluviales.

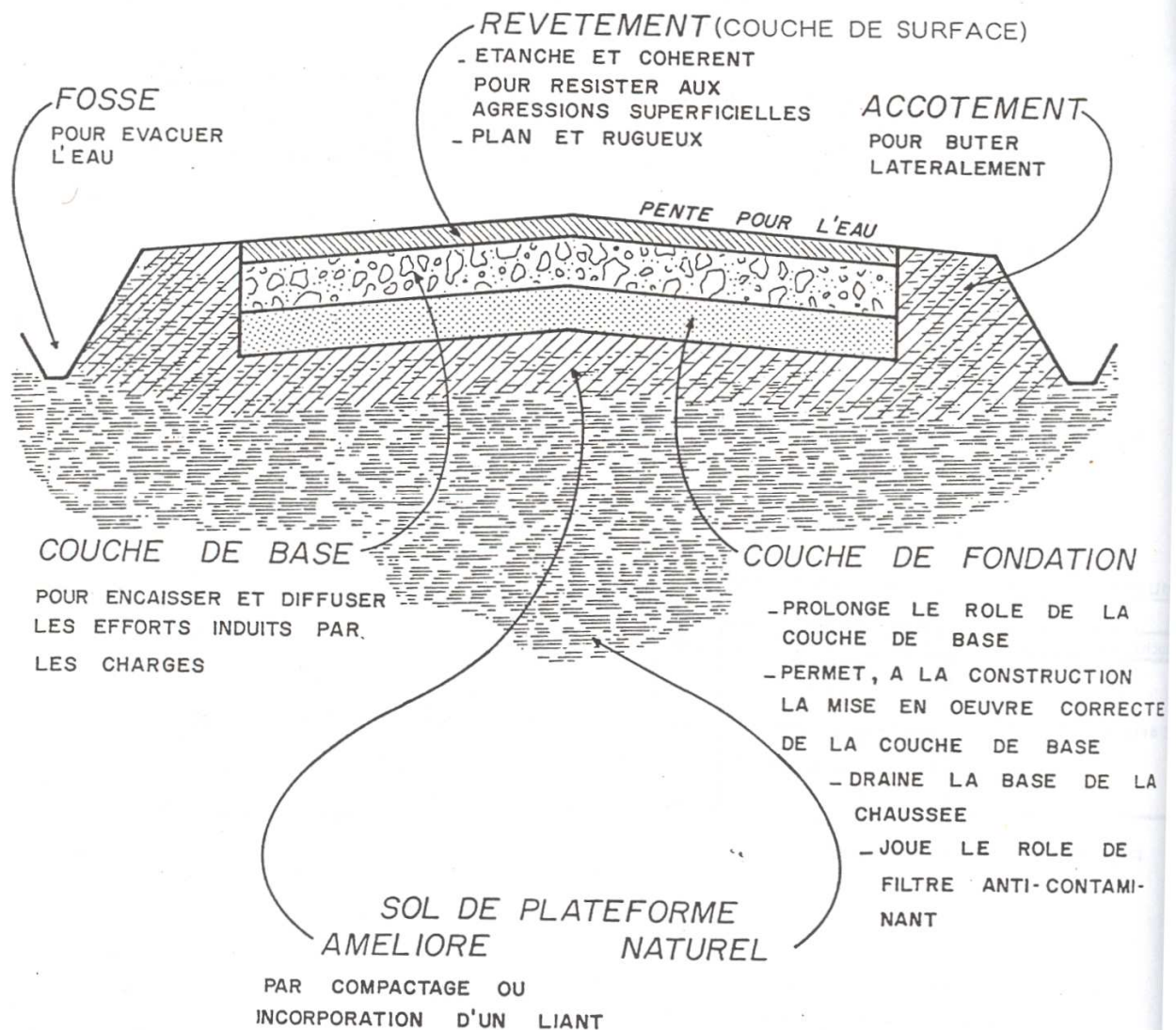
*Les couches de base et de fondations forment ce qu'on appelle le **corps de chaussée** dont le rôle est de transmettre les contraintes résiduelles au sol de plate-forme.*

Dans ce corps de chaussée, *la couche de base* est la véritable charpente, elle reçoit une partie des efforts rapidement variables (chocs, vibrations) et repartit les pressions résiduelles aux couches inférieures. Elle doit présenter des caractéristiques mécaniques élevées. Quant à la couche de fondations elle repartit les pressions résiduelles au sol de plate-forme ; elle doit constituer un substratum homogène et peu déformable pour la mise en œuvre efficace de la couche de base.

*La **plate-forme** est le support de la chaussée, elle est définie par sa portance (CBR).*

Dans son rôle d'atténuation des contraintes résiduelles, le corps de chaussées intervient par l'épaisseur et la nature des matériaux constitutifs.

ANATOMIE SOMMAIRE D'UNE CHAUSSEE ROUTIERE BITUME



1-1-3 Analyse fonctionnelle d'une chaussée

ANALYSE FONCTIONNELLE D'UNE CHAUSSEE

COUCHE DE SURFACE		
Roulement	☞ Interface pneumatique ☞ Interface environnement	▶ adhérence ▶ confort ▶ résistance ▶ étanchéité ▶ résistance chaleur,... ▶ durable
COUCHES D' ASSISE		
Base Fondation	Diffusion des efforts	▶ Propriétés mécaniques ▶ durabilité
COUCHE DE FORME		
Couche de forme	☞ Homogénéise la portance ☞ Assure le nivellement ☞ Facilite la construction	Propriétés mécaniques

1-2 TYPES DE CHAUSSEES

1-2-1 Chaussées classiques

Le module de rigidité décroît avec la profondeur : $E_R > E_B > E_F$

☞ **Chaussées souples** : Faibles trafic (dans les quartiers).

Composition des couches :

Revêtement : Béton bitumineux ou Sand asphalt

Base : Grave non traitée (GNT) – matériau naturel

Fondation: Grave non traitée (GNT)

☞ **Chaussées semi-rigides** :

Composition des couches :

Revêtement : Béton bitumineux ou Sand asphalt

Base : Grave traitée (GT) – matériau naturel + ciment

Fondation: Grave non traitée (GNT) ou Grave traitée GT

La plupart des routes en rase campagne aujourd'hui sont des chaussées semi-rigides. Ces chaussées sont utilisées pour les trafics modérés.

☞ **Chaussées rigides** : Trafic très élevé. Chaussées onéreuses.

Composition des couches :

Revêtement : Béton

Base : Grave traitée (GT)

Fondation: Grave traitée GT

ou

Revêtement :

Base : } dalle en béton

Fondation:

☞ **Chaussées mixtes**:

Composition des couches :

Revêtement : Béton bitumineux ou Sand asphalt

Base : Grave traitée (GT)

Fondation: Grave Bitume

Ou

Revêtement : Béton bitumineux ou Sand asphalt

Base : Grave Bitume

Fondation: Grave traitée (GT)

1-2-2 Chaussées inverses ou « chaussées sandwich »

Revêtement : Béton bitumineux (BB) ou Sand Asphalt (SA)

Base : Grave non traitée (GNT)

Fondation: Grave traitée GT

S'il y a fissure elle ne remonte pas car il y a un matériau non rigide en couche de base.

1-3 FACTEURS DE BASES DU DIMENSIONNEMENT DES CHAUSSEES.

(Différents éléments entrant en ligne de compte dans le dimensionnement des chaussées).

Les facteurs de bases pour le dimensionnement d'une chaussée sont :

- Le trafic (volume et évolution);
- Les matériaux de viabilité (leur comportement mécanique) ;
- Le sol de plateforme (son CBR) ;
- Le climat.

1-3-1 Le trafic

Il peut être caractérisé par 4 éléments :

- Son volume :
 - Débit journalier
 - Nombre cumulé de poids lourds devant emprunter la chaussée pendant toute sa durée de service ;
 - Nombre cumulé d'essieux standards ou équivalents.
- Son taux d'évolution
- La distribution transversale
- Le spectre des charges (distribution statistique des poids des véhicules).

A partir du spectre des charges on détermine le nombre **d'essieux équivalents**.

Exemple :	Pays	Essieu équivalent
	CI, France	13 T
	USA	8,2 T

Poids lourd en CI : Charge à l'essieu > 1,5 T
Charge utile 3,5

Poids lourd en France: Charge à l'essieu > 6 T
Charge utile > 9 T

Estimation du volume du trafic

☞ **Trafic journalier** : nombre de véhicule qui circule dans les deux sens sur une route par jour.

Soient : T_j : trafic journalier

i : taux d'évolution

n : nombre d'année (Durée de service).

☞ **Le trafic global** est donné par la formule :

$$T = 365 \times T_j \times \frac{(1+i)^n - 1}{i}$$

☞ **Le trafic poids lourds** est donné par la formule :

$$T_{PL} = 365 \cdot T_{j_{PL}} \cdot \frac{(1+i)^n - 1}{i} \quad T_{PL} < T$$

Nombre d'essieux équivalents : Les essieux standards ou équivalents les plus rencontrés sont :
France : 13 T

USA : 8,2 T

L'objectif est de convertir tout le trafic en nombre d'essieux standards.

Essai AASHO : $A = \left(\frac{P}{P_0}\right)^\alpha$ où A est le coefficient d'agressivité.

P_0 est l'essieu standard

$\alpha = 4$ pour les chaussées souples

$\alpha = 8$ pour les chaussées semi-rigides

$\alpha = 12$ pour les chaussées rigides.

Coefficient d'agressivité moyenne :

$$CAM = \frac{1}{T_{j_{PL}}} \sum_i \sum_{j=1}^3 K_j n_{ij} \left(\frac{P_i}{P_0} \right)^\alpha$$

Soit NE le trafic équivalent en nombre d'essieu standard

$$NE = T_{PL} \times CAM$$

$$\text{Or } T_{PL} = 365 \times T_{j_{PL}} \times \left[\frac{(1+i)^n - 1}{i} \right] \text{ donc } NE = 365 \times T_{j_{PL}} \times CAM \times \left[\frac{(1+i)^n - 1}{i} \right]$$

$$\text{i.e. } NE = 365 \times \sum_i \sum_{j=1}^3 K_j n_{ij} \left(\frac{P_i}{P_0} \right)^\alpha \times \left[\frac{(1+i)^n - 1}{i} \right]$$

Application :

On envisage la construction d'une route dont les caractéristiques sont les suivantes :

Distance = 100 Km

Vitesse de référence : 80 Km/h

Trafic : 350 Véh/j

Taux : 10%

Durée de service 15 ans

Chaussée souple

30 camions de 42 tonnes (type 1.2.2), (6, 18, 18) tonnes

50 camions à essieux simple de 12 tonnes (5, 7)

10 cars de transports voyageurs 15 tonnes (6, 9)

200 taxis brousses de 3 tonnes (1, 2)

50 voitures break type 504 (0,8 ; 1,2) et

10 voitures particulières 1 tonnes (0,5 ; 0,5)

1) Estimer le trafic poids lourds.

2) Déterminer le trafic équivalent essieux standards (13 tonnes et 8,2 tonnes).

Résumé

- Trafic journalier : T_j dans les deux sens.
- Trafic annuel : $T = 365.T_j \cdot \frac{(1+i)^n - 1}{i}$
- **Le trafic poids lourds** est donné par la formule :
- $T_{pl} = 365.T_{j_{pl}} \cdot \frac{(1+i)^n - 1}{i}$ $T_{PL} = X\% \cdot T$
- Trafic équivalent d'Essieux Standards sur la DS : $NE = 365.T_j \cdot A \cdot \frac{(1+i)^n - 1}{i}$

Coefficient d'agressivité : $A = \left(\frac{P}{P_a} \right)^\alpha$ avec $\alpha = 4$ pour des chaussées souples.

$\alpha = 8$ chaussées semi-rigides

$\alpha = 12$ chaussées rigides.

1-3-2 Matériaux de chaussées

Il y a trois grades familles de matériaux de chaussées :

- ☞ Les matériaux naturels
- ☞ Les matériaux traités au liant hydraulique;
- ☞ Les matériaux traités au liant hydrocarbonés;

a) Matériaux naturels

Ils sont composés de sols fins et de matériaux granulaires. La caractéristique mécanique principale de ces matériaux est qu'ils fluent (tassent) sous chargement. Il y a trois types de matériaux naturels :

- ☞ Les graveleux latéritiques naturels ;
- ☞ Les sables argileux ;
- ☞ Concassée d/D.

b) Matériaux traités au liant hydraulique

Différents liants hydrauliques :

- ☞ Ciment
- ☞ Chaux
- ☞ Cendres volantes
- ☞ Laitiers

Types de matériaux traités aux liants hydrauliques :

- ☞ Graveleux latéritique ciment (glc) ;
- ☞ Sol ciment (sc) ;
- ☞ Grave ciment (Gc).

c) Les matériaux traitées au liant hydrocarboné

Différents liant hydrocarbonés :

- ☞ Bitume
- ☞ Goudron produit à partir de la houille.

Différents types de matériau traités au liant hydrocarbonés :

Soit D la taille du plus gros grain.

- ☞ Grave bitume : $D > 20$ mm ;
- ☞ Béton bitumineux pour les couches de surface : enrobés denses $6,3 \text{ mm} < D < 20$ mm ;
- ☞ Sand Asphalt : $D < 6,3$ mm.

1-3-3. Sol de plate forme

On prend le CBR (c'est la valeur qui permet de caractériser le sol de plate forme) in situ sur les 30 derniers cm compactés. Il s'agit :

- du terrassement en déblai ;
- de la partie supérieure du remblai ;
- du terrain naturel;
- de la couche de forme.

1-3-4 Climat

Les variations saisonnières ont une influence sur les propriétés mécaniques des matériaux constitutifs de la chaussée.

Exemples :

- la variation de la teneur en eau influe sur la portance du sol de plate forme ;
- la température élevée crée des problèmes de déformation des enrobés et de fissuration des couches traitées au liant hydraulique.

CHAPITRE 2 : METHODES DE DIMENSIONNEMENT DES CHAUSSEES

Il y a deux principales familles de méthodes pour dimensionner une chaussée :

- Les méthodes empiriques ;
- Les méthodes rationnelles.

2-1 METHODES EMPIRIQUES

L'approche empirique est basée sur l'observation sous trafic des chaussées réelles ou expérimentales et le suivi de leur évolution dans le temps.

2-1-1 Principe général

Trouver des relations, à partir des études statistiques sur les différentes observations, entre :

- la géométrie de la route ;
- la nature des matériaux ;
- le trafic;
- l'état global de la chaussée (dégradations).

A partir des relations trouvés sur la base des études statistiques, on établit des abaques qui vont servir de base de dimensionnement des chaussées.

2-1-2 Principales méthodes empiriques

Il y a deux grandes familles de méthodes empiriques :

- *Les méthodes qui à partir d'une formule ou d'un graphique* permettent de calculer, en fonction des matériaux (sol, matériaux de chaussée), du trafic, les épaisseurs des différentes couches.

Exemple:

- Méthode CBR
- Méthode Russe
- Méthodes dérivées des essais AASHO
- Méthodes SHELL

- *Les méthodes catalogues de structures* : ces méthodes mettent à la disposition du concepteur, des structures de chaussées précalculées et testées par l'expérience au niveau national.

Avantage : La méthode évite au concepteur des calculs numériques et diminue les risques d'erreurs.

Exemple :

- Le catalogue français des structures type de chaussées neuves mis en place en 1971, revu en 1977 et 1994 et 1998.
- Le manuel de dimensionnement des chaussées pour les pays tropicaux en voie de développement, établi par le CEBTP en 1971 puis révisé en 1980. Le titre du document est « *Guide pratique de dimensionnement des chaussées pour les pays tropicaux* ».

- « Le manuel pour la conception et le dimensionnement des chaussées neuves » ; c'est le catalogue de structures type fait par le LBTP en 1977.

2-1-3 Méthodes basés sur des formules et des abaques

2-1-3-1 Méthode CBR

Parmi toutes les méthodes empiriques, la méthode CBR est la plus connue et la plus utilisée. Cette méthode est basée sur deux concepts :

- La résistance au poinçonnement du sol de plate forme caractérisée par le CBR;
- La méthode de Boussinesq qui donne la répartition de contrainte verticale dans le sol.

Méthode de Boussinesq

Hypothèses

- ▶ Le massif est homogène
- ▶ Le sol est élastique et de dimension infinie.

D'après Boussinesq : si on applique une force p répartie uniformément sur un disque de rayon R , à la profondeur Z , on a :

$$\sigma_z = p \left[1 - \frac{1}{\left[1 + \left(\frac{R}{z} \right)^2 \right]^{\frac{3}{2}}} \right]$$

L'expression de l'incrément vertical $\Delta\sigma(z)$ a été donnée par Harr et Lovell (1963) et par Szechy (1963) :

$$\Delta\sigma_v(z) = I_z \Delta\sigma$$

avec

$$I_z = 1 - \left[1 + \left(\frac{r}{z} \right)^2 \right]^{-\frac{3}{2}}$$

La variation de $\Delta\sigma(z)$ en fonction de z est représentée ci-dessous.

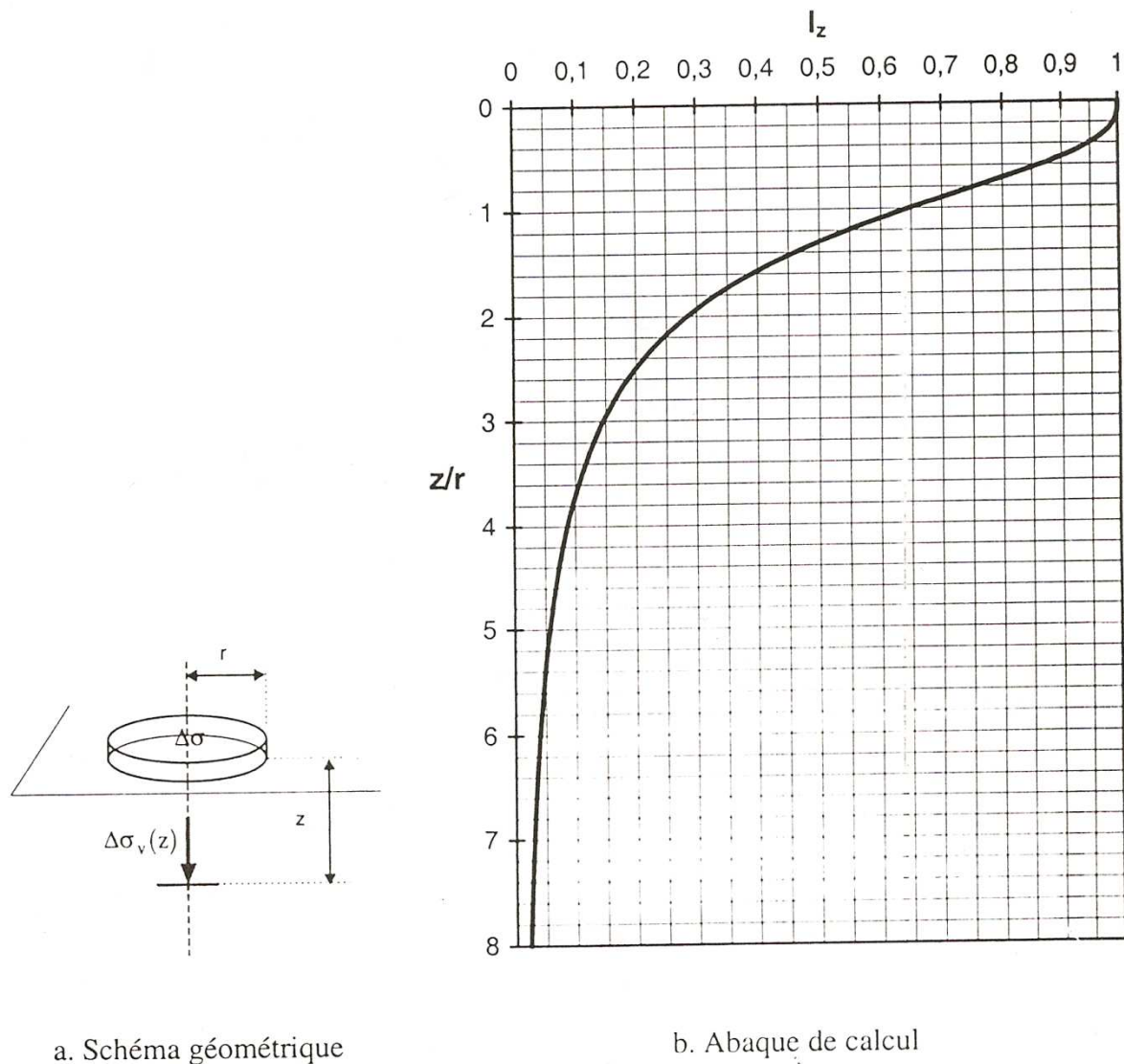


Figure 4.41 Abaque de calcul de l'incrément de contrainte verticale sous l'axe d'une charge circulaire uniforme

C'est-à-dire à la profondeur e (épaisseur de la chaussée), σ_e doit être inférieur à la résistance au poinçonnement du sol. On pose alors :

□ $\sigma_e = K \cdot I$ où I est la résistance au poinçonnement ;

K est le coefficient de sécurité pour tenir compte du caractère empirique de l'essai.

$$\text{Soit } KI = p \left[1 - \frac{1}{\left[1 + \left(\frac{R}{z} \right)^2 \right]^{\frac{3}{2}}} \right]$$

$$D'où e = \frac{R}{\sqrt[2/3]{\left(\frac{1}{1 - \frac{KI}{p}}\right)} - 1}$$

Les abaques CBR :

$$e = \frac{100 + 150\sqrt{P}}{I + 5} \quad \text{Formule ne prenant pas en compte le trafic.}$$

Où P : charge par roue ;

I : indice CBR ;

e: épaisseur de la chaussée (cm).

RRL (Road Research Laboratory) a produit des abaques permettant de tenir compte du trafic.

Loi de Peltier

$$e = \frac{1 + \sqrt{P}(75 + 50 \log\left(\frac{N}{10}\right))}{I + 5}$$

où P : charge d'une roue en tonne.

N : Nombre moyen journalier de véhicules de plus de 1,5 tonnes à vides

I : Indice CBR

e: épaisseur

On part du CBR du sol de plateforme, on détermine l'épaisseur globale de la chaussée e.

A partir du CBR du matériau de la couche de fondation, on détermine l'épaisseur e_1 de la chaussée au dessus de la fondation.

Epaisseur de la fondation : $e_f = e - e_1$

De proche en proche, on détermine les différentes épaisseurs.

2-1-3-2 La méthode Russe

La méthode Russe est aussi basée sur la méthode CBR. Elle s'inspire de la formule de Boussinesq. Comme hypothèse, elle suppose que le sol est élastique. Elle a été élaborée par le professeur Ivanov :

$$\sigma_z = \frac{P}{1 + a\left(\frac{z}{D}\right)^2}$$

où D : diamètre du cercle d'empreinte de la roue

P : Pression du pneu

a : coefficient correctif :

a=2,5 pour les chaussées monocouches

a=2 pour les chaussées bicouches

a=1 pour les chaussées tricouches.

Ici le critère de bon comportement de la chaussée est la déformation de la surface.

La déflexion F en surface pour un camion type doit être inférieure à des valeurs critiques obtenues par l'expérience en fonction de la pression P et du diamètre D . Dans la pratique, on considère F/D égale à 0,003 ou 0,006.

2-1-3-3 Méthodes AASHO

a- Essais AASHO

Ce sont des essais réalisés en vraie grandeur aux USA de 1958 à 1960 afin de connaître le comportement des chaussées. Différents facteurs ont été définis :

- ☞ L'état de la chaussée et l'évolution de son comportement dans le temps ;
- ☞ Les équivalences entre les différentes couches de matériaux ;
- ☞ Les équivalences entre les différents types de charges par essieu ;
- ☞ L'influence de ces charges et leur répercussions sur le comportement de la chaussée ;
- ☞ Les relations entre les déflexions en surface et les durées de vie des chaussées.

Après l'analyse des résultats de ces essais, 3 nouvelles notions ont été introduites :

Indice de viabilité (PSI : Present Service Ceability Index) : C'est un indice qui définit l'état de service de la chaussée du point de vue du confort et de la sécurité.

Après analyse, ils ont proposé :

$$\text{☞ Chaussée souples : } PSI = 5,03 - 1,9 \log(1 + \overline{SV}) - 0,01 \sqrt{C + P} - 1,38 \overline{RD}^2$$

Où PSI : Compris entre 0 et 5 ;

SV : variation moyenne de la pente longitudinale (slope variante)

C : pourcentage de surface fissuré (cracking)

P : pourcentage de surface réparée (Patching)

RD : profondeur des frayées (Ruth Depth).

Pour les essais AASHO, au départ $PSI=4,2$.

Lorsque $PSI < 1,5$ alors la route est hors d'usage.

$$\text{☞ Chaussée rigides: } PSI = 5,41 - 1,80 \log(1 + \overline{SV}) - 0,01 \sqrt{C + P} - 0,09 \overline{RD}^2$$

Indice d'épaisseur ou épaisseur équivalente : C'est un indice qui permet de relier le comportement de la chaussée à la nature de sa structure sous trafic.

Soit D : épaisseur totale et D_i : épaisseur des différentes couches.

On a : $D = a_1 D_1 + a_2 D_2 + a_3 D_3$

$$D = \sum_i a_i D_i \quad \text{où } a_i : \text{coefficients d'équivalence.}$$

Trafic équivalent: le trafic intervient par:

- ☞ Sa grandeur ;
- ☞ Le nombre de charges

Les essais ont permis d'apprécier les influences de ces deux paramètres du trafic.

b- Méthodes dérivées des essais AASHO

Dans toutes ces méthodes, intervient l'indice de structure $D = \sum_i a_i D_i$.

Ce sont :

- La méthode de Shook et Finn ;
- Méthode de Liddle ;
- Méthode de Shell institute.

1) Méthode de Shook et de Finn

Coefficient d'équivalence de trafic : $P_0=8,2$; $F=10^{0,250(P-8,2)}$
 $P_0=13$; $F=10^{0,250(P-13)}$

Indice de structure : $T=2D_1+D_2+0,75D_3$

Où T épaisseur équivalente

D1, D2, D3 : respectivement les épaisseurs des couches de roulement, base et fondation.

Epaisseur équivalente : $T = [-8,50 + 5,53 \log W] \left(\frac{2,5}{CBR} \right)^{0,4}$

Où T : épaisseur équivalente en pouce.

W : nombre équivalent d'essieu standard

CBR : indice de portance du sol support.

2) Méthode de Liddle

Coefficient d'équivalence : $F = \left(\frac{P}{P_0} \right)^4$ $P_0 = 8,2T$: $F = \left(\frac{P}{8,2} \right)^4$

$P_0 = 13T$: $F = \left(\frac{P}{13} \right)^4$

Epaisseur équivalente $D=0,44D_1+0,14D_2+0,11D_3$

Ici :

- L'épaisseur équivalente ne dépend pas du CBR mais d'un indice de portance S.
- Le trafic pris en compte est le trafic équivalent pondéré par un facteur régional R.

Le facteur R dépend :

- Etat des sols au cours des saisons
- Gel et degel
- Niveau de la nappe phréatique

R est compris entre 0,5 et 3.

$W_0 = RW$ où W : Trafic réel

W_0 : Trafic pondéré.

2-1-3-4 Méthode de l'asphalt institute

Elle utilise une échelle d'équivalence du trafic analogue à celle de Liddle et donne en fonction du trafic et du sol de plateforme l'épaisseur de la chaussée constituée uniquement de mélanges bitumineux.

2-1-4 Les méthodes basées sur les catalogues de structures

2-1-4-1 La méthode CEBTP

(établie en 1971, améliorée en 1980)

Elle est basée sur deux paramètres principaux :

- La résistance du sol de plate-forme ;
- Le trafic journalier.

Dans cette méthode, on a déterminé cinq classes de sol:

Classe	Ancienne classification	Nouvelle classification 1980
S1	$5 < \text{CBR} < 10$	$0 < \text{CBR} < 5$
S2	$10 < \text{CBR} < 15$	$5 < \text{CBR} < 10$
S3	$15 < \text{CBR} < 30$	$10 < \text{CBR} < 15$
S4	$30 < \text{CBR} < 80$	$15 < \text{CBR} < 30$
S5	$\text{CBR} > 10$	$\text{CBR} > 30$

Le trafic journalier est reparti en quatre classes :

- $100 \text{ UVP/j} < T_j < 300 \text{ UVP/j}$
- $300 \text{ UVP/j} < T_j < 1000 \text{ UVP/j}$
- $1000 \text{ UVP/j} < T_j < 3000 \text{ UVP/j}$
- $3000 \text{ UVP/j} < T_j < 6000 \text{ UVP/j}$

Démarche à suivre pour le dimensionnement :

- 1) Choix de la classe du sol de plate forme
- 2) Choix de la classe du trafic
- 3) A partir d'un tableau à double entrée trafic-sol, on détermine les épaisseurs des couches de chaussées.

2-1-4-2 La méthode LBTP

La méthode est caractérisée par :

La résistance du sol de plate-forme (le CBR) ;

Le trafic cumulé pendant la durée de service ou le trafic journalier :

- Trafic poids lourds
- Trafic équivalent d'essieux standards de 8,16 T.

Dans cette méthode, on a 5 classes de sols :

S1: $0 < \text{CBR} < 5$

S2: $5 < \text{CBR} < 10$

S3: $10 < \text{CBR} < 15$

S4: $15 < \text{CBR} < 30$

S5: $\text{CBR} > 30$

On a 5 classes de trafic :

Classe du Trafic	Trafic journalier	Trafic cumulé poids lourds
T1	$100 < T_j < 300$	$10^5 < T < 5.10^5$
T2	$300 < T_j < 1000$	$5.10^5 < T < 1,5.10^6$
T3	$1000 < T_j < 3000$	$1,5.10^6 < T < 4.10^6$
T4	$3000 < T_j < 6000$	$4.10^6 < T < 10.10^6$
T5	$6000 < T_j < 12000$	$10^7 < T < 2.10^7$

Démarche à suivre pour le dimensionnement :

1. Choix de la classe du sol de plate forme
2. Choix de la classe du trafic
3. Choix de la région de tracé de la route
4. Choix des structures: choisir les fiches de structures les plus adaptés à partir des matériaux (région), de la classe du trafic, de la classe du sol.

Application :

On projette de construire une route dans le centre du pays. La longueur de cette voie est de 150 Km. La vitesse de référence est de 90 Km/h.

➔ Trafic:

- 40 ensembles articulés de 44 T de type (1.2.2) : (6, 19, 19)
- 70 camions à essieux simple de 12 tonnes (5, 7)
- 10 cars de transports voyageurs à essieux simple de 15 tonnes (6, 9)
- 20 minicars à essieux simple de 7 tonnes (3,4)
- 150 taxis brousses à essieux simple de 3 tonnes (1, 2)
- 80 véhicules particuliers à essieux simple de 1 tonnes (0,5 ; 0,5)

Le taux d'évolution du trafic est estimé à 10% sur 15 ans.

Compte tenu du trafic, on souhaite que le type de structure de chaussée soit souple.

La reconnaissance géotechnique donne les résultats suivants:

Sol de plate forme : argile latéritique $W_{nat} = 24\%$ $\gamma_{d \text{ insitu}} = 1,62$

Essai en laboratoire : Proctor $\gamma_d \text{ opm} = 1,8$ pour $W_{opm} = 18\%$

$\gamma_{d95\% \text{ opm}} = 1,71$ pour $W_{95} = 16$ à 22%

$\gamma_{d90\% \text{ opm}} = 1,62$ pour $W_{90} = 14$ à 24%

CBR à 4 jours d'imbibition $CBR_{90\% \text{ opm}} = 4$
 $CBR_{95\% \text{ opm}} = 7$

1) Déterminer les trafics journaliers PL et équivalent selon les méthodes de Shook et Finn, et Liddle.

1) Donner l'épaisseur totale de la chaussée (Shook et Finn, CBR, LBTP).

2) Donner l'épaisseur et la nature des matériaux de chaque couche.

2-2 METHODES RATIONNELLES

2-2-1 Principe général

Dans les méthodes rationnelles, on cherche une loi mathématique qui peut reproduire le comportement des matériaux de chaussées (modélisation).

Pour pouvoir utiliser cette méthode, il est nécessaire de disposer de trois éléments :

- un modèle mathématique ;
- des moyens pour mesurer les caractéristiques de déformabilité des matériaux ;
- des moyens pour mesurer les caractéristiques limites, c'est-à-dire les contraintes et les déformations que les matériaux peuvent supporter.

2-2-2 Démarche générale du dimensionnement rationnel des chaussées

En utilisation courante, la démarche du dimensionnement rationnel s'articule selon les trois phases principales suivantes :

2-2-2-1 Le choix du type de structure et des matériaux qui la compose

Ce choix est fonction du cadre et des spécificités du projet étudié. La structure de chaussée peut être flexible, bitumineuse épaisse, semi-rigide, rigide, mixte ou inverse. A chaque type de structure est associé l'emploi possible de matériaux répartie eux même en cinq familles: les matériaux hydrocarbonés, les matériaux traités aux liants hydrauliques, les bétons, les matériaux non traités et les sols.

2-2-2-2 La détermination des sollicitations admissibles des différentes couches de matériaux

Le calcul des sollicitations admissibles dans les différents matériaux constituant la structure de chaussée découle des deux modèles d'endommagement sur lesquelles est fondée la méthode rationnelle :

2.2.2.2.1- pour les matériaux traités (hydrocarbonés, traités aux liants hydraulique 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 :

$$Stadm = A \times P \times N^b$$

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

P = coefficient additionnelle pour la prise en compte de différents facteurs, non reproduits par les résultats bruts des essais de fatigues en laboratoire.

N = nombre de passages des charges roulantes (ie. Trafic cumulé) sur toute la durée de service assignée à la chaussée.

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

$$S_{adm} = A \times N^b$$

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

N = nombre de passages des charges roulantes (ie. Trafic cumulé) sur toute la durée de service assignée à la chaussée.

2-2-2-3 La détermination des épaisseurs des différentes couches de matériaux

Les sollicitations créées par les charges roulantes dans les différentes de matériaux sont calculés à l'aide de modèle multicouches élastique limite de Burmister (cf § 3.1). S_{maxj} désigne la sollicitation la plus élevée, au sens des critères d'endommagement définis plus haut, supportée par la couche de matériaux n°j.

La détermination de l'épaisseur de chaque couche de matériau repose sur la vérification du critère de non rupture du matériau considéré pendant la durée de service de la chaussée, à savoir :

$$S_{maxj} \leq S_{admj}$$

S_{maxj} : sollicitation maximale créée par le trafic dans la couche de matériau n°j, au sens du mode d'endommagement attaché au type de matériau considéré (traction horizontale par flexion ou compression verticale, cf § 2.2) ;

S_{admj} : sollicitation admissible dans le matériau (cf § 2.2).

La détermination finale des épaisseurs H_j des différentes couches de matériaux constituant la structure de chaussée n'a pas, en général, de solution directe (absence de solution explicite $\{H_j = f(N)\}$). Elle s'effectue le plus souvent suivant une démarche itérative inverse schématisée ci-dessous.

La solution numérique au problème posé n'est pas par ailleurs, unique. Le choix final fait aussi appel à des considérations technologiques (par exemple, épaisseur minimales et maximales des couches suivant le matériau, suivant la classe du trafic, etc.), et empiriques (par exemple, épaisseur des couches de surface).

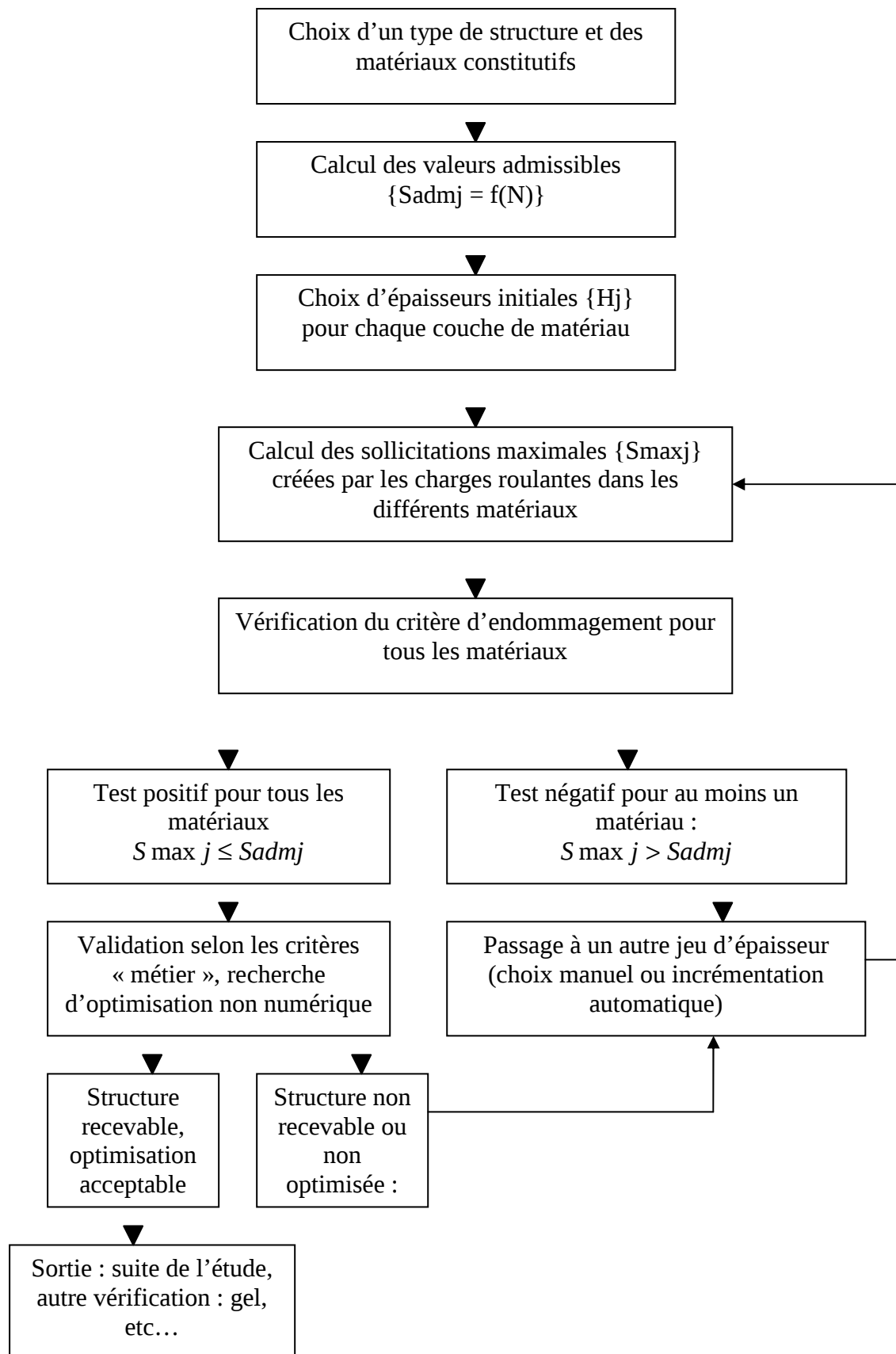


Figure 1 : Démarche générale du dimensionnement mécanique

Démarche générale du dimensionnement mécanique

Quelque soient les techniques de chaussée, la démarche de dimensionnement et l'articulation des différentes étapes reste sensiblement les mêmes.

1^{re} étape : une fois réunis les données nécessaires au calcul, on procède :

- à un premier choix de couche de roulement ;
- à un prédimensionnement de structure par référence à des situations comparables.

2^e étape : *Modélisation et calcul de la structure* : On calcul les contraintes et déformations dans la structure de chaussée ainsi prédimensionnée, sous l'essieu de référence de 130 KN (13 T).

3^e étape : *Vérification en fatigue de la structure et de la déformation du support*, en comparant les contraintes et déformations calculés à l'étape 2 à des valeurs admissibles déterminés en fonction :

- du trafic cumulé sur la période de calcul considérée ;
- du risque de ruine admis sur cette période ;
- des caractéristiques de résistance en fatigue des matériaux ;
- des effets thermiques ;
- des données d'observation du comportement des chaussées similaires.

4^e étape : Ajustement des épaisseurs calculées. Les épaisseurs de couches déterminé à l'étape 3 sont ajustée pour :

- tenir compte des contraintes technologiques d'épaisseur minimales et maximales pour atteindre les objectifs de compacité et d'uni ;
- réduire les risques de défaut de liaison entre aux interfaces en limitant le nombre;
- assurer une protection suffisante des assises traitées vis-à-vis des phénomènes non appréhendé par le calcul (remontés de fissures).

5^e étape : Définition de la coupe transversale de la chaussée

Modélisation

Le modèle mis en œuvre par les logiciels de calcul (Alizé, Ecoroute,...) est le modèle de Burmister. Ce modèle s'appuie sur la modélisation mécanique de la structure par un massif semi-infini, constitué d'une superposition de couche de matériau d'épaisseur constant, à comportement élastique linéaire isotrope. Les paramètres descriptifs du comportement mécanique de chaque matériau sont donc au nombre de deux : le module de déformation E et le coefficient de poisson ν .

Chaque interface entre les couches adjacentes peut être prise collée, ou glissante, ou semi-collée.

Le chargement appliqué par les charges roulantes à la surface de la chaussée est représenté par un ensemble de disque circulaire, chargé chacun par une pression verticale uniforme et statique.

Toutes les combinaisons de charges élémentaires circulaires de ce type sont possibles. Ceci permet de reproduire les silhouettes d'essieux, de bogie, de véhicule ou d'ensemble de véhicule les plus diverses.

Dans les opérations de dimensionnement courant, un chargement unique désigné chargement de référence est propre au cadre dans lequel la méthode de dimensionnement rationnel est appliquée.

Par exemple, le jumelage de 65 kN (3,25 kN par roue, pression de contact 0,662 MPa) constitue sauf cas particulier, la charge de référence pour le dimensionnement des structures de chaussée des réseaux routiers et autoroutiers français. Dans certaines applications de dimensionnement de chaussées aéronautiques, la charge isolée sera la roue isolée de 30 kN, etc.

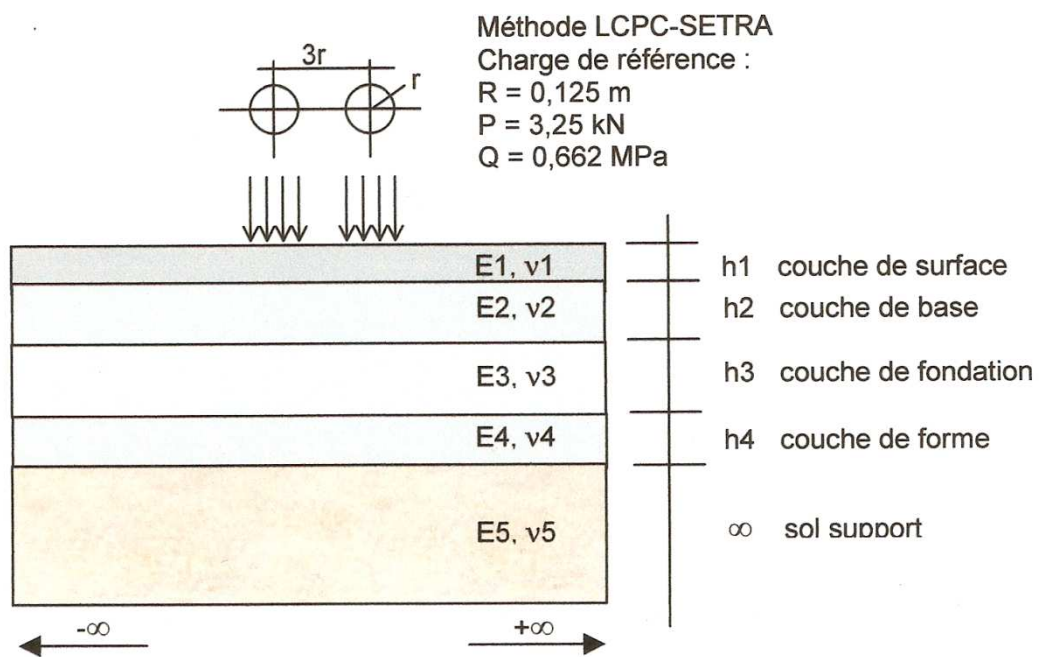
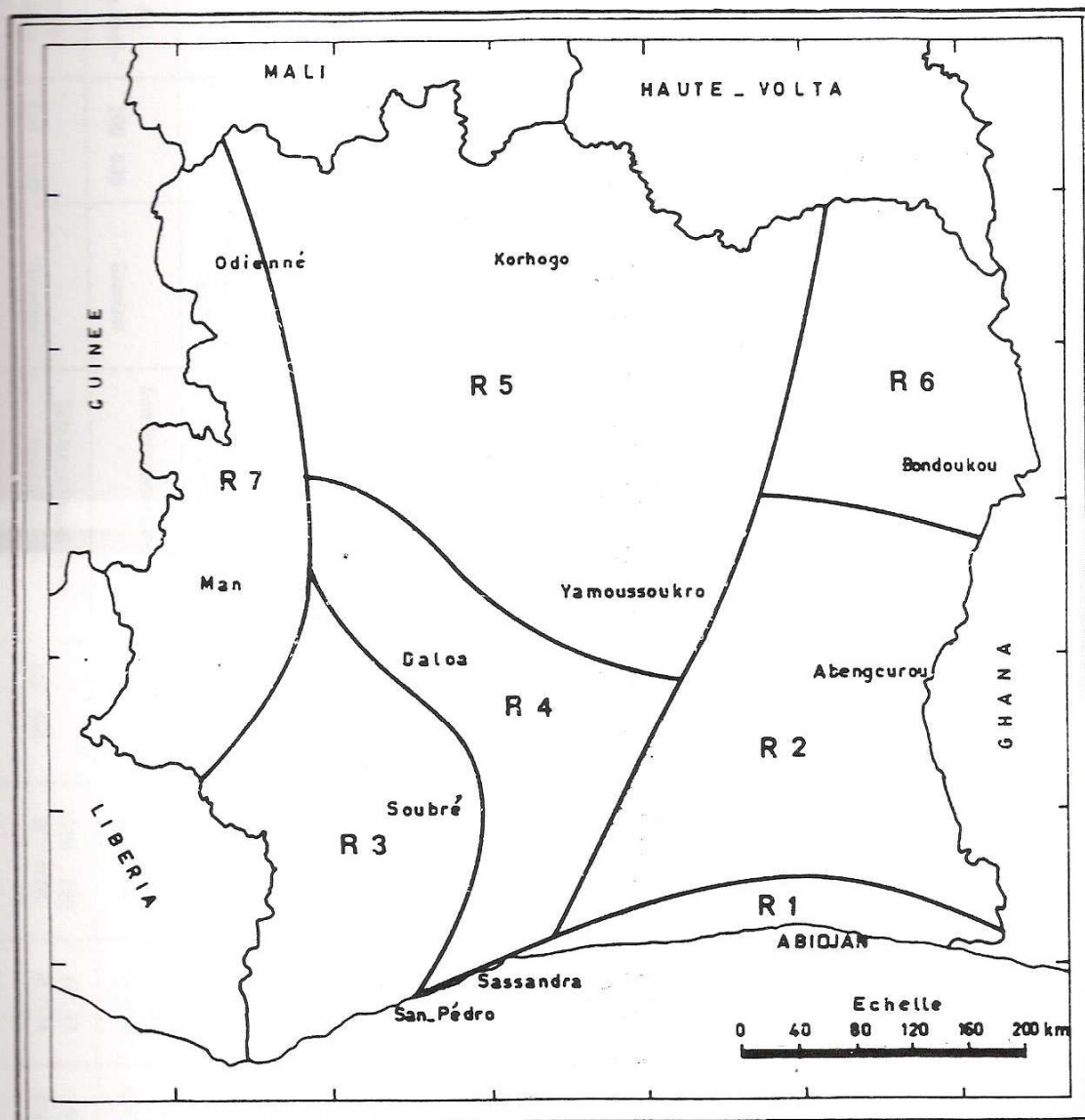


Figure 2 : Moteur de calcul Alizé – problème traité, par exemple

Le modèle de calcul donne accès, potentiellement, aux tenseurs complets de contraintes et de déformations, ainsi qu'au trois composante de déplacement, en tout point de la structure. En utilisation courante, les résultats du modèle strictement nécessaires au dimensionnement se réduisent à la sollicitation maximale, S_{maxj} supporté par chaque couche de matériau d'indice j ($j = 1$ pour la couche de surface à $j = n_c$ pour le sol support). Suivant la nature du matériau concerné, S_{maxj} représente la valeur suivante :

Nature de matériau n°j	Définition de S_{maxj}
Matériau hydrocarboné	Valeur de déformation d'extension horizontale maximale ϵ_{tmaxj}
Matériau traité au liant hydraulique et béton	Valeur de contrainte de traction horizontale maximale σ_{tmaxj}
Matériau non traité et sol	Valeur de la déformation de compression verticale maximale ϵ_{zmaxj}

CARTE DES REGIONS



LABORATOIRE DU BATIMENT ET DES TRAVAUX PUBLICS
DE COTE D'IVOIRE

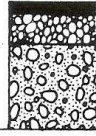
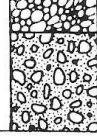
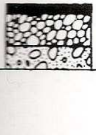
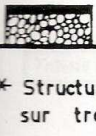
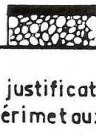
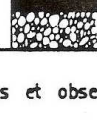
STRUCTURES TYPES DE CHAUSSEE

Fiche n°2

CHAUSSEE NEUVE

BASE : graveleux - ciment gC

FONDATION : graveleux naturels gn

	T1	T2	T3	T4 *	T5
S1	 3cm(r) 15cm gC 40cm gn	 4cm(r) 15cm gC 45cm gn	 5cm(r) 20cm gC 45cm gn	 7cm(r) 20cm gC 50cm gn	Voir fiches N° 4_5
S2	 3cm(r) 15cm gC 20cm gn	 4cm(r) 15cm gC 25cm gn	 5cm(r) 20cm gC 25cm gn	 7cm(r) 20cm gC 30cm gn	
S3	 3cm(r) 15cm gC 15cm gn	 4cm(r) 15cm gC 20cm gn	 5cm(r) 20cm gC 20cm gn	 7cm(r) 20cm gC 25cm gn	
S4	 3cm(r) 15cm gC 10cm gn	 4cm(r) 15cm gC 15cm gn	 5cm(r) 20cm gC 15cm gn	 7cm(r) 20cm gC 20cm gn	
S5	 3cm(r) 15cm gC	 4cm(r) 15cm gC	 5cm(r) 20cm gC	 7cm(r) 20cm gC	

* Structure dont la justification technique mérite des études et observations particulières sur tronçons expérimentaux.

TABLEAU I
DEFINITION DES REGIONS
I, a Caractéristiques Climatiques

REGION	APPELATION RETENUE	ALTITUDE (mètres)	ROCHE MERE PREPONDE- RANTE	PEDOLOGIE PREPONDERANTE	DEFICIT HYDRIQUE CUMULE mm/an	PLUVIOME- TRIE mm/an	TEMPERA- TURE °C	DUREE SAISON SECHE (mois)	VEGETATION	TYPE DE CLIMAT
R ₁	Région du littoral littoral	0 - 50	Sables Tertiaires	Sables plus ou moins argileux	≤ 250	1500 - 2500 M = 2000	21 - 31 M = 26	4 - 5 déc - Avr.	Forêt dense humide ombrophile	Equatorial
R ₂	Région fores- tière des plaines du Sud -Est	0 - 50 50 - 200	Schistes	Sols ferralli- tiques fortement désaturés	200 - 500	1200 - 2000 M = 1400	20 - 30 M = 27	4 - 5 nov. - mars	Forêt dense humide mésophile	Equatorial
R ₃	Région forestière des plaines du Sud -Ouest	100 - 300	Granites (avec passages schis- teux)	Sols ferrallitiques forte- ment désaturés	200 - 400	1600 - 2500 M = 1800	20 - 30 M = 27	3 - 5 déc - mars	Forêt dense humide ombrophile	Equatorial
R ₄	Région du Centre- Sud	200 - 300	Granites (avec passages schis- teux)	Sols ferrallitiques moyenne- ment désaturés	300 - 600	1200 - 1600 M = 1400	15 - 35 M = 27	5 - 7 nov - avr.	Forêt claire humide, savane guinéenne	Equatorial de transition
R ₅	Région du Centre Nord	300 - 400	Granites (avec passages schis- teux)	Sol ferrallitiques faibles- ment désaturés ou sols ferrugineux	600 - 900	1200 - 1500 M = 1300	15 - 35 M = 26	7 - 8 nov - mai	Savane boisée ou arbustive	Tropical ou soudanais
R ₆	Région des plateaux du Nord- Est	200 - 400	Granites	Sols ferrugineux tropicaux	600 - 900	1000 - 1300 M = 1100	16 - 34 M = 26	7 - 8 oct - mai	Savane boisée ou arbustive	Tropical ou soudanais
R ₇	Région monta- gneuse du Nord- Ouest	400 - 1700	Granites	Sols ferrallitiques forte- ment désaturés	400 - 900	1300 - 1800 M = 1600	12 - 37 M = 24	5 - 7 nov - avr	Forêt claire (sud) savane boisée (nord)	Régime de montagne

TABLEAU 1 (suite)
DEFINITION DES REGIONS
I-b Caractéristiques «routières»

REGION	OBSERVATIONS LIEES AUX PROBLEMES ROUTIERS
<i>R₁</i>	Région pourvue essentiellement en sables, pauvre en graveleux et en roches massives. Nappe phréatique peu profonde. Imbibition certaine des sols en saison pluvieuse. Trafic lourd de la grande agglomération ou voirie urbaine à trafic léger. Pour la constitution des chaussées à trafic faible ou modéré, on s'orientera vers l'utilisation de sables non traités (en fondation) et traités au ciment ou au bitume (en couche de base). Pour routes à trafic fort, les fondations en sable traité peuvent être avantageuses.
<i>R₂</i>	Région pourvue essentiellement en graveleux de quartz relativement plastiques (type G2 G3). Roches schisteuses de qualité médiocre, masquées par couverture forestière. Horizons profonds de sols meubles, schisteux, à teneur en eau naturelle élevée, érodables, sensibles au remaniement. Pour les structures de chaussées l'utilisation des graveleux naturels en fondation et des graveleux-ciment en couche de base (trafic faible ou modéré) constituera une solution classique-Région propice au sand-asphalt.
<i>R₃</i>	Région pourvue essentiellement en graveleux relativement plastiques (type G2 G3). Roches le plus souvent granitiques avec quelques passages schisteux, généralement masqués par couverture forestière. Horizons profonds de sols meubles (arènes ou schistes) à teneur en eau naturelle assez élevée. De même qu'en <i>R₂</i> , l'utilisation de graveleux naturels en fondation et de graveleux-ciment en base constituera pour les chaussées à trafic réduit ou modéré la solution courante. Mais, la roche granitique peut aussi être mise à profit pour la réalisation de couche de base en T.V. de concassage.
<i>R₄</i>	Région pourvue essentiellement en graveleux relativement plastiques au Sud (type G2 G3) et de meilleure qualité au Nord (type G1 G2). Socle granitique plus masqué au Sud qu'au Nord par couverture forestière. Phénomènes d'induration amorcés au Nord. Ecartes souvent importants de température au Nord. Fondation en graveleux naturels, base en graveleux-ciment (au Sud) ou en graveleux naturel (au Nord), telle pourra être la solution classique de chaussée pour les trafics faibles ou modérés. Toutefois, la présence de la roche au Nord peut permettre une variante en T. V. de concassage pour la base.
<i>R₅</i>	Région pourvue essentiellement en graveleux ferrugineux (type G1 G2) et en arènes sableuses. Roches granitiques avec passages schisteux peu masqués par végétation arbustive. Présence de carapaces ferrugineuses. Sols meubles peu profonds assez souvent érodables (sables). Ecartes importants de température. Pour les chaussées à trafic modéré la solution Tout-Graveleux-Naturel pourra être envisagée. Alternativement, la roche granitique pourra fournir du T.V. de concassage en base.
<i>R₆</i>	Région pourvue en graveleux ferrugineux (type G1 G2) et en arènes sableuses. Roches essentiellement granitiques avec passages schisteux à l'Ouest. Peu de couverture végétale. Socle peu profond, carapaces ferrugineuses, phénomènes d'induration. Sables souvent érodables. Ecartes importants de température. De même qu'en <i>R5</i> la chaussée Tout-Graveleux-Naturels pourra être la solution classique pour les routes à trafic modéré. Ne pas exclure la possibilité d'utiliser les sables ferrugineux.
<i>R₇</i>	Région de montagne pourvue en sites de roches massives (granitiques) mais aussi en graveleux peu plastiques (notamment au Nord). Drainage naturel bon, mais risques d'érosion des arènes sableuses. Ecartes importants de température. La présence de la roche peut rendre le T. V. de concassage fortement compétitif vis à vis du graveleux. Les choix de chaussée sont plus divers.