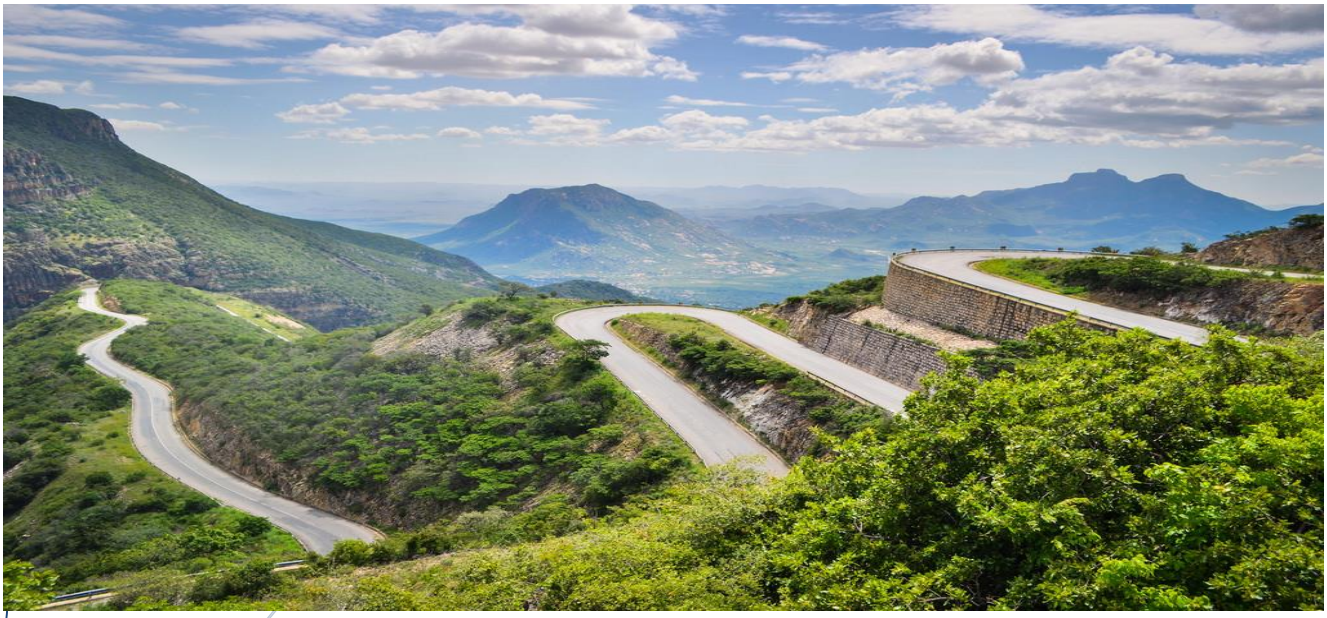
ROYAUME DU MAROC
MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE
ECOLE SUPÉRIEURE D'INGÉNIERIE APPLIQUÉE ET INNOVATION

24/02/2025

Cours de routes 1

M. Ahmed JEBBARI



« TOUTE INFRASTRUCTURE, quelle qu'elle soit est une marque de la civilisation, peut-être encore plus qu'un bâtiment : on ne démolit pas une route, on n'abolit pas un tracé et nous vivons encore avec ceux de l'Empire Romain. »

(Jean-Marie DUTHILLEUL)

ESIAI - OUJDA

Table des matières

INTRODUCTION : 4

GÉNÉRALITÉS SUR LES ROUTES 5

1. DEFINITION: 6
2. FONCTIONS DE LA ROUTE : 6
3. LE RESEAU ROUTIER AU MAROC : 6
4. LE RESEAU ROUTIER AU NIVEAU DE LA REGION DE L'ORIENTALE : 8
5. LES GESTIONNAIRES DU RESEAU ROUTIER AU MAROC : 10

TERMINOLOGIE ROUTIÈRE 11

1. CHAUSSEE : 12
2. ACCOTEMENTS : 13
3. TERRE-PLEIN CENTRAL : 13
4. FOSSES : 14
5. REMBLAIS – DEBLAIS -TERRASSEMENT : 15
6. TALUS : 15
7. PLATE-FORME : 16
8. ASSIETTE : 16
9. EMPRISE : 16
10. DEVERS : 17
11. OUVRAGES HYDRAULIQUES ROUTIERS : 17
12. OUVRAGES DE SOUTENEMENT ET DE PROTECTION : 18

GENERALITES SUR LES STRUCTURES DE CHAUSSEE 19

..... 19

1. ROLES DE LA STRUCTURE DES CHAUSSEES 20
2. LES DIFFERENTS TYPES DE STRUCTURES DE CHAUSSEES : 22
   - *2.1. Les chaussées souples : 22*
   - *2.2. Les chaussées semi-rigides : 23*
   - *2.3. Les chaussées rigides : 23*
3. MATERIAUX CONSTITUTIF DE LA STRUCTURE DE CHAUSSEE 24
   - *3.1. Graves non traitées (GNT) 24*
   - *3.2. Les mélanges traités aux liants hydrocarbonés 25*
   - *3.3. Les mélanges traités aux liants hydrauliques 25*

PARAMÈTRES PRINCIPAUX POUR UN PROJET ROUTIER 26

1. TOPOGRAPHIE : 27

2. HYDROLOGIE : 27
3. LE TRAFIC : 30
4. GEOTECHNIQUE ROUTIERE : 31
4.1. Définition : 31
4.2. Problèmes de la géotechnique routière : 31
5. LES ESSAIS D'IDENTIFICATION DES SOLS : 36
5.1. Essais permettant de déterminer les paramètres de nature des sols : 36
5.2. Les essais de détermination des paramètres de compactage : 37
5.3. Les essais de détermination des paramètres de comportement mécanique : 38
5.4. Classification des sols : 38
6. PARAMETRES RELATIFS AUX VEHICULES : 39
6.1. Vitesses : 39
6.2. Distances : 40
6.3. Conditions de visibilité : 45

CARACTERISTIQUES GEOMETRIQUES D'UN PROJET ROUTIER 47

1. INTRODUCTION : 48
2. TRACE EN PLAN : 48
2.1. Arcs de cercle : 49
2.2. Courbes de raccordement : 53
2.3. Raccordement et devers : 59
2.4. Règles de continuité : 64
3. PROFIL EN LONG : 66
3.1. Introduction : 66
3.2. Déclivités : 67
3.3. Voie supplémentaire pour véhicule lent : 67
3.4. Les raccordements en profil en long : 69
3.5. Coordination du Tracé en Plan et du Profil en Long : 72
4. PROFIL EN TRAVERS : 73
4.1. Définition et généralités : 73
4.2. Largeur des chaussées : 76
4.3. Accotements : 76
4.4. Pentes transversales : 77

CUBATURES ET MOUVEMENT DES TERRES 78

1. INTRODUCTION : 79
2. CALCUL DES SURFACE DES PROFILS EN TRAVERS : 79
3. CALCUL DES VOLUMES DE TERRASSEMENT : 80
3.1. Application dans les projets routiers : 80
3.2. Foisonnement et tassement : 81
4. MOUVEMENT DES TERRES : 82

4.1. Généralité : 82
4.2. Transport des terres :..... 83
4.3. Epure de Lalanne : 83
4.4. Etablissement de l'épure de Lalanne : 84
4.5. Ligne de répartition des transports :..... 85
4.6. Différents cas envisagés pour la position de la ligne LR :..... 86

INTRODUCTION :

Le réseau routier joue un rôle crucial dans le développement des activités économiques, l'installation et les mouvements des populations. De même, il est vital pour promouvoir les différents échanges aussi bien au sein de la région qu'avec les autres régions du pays.

Les routes représentent donc un moyen de communication indispensable, et un indice important qui reflète le niveau de développement des pays.

Ainsi, la route est un ouvrage critique qui nécessite beaucoup d'attention pendent ses études et son exécution, vu qu'il est très couteux, et qu'il doit assurer la sécurité des usagers.

L'ingénieur est alors obligé, dans un projet routier, de présenter des solutions à la fois rationnelles, sécuritaires et économiques.

De ce fait, nous allons entamer dans ce cours de « ROUTES 1» la partie « conception » d'un projet routier (la partie de dimensionnement sera entamée en 2eme année) ; en illustrant les différents facteurs, caractéristiques et conditions nécessaires pour la conception géométrique des routes.

CHAPITRE I

GÉNÉRALITÉS SUR LES ROUTES

1. Définition:

La route est une voie terrestre aménagée pour assurer la circulation des véhicules en toute saison.

C'est une structure multicouche dont le rôle est de permettre au sol de résister aux contraintes dues à la circulation des véhicules.

2. Fonctions de la route :

La taille et l'état du réseau routier d'un pays reflètent généralement le niveau de développement du pays, et c'est généralement à cause des fonctions pertinentes que joue la route. Ces fonctions de la route sont généralement :

- La fonction économique : elle concerne:
  - la fonction du transport des marchandises entre zones d'économies complémentaires.
  - L'existence d'un réseau routier de qualité est un facteur facilitant l'implantation d'activités économiques.
  - La fonction touristique de la route joue aussi un rôle primordial dans le développement économique.
  - Une autre fonction économique de la route est l'activité qu'elle génère pour sa construction et son entretien.
- La fonction de culture ; en liant différentes zones de cultures divers.
- La fonction de liaison humaine et sociale (désenclavement des populations rurales).

3. Le réseau routier au Maroc :

Le réseau routier marocain assure 90% des déplacement des personnes et 75% du transport des marchandises. Il joue un rôle primordial dans le développement économique, social et touristique du pays. Pour cela, le royaume a accordé une grande importance aux infrastructures routières.

Le réseau routier au Maroc est composé de deux parties :

- La voirie urbaine : située à l'intérieur des périmètres urbains. Elle comporte :
  - Autoroutes urbaines.

- Voie express ou Voie rapide.
- Boulevard.
- Avenue.
- Rue.
- Ruelle…

❖ Le réseau routier en rase compagne : situé en dehors des périmètres urbains, il est composé de :

- Autoroutes (A) ; d'une longueur de 1800 Km.
- Rocade (voie de contournement) : ce sont des routes qui contournent (cintrent) la limite urbaine d'une ville.
- Routes Nationales (RN) : ce sont des routes qui relient deux pôles économiques. Les routes nationales revêtues au Maroc sont d'une longueur de 10203 Km.
- Routes Régionales (RR) : ce sont des routes qui relient les routes nationales et lient entre les régions. Elles sont d'une longueur de 9370 Km.
- Routes Provinciales (RP) : ce sont des routes qui assurent les liaisons entre les communes. Elles sont d'une longueur de 23745 Km.
- Pistes Communales ; qui assurent la liaison à l'intérieur des communes.
- Pistes Forestières: ce sont des liaisons à l'intérieur des forêts.
- Polygone Bétravier dans les zones agricoles.
- Routes ou pistes privées…

Borne kilométrique
RN en rouge N°01 à 99

Borne kilométrique
RR en jaune du N°101 au N°999

Borne kilométrique
RP en Blue du N°1001 au N°9999

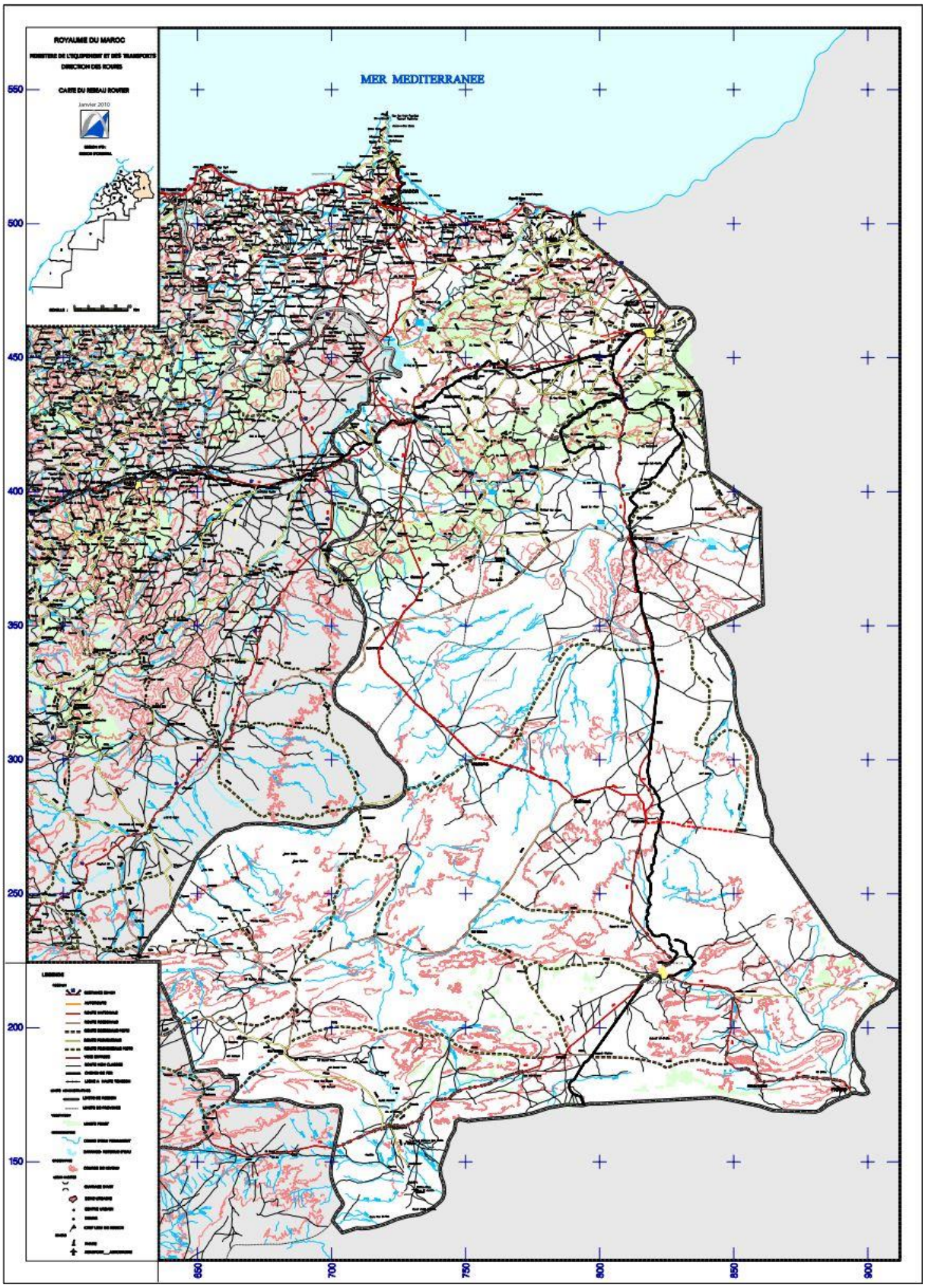
Exemple de borne kilométrique sur la RN 01 au PK 535 à 174 Kms de la ville de ESSAOUIRA.

PK : point kilométrique.

4. Le réseau routier au niveau de la région de l'orientale :

La région de l'Oriental dispose d'un réseau routier qui s'étend sur une longueur de 4.942 Km, soit 8,6% du total national. Les routes revêtues représentent 74,7% du total du réseau routier régional contre 69,8% au niveau national. Les routes provinciales représentent la moitié de l'ensemble du réseau régional (2543 Km), les routes régionales s'étendent à 913 Km, alors que la part des routes nationales se maintient à 30% (soit 1434 Km).

En plus, la région dispose d'une autoroute de 167 Km.



Carte du réseau routier de la région de l'oriental.

5. Les gestionnaires du réseau routier au Maroc :

Les gestionnaires des différents réseaux routiers au Maroc (Organismes responsables de la gestion des réseaux routiers) sont :

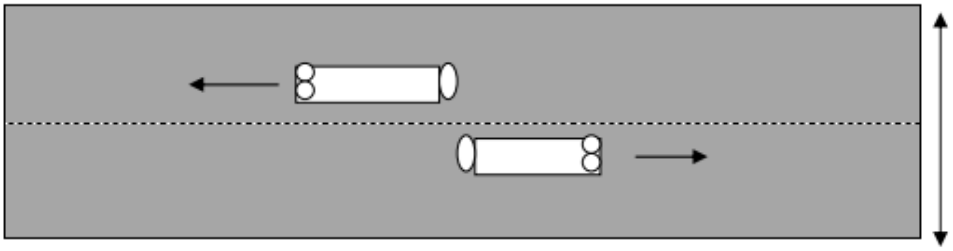
- Les collectivités Territoriales (Voirie urbaine et routes communales).
- Le Ministère de l'Equipement et du Transport (Réseau classé : RN, RR et RP).
- Les Autoroutes du Maroc (ADM) (les autoroutes à péage).
- Les Eaux et forêts (pistes forestières).
- Le Ministère de l'Agriculture (Polygone Bétravier).

CHAPITRE II

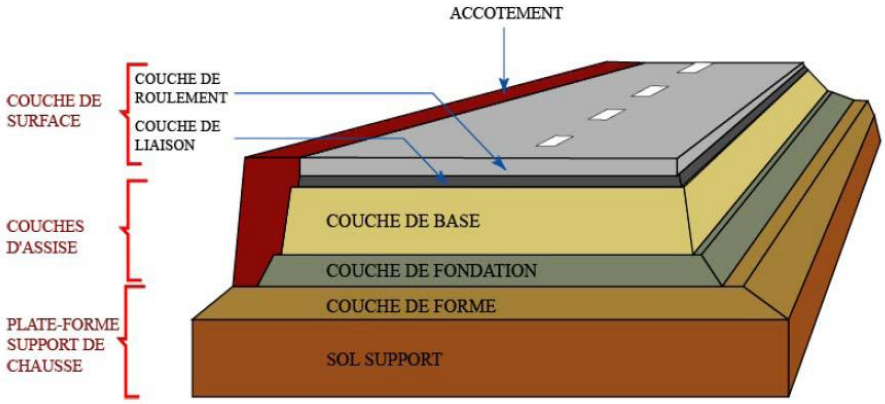
TERMINOLOGIE ROUTIÈRE

1. Chaussée :

Sur le plan horizontal ; la chaussée est la surface revêtue de la route sur laquelle circulent normalement les véhicules.



Et sur le plan vertical ; c'est une structure multicouche rapportée sur un terrain naturel pour permettre la circulation des véhicules. Elle est constituée de trois parties principales : la plate-forme support de la chaussée, les couches d'assise (couche de fondation et couche de base), et la couche de surface (couche de liaison et couche de roulement).



Coupe type d'une structure de chaussée.

Son rôle est de supporter les sollicitations du trafic dans les meilleures conditions de sécurité et de confort.

Pourquoi une structure de chaussée ?

Il est vrai qu'on circulait aisément sur des pistes bien nivelées quand les conditions climatiques étaient favorables,

Mais

En période de pluie, les sols mouillés devenaient glissants ou se transformaient en bourbiers.

Donc étaler des lits de pierres dont le mérite était d'être moins sensibles à l'eau : structure de chaussée (Corps de chaussée).

2. Accotements :

Ce sont deux bandes latérales qui encadrent la chaussée, ils peuvent être dérasés ou surélevés.

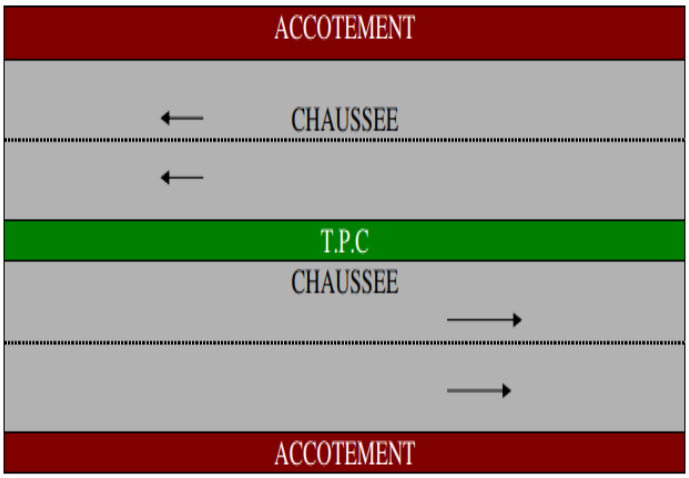
La largeur des accotements varie généralement entre 1à 3 m.

Les rôles des accotements sont :

- Supporter latéralement la structure de la chaussée.
- Assurer un refuge aux véhicules arrêtés ou en panne.
- Permettre la circulation des véhicules d'urgence.
- Protéger l'automobiliste lors d'un dépassement imprévu en lui permettant d'éviter une collision frontale.
- Les accotements larges suscitent chez les conducteurs une sensation de confort et de sécurité.

3. Terre-plein central :

Le terre-plein central (TPC) est la partie située au milieu d'une route bidirectionnelle permettant la séparation physique des deux sens de circulation, il sert à éviter les mouvements de traversée des véhicules.



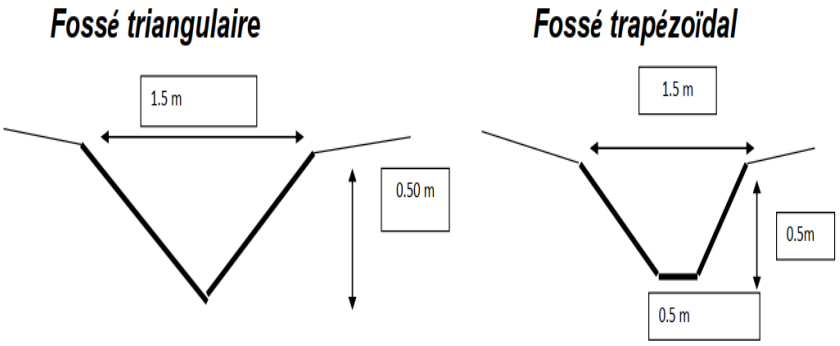
4. **Fossés :**

Ce sont les excavations latérales aménagées de part et d'autre de la plate-forme.

Ils peuvent être en terre ou bétonnés.

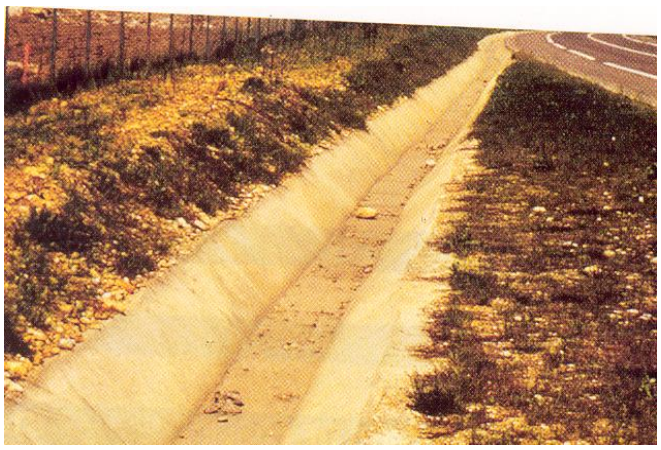
Ils assurent l'assainissement de la plate-forme en collectant les eaux de ruissellement.

On distingue entre deux types :



(Dimensions à titre indicatif).

Fossé naturel

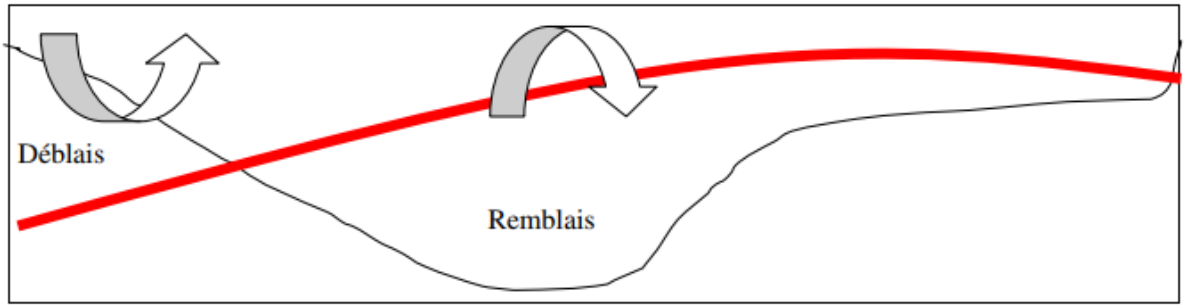


Fossé bétonné

5. Remblais – Déblais -Terrassement :

Quand la route est construite au-dessus du terrain naturel, on dit qu'elle est en remblais.

Quand elle est construite au-dessous du terrain naturel, on dit qu'elle est en déblais.



Déblaiement : c'est l'opération qui consiste à abaisser le niveau altimétrique du terrain par creusement (excavation)

Déblai : c'est le nom qui désigne les terres provenant de déblaiement (le sol retiré du terrain naturel par creusement)

Remblaiement : c'est l'opération opposée à la première, elle consiste à apporter des terres pour surélever le profil d'un terrain

Remblai : c'est le nom qui désigne les terres à apporter pour l'opération de remblaiement (C'est le volume du matériau apporté et mis en œuvre par couches et par compactage)

NB : l'ensemble des opérations de déblai et remblai s'appelle **terrassement**

6. Talus :

C'est la partie de la route comprise entre l'accotement et le fossé, ou au-delà du fossé (c'est la proie des déblais et remblai).

On distingue les talus de remblais et les talus de déblais.

La pente est définie en fonction de la stabilité des matériaux constituant le talus.

- Les talus de remblais sont généralement réglés à une pente de 3/2 (3 à la base et 2 en hauteur).
- Les talus de déblais sont généralement réglés à une pente de 1/1.

7. Plate-forme :

C’est la surface de la route qui comprend la chaussée, les accotements et éventuellement les terres pleines centrales (TPC).

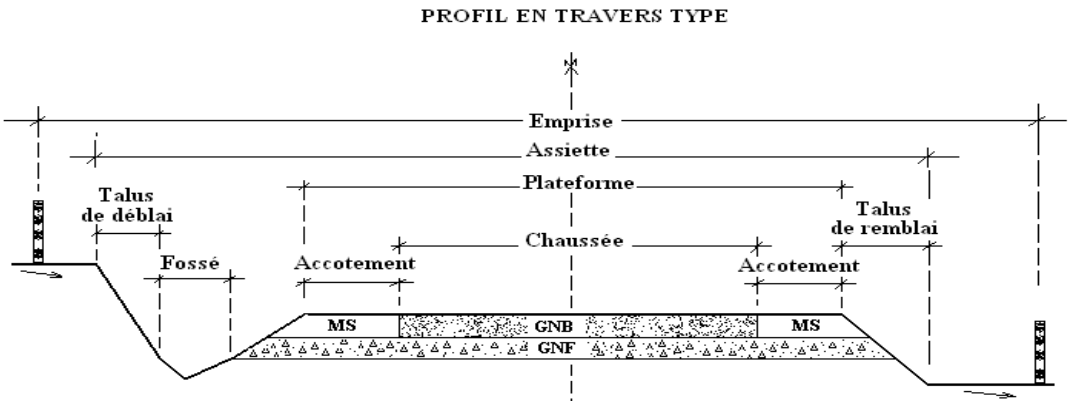
8. Assiette :

C’est la surface du terrain réellement occupée par la route et ses annexes.(Plate-forme + fossées + talus + toute dépendance et ouvrages affectés au domaine publique).

9. Emprise :

C’est la surface de terrain juridiquement affectée à la route et ses annexes ; c’est la limite du domaine publique de l’état.

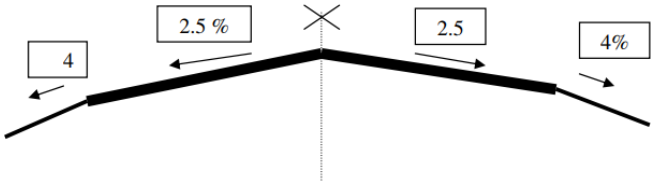
Elle est généralement de 30 m pour les routes, et de 70 à 100 m pour les autoroutes.



10. Devers :

C’est l’inclinaison transversale de la route. Le devers a deux missions principales :

- Évacuer des eaux de ruissellement superficielles.
- Compenser une partie de la force centrifuge dans les parties de la route en courbe.



N.B : En courbe la valeur du dévers dépend de la valeur du rayon en plan.

11. Ouvrages hydrauliques routiers :

Ce sont des ouvrages d’assainissements qui permettent à la route de traverser les cours d’eaux et les dépressions en assurant l’évacuation des eaux. Ils sont en maçonnerie, en béton ou en béton armé.

Les ouvrages hydrauliques routiers comportent :

- Les buses : ouvrages en béton à section circulaire. Elles peuvent être simples, doubles ou triples ou multiples.

- Les dalots : ouvrages en béton armé à section carrée ou rectangulaire. Ils peuvent être aussi simples, doubles ou triples.

- Les radiers : ils peuvent être submersibles ou semi-submersibles.

- Les ponts (OA - ouvrage d'art) : ils sont adoptés dans le cas de grands cours d'eaux.

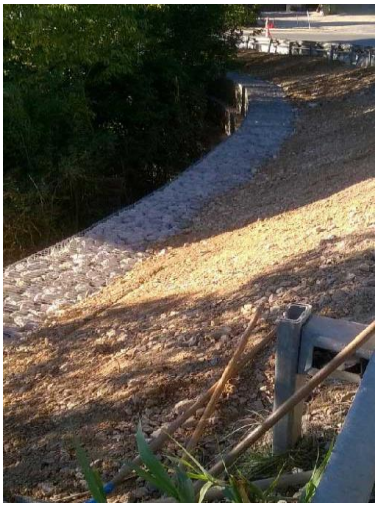
12. Ouvrages de soutènement et de protection :

Les ouvrages de soutènement sont des ouvrages destinés à assurer la stabilité des talus ; qu'ils soient des talus naturels, en remblais ou en déblais.

Les ouvrages de protection sont destinés à protéger la route ou ses éléments contre les affouillements ou les ravinements des eaux.

Ces ouvrages sont généralement en béton, en béton armé, en maçonnerie, en gabions, ou en enrochements.

Mur de Soutènement



Gabions

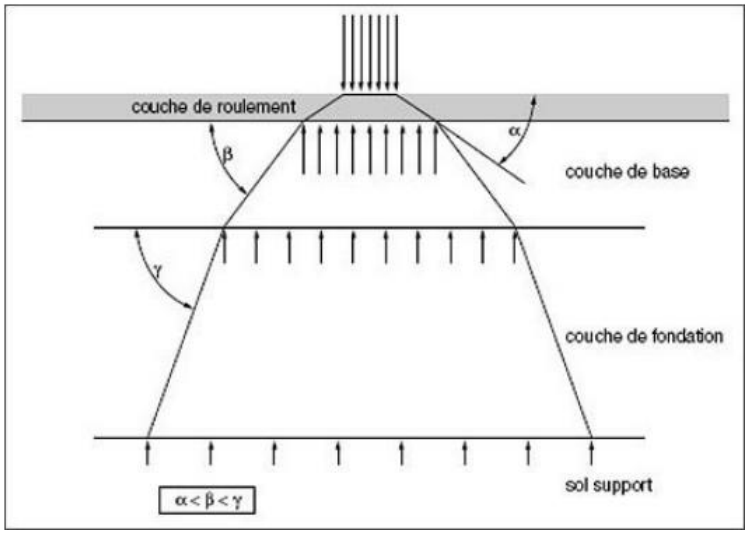
Chapitre III

Généralités sur les structures de chaussée

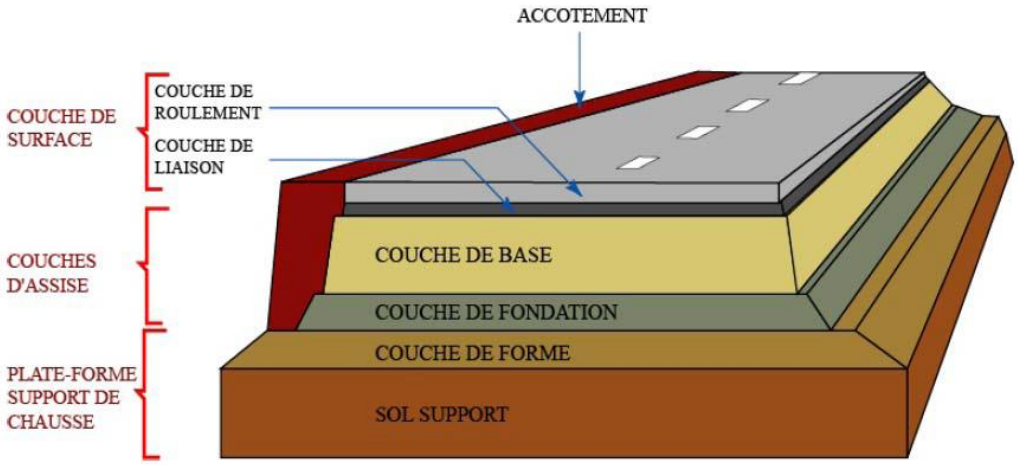
1. Rôles de la structure des chaussées

Une chaussée est une structure multicouche constituée de trois parties principales : la plate-forme support de la chaussée, les couches d'assise et la couche de surface.

Son rôle est de permettre au sol-support de résister aux contraintes dues à la circulation des véhicules, et cela se fait principalement par la répartition de ces contraintes lors de leur transmission au sol sous-jacent, afin d'avoir au niveau du sol-support une contrainte inférieure à sa contrainte admissible.



Répartition de la charge d'une roue d'atterrisseur dans les différentes couches de matériaux constituant une chaussée souple



Coupe type d'une structure de chaussée.

Chaque partie de la chaussée est constituée d'une ou de plusieurs couches, chacune a son propre rôle :

- **La plate-forme support** est constituée du sol-support surmonté généralement d'une couche de forme qui a comme but :
  - à long terme : d'homogénéiser la portance du sol, de maintenir une portance minimale de la plate-forme et de contribuer au drainage de la chaussée
  - à court terme (c'est-à-dire pendant les travaux) : d'assurer la protection du sol support, la qualité du nivellement et la circulation des engins.

  Lorsque les qualités de portance des matériaux constituants le sol-support sont satisfaisantes, la couche de forme peut être réduite à une mince couche de réglage, ou bien carrément inexistante.

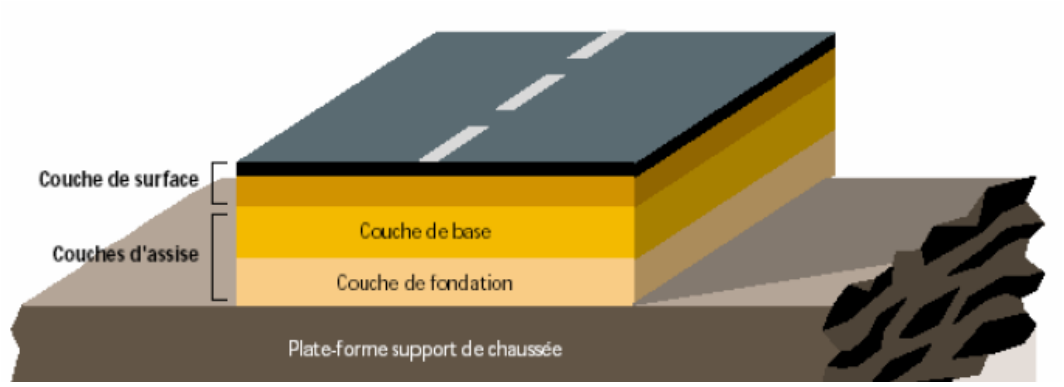
- **L'assise de la chaussée (ou corps de chaussée)**, formée généralement d'une couche de fondation surmontée par une couche de base.
  Elle a comme rôle d'apporter à la chaussée la résistance mécanique pour résister aux charges verticales induites par le trafic, et de répartir les pressions sur la plate-forme support afin de maintenir les déformations à ce niveau dans les limites admissibles.
  Le principal rôle des deux couches est le même, pourtant il existe entre eux une différence de caractéristiques justifiée ; la couche de base, étant plus proche à la surface de chaussée subit des contraintes et des déformations notables, ces contraintes sont moins importantes au niveau de la couche de fondation ;
  Il est donc nécessaire que la couche de base présente des caractéristiques mécaniques assez élevées, et qui ne génèrent au niveau de la couche de fondation qu'un coût supplémentaire.
- **La couche de surface** qui est constituée de la couche de roulement, et d'une couche de liaison entre les couches d'assise et la couche de roulement.
  Cette couche de roulement a comme fonctions :
  - Résister aux efforts dus à l'accélération et au freinage des véhicules
  - Assurer le confort de conduite aux usagers
  - Assurer leur sécurité en présentant une bonne rugosité
  - Assurer la protection des couches d'assise vis-à-vis les infiltrations d'eau.

2. Les différents types de structures de chaussées :

Les structures de chaussée peuvent se diviser en trois catégories selon leur fonctionnement mécanique :

2.1. Les chaussées souples :

Cette catégorie regroupe les chaussées dont l'assise est constituée de couches de graves non traitées, ou traitées aux liants hydrocarbonés, avec un revêtement bitumineux relativement mince qui peut être réduit à un enduit superficiel dans le cas de chaussées à très faible trafic.



Structure générale d'une chaussée souple.

Remarque :

- Une grave non traitée est un mélange de granularité continue de cailloux, de graviers et de sable, avec généralement une certaine proportion de particules fines.
- Un liant hydrocarboné est un matériau adhésif contenant du bitume, du goudron, ou bien les deux.

La répartition des efforts verticaux sur le sol support due à cette structure est modérée, ainsi qu'elle ne peut mobiliser que de faibles efforts assimilables à une flexion, surtout pour les structures en assise non traitée.

Le critère principal de dimensionnement d'une chaussée souple réside donc dans la limitation de la sollicitation du sol support de manière à éviter sa « plastification » qui se traduirait en surface par d'importantes déformations de la chaussée.

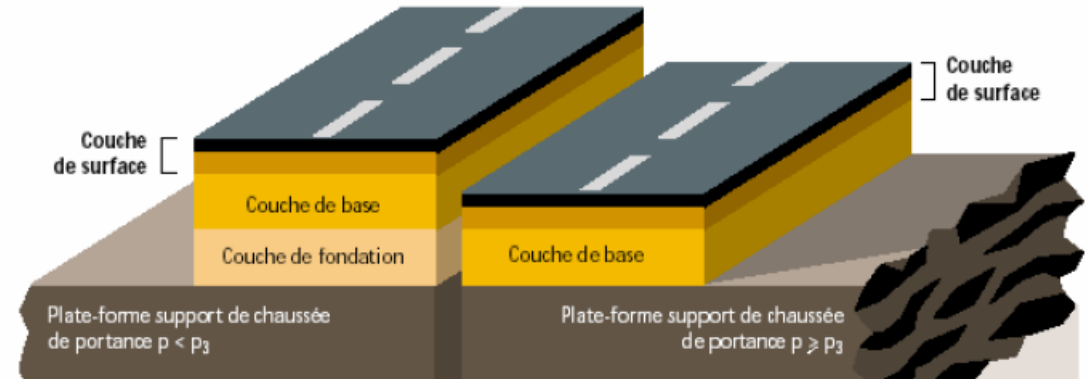
Il faut donc adapter l'épaisseur de chaussée. Ainsi, les chaussées souples sont à grandes épaisseurs disposées en plusieurs couches de qualité géotechnique améliorée de bas en haut.

Sous cette catégorie on trouve 2 types de chaussées :

- Les chaussées souples avec assise en grave non traitée
- Les chaussées bitumineuses épaisses

2.2. :

Elles sont constituées Les chaussées semi-rigides d'une couche de surface bitumineuse, posée sur une assise en matériaux traités aux liants hydrauliques (ciment, chaux ...) et qui peut être réduite à une seule couche (couche de base) en fonction de la portance de la plate-forme support.



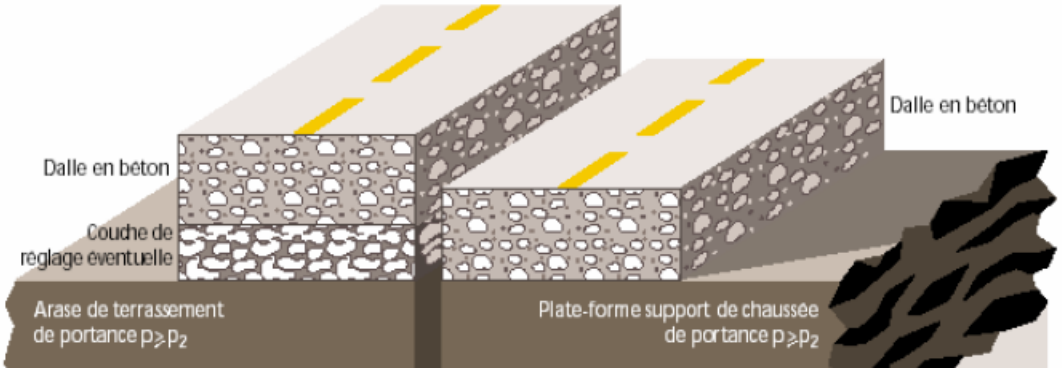
Structure générale d'une chaussée semi-rigide

Sous cette catégorie on trouve 3 types de chaussées :

- Les chaussées à assise traitée aux liants hydrauliques
- Les chaussées à structure mixte (base rigide/Fondation souple)
- Les chaussées à structure inverse (Base souple/Fondation rigide) ; le but d'inverser les couches est d'absorber les mouvements horizontaux, et éviter la remontée des fissures vers les couches de surface.

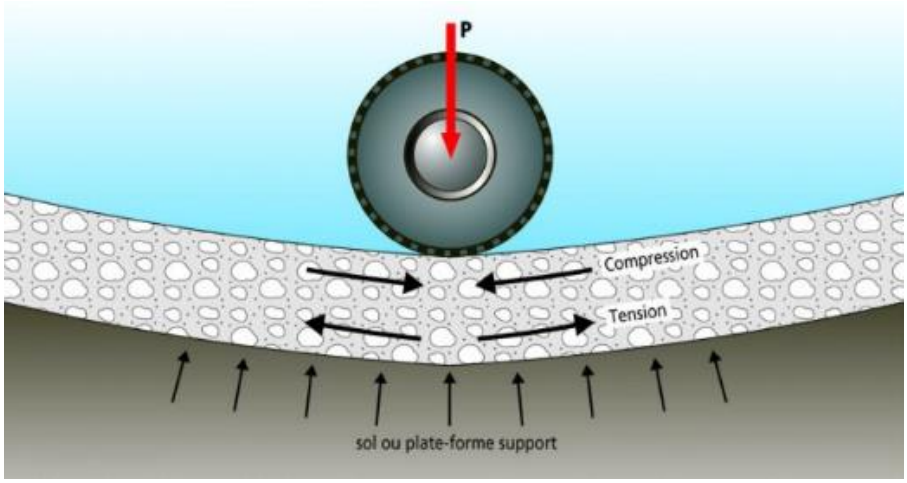
2.3. ***Les chaussées rigides :***

Sont constituées d'un corps de chaussée en dalle béton de ciment, la couche de surface et la couche de base sont éventuellement confondues dans cette catégorie de chaussées.



Structure générale d'une chaussée rigide.

La répartition des efforts au niveau du sol support due à cette structure conduit à une faible sollicitation de ce dernier. En plus, ces matériaux possèdent une grande rigidité, et donc peuvent mobiliser des efforts notables de traction par flexion.



Le principal critère de dimensionnement d'une chaussée rigide réside donc dans la limitation des efforts de traction par flexion des matériaux sous l'effet de la répétition des charges.

Conclusion : le critère de dimensionnement ;

Le critère principal de dimensionnement change pour chaque catégorie de chaussées en fonction de leur comportement mécanique, il se caractérise donc :

- Pour les chaussées souples dans la limitation des efforts verticales dus à la circulation.
- Pour les chaussées rigides dans la limitation des efforts de traction par flexion des matériaux dus à leur grande rigidité.

3. Matériaux constitutif de la structure de chaussée

3.1. Graves non traitées (GNT)

Les graves non traitées sont des matériaux granulaires à granulométrie continue avec un diamètre maximal de grains compris entre 14 et 31,5 mm, et contenant une faible quantité de fines non plastiques (4 à 10 %).

les graves non traitées sont utilisées comme matériaux d'assise de chaussées, principalement sur les chaussées à faible trafic, en couche de base et de fondation ; mais elles peuvent aussi être utilisées en couche de fondation sur des chaussées à moyen trafic.

Les caractéristiques des granulats sont choisies selon leur dureté, propreté, forme et angularité qui sont les principales spécifications portant sur les granulats.

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

Pour la couche de forme on utilise les matériaux type F1 et F2 …

3.2. Les mélanges traités aux liants hydrocarbonés

On désigne sous le nom de liants hydrocarbonés des substances constituées essentiellement d'assemblage d'atomes de carbone et d'hydrogène qui, au contact de particules solides telles que les granulats, développent des forces d'adhésion et de cohésion, assurant de la sorte une certaine rigidité et une résistance à la déformation en traction.

On distingue trois familles de liants hydrocarbonés : les liants naturels, les goudrons et les bitumes.

De nos jours, on utilise principalement le bitume qui, provenant presque exclusivement du traitement des pétroles bruts

On distingue des mélanges coulés à chaux ou à froid dont :

- EB : Enrobé bitumineux pour couche de roulement
- GBB : Grave bitume pour couche de base
- GBF : Grave bitume pour couche de fondation
- BBME : Béton bitumineux à module élevé pour couche de roulement
- EME : Enrobé à module élevé Couche de base
- GE : Grave Emulsion.
- ECF : enrobé coulé à froid
- RSB : revêtement superficiel bicouches
- …

Pour la couche de liaison il y'a 2 cas :

- Couche d'imprégnation : l'émulsion à 55% de bitume …
- Couche d'accrochage : l'émulsion à 65% de bitume

3.3. Les mélanges traités aux liants hydrauliques

Ce sont les graves traitées au ciment qui sont les suivants :

- GC : Grave ciment
- GAC : Grave améliorée au ciment
- GVC : Gave valorisé au ciment

CHAPITRE III

PARAMÈTRES PRINCIPAUX POUR UN PROJET ROUTIER

L'étude d'un projet routier et généralement divisée en deux parties ; la conception géométrique, et le dimensionnement de la route. Ainsi l'ingénieur ou le technicien est obligé de compléter son étude avec la conception et dimensionnement des différents ouvrages annexes à la route. (Ouvrages hydrauliques, Murs de soutènement, Talus…).

La conception et le dimensionnement de la route sont donc affectés par plusieurs facteurs qui touchent plusieurs spécialités ; la conception géométrique de la route nécessite des études de la topographie, et de l'hydrologie, tandis que le dimensionnement est basé principalement sur les études de trafic, de géotechnique et d'hydrologie.

Nous allons illustrer dans ce chapitre les différents paramètres nécessaires pour l'étude d'un projet routier.

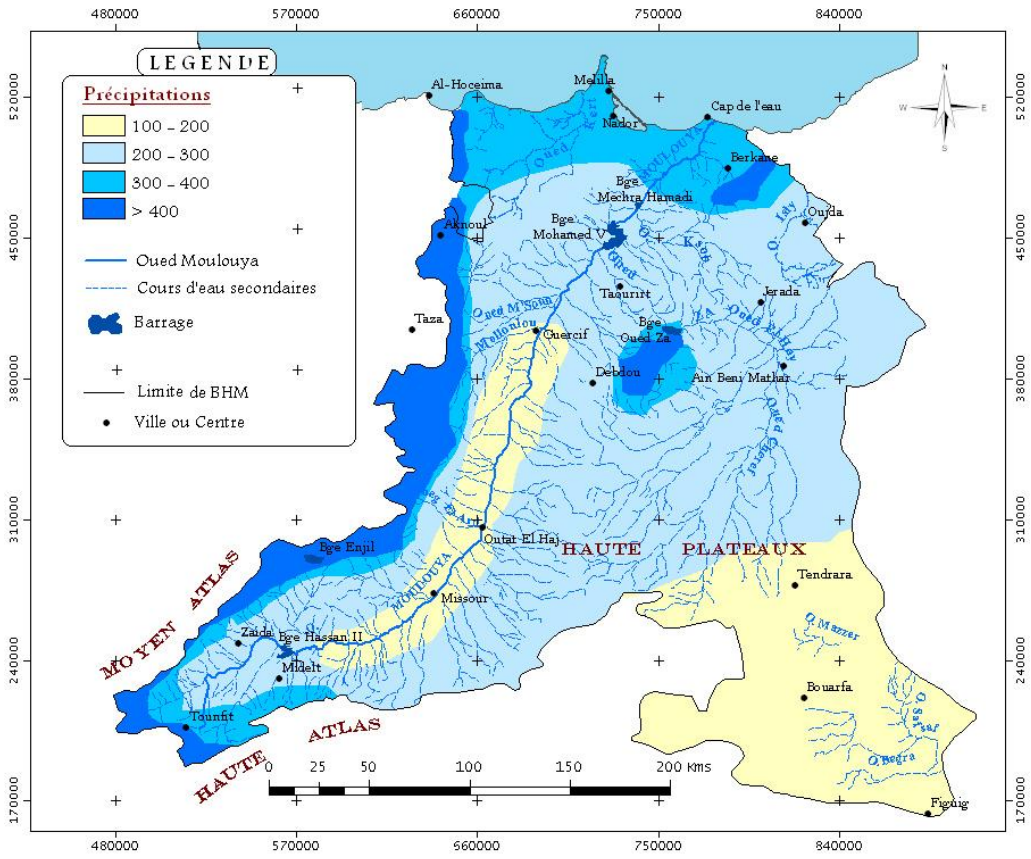
1. **Topographie :**

Le levé topographique du terrain est généralement la donnée la plus importante lors de la conception de la route, puisqu'il illustre tous les obstacles existants dans le terrain, et donc permet de choisir le trajet le plus optimal tout en respectant les normes de la conception.

Le topographe joue ainsi un rôle très important durant tout le cycle de vie du projet routier, il assure durant les travaux le bon calage de la route sur le terrain naturel, et la gestion et suivie des quantités de matériaux utilisés (ce sont des quantités énormes dans les projets routiers, d'où vient l'importance du suivie topographique).

2. **Hydrologie :**

Sachant les dangers que présente l'eau, si elle est mal évacuée, pour les structures de chaussées, il se relève très nécessaire de savoir les conditions climatiques dans lesquelles se trouve le projet (principalement le niveau de précipitations), et d'identifier à l'aide de la topographie les cours d'eau et les dépressions principales qui influence la zone du projet.

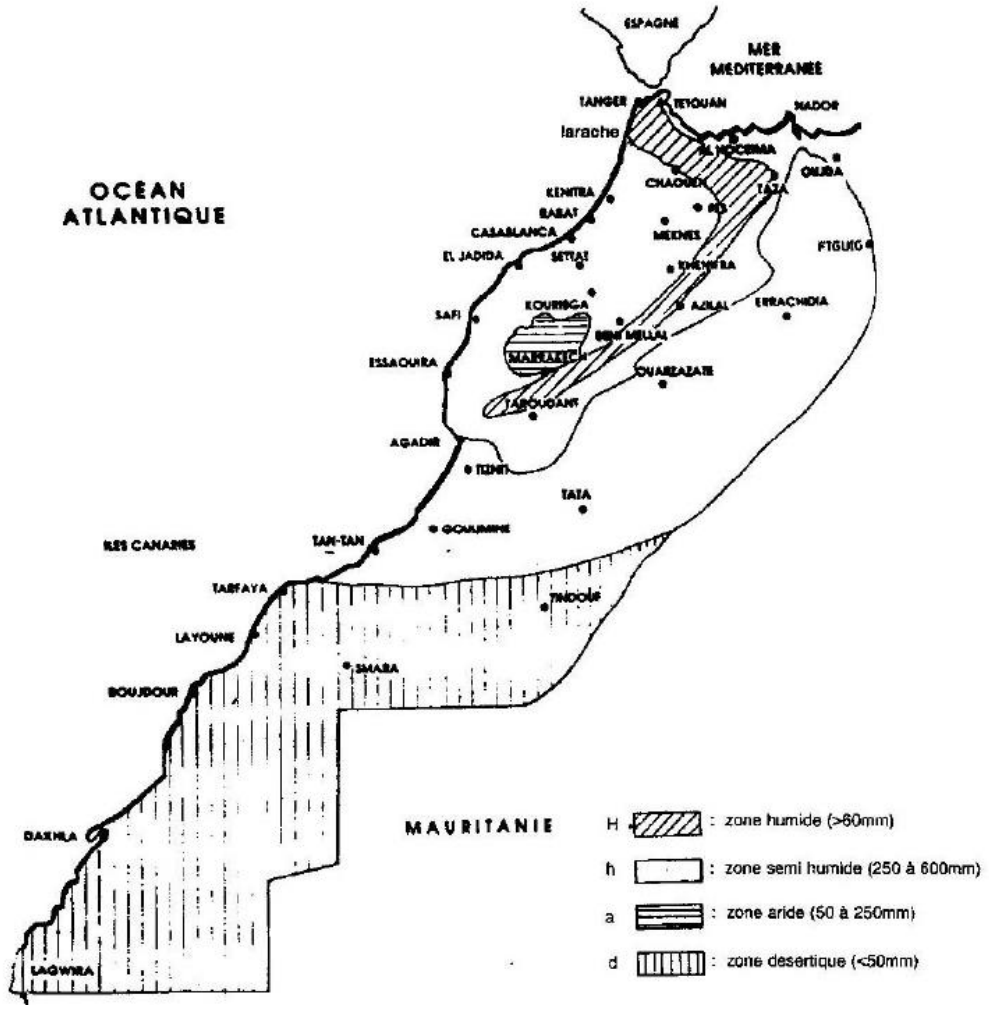


Carte hydrologique de la zone de l'oriental.

Cela permettra de choisir le trajet le plus adéquat pour la route, et d'anticiper les ouvrages hydrauliques nécessaires pour le projet.

Pour le niveau des précipitations au Maroc, quatre zones sont considérées en fonction de la précipitation annuelle moyenne exprimée en mm et déterminée sur une période de récurrence longue (environ 30 ans).

La délimitation de ces zones est faite dans la carte suivante :



Zones climatologiques – MAROC

3. **Le trafic :**

Le trafic est un terme qui représente le nombre de véhicules circulant sur une route, par unité de temps.

Si l'unité de temps est le jour on dit : le trafic journalier (TJ). La moyenne annuelle des trafics journalier est appelée le trafic moyen journalier (TMJ).

Le trafic représente un paramètre fondamental dans le dimensionnement des chaussées, puisque la circulation des véhicules présente les majeures contraintes que subisse la chaussée.

En fait, par l'intermédiaire des pneumatiques, le poids des véhicules est transmis à la chaussée sous forme de pressions. Cette pression est de l'ordre de 0,2 MPa pour une automobile, et de 0,66 MPa sous une roue de camion.

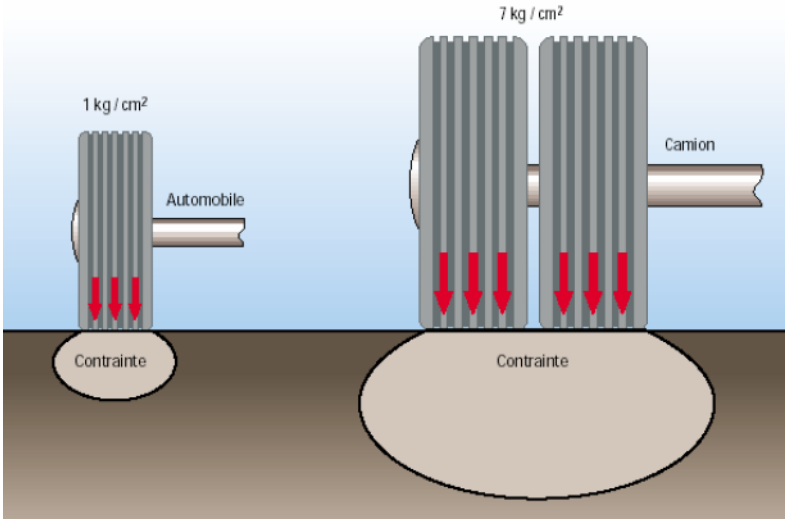


Illustration des agressivités d'un véhicule léger et d'un poids lourd sur la chaussée.

Vu la différence des deux efforts, seuls les efforts dus aux poids lourds sont pris en compte pour déterminer les classes de trafic.

4. Géotechnique routière :

4.1. Définition :

La géotechnique routière est tout simplement l'application de la géotechnique au domaine routier. Elle se focalise principalement sur les majeurs problèmes d'ordre géologique et géotechnique, qui affectent un projet routier. Elle concerne généralement :

- Les travaux de terrassement
- La stabilité des talus et des versants.
- La stabilité des ouvrages.
- Les sols d'emprunts et les gîtes de matériaux.
- Les zones aquifères.

4.2. Problèmes de la géotechnique routière :

4.2.1. Les terrassements :

Le volume et l'importance des terrassements dépendent généralement du relief et des caractéristiques du tracé.

L'objectif de l'étude est de minimiser les coûts de terrassement par un choix judicieux du tracé et de la ligne rouge, qui prend en compte la nature et l'état des sols à terrasser, ainsi que leur emplacement.

Il convient donc de connaître de façon satisfaisante, en fonction de la précision requise pour chaque phase d'étude :

- La nature des sols à déblayer ; notamment leur degré de difficulté d'extraction (sol rocheux, sols rippables, sols meubles).
- La possibilité de réemploi des sols.
- La qualité géotechnique des sols, pour établir un mouvement des terres permettant :
    - de définir le niveau optimal de la ligne rouge.
    - d'assurer une stabilité satisfaisante aux remblais
    - d'assurer une portance optimale au niveau de l'arase des terrassements
    - et même de dégager des matériaux susceptibles d'emploi en couche de forme ou en couche de fondation.

  Il s'agit ici, d'optimiser la qualité des travaux et leur coût en ne se limitant pas à la recherche d'un simple équilibre entre le volume des déblais et des remblais.

Ces paramètres sont déterminés à l'aide des essais d'identification des sols

4.2.2. La stabilité des Talus et des versants :

On s'intéresse ici à la stabilité des versants ou des pentes naturelles dans lesquels on effectue un terrassement (déblai ou remblai), à la stabilité des talus de déblai, et celle des talus de remblais.

L'objet de l'étude est d'assurer la pérennité de l'ouvrage en estimant, en premier lieu, les risques d'instabilité et leur percussion et, en second lieu, en définissant toutes les mesures constructives propres à éviter ces risques ou en cas d'impossibilité à y remédier.

Les éléments essentiels des études de stabilité sont généralement le contexte géologique et hydrogéologique, le relief et les caractéristiques géométriques de l'ouvrage routier.

i. Stabilité des versants et des pentes naturelles :

Pour ce qui est de la stabilité des versants et des pentes naturelles, on peut regrouper les désordres les plus fréquents en quatre classes :

- les écroulements ; ils affectent les masses rocheuses et provoquent la chute d'importants blocs rocheux ;

- les glissements ; ils affectent généralement les sols meubles. Ils résultent d'une action mécanique (suppression de butté, etc...) et se développent sur une surface définie ;

- les fluages ; ils affectent aussi les sols meubles, mais sous la forme d'un mouvement lent sans surface définie ;
- les coulées ; ce sont des mouvements importants de matériaux divers peu liés, généralement en présence d'eau.

Il convient donc de délimiter les zones à risques, c'est-à-dire, d'une part, les zones où les instabilités sont actives en l'absence de tous travaux et d'autre part, celles où l'exécution des terrassements peut réactiver des mouvements anciens où produire des instabilités.

Si les premières peuvent être détectées facilement par des gens expérimentés, les secondes nécessitent la collecte des données géotechniques et hydrologiques suffisantes à partir de reconnaissances in-situ plus ou moins détaillées.

ii. Stabilité des talus de déblai :

Au niveau de la stabilité des pentes de talus de déblai, deux types de problèmes sont rencontrés:

- Les problèmes superficiels : érosion, chute de pierres.
- Les problèmes profonds : glissement de masse dans le talus pouvant affecter outre le talus de déblai, la plate-forme et même la partie remblais dans le cas d'un profil mixte.

Les premiers nécessitent une connaissance géotechnique des sols meubles ou rocheux qui se trouveront en parement du talus après déblaiement, afin de prévoir les travaux de fixation des sols qui pourraient s'avérer indispensables.

Pour l'étude des problèmes profonds, il faudra poursuivre les investigations pour atteindre des niveaux bien inférieurs à celui du parement du talus (surface du « cercle » de glissement potentiel).

L'ensemble des caractéristiques des profils en travers du déblai et la situation et le type des ouvrages confortatifs, doivent être totalement fixés en fin d'étude.

Les rectifications éventuelles en cours de travaux ne doivent être que de second ordre.

iii. Stabilité des talus de remblais :

On s'intéresse ici aux remblais de grande hauteur, et aux remblais sur sols compressibles.

L'objet de l'étude est de limiter les tassements, d'éviter les cisaillements (remblais), et de déterminer les matériaux de remblai et les dispositions constructives (notamment planning pour les remblais sur sols compressibles).

Pour les remblais de grande hauteur, on se préoccupe de :

- la nature des sols de fondation (présence de sols compressibles ou de sols de faible résistance au cisaillement),
- la nature des sols constitutifs du remblai (sols évolutifs, caractéristiques mécaniques au cisaillement),

4.2.3. Stabilité des ouvrages:

On s'intéresse ici à l'étude de stabilité des fondations des ouvrages d'art et des ouvrages de soutènement et de protection.

L'objet de l'étude est de définir pour ces ouvrages le (ou les) types de fondations possibles et leur niveau.

En général, il est nécessaire de mener les investigations pour avoir une idée claire sur la nature du sol qui supportera les semelles des ouvrages, et sur le niveau du bon sol susceptible de résister aux contraintes dues aux chargements. L'étude doit prendre en compte les instabilités susceptibles dans la zone des ouvrages, surtout pour les ouvrages de soutènement.

4.2.4. Les sols d'emprunts et les gîtes de matériaux :

Les études de sols d'emprunts pour matériaux de remblai (en cas de déficit), et de couche de forme et les études de gites à matériaux pour corps de chaussée, sont bien souvent négligées, laissant au niveau de l'appel d'offres jouer la concurrence en ce qui concerne la fourniture et le transport des matériaux.

Il est cependant impératif d'évaluer, au plus juste, le coût des matériaux d'emprunt et de corps de chaussée, tout en s'assurant d'une qualité minimale.

Il est certain que sur ce point des conditions très variables sont rencontrées, depuis les zones riches en matériaux aux zones à ressources très limitées. C'est effectivement dans ce dernier cas que l'étude prend tout son intérêt.

Après un bilan sommaire des ressources connues disponibles, il conviendra d'orienter l'étude vers une reconnaissance plus approfondie, allant de la recherche de gîtes avec vérification des qualités de matériau à la détermination de réserve de gîtes déjà connus et exploités.

Enfin, il faut insister sur les qualités minimales requises pour les matériaux, afin de faire effectivement jouer la concurrence à l'appel d'offres dans des conditions satisfaisantes.

4.2.5. Les zones aquifères :

Bien que ce problème ait déjà été partiellement évoqué, notamment pour les terrassements (présence éventuelle de nappe avec dispositions constructives particulières, rabattement, etc...) et pour les stabilités de pente (à court terme au moment des travaux ou à long terme), il parait utile de souligner l'importance de l'étude des nappes aquifères

Le cas des nappes affleurantes (marécages, sebkha) est à inclure dans ces études sans oublier que bien souvent sont associés à ces situations des problèmes de sols compressibles.

5. Les essais d'identification des sols :

N.B : Les partie ici-bas sont évoqué dans ce cours à titre sommaire et simpliste, il seront étudié minutieusement ultérieurement

L'identification des sols est une étape indispensable pour la résolution des différents problèmes géotechniques, ou dans le cas échéant, l'anticipation des mesures adéquates pour y remédier.

Cette identification se réalise par le moyen de plusieurs essais qui permettent de caractériser les sols, puis de les classer. Cela permet en fin de compte de déterminer les méthodes adéquates pour l'extraction du sol, la possibilité de réutilisation du sol en remblais ou en couche de forme, et les conditions de mise en œuvre.

Ces essais se divisent généralement sous trois catégories :

5.1. Essais permettant de déterminer les paramètres de nature des sols :

Les paramètres de nature se rapportent à des caractéristiques intrinsèques, c'est-à-dire qui ne varient pas ou peu, ni dans le temps ni au cours des différentes manipulations qui subit le sol au cours de sa mise en œuvre.

On trouve sous cette catégorie :

i. Analyse granulométrique :

Cet essai comporte :

- Analyse granulométrique par tamisage :

Le but de cet essai est de déterminer la granulométrie du sol, c'est-à-dire déterminer la répartition des grains de sol suivant leur dimension dans un échantillon.

- Analyse granulométrique par voie humide :

Le but de l'essai est de tracer la courbe granulométrique des éléments fins.

ii. Limites d'Atterberg :

Le but de cet essai est de caractériser l'argilosité d'un sol,

iii. Valeur de Bleu du Sol (VBS) :

Le but est de déterminer la propreté d'un sable, d'un granulat et plus généralement d'un sol, et les différents types d'argiles qu'il contient.

iv. Équivalent de Sable (ES) :

L'essai équivalent de sable permet de déterminer la proportion de poussière fine nuisible dans un matériau. Il est surtout utilisé par les matériaux routiers et les sables à béton, car il permet de séparer les sables et graviers des particules fines comme les limons et argiles.

5.2. Les essais de détermination des paramètres de compactage :

i. Essai Proctor :

Cet essai sert à la détermination des références de compactage d'un matériau : masse volumique et teneur en eau.

ii. L'indice de portance (CBR) :

L'essai CBR est un essai de portance (aptitude des matériaux à supporter les charges)

Cet essai permet de :

- Établir une classification des sols (GTR)
- Évaluer la traficabilité des engins de terrassement
- Déterminer l'épaisseur des chaussées (CBR augmente → épaisseur diminue).

5.3. Les essais de détermination des paramètres de comportement mécanique :

i. Essai Los Angeles :

L'objet de cet essai est de déterminer la résistance aux chocs.

ii. Essai Micro-Deval :

L'objectif de cet essai et d'apprécier la résistance à l'usure des granulats ; l'essai est réalisé en présence d'eau pour se rapprocher des conditions réelles de séjour des granulats dans les chaussées.

5.4. Classification des sols :

Sur la base des résultats des essais précédents, une classification des sols est établie :

6. Paramètres relatifs aux véhicules :

6.1. Vitesses :

La définition des caractéristiques géométriques d'une route dépend de plusieurs facteurs parmi lesquels on trouve obligatoirement la vitesse à laquelle circulent les véhicules.

Pourtant les véhiculent peuvent circuler généralement à différentes vitesses, d'où vient le besoin de définir des vitesses réglementaires, et des vitesses permettant la normalisation du tracé routier.

6.1.1. Vitesse de référence Vr (ou vitesse de base) :

La vitesse de référence Vr d'une route est la vitesse qui peut être pratiquée en tout point de la route considérée, c'est-à-dire la vitesse que l'on peut pratiquer, en toute sécurité, aux points les plus difficiles de cette route.

Elle permet de définir les caractéristiques minimales d'aménagement des points singuliers, et de normaliser les conditions techniques d'aménagement des routes.

En vue de l'homogénéité du réseau, une certaine normalisation doit être introduite. Cette normalisation est la définition des catégories.

L'instruction des caractéristiques géométriques des routes en rase compagne (ICGRRC) prévoit 5 catégories :

Vitesse de référence en km/h	40	60	80	100	120
Catégorie	Hors catégorie Ou REFT	3eme	2eme	1ere	Exceptionnelle

6.1.2. vitesses réglementaires :

C'est les vitesses limites définies suivants les conditions de circulation (type, géométrie, profil, environnement, météo etc…) fixées dans un but de sécurité.

6.2. Distances :

Le concepteur de la route doit avoir une idée claire sur les distances minimales permettant aux usagers de réaliser les différentes manœuvres en toute sécurité (rouler, freiner, dépasser, s'arrêter devant un obstacle).

6.2.1. Distance de perception-réaction :

C'est la distance parcourue à vitesse constante v du véhicule, pendant le temps de perception-réaction.

Ce temps est constitué du temps physiologique de perception-réaction (1,3s à 1,5 s) et le temps mort mécanique d'entrée en action des freins (0,5s).

Pour le calcul, on adopte généralement la valeur de 2 s pour ce temps de perception-réaction lorsque la vitesse est inférieure à 100 Km/h, et 1,8 s pour les vitesses supérieures à 100 Km/h (situation d'attention soutenue).

Donc la distance de perception réaction (e) se calcule comme suit :

$$e = v \times t$$

Avec : v : vitesse du véhicule en m/s.

t : temps de perception–réaction en seconde (s).

Pour passer à l'équation en fonction de V en Km/h on passe par la relation $v = \frac{V}{3,6}$

On aura donc :

- Pout t = 2s : e = 0,55V
- Pour t = 1,8s : e = 0,5V

6.2.2. Distance de freinage :

C'est la distance parcourue par le véhicule pendant l'action effective de freinage, jusqu'à l'annulation de sa vitesse initiale.

Elle est fonction de la vitesse initiale, de la déclivité et du coefficient de frottement longitudinal (valeur comprise entre 0 et 1).

Soit une voiture de masse m(Kg) circulant sur une route droite de pente : δ (déclivité), avec une vitesse v(m/s), et soit f le coefficient de frottement longitudinal de la chaussée.

La voiture freine à l'instant t=0s.

Les forces appliquées à la voiture dans l'action de freinage sont :

- La force de pesanteur : P = m.g ; avec m la masse de la voiture et g=9,81m/s² (accélération de la pesanteur).
- La force de frottement (réaction du sol) F= f.P avec f coefficient de frottement longitudinale.

Le théorème de l'énergie cinétique annonce que l'énergie cinétique de la voiture est égale au travail de ses forces pendant la durée de freinage t(s) ; c'est-à-dire :

$$\frac{m.v^2}{2} = f.P.d_b + P.\sin(\alpha).d_b$$

Avec :

- α : l'angle que fait la route de pente δ avec le plan horizontal.
- d_b : la distance parcourue par la voiture pendant le temps de freinage t.

Sachant que α est généralement petit on peut écrire :

$$Sin\ \alpha = \tan\alpha = \delta$$

Avec δ la déclivité du terrain en (m/m).

L'équation devient après simplification :

$$\frac{v^2}{2} = d_b.g.(f+\delta)$$

Et donc la distance de freinage s'écrit :

$$d_b = \frac{v^2}{2g.(f+\delta)}$$

Pour écrire l'équation en fonction de la vitesse V habituellement exprimée en Km/h on passe par la relation :

$$v = \frac{V}{3{,}6}$$

Et donc en remplaçant g par sa valeur on trouve :

$$\boldsymbol{d_b = 0,004.\frac{V^2}{f+\delta}}$$

En pratique la distance de freinage est donnée par le tableau suivant:

Vr (Km/h)	40	60	80	100	120	130	140
F(V)/g	0,46	0,44	0,42	0,38	0,34	0,32	0,3

Vr (Km/h)	40	60	80	100	120	130	140
db(m)	15	35	65	105	170	210	260

6.2.3. Distance d'arrêt :

C'est la distance nécessaire pour effectuer l'action d'arrêt. Elle est la somme de la distance de perception-réaction et la distance de freinage ;

Donc la distance d'arrêt en alignement droit peut s'écrire :

- $d_1 = d_b + 0{,}55.V \quad (si\ V < 100\ Km/h)$
- $d_1 = d_b + 0{,}50.V \quad (si\ V \geq 100\ Km/h)$

Ou bien :

- $d_1 = 0{,}004.\frac{V^2}{(f+\delta)} + 0{,}55.V \quad (si\ V < 100\ Km/h)$
- $d_1 = 0{,}004.\frac{V^2}{(f+\delta)} + 0{,}50.V \quad (si\ V \geq 100\ Km/h)$

Distance d'arrêt en courbe d_2 :

On ne prend en compte d2 que dans l'hypothèse où le rayon en plan du tracé exprimé en mètres est inférieur à 5 fois V exprimé en km/h.

De ce fait, l'effort de freinage est moins énergétique, on en tient compte en majorant la distance d1 d'une valeur de 25% de db.

L'équation devient :

- $d_2 = 0{,}005.\frac{V^2}{(f+\delta)} + 0{,}55.V \quad (si\ V < 100\ Km/h)$
- $d_2 = 0{,}005.\frac{V^2}{(f+\delta)} + 0{,}50.V \quad (si\ V \geq 100\ Km/h)$

En pratique la distance d'arrêt est donnée par le tableau suivant:

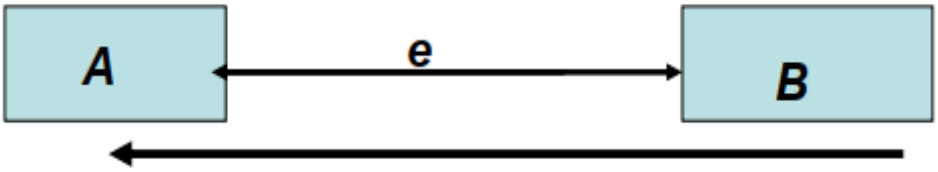
V(Km/h)	40	60	80	100	120	130	140
f	0,46	0,44	0,42	0,38	0,34	0,32	0,30
d1(m)	40	70	105	160	230	280	330
d2(m)	45	80	120	180	275	330	390

6.2.4. Distance de sécurité entre deux véhicules :

Deux véhicules circulent dans le même sens, à la même vitesse. Le premier freine au maximum. A quelle distance le second peut suivre pour éviter la collision ?

Théoriquement puisqu'ils roulent à la même vitesse, ils s'arrêteront à la même distance qui est la distance de freinage.

L'espacement entre les deux véhicules sera simplement parcouru durant le temps de perception-réaction (t=2s).



$$e = 0{,}55 \times V \quad (avec\ V\ en\ Km/h)$$

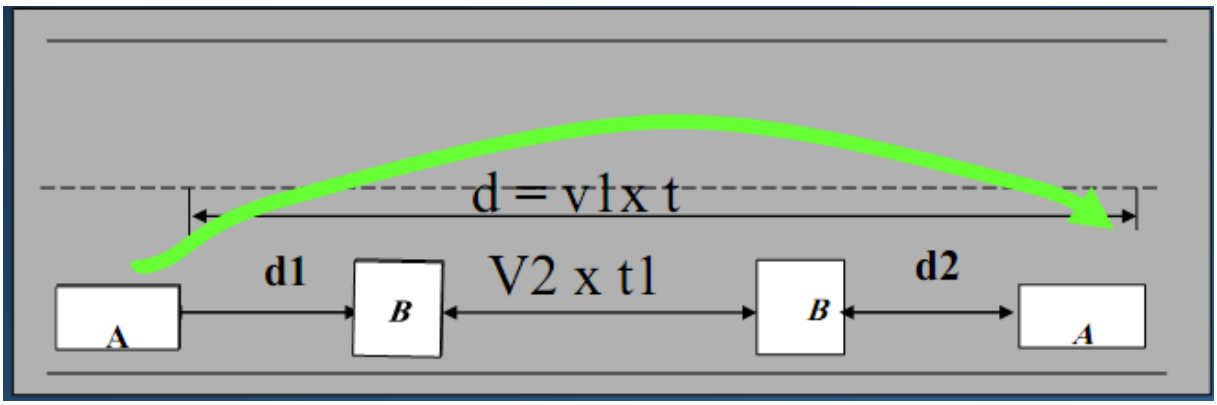
Pratiquement le freinage est une opération plus compliquée. Lorsque B voit s'allumer le stop de A, il ne sait pas avec qu'elle intensité A freine. Il hésite donc à freiner lui aussi au maximum.

En se basant sur des expériences, on a complété la valeur de "e" par un terme en fonction de V^2.

$$e = 0{,}55.V + \frac{V^2}{335}$$

6.2.5. Distance de dépassement :

On considère un véhicule qui exerce la manœuvre de dépassement à vitesse constante v1, sans avoir à ralentir.



Soit :

- d1: la distance entre A et B avant le dépassement
- d2 : la distance entre A et B après le dépassement
- t le temps nécessaire pour exercer le dépassement

Pendant le temps t, le véhicule A parcourt une distance d telle que :

$$d = v1 \times t$$

Et

$$d = d1 + v2 \times t + d2$$

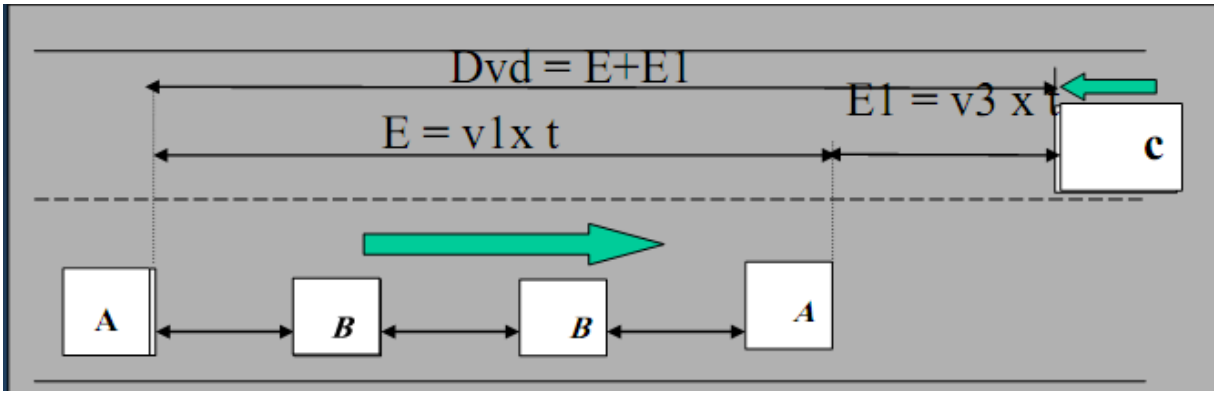
Des deux équations on déduit que :

$$t = \frac{d1 + d2}{v1 - v2}$$

D'où :

$$d = \frac{v1 \times (d1 + d2)}{v1 - v2}$$

6.2.6. distance de visibilité de dépassement :



$$Dvd = E + E1 = \frac{v1 \times (d1 + d2)}{v1 - v2} + \frac{v3 \times (d1 + d2)}{v1 - v2}$$

En général, l'ICGRRC défini la distance de visibilité de dépassement comme la distance de visibilité nécessaire pour qu'un véhicule, en attente derrière un véhicule lent puisse amorcer sans danger une manœuvre de dépassement.

Cette distance est fixée par l'ICGRRC à 500m (valeur expérimentale).

6.3. Conditions de visibilité :

Ce sont des conditions essentielles de sécurité.

Le tracé de la route doit offrir au conducteur une visibilité suffisante, pour une vitesse de référence donnée, afin qu'il puisse effectuer toutes ses manœuvre (rouler, freiner, dépasser, s'arrêter devant un obstacle).

6.3.1. Visibilité longitudinale :

En visibilité longitudinale, on doit assurer, pour la vitesse de référence Vr :

- La visibilité d'obstacle à la distance d'arrêt en alignement droit et en courbe;
- La visibilité de manœuvre de dépassement sur une distance Dvd, pour toute route à voie banalisée de dépassement.

6.3.2. Visibilité latérale en courbe (Visibilité à l'intérieur d'un virage):

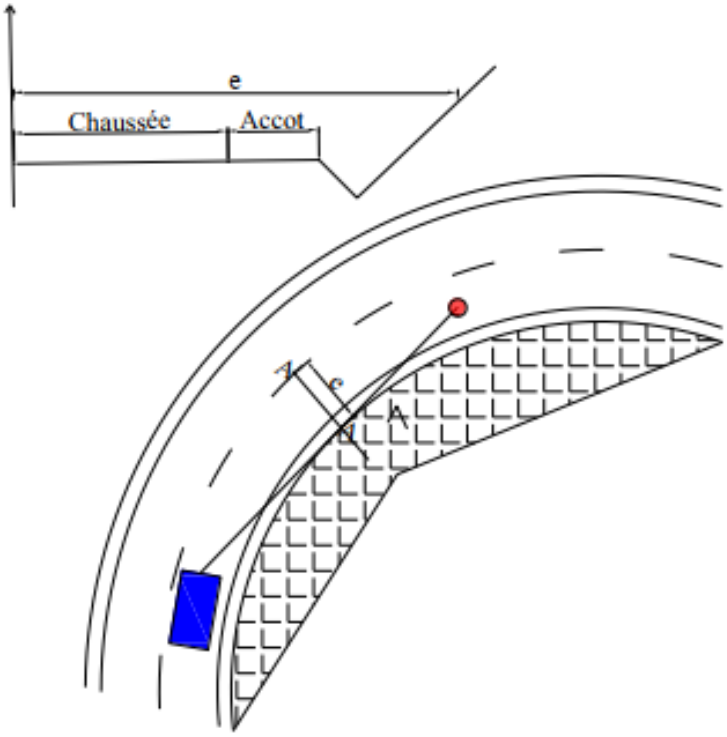
Le dégagement latéral des obstacles peut être rendu nécessaire pour assurer la distance de visibilité nécessaire.

En courbe de rayon de courbure « R » moyen, il faut des dégagements latéraux « e » pour disposer d'une distance « d » de visibilité ;

e : distance du talus à l'axe de la chaussée

Le rayon de virage R, e et d sont liés par la relation :

$$e = \frac{d^2}{8.R}$$



En pratique, on prend pour distance de visibilité la distance d'arrêt « da », donc :

da= distance d'arrêt

e = dégagement latéral ou flèche

R = rayon de courbure du tracé en plan

$R^2=(R-e)^2 + da^2/2^2$

$R^2-R^2-e^2+2Re=da^2/4$ e << R d'où e^2 est négligeable/ R , donc :

$$e = \frac{(da)^2}{8.R}$$

CHAPITRE IV

CARACTERISTIQUES GEOMETRIQUES D'UN PROJET ROUTIER

1. Introduction :

Définir les caractéristiques d'une route, c'est concevoir les trois éléments géométriques simples qui la composent :

- Le tracé en plan ; projection de l'axe de la route sur un plan horizontal.
- Le profil en long ; le tracé de cet axe en élévation.
- Le profil en travers ; coupe suivant un plan vertical perpendiculaire à l'axe de la route.

Les règles et les conditions techniques relatives à la construction de ces trois éléments font l'objet de trois instructions ministérielles. Elles s'appliquent selon le type de route considérée:

- Instruction sur les conditions techniques d'aménagement des autoroutes de liaison (ICTAAL).
- Instruction sur les conditions techniques d'aménagement des voies rapides urbaines (ICTAVRUI).
- Instruction sur les caractéristiques géométriques des routes en rase campagne (ICGRRC).
    - REFT (Routes économiques à faible trafic).

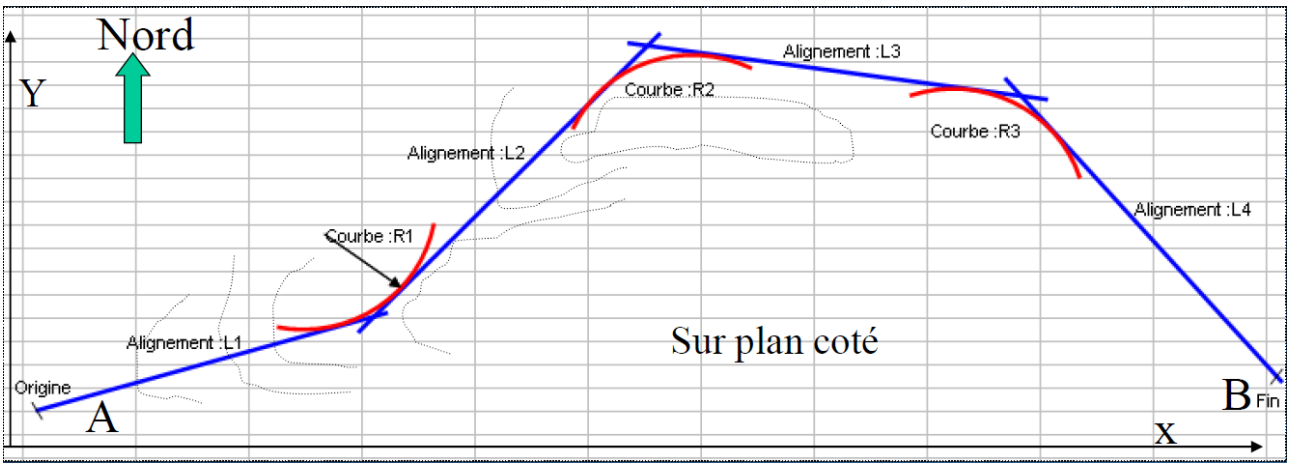
Il est impératif de comprendre la démarche qui a prévalu à l'élaboration de ces instructions techniques. Elles sont à considérer comme des outils destinés à faciliter la tâche du projeteur et non comme une contrainte de nature à limiter son imagination.

2. Tracé en plan :

Le tracé en plan est la projection sur un plan horizontal de l'axe de la chaussée.

C'est une succession de segments de droite, d'arcs de cercle et de raccordements à courbure variable.

La combinaison de ces éléments, en coordination avec le profil en long, doit en premier lieu permettre de réserver une proportion convenable de zones où la visibilité est suffisante pour permettre le dépassement. Simultanément, on doit éviter l'effet de monotonie et réduire en conduite nocturne le temps d'éblouissement par les phares lié aux grands alignements droits (de préférence de ne pas dépasser 5km d'alignement droit !).



2.1. ***Arcs de cercle :***

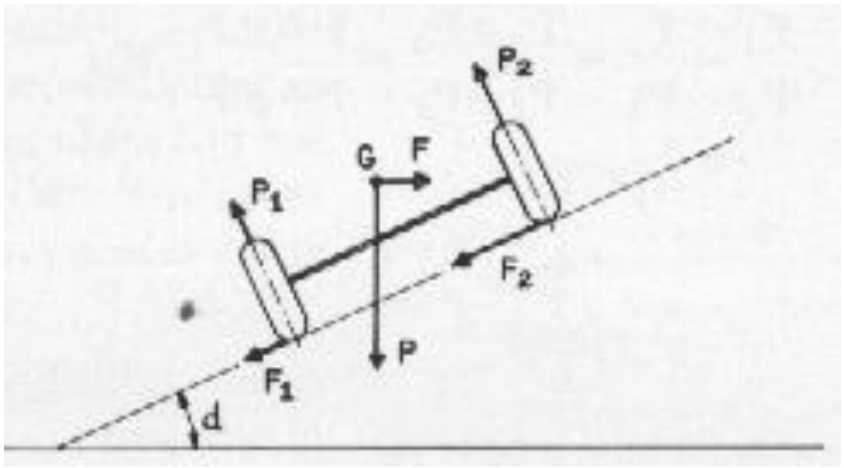
Trois éléments interviennent pour limiter les courbures :

- Stabilité des véhicules en courbe.
- Visibilité en courbe.
- Inscription des véhicules longs dans les courbes de rayon faible.

2.1.1. Stabilité en courbe – calcul du rayon en courbe:

Dans un virage de rayon R, le véhicule subit l'effet de la force centrifuge qui tend à provoquer une instabilité du système (dérapage du véhicule).

Afin de réduire l'effet de la force centrifuge, on incline la chaussée transversalement vers l'intérieur de la courbe (éviter le phénomène de dérapage) d'une pente donnée exprimée par sa tangente ; c'est le devers.



Forces agissant sur un véhicule dans un virage.

Les forces agissant sur le véhicule dans le virage sont :

- P le poids du véhicule.
- F la force centrifuge produite lors du déplacement de la masse « m » du véhicule à la vitesse « v » sur la trajectoire circulaire de rayon « R ».

  On a : $F = \frac{m.v^2}{R}$ avec : v en m/s
- F' : résultante des réactions tangentielles F1 et F2 (réaction à l'interface sol/véhicule).

  On a : F'=P.f_t , avec f_t :coefficient de frottement transversal (il dépend de la rugosité de la surface et du pneumatique).

L'équilibre est acquis si le frottement transversal s'oppose au dérapage, c'est-à-dire :

$$P.\sin\alpha + F' \geq F.\cos\alpha$$

Avec : α : l'angle que fait la route avec le plan horizontale ; on a $\tan\alpha = d$ (le devers en %).

α étant petit, on peut écrire : $\sin\alpha = \tan\alpha = d \quad et \quad \cos\alpha = 1.$

L'équation devient alors :

$$P.d + P.ft \geq F$$

$$\Longrightarrow \quad m.g.(d + ft) \geq \frac{m.v^2}{R}$$

$$\Longrightarrow \quad R \geq \frac{v^2}{g.(d+ft)}$$

Et on a : $v = \frac{V}{3.6}$ et g = 9.81 m/s².

Après calcul on a :

$$R_{min} = \frac{V^2}{127(d + ft)}$$

d sera d'autant plus grand que la courbure sera plus forte.

Pour les normes marocaines on a défini pour chaque catégorie 2 valeurs limites du rayon : Le rayon minimum normal (Rmn) et le rayon minimum absolu (Rma).

- Rmn : qui assure la stabilité d'un véhicule dans une courbe déversée à 4%.
- Rma : qui assure la stabilité d'un véhicule dans une courbe déversée à 7%.

Egalement on a défini le rayon non déversé (Rnd) qui correspond à un profil en travers normal (2,5% et – 2,5%).

ICGRRC	Exp	1er C	2ème C	3ème C	H.C
Rmn (d=4%)	1 000	500	250	125	30
Rma (d=7%)	700	350	175	75	15

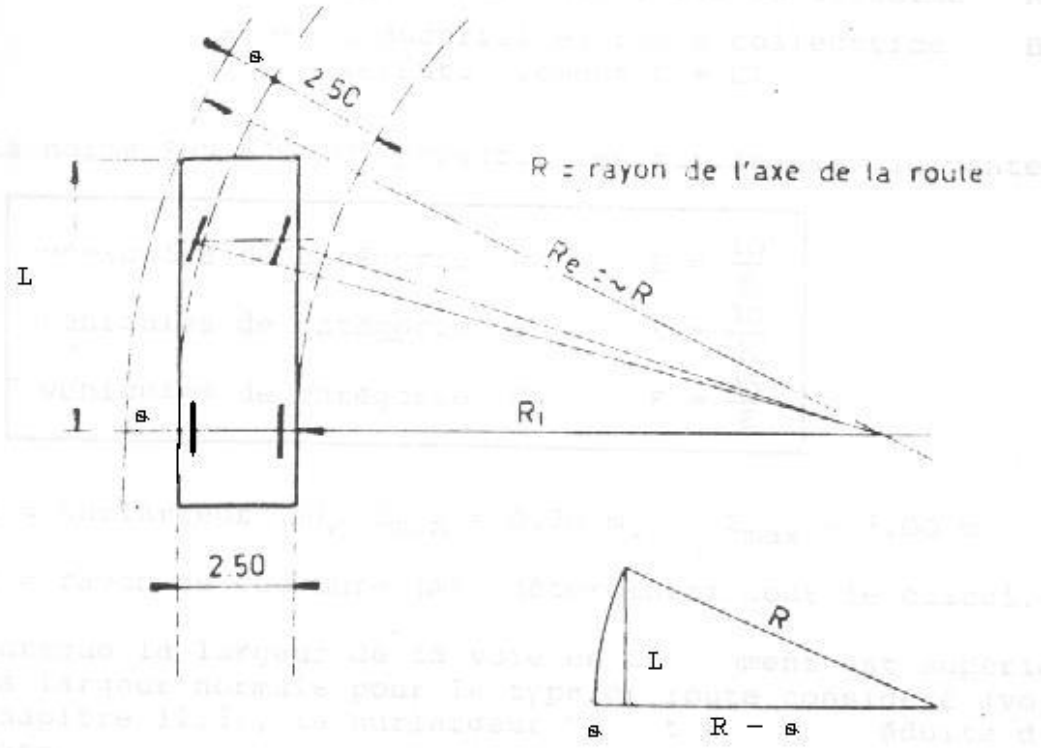
2.1.2. Sur-largeur :

Un long véhicule à deux essieux, circulant dans un virage, balaye en plan une bande de chaussée plus large que celle qui correspond à la largeur de son propre gabarit.

Pour éviter qu'une partie de sa carrosserie n'empiète sur la voie adjacente, on donne à la voie parcourue par ce véhicule une surlargeur par rapport à sa largeur normale en alignement.

Ce problème, dit de « l'inscription des véhicules » dans les virages, s'adresse aux sinuosités de faibles rayons, généralement inférieur ou égale à 250 m.

Le calcul de la surlargeur nécessaire se fait pour le véhicule lui-même et le résultat obtenu s'applique en surlargeur à chacune des deux voies de la route.



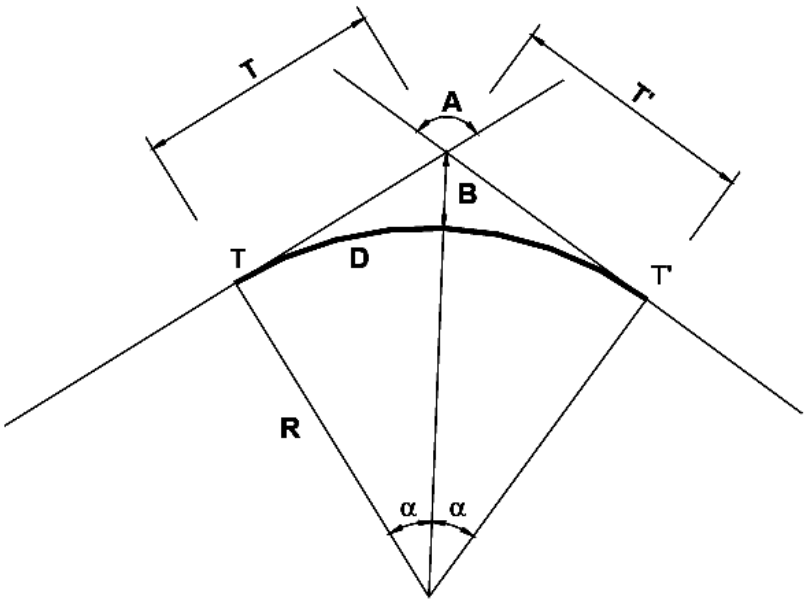
On a $R^2 = (R - s)^2 + L^2$

Sachant que s est petite comparée à R on peut écrire : $s^2 \sim 0$.

On aura donc : $s = \frac{L^2}{2R}$

L'ICGRRC fixe cette formule à : $s = \frac{50}{R}$ (S et R en mètre)

2.1.3. Arc de cercle raccordant deux alignements droits (calcul des A,R,T,D,B) :



$$\alpha = \frac{200 - A}{2} \qquad \alpha \text{ et } A : \text{en grad}$$

$$T = T' = R \ tg\alpha$$

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

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

Exemple 1 : Connaissant R et A :

Rayon de courbure R=250 m, angle A=180 grades. → α= 10grd , T= 39,60m, B=3,12m , D=78,54m.

Exemple 2 : Connaissant R et les Gisements :

Le gisement désigne, en topographie, l'angle formé entre une direction et le nord de la carte.

Rayon de courbure R=215 m, G1=89 grades, G2=157 grades → α= 34grd , T=127,15 m,

B=34,78m , D=229,65m.

Pratiquement :

Soit S le point d'intersection des deux alignements droits (le sommet du raccordement).

Le point S et l'angle A sont connus vu que les deux alignements droits sont connus.

T et T' sont deux points des tangentes.

Soit R est connu (choisi selon la catégorie de la route).

R est connu, donc les droites ST et ST' sont connus, on construit donc le point S d'intersection et on lui reporte les distances horizontales calculées ST et ST'. On procède suivant au piquetage de plusieurs points de l'arc.

On a : $ST = ST' = R.cotg\left(\frac{A}{2}\right)$ Et $SO = \frac{R}{\sin(\frac{A}{2})}$

2.2. Courbes de raccordement :

Ce tracé en plan qui, en première approximation, se compose d'une succession de droites et d'arcs de cercles accuse aux points de tangence une discontinuité de courbure qui n'est plus compatible avec les grandes vitesses pratiquées aujourd'hui.

Définition de la courbure : $K = \frac{1}{R}$ (R = rayon de l'axe du virage).

Un tracé rationnel de route moderne comportera donc nécessairement des alignements droit, des virages en arcs de cercle et, entre ces deux éléments, des tronçons de raccordement de courbure progressive, passant de la courbure 0 (R = infini) à l'extrémité de l'alignement à la courbure $\frac{1}{R}$ au début du cercle du virage.

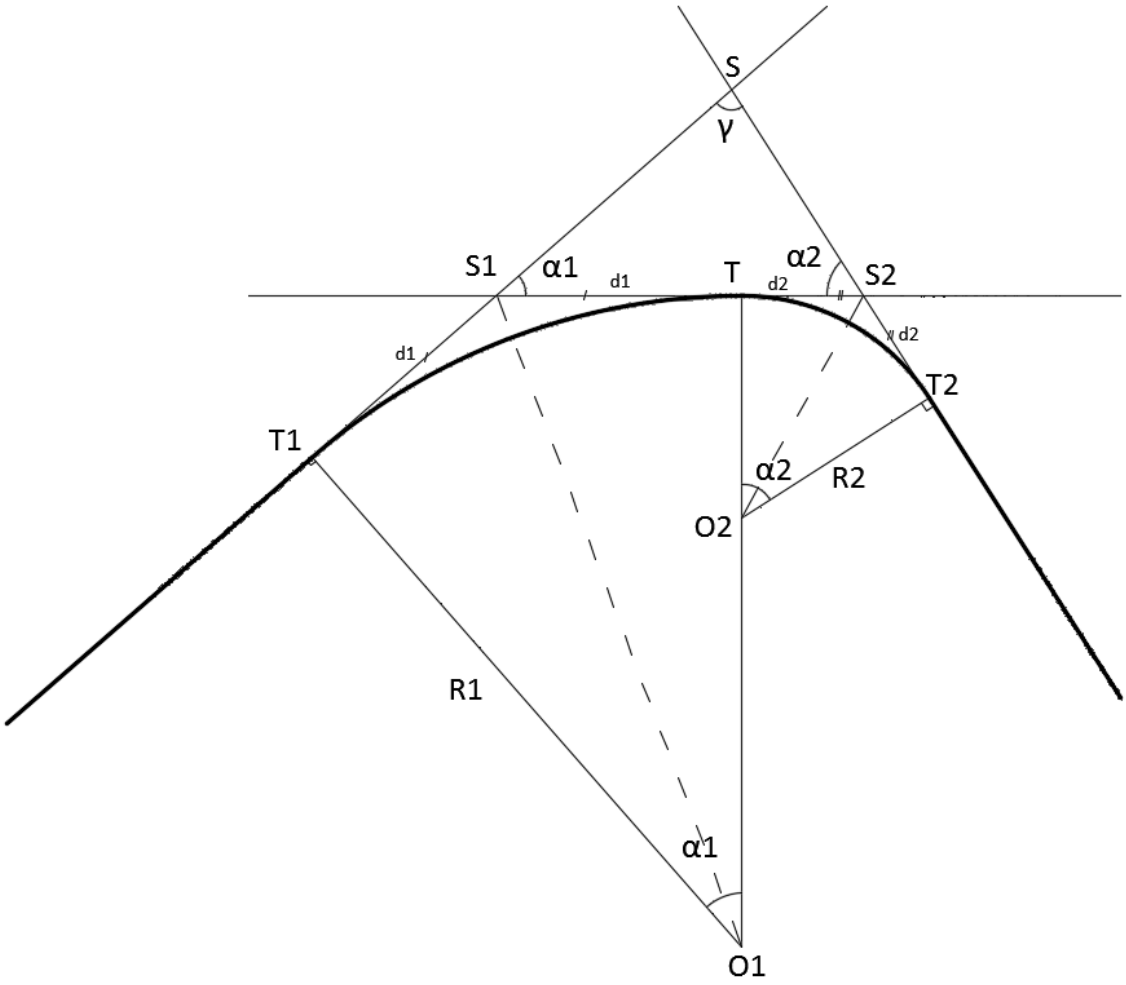
Pour les sinuosités de rayons supérieurs à 1000 m, les conditions dynamiques et de confort ne demandent plus de CR ; mais il est toutefois recommandé de les maintenir pour des raisons d'ordre optique et esthétique.

2.2.1. Rôle et nécessité des CR :

L'emploi des CR se justifie par les quatre conditions suivantes :

- Stabilité transversale du véhicule.
- Confort des passagers du véhicule.
- Transition de la forme de la chaussée.
- Tracé optiquement et esthétiquement satisfaisant.

2.2.2. Raccordement circulaire composé :



On a :

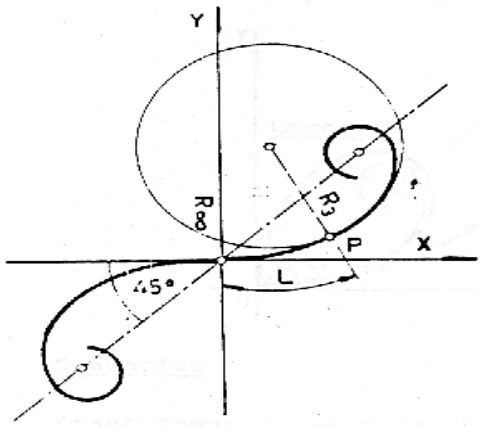
- $\alpha 1 + \alpha 2 + \gamma = 200$
- $S1S2 = d1 + d2$
- $\frac{S1S2}{\sin\gamma} = \frac{SS1}{\sin\alpha 2} = \frac{SS2}{\sin\alpha 1}$
- $ST1 = SS1 + d1$ Et $ST2 = SS2 + d2$
- $d1 = R1.\tan(\frac{\alpha 1}{2})$ Et $d2 = R2.\tan(\frac{\alpha 2}{2})$
- $\widehat{TT}1 = R1.\alpha 1.\frac{\pi}{200}$ Et $\widehat{TT}2 = R2.\alpha 2.\frac{\pi}{200}$

Plusieurs types de calcul sont menés suivant les données du problème…

2.2.3. Raccordement à courbure progressif (Clothoïde):

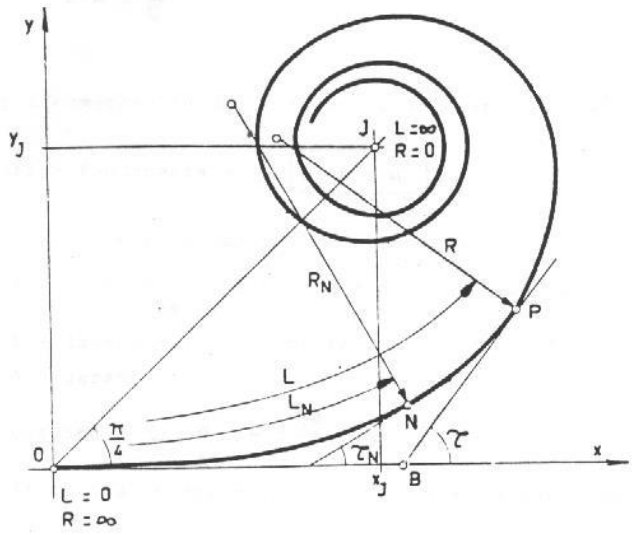
Pour réaliser la transition en douceur du rayon infini (alignement droit) au rayon R du virage, on intercale entre l'alignement droit et l'arc de cercle un raccordement progressif (généralement une Clothoïde).

Définition de la Clothoïde :



La clothoïde est une courbe plane caractérisée par la propriété que sa courbure en un point est proportionnelle à l'abscisse curviligne du point (ou longueur de l'arc), mesurée à partir du point d'inflexion.

C'est une spirale, dont le rayon de courbure décroît d'une façon continue dès l'origine (ou point d'inflexion) où il est infini jusqu'au point asymptotique où il est nul (sur la bissectrice des coordonnées).



Elle possède deux branches symétriques par rapport à l'origine.

Parcourue à vitesse constante, la clothoïde maintient constante la variation de l'accélération transversale, ce qui est très avantageux pour le confort des usagers.

La variation constante de la courbure de la clothoide correspond pour le conducteur à une rotation constante de son volant (valable pour R<1000 m ; pour de plus grands rayons, la trajectoire est de toute façon polygonale).

Expression mathématique de la Clothoïde :

Courbure K linéairement proportionnelle à la longueur curviligne L ;

$$K = \frac{1}{R} = C.L$$

Pour l'homogénéité de la formule, on pose : $\frac{1}{C} = A^2$

L'équation devient (équation fondamentale):

$$\boldsymbol{L.R = A^2}$$

En un point P considéré de la clothoide:

- R= rayon de courbure en ce point.
- L= longueur le long de la courbe entre l'origine et P.
- A= paramètre de la clothoïde.

A l'origine : $L = 0\ et\ R = \infty$

Dès l'origine, L augmente, R diminue, on a une spirale.

Le point J est un point asymptotique sur la bissectrice des axes de coordonnées :

$R = O\ et\ L = \infty$.

N.B :

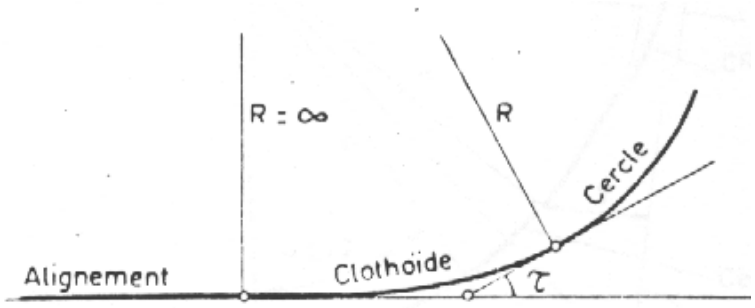
Chaque valeur du paramètre A défini une certaine clothoïde, autrement dit à chaque paramètre correspond une seule clothoïde. En faisant varier A, on obtient une famille de clothoïde homothétiques, soit géométriquement semblables entre elles.

Pratiquement les concepteurs utilisent fréquemment les valeurs ci-après :

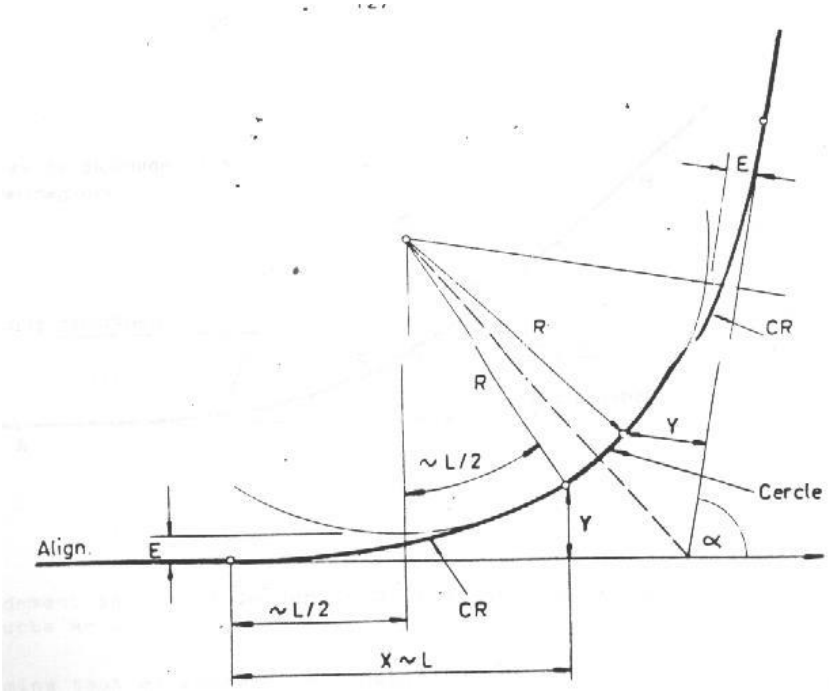
Catégorie	Hors catégorie Ou REFT	3eme	2eme	1ere	Exceptionnelle
Paramètre A	40	80	140	220	360

2.2.4. Formes de clothoïde appliquées au tracé en plan :

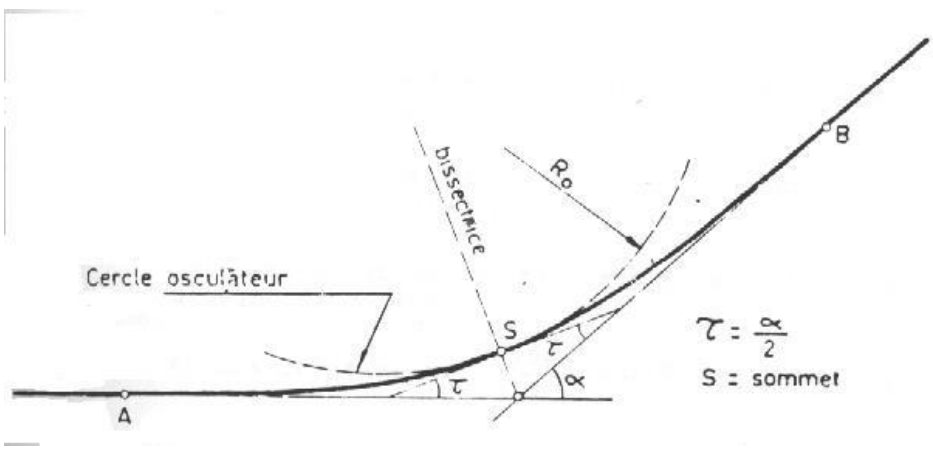
Cas élémentaire : Clothoïde raccordant un alignement à un arc de cercle.



i. Cas 1 : Deux alignements et un arc de cercle raccordés par deux branches de clothoïde :



Cas particuliers du précédent : Courbe à sommet

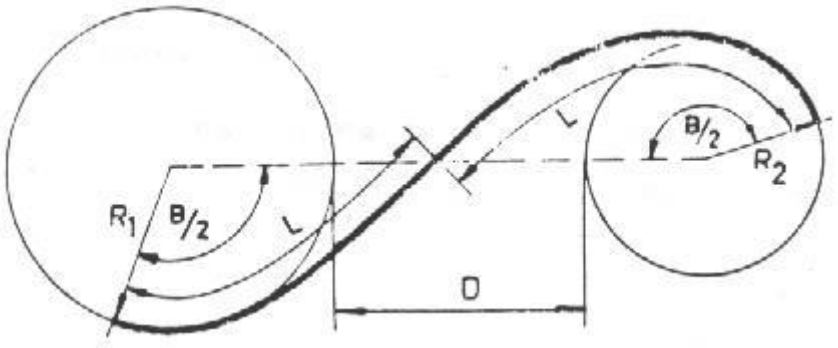


Les deux branches de clothoïde se rejoignent, avec une tangente commune au point de jonction (sommet), situé sur la bissectrice de l'angle entre les deux alignements. On obtient une clothoïde à sommet ou clothoïde de transition.

Les deux branches peuvent avoir le même paramètre ou deux paramètres différents, voisins l'un de l'autre.

ii. Cas 2 : Courbe en S :

C'est le cas de raccordement de deux arcs de sens contraires par un seul arc de clothoïde.

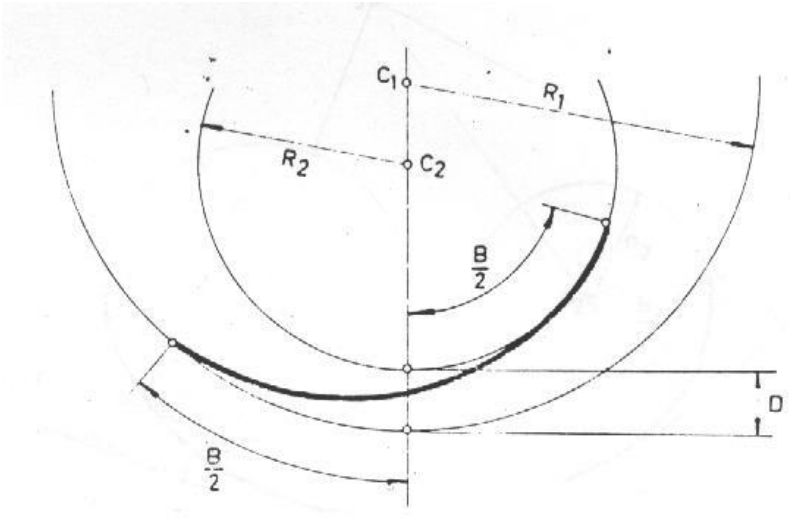


On élimine tout alignement intermédiaire (raisons d'ordre dynamique et esthétique).

On raccorde au moyen d'un seul arc de clothoïde avec un point d'inflexion.

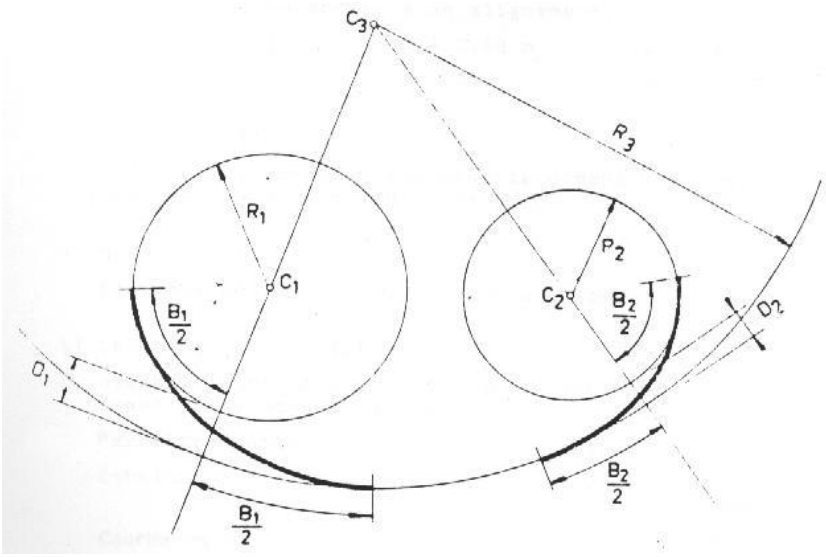
iii. Cas 3 : Raccordement de deux arcs de cercle de même sens par une courbe en ovale :

Cercles de rayons différents, de centres différents, l'un contenant l'autre.



iv. Cas 4 : Raccordement de deux arcs de cercle de même sens, les cercles étant extérieurs l'un à l'autre: courbe en C :

Il est nécessaire d'utiliser un cercle auxiliaire de rayon R3 contenant les deux autres cercles, après quoi on applique deux fois le cas 3 précédent. Ce cas peut rendre service lorsque l'on veut éviter le désagrément d'avoir un court alignement entre deux arcs de cercle de même sens.



2.3. Raccordement et devers :

2.3.1. Longueur de raccordement devers :

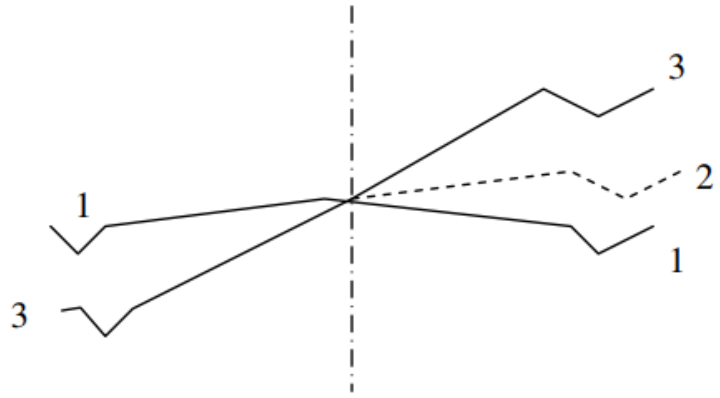
Dans les alignements droits les chaussées ont un profil en travers constitué :

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

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

Le raccordement s'effectue toujours en dehors de la courbe circulaire dont le devers est fixe, le raccordement s'effectue donc sur les alignements droits, sinon sur des courbes de raccordement à courbe progressives disposées de part et d'autre des courbes circulaires.

En général la côte de l'axe sera conservée et le profil pivotera autour de l'axe le long de la section du raccordement devers, jusqu'à ce que le versant extérieur attend la pente du versant intérieur, l'ensemble continue à pivoter autour de l'axe pour atteindre le dévers d.



Variation du devers :

Pour des raisons de confort le devers est introduit à raison de 2% par seconde de temps de parcours à la vitesse de base de la catégorie considérée.

Ce taux de variations peut être porté à 4% pour les routes de 3ème catégorie, H.C et REFT.

Donc pour le cas général d'une variation de 2%, on a :

1s → 2%

t → (d+2,5)%

Et donc : $t = \frac{d+2,5}{2}$

Et on sait que la longueur de la transition est : $L = v_b . t \quad avec\ v_b\ en\ m/s$

Donc :

$$L = \frac{v_b \times (d + 2,5)}{2}$$

Soit en fonction de Vb en Km/h :

$$L = \frac{V_b \times (d + 2,5)}{7,2}$$

Exemple numérique (variation du devers) :

Données :

- Catégorie : 2ème
- Rayon : **R** = 175 m
- Dévers : **d** = 7%
- Vitesse de base : **V**b=80 km/h

Calcul :

- Branche de clothoïde : **L** = **V**b**.** (**d** + 2,5)/7,2

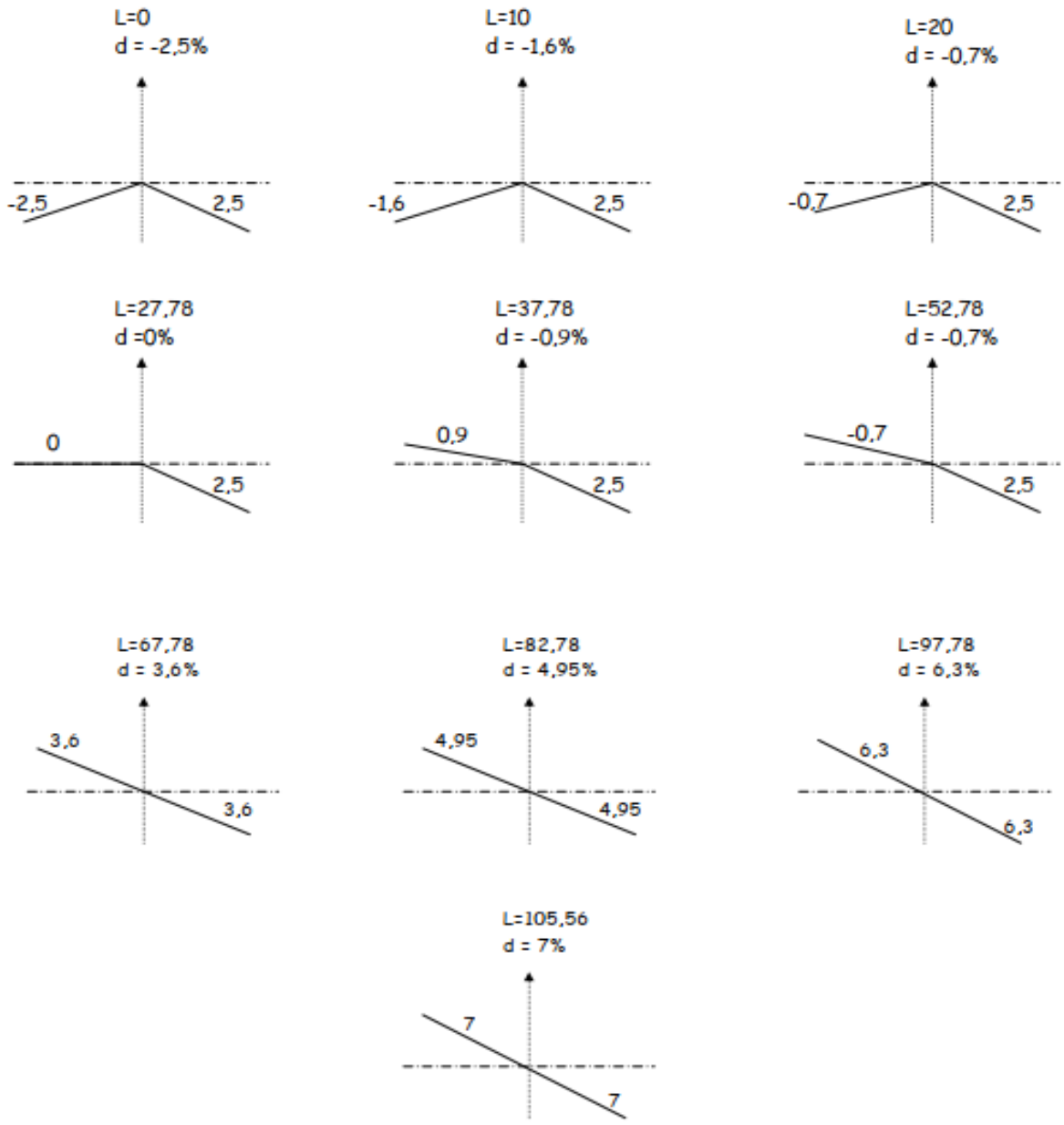
Vb = 80 km/h ; d = 7% ; alors : **L** = 105,56 m

Pour d = 0% ; L = 27.78 m.

Soit **: L** = 10+10+7,78+10+15+15+15+15+7,78 = 105,56 m

- Calcul du dévers : $d = \frac{7,2 \times L}{Vb} - 2,5$

Abscisse curviligne (m)	Dévers **d** en %	
	Gauche	Droit
0	-2,5	2,5
10	-1,6	2,5
20	-0,7	2,5
27,78	0	2,5
37,78	0.9	2,5
52,78	2,25	2,5
67,78	3,60	3,60
82,78	4,95	4,95
97,78	6,3	6,3
105,56	7	7



2.3.2. Règles selon les normes (ICGRRC et REFT) :

i. Règle 1 :

Sous certaines conditions, on peut conserver dans les virages le profil en travers en alignement. Ces conditions sont :

- Pour route de catégorie exceptionnelle et 1ère catégorie : $R > 2R_{mn}$
- Pour route de 2ème et 3ème catégorie : $R > 1{,}4R_{mn}$
- Pour les REFT : $R > 75m$.

ii. ***Règle 2 :***

Pour les routes de Catégorie Exceptionnelle, 1ère catégorie et 2ème catégorie, la section de raccordement devers sera obligatoirement une courbe de raccordement à courbe progressive sauf si : $R > 1{,}4R_{mn}$

iii. ***Règle 3 :***

- Pour les routes susceptibles d'être enneigées ou verglacées, le devers sera limité à 5 %.
- Pour les routes de 3ème catégorie, il ne sera utilisé de courbes progressives que lorsque ce sera nécessaire pour respecter les conditions de variation des dévers.

Valeurs des Devers en fonction de la catégorie de la route et du rayon de courbure (en mètre) :

C.Excep		1ère C		2ème C		3ème C	
R	%	R	%	R	%	R	%
700	7 %	350	7 %	175	7 %	75	7 %
750	6 %	375	6 %	200	5,5 %	80	6,5 %
800	5,5 %	400	5,5 %	225	4,5 %	90	6 %
850	5 %	425	5 %	250	4 %	100	5 %
900	4,5 %	450	4,5 %	275	3,5 %	110	4,5 %
950	4,5 %	475	4,5 %	300	3 %	120	4 %
1000	4 %	500	4 %	325	3 %	125	4 %
1050	3,5 %	525	3,5 %	350	2,5 %	130	4 %
1100	3,5 %	550	3,5 %	>350	P.N	140	3,5 %
1150	3,5 %	575	3,5 %			150	3 %
1200	3 %	600	3 %			160	3 %
1300	3 %	625	3 %			170	2,5 %
1350	2,5 %	650	3 %			175	2,5 %
1400	2,5 %	675	2,5 %			>175	P.N
2000		700 à 1000	2,5 %				
> 2000	P.N	> 1000	P.N				

NB: PN = Profil normal : + 2,50% et – 2,50%.

2.3.3. Valeurs Intermédiaires des devers :

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

- Catégorie exceptionnelle :

$$d = \frac{1}{0{,}00033.R - 0{,}092} - 0{,}2$$

- 1ère catégorie :

$$d = \frac{1}{0{,}00066.R - 0{,}092} - 0{,}2$$

- 2ème catégorie :

$$d = \frac{1}{0{,}00132.R - 0{,}092} - 0{,}2$$

- 3ème catégorie :

$$d = \frac{1}{0{,}00275.R - 0{,}092} - 0{,}2$$

- REFT :

$$d = \frac{90}{R} + 1\ ; pour\ 15 < R < 30$$

$$d = \frac{75}{R} + 1{,}5\ ; pour\ 30 < R < 75$$

2.4. Règles de continuité :

La sécurité dans la route dépend de la continuité de ses caractéristiques plus que son niveau d'aménagement.

Si $R < Rmn\ ou\ Rma$ ----------> Règles de continuité.

2.4.1. Sections de même catégorie :

i. Règle a:

- Le rayon d'une courbe R ne peut être inférieur au Rmn (ou Rma) que s'il est précédé, dans le sens de parcours, d'un rayon R1 tel que :

$$R1 < \frac{R \times R_{mn}}{R_{ma}}$$

- La distance entre les sommets de ces courbes doit être inférieure à celle correspondant à une minute de temps de parcours à la vitesse de base.

$$Distance\ entre\ sommets\ (m) < \frac{V(Km/h) \times 60}{3{,}6}$$

ii. Règle b:

Après un alignement droit d'une longueur correspondant à plus de 2 min de temps de parcours, le rayon d'une courbe doit être supérieur au Rma de la catégorie immédiatement supérieure (1500 m pour la catégorie exceptionnelle).

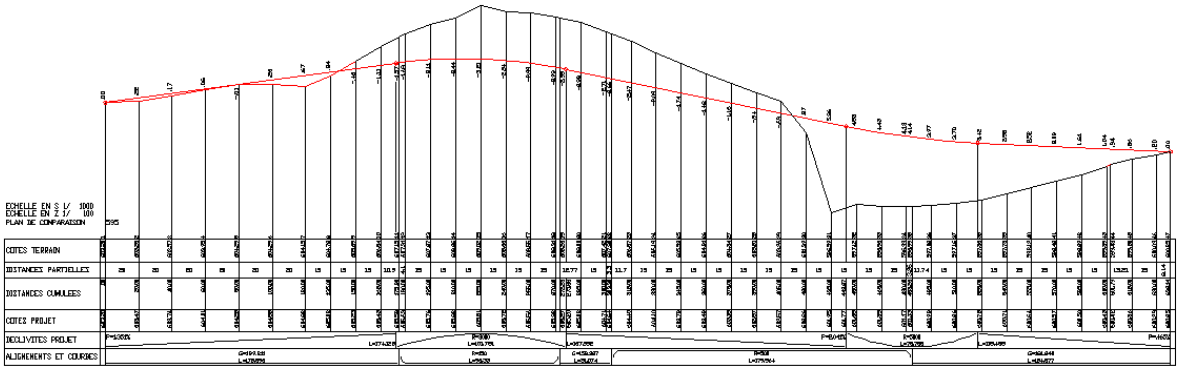
2.4.2. Sections de catégories différentes :

Lorsqu'un même itinéraire comporte des sections de catégories d'aménagement différentes, sans que celles-ci soient séparées par une agglomération importante :

- 2 sections contiguës ne peuvent appartenir qu'à des catégories immédiatement voisines, chacune ayant une longueur correspondant à au moins 5 minutes de temps de parcours à la vitesse de base.
- Une section de transition sera ménagée entre elles et étudiée avec un soin particulier. Cette section devra comporter au moins 2 virages de rayon égal au minimum absolu de la catégorie supérieure. Ces virages devront, pour l'usager venant de la section de la catégorie supérieure, respecter la « **règle a »** annoncée ci –avant. Ils seront espacés, au plus de la distance correspondant à 1 minute de temps de parcours à la vitesse de base de celle –ci.

3. PROFIL EN LONG :

3.1. Introduction :



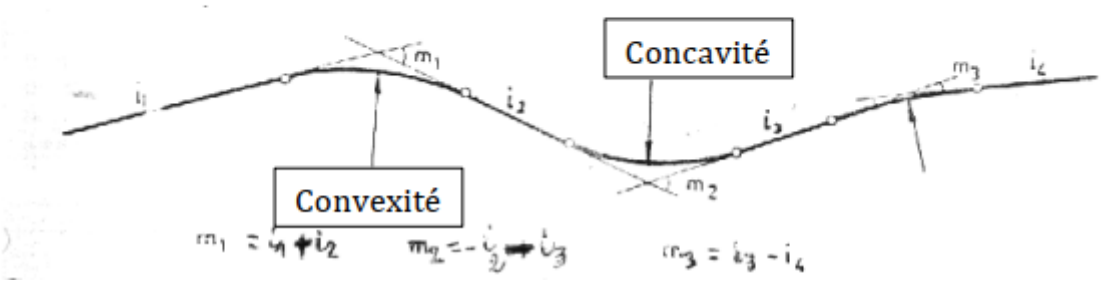
Le profil en long est constitué de :

- ❖ Lignes droites (déclivités).
- ❖ Arcs de cercle tangents aux droites, constituant les raccordements verticaux (convexes et concaves).

Les droites ascendantes dans le sens du kilométrage sont appelées « Rampes », les descendantes « Pentes ». Rampes et pentes constituent les déclivités, exprimées avec signe + pour les rampes, et pour les pentes avec signe -.

Ex Rampe + 5% = angle 3° (sur horiz.)
Pente - 5% = angle 3°

m = 10% 6°



3.2. Déclivités :

i. Déclivité minimum :

Les tronçons de route absolument horizontaux, dits « en palier » sont à éviter (si c'est possible), pour la raison de l'écoulement des eaux pluviales.

Déclivité minimum : $\boldsymbol{i_{min} = 0,5\ \%\ , de\ préférence\ 1\ \%}$

ii. Déclivité maximum :

V_B (Km/h)	40	60	80	100	120	140
I_{max} (%)	8	7	6	5	4	4

Tableau des déclivités maximales selon l'ICGRRC

3.3. Voie supplémentaire pour véhicule lent :

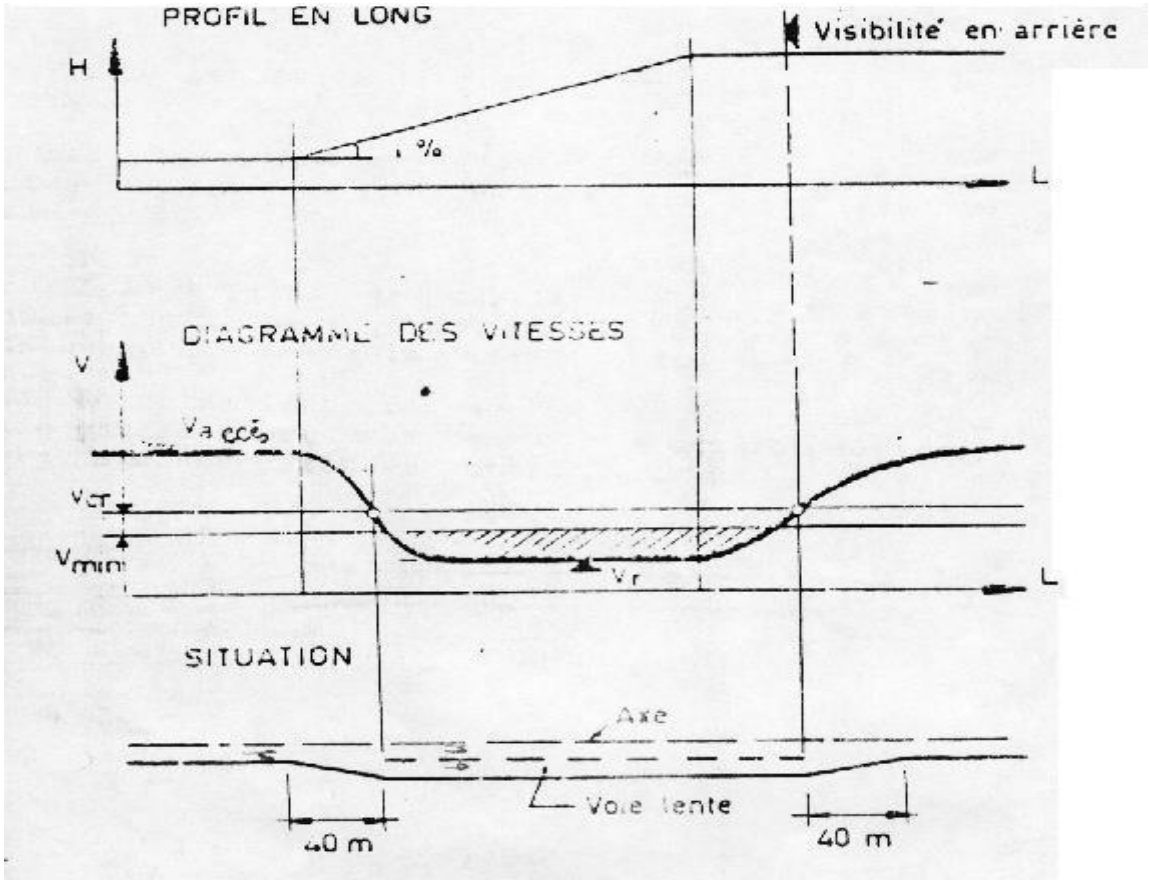
3.3.1. Voie lente :

Définition : Voie supplémentaire amenée dans une rampe, adjacente aux voies principales, destinée aux véhicules lents (camions, cars, VP avec remorque). Elle sert à maintenir sur la voie principale une vitesse rationnelle VCR. On a intérêt à éliminer les véhicules lents assez tôt pour ne pas freiner le trafic, d'où l'adoption de V_{cr} plus grand que V_{min}.

$$V_{cr} = Vmin + 10\ Km/h$$

La position de la voie lente se détermine au moyen des diagrammes de décélération, respectivement, d'accélération des PL, en tenant compte d'une vitesse d'accès au pied de la rampe. La voie lente commence à l'endroit où le camion qui ralentit atteint la vitesse critique et elle finit lorsque le camion a repris de la vitesse et va dépasser VCR.

Aux deux extrémités, la voie lente est munie de biseaux, dont la longueur correspond au parcours en 3 secondes, à la vitesse VCR, soit 30 – 40 m.

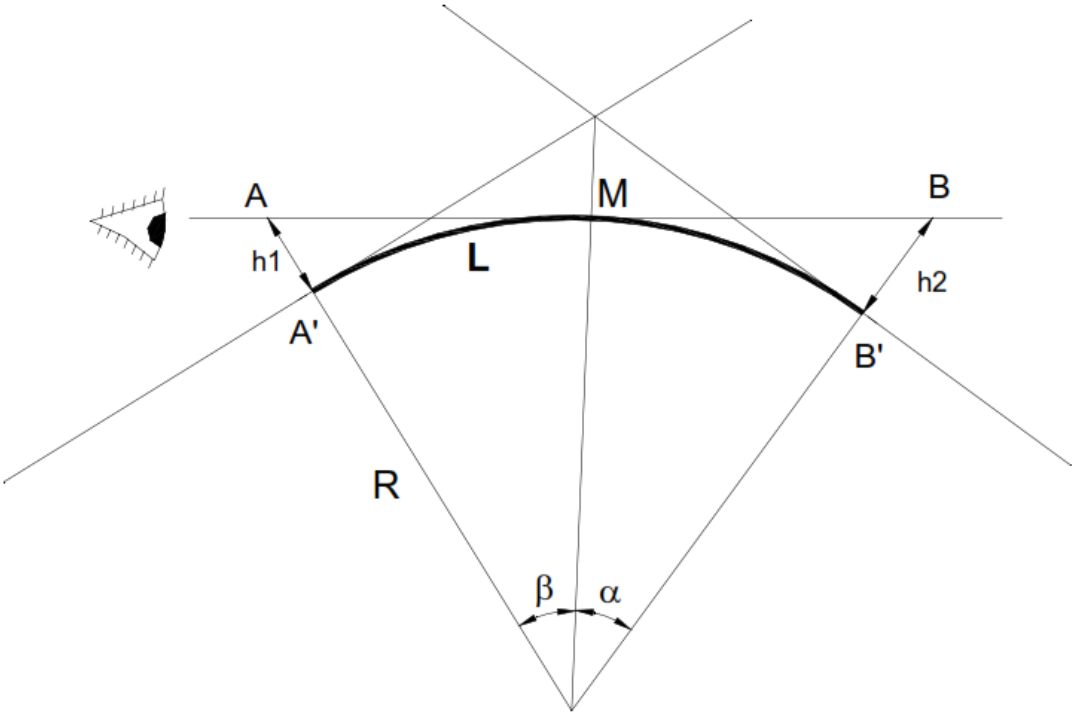


L'emploi d'une voie lente dépend des facteurs suivants :

- valeur de la rampe ;
- longueur de la rampe ;
- proportion des PL ;
- volume du trafic ;
- visibilité pour dépasser
- possibilité de construction (terrain, financement).

3.4. Les raccordements en profil en long :

3.4.1. En angle saillant :



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

$BM^2 = 2\, h_2\, R$

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

$$\Rightarrow R = \frac{Dv^2}{2\,(h1 + h2 + 2\sqrt{h1 \cdot h2})}$$

Pour h1=1.10m (hypothèse sur position du conducteur), les rayons de courbure de raccordements saillants sont donnés en fonction de la vitesse de base de la route, et de la hauteur d'obstacle h2 :

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

3.4.2. <u>En angle rentrant :</u>

Pour des raisons de confort, la valeur du rayon est fixée de manière à limiter l'accélération normale à g/30.

$$\gamma_N = \frac{V^2}{R} < \frac{g}{30} \qquad => \qquad R > \frac{30\,V^2}{g}$$

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

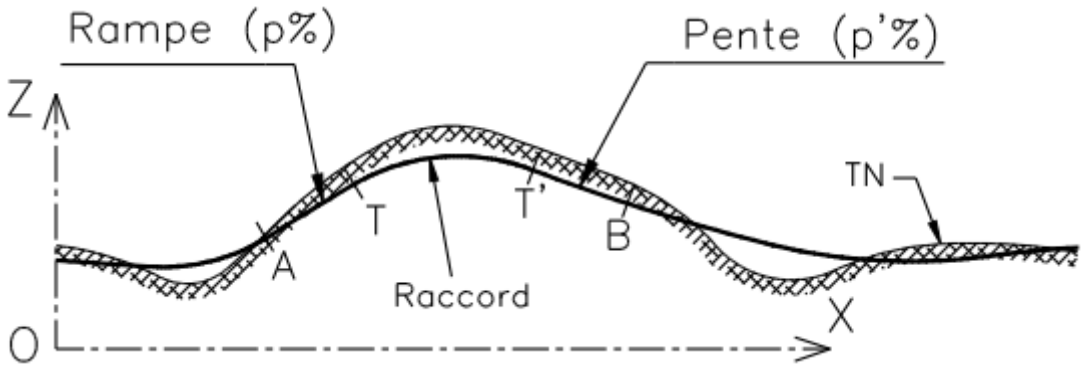
g : l'accélération = 9,81 m/s2

D'où :

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

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

<u>Raccordement théorique :</u>



La propriété que doit assurer la courbe de transition TT' permettant de passer de la rampe AT à la pente T' B est d'assurer un taux de changement de pente constant. Ainsi le passage de la pente p, positive par convention à la pente p' négative, sera le plus progressif possible.

Dans le repère (O, X, Z) associé au profil en long, on peut exprimer la pente par:

$$p = \frac{dZ}{dX}$$

La variation de pente est donc : $\frac{d^2Z}{dX^2}$, soit la dérivée seconde de l'altitude Z par rapport à l'abscisse X.

Si la variation de pente est constante, alors :

$$\frac{d^2Z}{dX^2} = K$$

Et donc :

$$Z = \frac{KX^2}{2} + K'X + K''$$

C'est l'équation d'une parabole d'axe de symétrie vertical qui est la courbe cherchée.

Implantation du raccordement en profil en long :

Implanter un raccordement en profil en long revient à positionner un point P quelconque de l'axe du projet dans le repère (O,X,Z) associé au profil en long étudié.

Remarques :

RI : Il ne peut être fait usage de raccordement saillant d'un R < RMN que si la déclivité de part et d'autre est en pente descendante en s'éloignant du sommet d'au moins 2%.

R2 : L'usage de déclivité > à 4% (6% pour 3ème Catégorie) est interdit, à moins qu'un calcul de rentabilité en prouve le bien fondé.

Elles ne peuvent en aucun cas régner sur plus de 2 Km, et seront, s'il y a lieu séparées par des paliers de 2% de déclivité max.

R3 : Les changements de déclivité Δq inférieures aux valeurs du tableau ci-dessous se feront sans courbe de raccordement.

Dans le cas d'angle saillant, Parfois ils comporteront des raccordements assurant la visibilité à la distance de visibilité de dépassement.

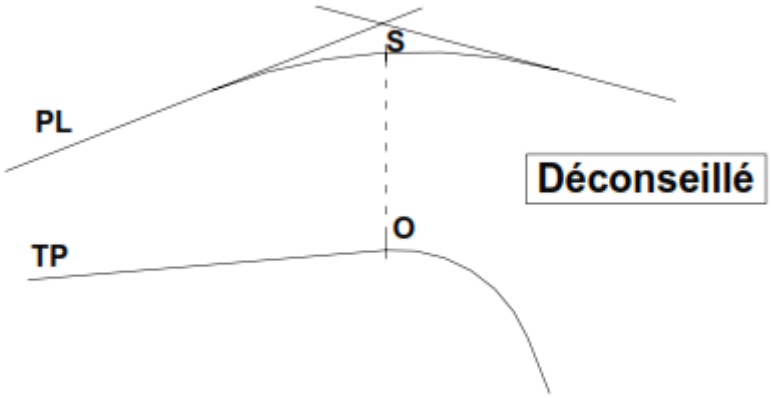
Catégorie	Except.	1ère C	2ème C	3ème C
Changement de déclivité limite Δq	3%	2%	1.5%	1%

R4 : On a une Perte de tracé lorsque l'usager perd de vue la route sur une certaine longueur et voit la section suivante (en TP et en PL).

Les pertes de tracé en alignement droit, et/ou donnant l'illusion d'un A.D (alignements droits séparés par des courbes masqués) sont interdites, à moins que la distance de visibilité en tout point soit > 500m.

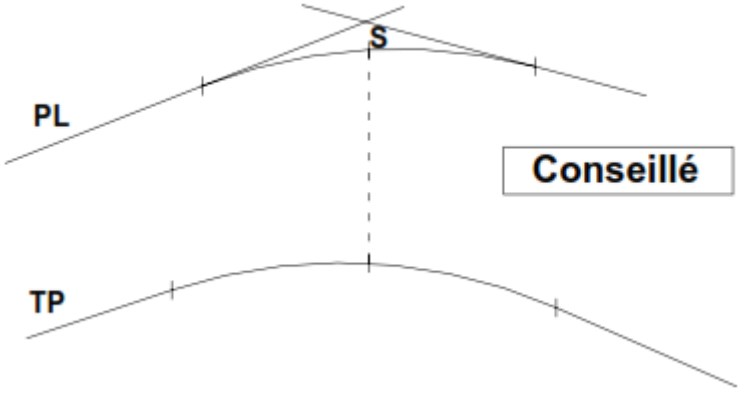
3.5. Coordination du Tracé en Plan et du Profil en Long :

En angle saillant, il ne faut pas coïncider le sommet de la parabole (PL) avec l'origine de la courbe en TP.



Il faut éviter que le virage soit masqué par le sommet de la parabole.

Donc soit on essaie de coïncider la courbe en plan avec celle du PL dans la mesure du possible.

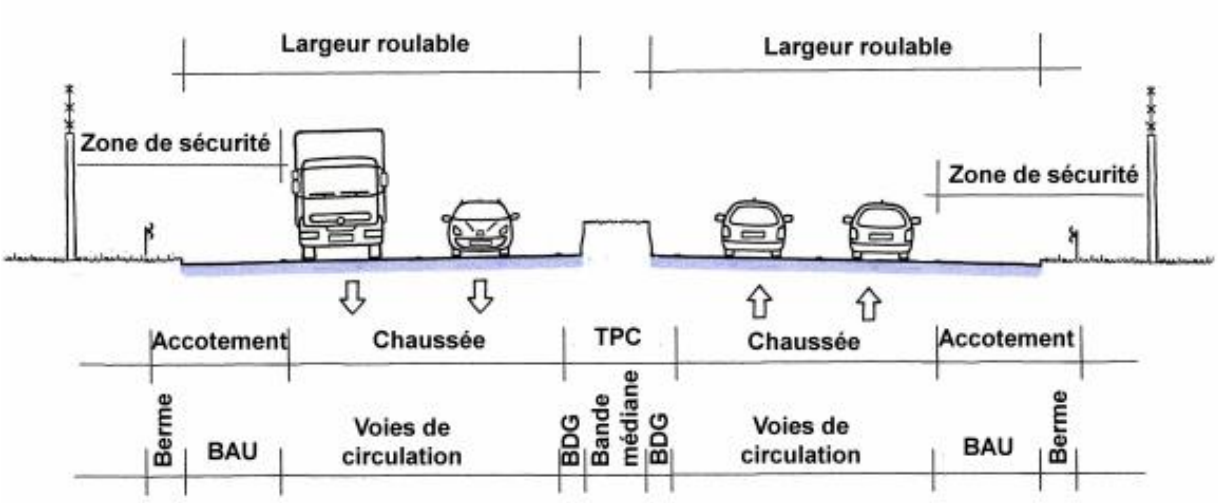


Soit on essaie d'introduire une Clothoïde pour changer l'origine de la courbe en TP.

4. Profil en travers :

4.1. Définition et généralités :

Le profil en travers est une coupe transversale de la chaussée et de ses dépendances, perpendiculaires à l'axe du projet.



Les profils en travers permettent de calculer les paramètres suivants :

- la position des points théoriques d'entrée en terre des terrassements ;
- l'assiette du projet et son emprise sur le terrain naturel ;
- les cubatures (volumes de déblais et de remblais).

Le profil en travers (figure ci-dessous) est représenté en vue de face pour une personne qui se déplacerait sur l'axe du projet de l'origine à l'extrémité du projet.

La voie de gauche doit donc se situer sur la partie gauche du profil.

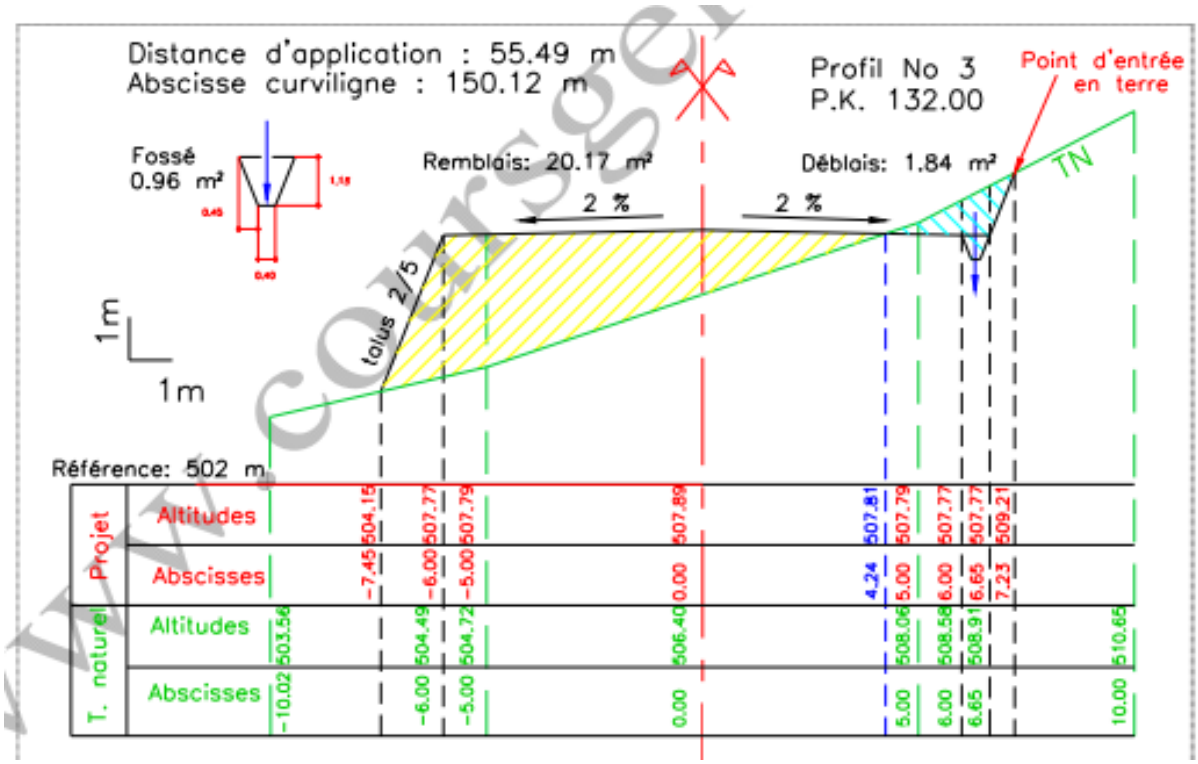
On commence par dessiner le terrain naturel à partir d'un plan horizontal de référence qui n'est pas forcément celui du profil en long, de manière à obtenir le profil en travers à l'échelle maximale sur le format choisi. L'échelle de représentation est de l'ordre de 1/100 à 1/200 (jusqu'à 1/50 pour les voies les moins larges).

Il n'y a pas d'échelle différente en abscisse et en ordonnée de manière à pouvoir mesurer directement sur le graphique des longueurs dans toutes les directions ou bien des surfaces.

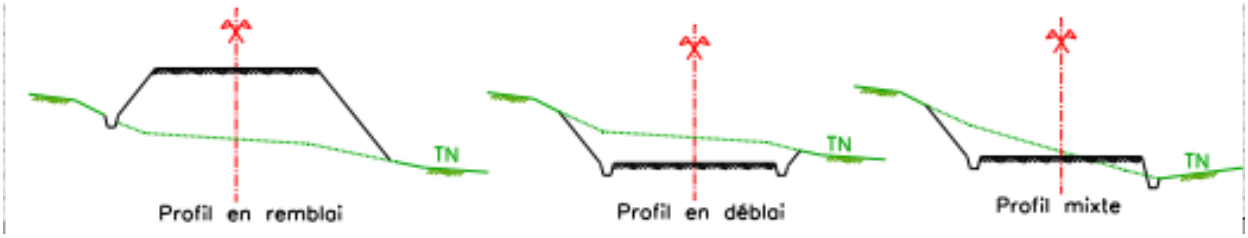
L’abscisse de chaque point du terrain naturel (ou du projet) est repérée par rapport à l’axe du profil en travers (donc négative à gauche et positive à droite), l’ordonnée est toujours l’altitude du point.

On y superpose ensuite le gabarit type du projet (largeur de chaussée, accotements, fossés et pentes de talus) à partir du point d’axe dont l’altitude a été déterminée sur le profil en long.

Cela permet de calculer la position des points d’entrée en terre.

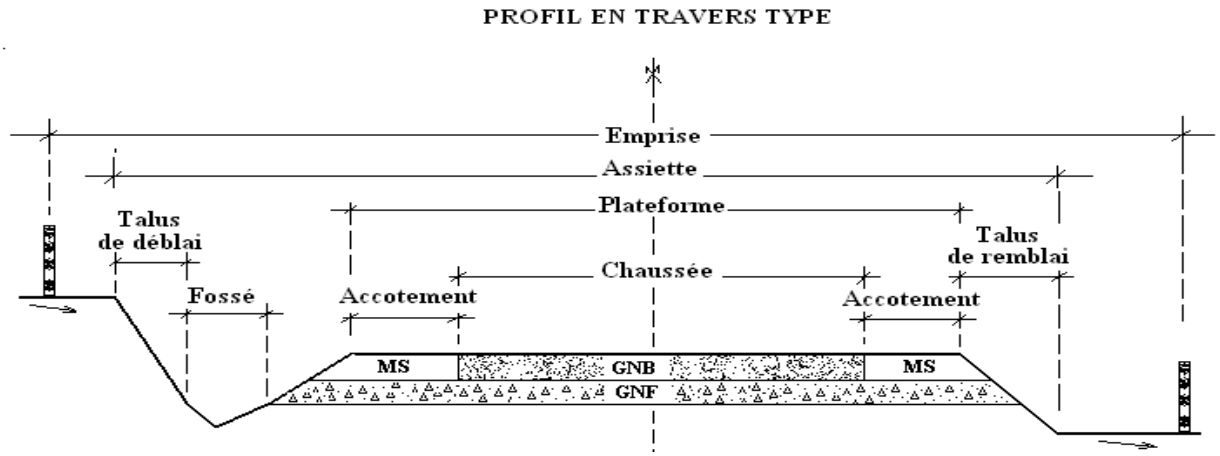


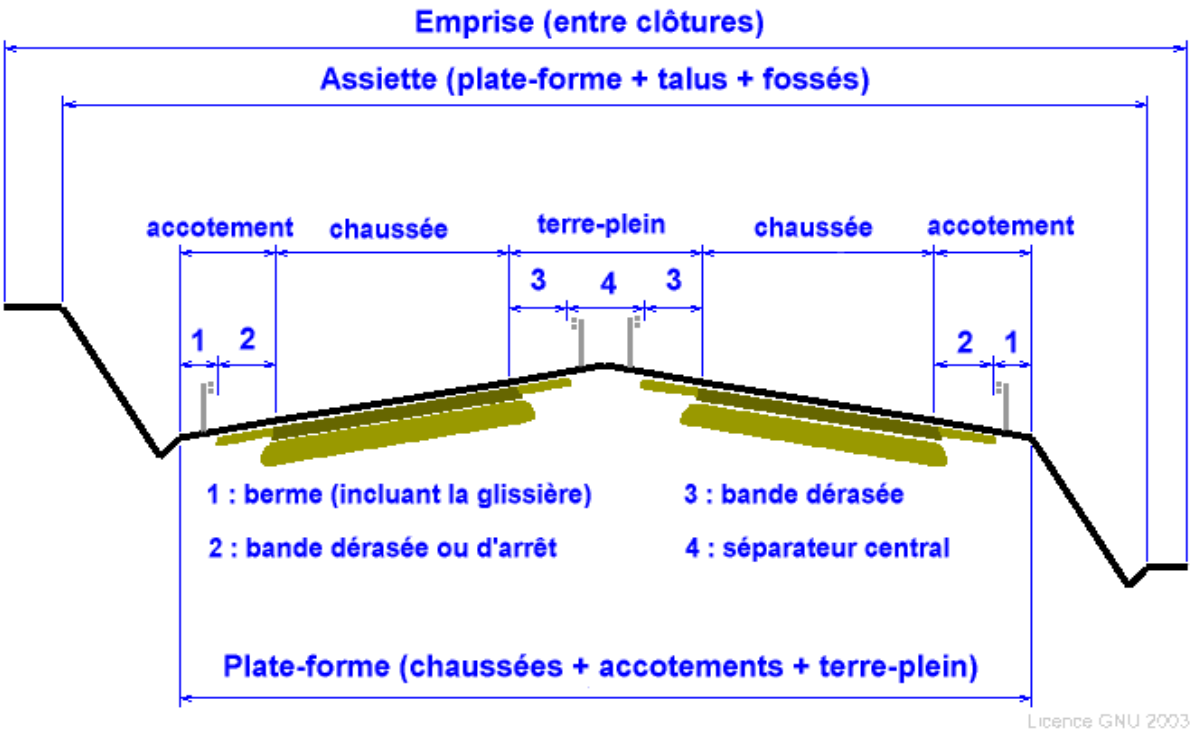
Il existe trois types de profils en travers (figure ci-dessous) : les profils en remblai, en déblai ou bien les profils mixtes.



www.coursgeni

La nomenclature des termes utilisés pour les profils en travers est donnée sur les figures ci-dessous :





Le profil en travers courant est une pièce de base dessinée dans les projets à une distances régulières (10, 15, 20, 25m, …) notamment selon la nature du terrain naturel (plat, vallonnée ou accidenté)

4.2. Largeur des chaussées :

Le nombre de voies de circulation est variable selon le volume de circulation projeté à terme et les niveaux de services attendus.

La largeur des voies est de 3,50 m pour les routes principales neuves en rase-campagne. Celle-ci peut néanmoins être réduite à 3 m en cas de contrainte de site et lorsque le volume de circulation est faible.

Sur les routes en relief difficile, la largeur peut être inférieure.

Dans les zones urbaines la largeur de chaussée peut être réduite à 4,00 mètres. Cette largeur suffit en effet au croisement de deux véhicules légers. Lorsque le croisement de poids lourd sur ces voies est récurrent une largeur de 5,50m est préférable.

Dans les courbes de rayon inférieur à 250 m, une sur largeur est préconisée dans les virages. Elle vaut normalement, par voie de circulation 50/R en mètres, R étant le rayon de courbure exprimé en mètres. Cette sur largeur peut être ramenée à 25/R pour les routes en relief difficile.

4.3. Accotements :

L'accotement comprend par définition : une bande dérasée dépourvue de tout obstacle bordée à l'extérieur d'une berme .

La bande dérasée comprend :

- une sur-largeur de chaussée, de structure identique à la chaussée elle-même, d'une largeur de 0,25 m généralement et qui porte le marquage de rive ;
- une partie stabilisée ou revêtue (pouvant supporter le passage occasionnel d'un poids lourd).

Les fonctions de la bande dérasée sont de :

- permettre la récupération d'un véhicule déviant de sa trajectoire ;
- permettre des manœuvres d'évitement ;
- permettre aux piétons ou cyclistes de circuler en sécurité ;
- permettre l'arrêt d'un véhicule ;
- faciliter les opérations d'entretien de la chaussée et des dépendances.

4.4. Pentes transversales :

Le profil de la chaussée est constitué par deux versants de plans raccordés sur l'axe, sauf pour les chaussées unidirectionnelles qui comportent un seul versant plan dirigé vers l'extérieur.

Les valeurs de la pente transversale dénommée dévers, pour les routes en rase-campagne, peuvent être récapitulées dans le tableau suivant :

Pentes transversales	**Chaussée**	**Bande dérasée**	**Berme**
En alignement et courbe non déversée	2,5 %	4 % (stabilisée) 2,5 % à 4 % (revêtue)	8 %
En courbe avec dévers < à 4 %	P < 4 %	4 % (stabilisée) 2,5 % à 4 % (revêtue)	8 %
En courbe avec dévers > 4 % (côté intérieur)	P > 4 %	P	8 %

CHAPITRE V

CUBATURES ET MOUVEMENT DES TERRES

1. Introduction :

La cubature des terrassements consiste à calculer les volumes de terre à enlever (déblais) et les volumes à apporter (Remblai), pour donner à la route une allure uniforme et homogène pour recevoir un cops de chaussée qui permettra aux véhicules de circuler en toute sécurité et sérénité.

On peut évaluer les volumes de terrassement à partir des :

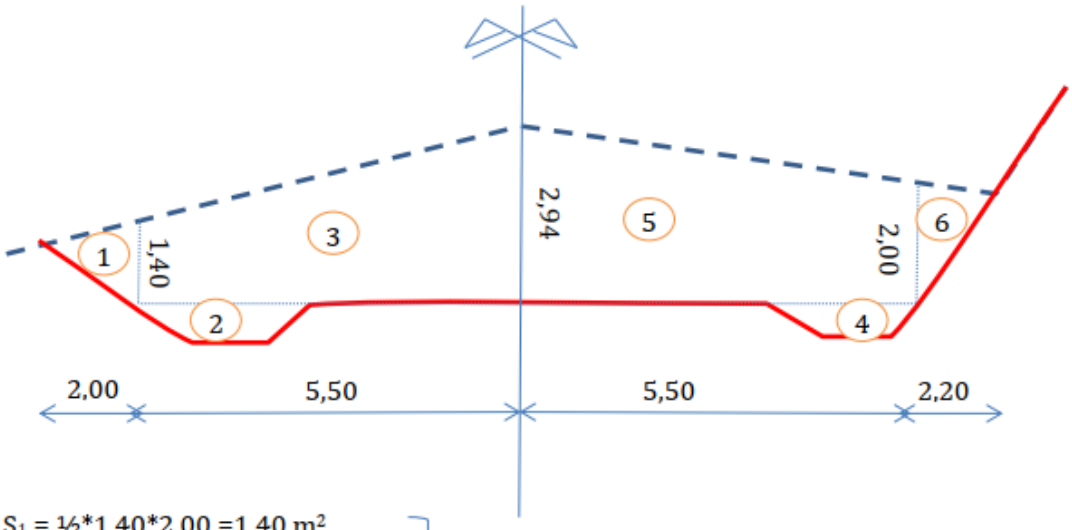
- Surfaces de remblai ou de déblais obtenus par le profil en travers.
- Distances entre profils en travers, indiquées sur le profil en long.

2. Calcul des Surface des profils en travers :

Le profil en travers permet le calcul de la surface comprise entre la ligne de projet et la ligne du terrain naturel.

Pour cela, mis à part les fossés qu'ayant généralement une section constante d'un profil à l'autre, on divise la surface à calculer par des lignes verticales aux surface élémentaires (rectangle triangle ou trapèze).

Exemple de calcul de Surface :



$S_1 = ½*1,40*2,00 = 1,40\ m^2$

$S_2 = 0,50\ m^2$ 'section constant'

$S_3 = (2,95+1,.40)/2*5,50 = 11,96\ m$

$S_4 = 0,50\ m^2$ 'section constant'

$S_5 = (2,95+2,00)/2*5,50 = 13,61\ m^2$

$S_6 = ½*2,20*2,00 = 2,20\ m^2$

$\Rightarrow Surface\ Totale\ du\ profil = 30,175 m^2$

3. Calcul des volumes de terrassement :

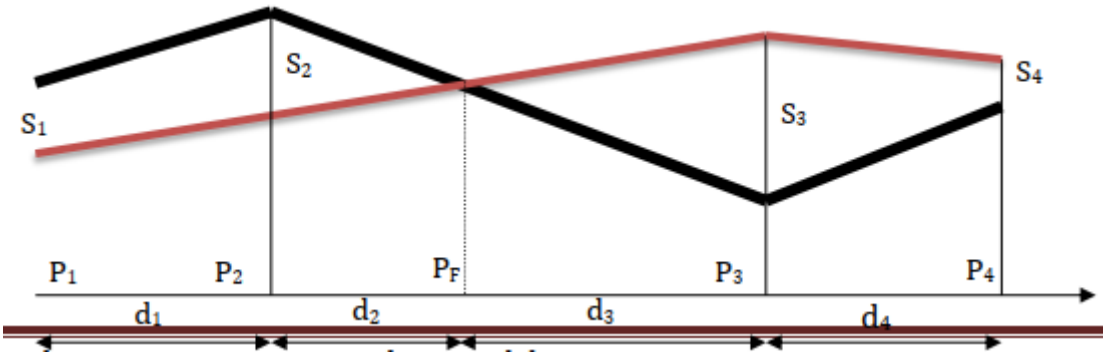
3.1. ***Application dans les projets routiers :***

Les hypothèses à prendre en considérations sont :

- Le calcul des volumes s'effectue dans le sens de parcours du projet.
- Le terrain est supposé régulier entre 2 profils.
- Plus le nombre des profils en travers soit grand, meilleure sera la précision de calcul des terrassements.

Soit par exemple une partie de terrassement comprise entre les profils en travers P1 et P2 ayant une distance entre eux d1 et Si on suppose que la variation de surface est linéaire.

C'est-à-dire : $S' = \frac{S1+S2}{2}$



Le volume entre P1 et P2 vaut alors :

$$V1 = \frac{d1}{2}(S1 + S2)$$

De même pour les autres parties :

$V_2 = \frac{d_2}{2}(S_2 + S_3)$ entre profil P2 et P3

$V_3 = \frac{d_3}{2}(S_3 + S_4)$ entre profil P3 et P4

.

.

.

.

$V_{n-1} = \frac{d_{n-1}}{2}(S_{n-1} + S_n)$ entre profil P_{n-1} et Pn

Le volume total V vaut alors :

$$V = \sum_1^{n-1} V_i = \frac{d_1}{2} \times (S_1 + S_2) + \frac{d_2}{2} \times (S_2 + S_3) + \frac{d_3}{2} \times (S_3 + S_4) + \cdots + \frac{d_{n-1}}{2} \times (S_{n-1} + S_n)$$

$$= \frac{d_1}{2} \times S_1 + \left(\frac{d_1+d_2}{2}\right) \times S_2 + \left(\frac{d_2+d_3}{2}\right) \times S_3 + \cdots \left(\frac{d_{n-2}+d_{n-1}}{2}\right) \times S_{n-1} + \frac{d_{n-1}}{2} \times S_n$$

La distance ($\frac{d_{i-1}}{2} + \frac{d_i}{2}$) est appelée « longueur d'application ».

Les résultats seront présenté sur un tableau appelé « tableau du métré des terrassements »:

Tableau du métré des terrassements						
N° des profils	**Distance entre profils (m)**	**Longueur d'application (m)**	**Déblai**		**Remblai**	
			Surface (m^2)	**Volume (m^3)**	**Surface (m^2)**	**Volume (m^3)**
1	27,00	13,50	10,69	144,31	5,59	75,47
2	43,00	35,00	14,80	518,00	2,25	78,75
3	14,10	28,55	3691	1033,78	/	/
PF1	10,9	12,50	/	/	/	/
4	30,00	20,50	/	/	28,00	572,60
5	32,00	31,00	2,30	71,30	13,60	421,60
6		16,00	/	/	22,50	360,00
Total	**157,00**	**157,00**		**1787,39**		**1508,42**

D'après ce tableau on peut conclure qu'il y a un excès de déblai.

3.2. Foisonnement et tassement :

Tous les terrains s'augmente en volume lors de leurs extractions, on dit qu'ils foisonnent.

Lorsqu'on les mit en remblais et les compactés, ils tassent.

Le volume des terrains des déblais foisonnés :

$$V_{DF} = V_D + V_D \times C_f$$

Le volume des terrains des remblais tassés :

$$V_{RT} = V_R - V_R \times C_t$$

Avec :

- Cf : coefficient de foisonnement
- Ct : coefficient de Tassement

Le maitre d'œuvre et le maitre de l'ouvrage ne s'attachent pas à ces coefficients car ce qui les intéresse est le volume initial de déblai à extraire et le volume final remblais a mis en place, par contre les entreprises de réalisation qui transporte les matériaux s'intéressent à ces coefficients pour déterminer ces prises et ces cadences.

A titre indicatif les valeurs de coefficient Cf et Ct sont aux moyennes suivantes :

Nature du terrain	C_f	C_t
Terre végétale et sable	10% à 15%	08% à 12%
Gravier	15% à 20%	12% à 15%
Terre argileuse	25% à 30%	17% à 19%
Les argiles	30% à 35 %	19% à 21 %
La marne	35% à 40%	21% à 33%
Argile marneuse très compacte	40% à 55%	23% à 30%
Les éboulis d'oued	30% à 40%	17% à 18%
Tout venant d'oued	40% à 65%	10% à 15%

4. Mouvement des terres :

4.1. Généralité :

Le transport des terres représente une part importante des travaux à effectuer sur un projet routier (40 à 50% du prix total) : une étude soignée doit être réalisée lors des phases de soumission des prix du marché, de préparation du projet, d'exécution des travaux.

Les mouvements des terres a pour objet :

- La compensation déblais/remblai sur le long du projet ;
- L'évacuation des déblais excédentaires aux dépôts ;
- Emprunt des matériaux sur chantier pour remblaiement lorsqu'il y a un manque ;

- Recherche de la distance moyenne de transport la plus courte possible ;
- Exclure le transport en sens contraire qui se croisent ;
- Choix de matériels de transports de terrassement (Motor Scraper, chargeur camions…)
- Calcul du coût réel de terrassement
- Permet d'évaluer les rendements nécessaires en fonction de la durée prévue du chantier.
- Permet de choisir le matériel adapté au matériau, aux rendements, aux distances de transport.
- Permet d'établir le planning général des travaux pour l'ensemble du chantier.

4.2. Transport des terres :

4.2.1. Transports transversaux :

Dans les profils mixtes, on commence d'utiliser au maximum les déblais à la construction des remblais, on fait ces transports perpendiculairement à l'axe de la route

Ces distances sont, généralement courtes et n'interviennent pas dans la distance moyenne de transport.

4.2.2. Les transports longitudinaux :

On ne fait les transports longitudinaux qu'après avoir fait les transports transversaux. La recherche de ces transports les plus économiques est effectuée par une méthode graphique.

4.3. Epure de Lalanne :

4.3.1. Description :

L'épure de Lalanne est un graphique inventé par l'ingénieur Léon Lalanne1 au XIXe siècle.

Elle sert à optimiser le profil en long pour la construction d'une route et ainsi minimiser la distance de transport moyenne des terres pour les opérations de terrassement qui vont suivre.

Il permet :

- D'équilibrer des déblais et remblais longitudinalement,
- de trouver rapidement un mouvement des terres ayant la distance de transport moyenne minimum.
- de minimiser les coûts de transport.

4.3.2. distance moyenne de transport :

Les dépenses de transport augmente avec le volume à transportés et la distance parcourus, elles sont proportionnelles au produit de distance par volume appelé Moment de Transport Vi x di.

Soit V1, V2, V3, …, Vn les volumes transportés aux distances d1, d2, d3,…, dn,

Le volume total sera : $V = \sum_{i=1}^{n} Vi$

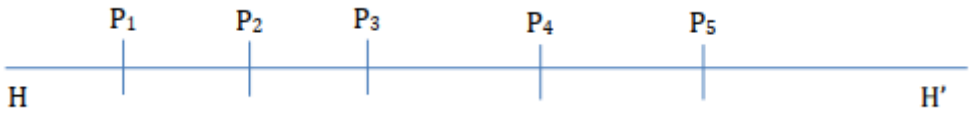
Alors la distance moyenne de transport dm sera :

$$d = \frac{1}{V}(V_1 \times d_1 + V_2 \times d_2 + \cdots + V_n \times d_n \Rightarrow d = \frac{\sum V_i d_i}{\sum V_i}$$

4.4. ***Etablissement de l'épure de Lalanne :***

L'épure de Lalanne est un moyen de représentation graphique des terrassements effectués, il s'établit de façon suivante :

- On porte sur une droite, dite ligne de terre HH', ou ligne initiale, les distances entre centres de gravité(les positions des profils en travers).
- Perpendiculairement à cette ligne, on trace les cubes des déblais et des remblais lus dans le tableau du mouvement des terres.
- On choisit pour cela une échelle des cubes (par exemple centimètre pour 20 m3 ou pour 50 m3 ou encore pour 100 m3.



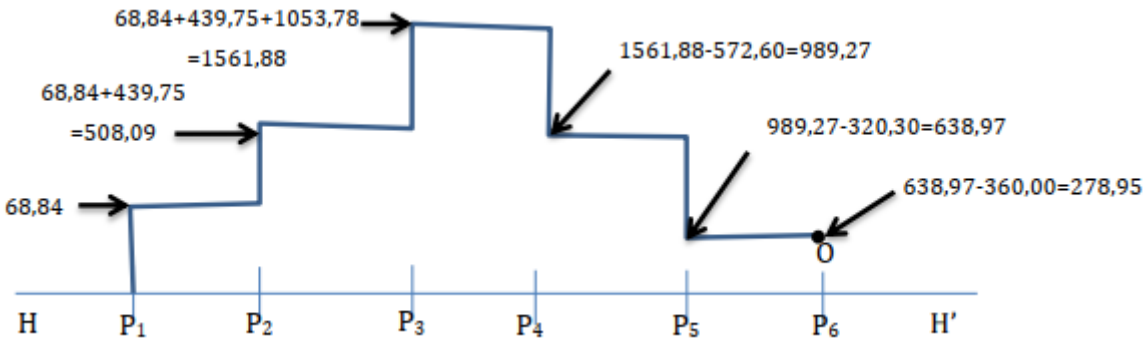
On porte :

- les déblais de bas en haut
- les remblais de haut en bas

En sautant d'un centre de gravité à l'autre par un échelon horizontal.

Exemple :

N° des profils	Longueur d'application (m)	Volume (m^3) Déblai	Volume (m^3) Remblai	Excès de déblais	Excès de Remblai
1		144,31	75,47	68,84	/
	27,00				
2		518,00	78,75	439,75	/
	43,00				
3		1053,78	/	1053,78	/
	25,00				
4		/	572,60	/	572,60
	30,00				
5		71,30	421,60	/	320,30
	32,00				
6		/	360,00	/	360,00
Total		**1787,39**	**1508,42**	**1561,88**	**1282,90**



Si l'extrémité du cube du dernier profil se trouve :

- sur la ligne de terre : Le cube des déblais = le cube des remblais.
- au-dessus de la ligne de terre : Le cube des déblais est supérieur au cube des remblais. Il faudra mettre l'excédent en dépôt.
- au- dessous s de la ligne de terre : Le cube des déblais est inférieur au cube des remblais. Il faudra faire un ou plusieurs emprunts.

La distance entre la ligne de terre et l'extrémité de l'épure doit être, à l'échelle des cubes, égale à la différence des déblais et des remblais.

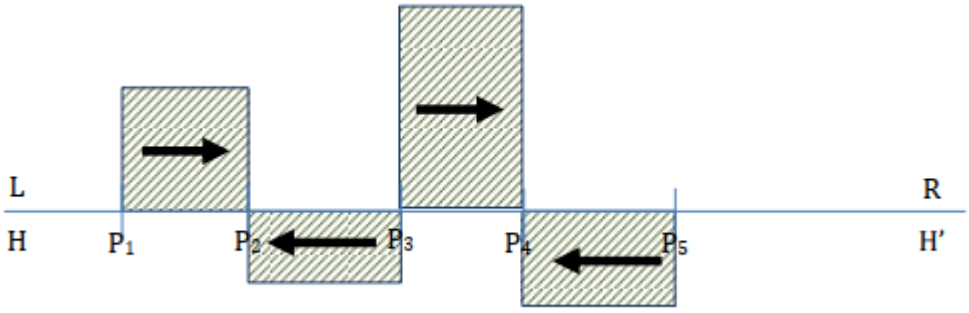
4.5. Ligne de répartition des transports :

Sur l'épure, les cubes des déblais, représentés par des segments verticaux ascendants, seront transportés aux remblais, représentés par les segments verticaux descendants qui leur font face.

Ou obtient ainsi des rectangles qui représentent les transports.

On cherche une ligne de répartition des transports, définit par une ligne horizontale « LR », qui peut être différent de la ligne HH' pour organiser les transports en faisant en sorte que la somme des surfaces des rectangles soit la plus petite possible.

- La surface de chaque rectangle (cube X distance) représente donc le moment de transport du cube correspondant au côté vertical du rectangle.
- Les transports se font :
  - évidemment dans le sens déblais vers remblais.
  - de gauche à droite au-dessus de la ligne de répartition.
  - de droite à gauche au-dessous de la ligne de répartition.



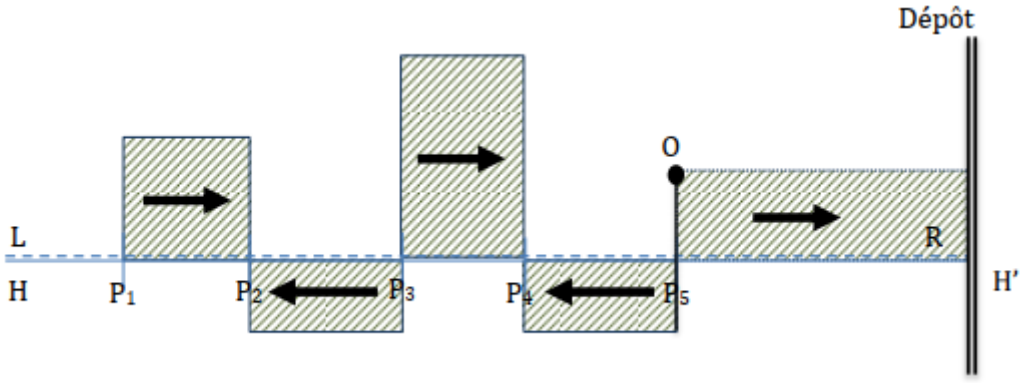
4.6. *Différents cas envisagés pour la position de la ligne LR :*

4.6.1. 1ère Cas: Déblais et Remblais compensés :

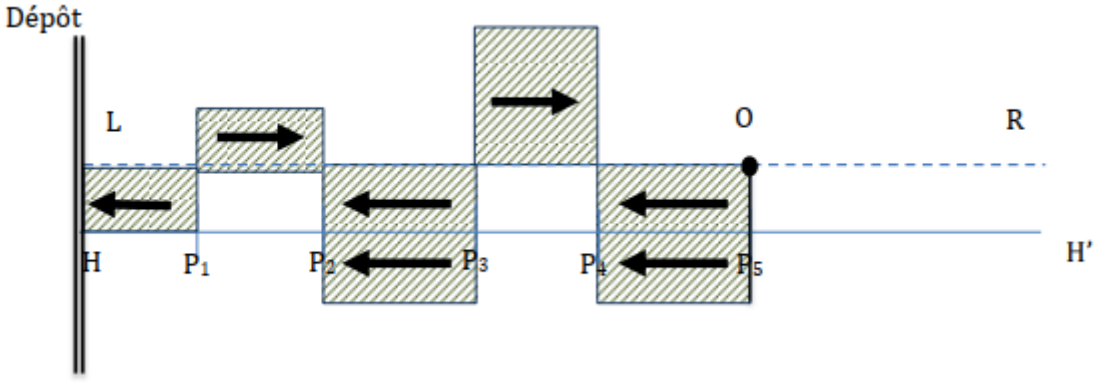
Cas exceptionnel qui permet de comprendre la solution des autres cas.

Le point final « O » est sur la ligne de terre initiale HH'.

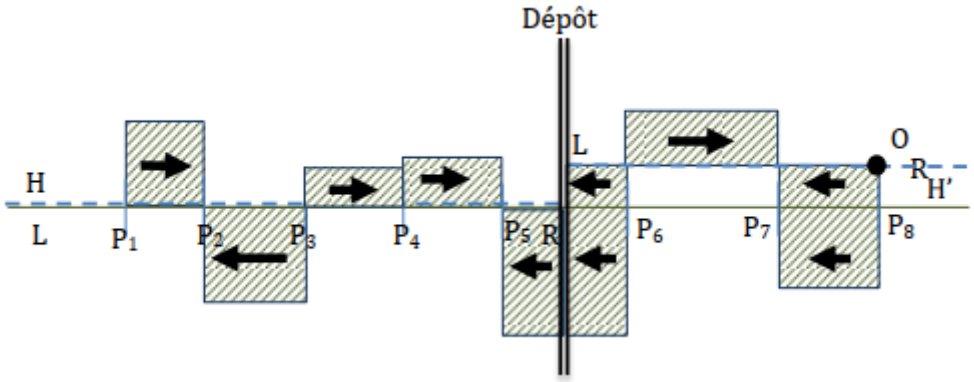
4.6.2. Un dépôt de déblai placé à droite de l'épure :



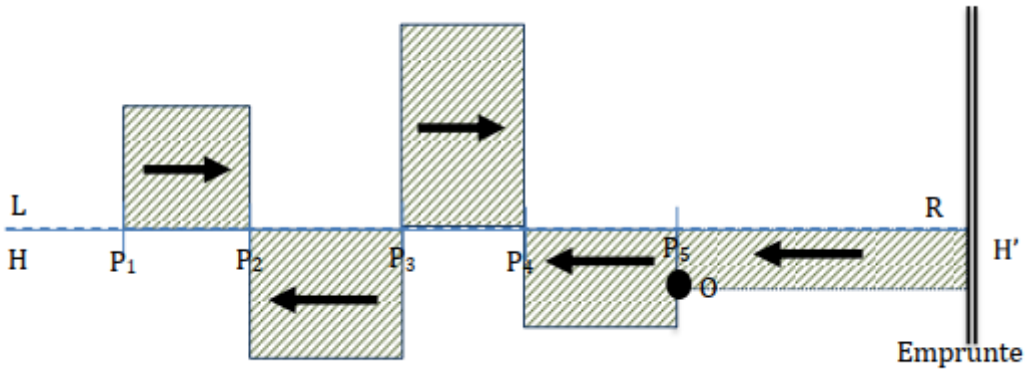
4.6.3. Un dépôt de déblai placé à gauche de l'épure :



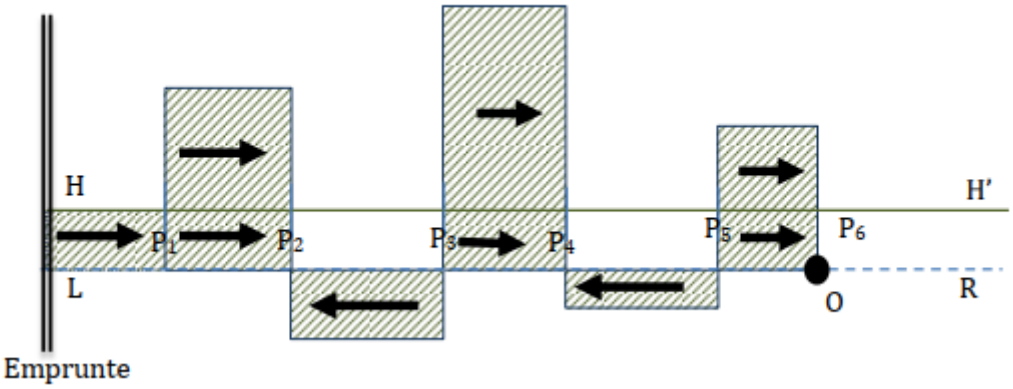
4.6.4. Un dépôt de déblai placé à l'intérieur de l'épure :



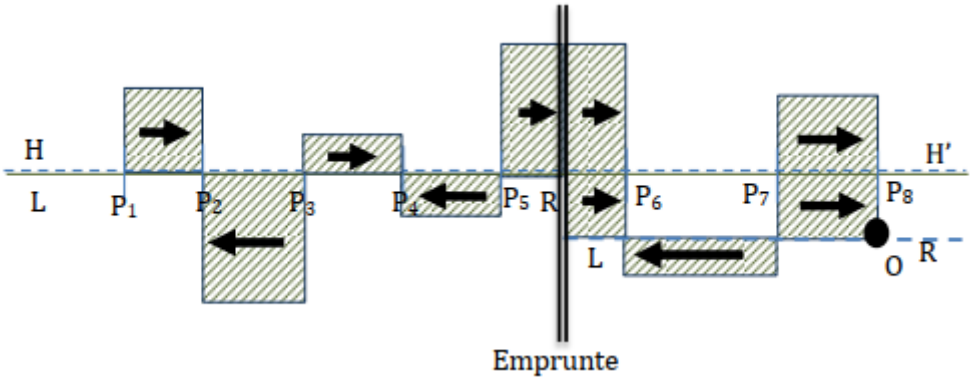
4.6.5. Un emprunt unique de remblai à droite de l'épure :



4.6.6. Un emprunt unique de remblai à gauche de l'épure :



4.6.7. Un emprunt unique de remblai à l'intérieur de l'épure :



Exercice :

- Etablir le tableau du mouvement des terres en utilisant les données du tableau suivant sachant que Le dépôt se trouve à droite de l'épure à une distance de 80 m de profil N°9 :

N° des profils	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Distance entre profils (m)	30	50	40	15	45	35	15	27	
Volume des déblais (m³)	/	/	20	46	84	52	42	34	23
Volume des remblais (m³)	40	60	45	18	/	/	16	22	30

- Calculer la distance moyenne minimale de transport.