

Université Mohamed Boudiaf
Faculté des Sciences de la technologie Département Génie civil

Cours de route03

Docteur. Menasri .A 2023-2024

Chapitre 3 : LE PROJET ROUTIER

IV-1- RECHERCHE DU TRACE

IV-1-1 – Introduction

Le tracé d'une route, d'une voie ferrée, d'un canal, ou selon un terme général, le tracé d'un projet linéaire est caractérisé par :

- son tracé en plan (parties droites et courbes)
- son profil en long (déclivités plus ou moins fortes)
- son profil en travers (pour le calcul des volumes)

Le plan et le profil en long doivent être prévus pour donner à la circulation la sécurité, le confort et la rapidité désirable, tout en maintenant les dépenses du projet dans des limites raisonnables. Ces conditions sont en général difficilement compatibles, et l'on cherchera un compromis, acceptable compte tenu du caractère important de la voie à construire. Bien entendu, la route doit répondre à un besoin, qui aurait été déterminé notamment par des études de trafic, et la dépense à engager devra être rentable, c'est à dire produire des améliorations chiffrables de la circulation par une économie de km ou de temps ou par une diminution des accidents.

IV-1-2 – Principes généraux

D'une façon générale, il faudrait essayer de concilier deux points de vue différents, celui du service constructeur et celui de l'utilisateur futur.

Le service constructeur recherchera :

- La plus petite dépense de construction, obtenue par un tracé court en réduisant les déblais et les remblais, les ouvrages d'arts (pont, murs de soulèvement etc...) et en évitant les expropriations des parties coûteuses telles que bâtiments et cultures de haute valeur.

- La plus petite dépense d'entretien ultérieur, obtenue par un tracé court, par l'établissement de la route sur un bon sous-sol (sans parties argileuses ou humides), par la suppression des points singuliers ou l'entretien de la route sera délicat (courbes de petit rayon, fortes déclivités).

Il faut noter que dans certains cas, au prix d'un léger supplément de dépenses pour le premier établissement on pourrait diminuer notablement les dépenses d'entretien, ce qui serait en fin de compte avantageux.

Quant à l'usager, il désirera qu'on lui offre :

- La plus petite dépense pour le transport qu'on obtiendra par un trajet court, des déclivités faibles, des courbes à grand rayon, (pour éviter les ralentissements) et l'atténuation des successions de pentes celles-ci provoquant des dépenses d'énergie.

L'usager cherche en effet l'économie de temps et de carburant.

- La sécurité et la commodité de la circulation, obtenue par une route large, une grande visibilité en tous les points du tracé, la suppression de tous les croisements à niveaux avec les voies ferrées, et les carrefours biens dégagés au croisement des voies importantes.

- Accessoirement enfin, l'agrément du voyage pour le tourisme.

Ces deux points de vue ne doivent pas être considérés comme opposés et le service constructeur doit se placer au point de vue de l'intérêt général pour la détermination des caractéristiques de son projet.

Une voie de communication bien dessinée, bien construite, facilite les déplacements des personnes et les échanges des marchandises, c'est un enrichissement du pays et quand on étudie l'aspect économique d'un travail routier capital, on s'aperçoit qu'il offre une rentabilité élevée.

Il ne s'agit donc pas de rechercher à réduire la dépense à l'excès sinon, on n'arriverait à offrir aux véhicules qu'une mauvaise piste pierreuse.

Le projeteur devra faire preuve de talent pour satisfaire ces différents principes qu'il devra avoir présents à l'esprit lors de l'étude générale du tracé. Il devra avoir la notion de l'intérêt public général, des intérêts des contribuables ainsi que ceux des usagers futurs de l'ouvrage qu'il projette.

IV-1-3 – Etude sur la carte

On procède tout d'abord à l'étude de l'axe de la route sur les cartes à petites échelles (1/200 000 ou 1/50 000 par exemple), s'il s'agit d'un tracé assez long (au moins 10 km).

On doit faire entrer en ligne de compte :

- Les considérations de géographie politique : villes à relier par l'itinéraire ;

- Les considérations de géographie physique : massifs montagneux à traverser ou à contourner, cours d'eau à traverser ou à suivre.

- Les considérations de géographie économique : localités dont les habitants seront les usagers de la route, industries à desservir (usines, carrières, mines) dont la route assurera l'écoulement des produits, points de commerces importants (foires, marchés)

- Les considérations géologiques : On évitera les parties humides, les fonds de vallée, partie marécageuse, les points de formation des brouillards, les couloirs d'avalanche, les

parties soumises en montagnes aux chutes de pierres, ainsi que quand on a le choix, les parties rocheuses qui conduiraient à des terrassements coûteux ;

On pourra avoir à déterminer la région possible le franchissement d'un ravin escarpé ou d'un autre point particulier.

- Les considérations stratégiques imposées par les autorités militaires lorsqu'elles sont appelées à donner leur avis sur le tracé ;

- Les considérations touristiques et esthétiques : mise en valeur des sites touristiques tel que les sites naturels et monuments historiques.

On arrivera ainsi à déterminer un certain nombre de points de passage obligés du tracé ou au contraire, les régions à éviter, ce qui fractionnera le projet en plusieurs tronçons assez courts, plus faciles à étudier en détail. Tout ce travail se conduira à la fois au bureau et sur le terrain où on effectuera les premières reconnaissances.

IV-1-4 Etude sur le plan

On aura alors recours à des documents à plus grande échelle (1/20 000 , 1/10000 , ou de cadastre par exemple pour préciser les points déjà déterminés.

On procédera à des reconnaissances plus détaillées de terrain, et on arrivera à arrêter une zone plausible du tracé sur laquelle on effectuera les travaux topographiques (levé et nivellement) en vue d'arrêter le ou les tracés possibles.

1) Caractéristiques techniques en plan

Les études de détails sont ensuite entreprises. D'une façon générale, on recherchera les parties droites qui seront reliées par des courbes dont le rayon sera le plus grand possible.

Sauf lorsqu'il en sera spécifié autrement, il sera traité d'une façon générale sur les voies de 60 à 80 km/h la mise en œuvre des dispositions suivantes :

- En plaine , prendre $R = 500$ m qui permet une vitesse de 80 à 90 km/h

$R = 1\ 000$ m pour une vitesse de 120 km/h

- En pays moyennement accidenté :

On s'efforcera d'avoir des rayons supérieurs à 100 et 150 m pour des vitesses de 50 ou 60 km/h.

On peut d'ailleurs avoir une idée de la valeur du rayon nécessaire par les expressions suivantes :

Rayon minimum absolu $R_{Hm} = V^2/30$

Rayon minimum normal $R_{HN} = V^2/20$

- En pays fortement accidenté et en montagne

On prendra $R \geq 50$ m ou à la rigueur $R \geq 30$ m tout en sachant que le minimum à observer sur les routes nationales est : $R = 40$ m

Le rayon de 30 m pourrait être réduit pour les itinéraires secondaires en haute montagne mais on devra prendre dans tous les cas $R \geq 12$ m qui est en effet le rayon de giration des gros véhicules automobiles (camion lourds, autocar).

Ils permettent également le passage des véhicules transportant les arbres abattus en forêt.

.- Dans les virages :

Non seulement les courbes auront le plus grand rayon possible, mais on devra veiller aussi à respecter d'autres conditions :

- Ne pas placer les courbes aux abords des O.A. (ponts, tunnels) pour assurer la visibilité et la sécurité en ces points délicats du tracé ;
- Ne pas faire succéder immédiatement deux courbes de rayons différents, ce qui poserait des problèmes de visibilité et d'adaptation au niveau du conducteur.
- Pour la même raison, lorsqu'il est possible, ne pas placer à la suite l'une de l'autre deux courbes de sens inverses, il faudra toujours séparer les courbes l'une de l'autre par des parties droites suffisamment longues pour que les voitures puissent reprendre leur stabilité avant d'aborder le virage suivant.
- La longueur de ces parties droites dépendra de la vitesse normale prévue sur l'itinéraire et du % probable de véhicules lourds plus difficiles à manier. Sur les voies ferrées, la partie droite sera d'une centaine de m , sur les routes de 50 m au moins. En fait, cette longueur doit permettre un temps de parcours de 5 secondes à la vitesse permise par le rayon des virages.

2) Caractéristiques techniques en profil en long

Le profil en long doit répondre à la nécessité :

- de s'adapter au relief du TN
- d'écouler les eaux de pluie.

Pour assurer l'écoulement des eaux, on évitera les parties absolument horizontales (paliers) en les remplaçant par une déclivité légère de 6 à 8 cm/m.

Dans les parties très longues où le sol naturel est horizontal, on prévoira une succession de pentes et de rampes avec la déclivité minimale.

On pourra noter que dans les parties de plaine, les remblais de faible hauteur (0,20 à 0,50m) faciliteront l'assèchement de la plate forme mieux que si elle était en déblai (cas des voies qui longent les cours d'eau ou les corniches).

On rappelle également l'existence des voies digues, permettant la circulation le long de l'obstacle naturel que constitue une rivière et servant en même temps, à protéger le pays des inondations.

Quant à l'autre condition qui est de s'adapter aux reliefs naturels, on est conduit à envisager des déclivités maximales.

Dans les zones de plaines, on peut envisager des routes rapides et les déclivités à prévoir doivent être au plus égales à **4%**.

Dans les zones moyennement accidentées (cas du Burkina Faso) où les inondations de terrain sont plus accentuées qu'en zone de plaine, des déclivités moins importantes conduiraient à des travaux de terrassement très importants et très coûteux. Pour les éviter, on acceptera de prévoir des déclivités plus importantes qui seront inférieures ou égale à **6%**.

Dans tous les cas on doit faire ressortir deux principes logiques quelque fois perdus de vue :

3) Un point bas ne doit jamais être en déblai

Pour éviter cette disposition, on réduira les déclivités arrivant de chaque côté du point bas pour tenir celui-ci légèrement au-dessus du T.N, ou encore on placera le part et d'autre de ce point bas des déclivités très atténuées ou par une courbe de raccordement concave.

4) De même en sens inverse, il est contre-indiqué de prévoir un remblai dans un point haut,

Ce qui conduirait à une dépense inutile de terrassement, et à une dépense inutile d'énergie pour que les véhicules atteignant cette altitude exagérée.

5) Homogénéité des caractéristiques d'un tracé

Dans un projet de route, on doit s'efforcer de prévoir des caractéristiques homogènes, surtout en ce qui concerne les rayons de virage et la visibilité. En effet, si un itinéraire présente une série de virages de 200m de rayon par exemple, les conducteurs régleront l'allure de leurs véhicules sur les caractéristiques qui leurs sont offertes. S'il existe ensuite un virage de 30m seulement, les automobilistes, du fait de leur accoutumance à la route (avec une vitesse trop importante) le rayon faible les surprendra et provoquera des accidents et ce, malgré tous les panneaux indicateurs qu'on aurait pu poser. Il en est de même pour la visibilité. Il serait tout à fait très dangereux de laisser subsister une route bien dégagée un seul endroit de très mauvaise visibilité qui surprendrait le conducteur, habitué depuis un long moment à circuler en toute quiétude.

6) Tracé en plaine

On convient d'appeler plaine un pays où les déclivités naturelles du terrain ne dépassent pas 4 %. Dans ce cas, il n'y a aucune difficulté pour déterminer l'axe d'une route. On adopte généralement le tracé le plus court, c'est-à-dire la ligne droite entre les points obligés du tracé. Les obstacles, s'il en existe, sont contournés par des courbes de rayon convenable.

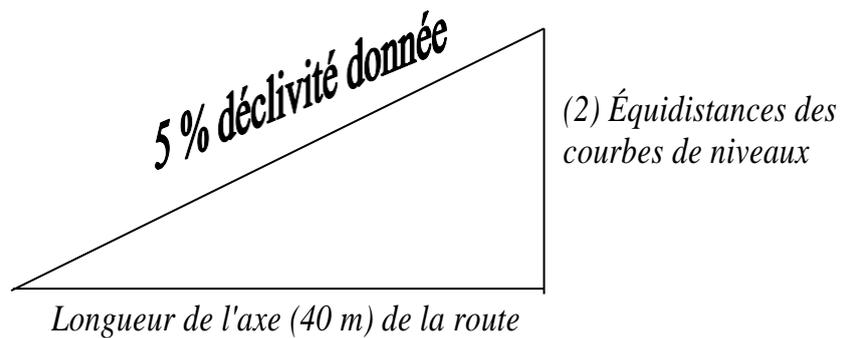
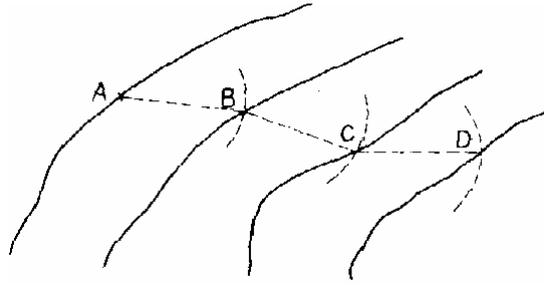
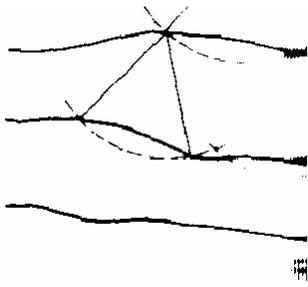
Cependant, on devrait éviter les trop longues lignes droites, pour éviter la monotonie relâchant la vigilance des conducteurs, et pour éviter, la nuit, l'éblouissement prolongé dû aux phares.

Il est recommandé que les parties droites d'un tracé représentent 60% au plus de la longueur totale du trajet, mais aussi au moins 20% de cette même longueur totale.

A. Tracé théorique

Pour l'étude du tracé, on a recours aux plans sur lesquels sont tracés les courbes de niveau et l'on cherche à tracer une ligne (représentant l'axe approximative de la route) respectant la déclivité maximale que l'on s'est fixée.

Exemple :



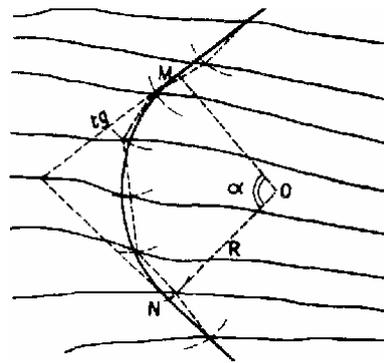
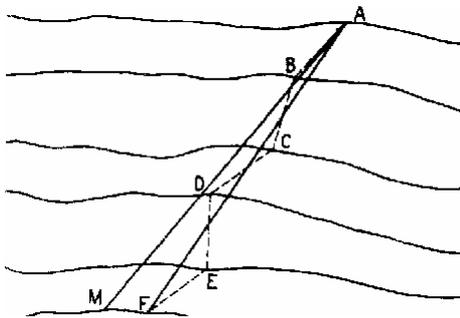
$2/0,05 = 40 \text{ m} \Rightarrow$ ouverture du compact

Soit un plan à l'échelle $1/2000^e$ comportant des courbes de niveau équidistantes de 2m ; on veut y dessiner, un tracé ayant un déclivité maximale de 5%.

Pour franchir la différence de niveau de 2m séparant 2 courbes successives, il faudrait que le tracé ait une longueur de $2/0.05 = 40 \text{ m}$

Cette longueur de 40m à l'échelle de $1/2000$ est représentée par 2 cm .Sur le plan , la route devrait avoir une longueur de 2cm entre 2 courbes de niveau successives.

On rappelle que sur les plans, les longueurs sont mesurées et ramenées à l'horizontale.



On va alors, depuis le point A fixé, décrire sur le plan un arc de cercle de 0,02 m de rayon (2cm) qui va couper la courbe de niveau suivante en des points (2 en général) d'où l'on continuera les arcs de cercles jusqu'à la prochaine courbe de niveau.

On voit immédiatement qu'il y aura un nombre élevé de solutions égale à 2^{n-1} , n étant le nombre de courbes de niveau du plan.

Mais on va tout de suite rejeter même les dessiner, les trajets qui ne peuvent conduire à aucune solution pratique.

C'est ainsi que l'on rejettera les tracés en zigzag (A,B,C,D, F, N) pour ne conserver que ABCEGN). On va également rejeter les tracés qui n'auraient pas

tendance à se diriger vers des points de passage obligé du tracé ou qui, au contraire, iraient vers les régions à éviter telles que les marais ou les zones bâties.

On ne conserverait finalement qu'un nombre limité de solutions. Ces tracés ainsi déterminés s'appellent des **tracés théoriques**.

B. Tracé réel

Le tracé théorique obtenu à l'aide des courbes de niveau et des ouvertures de compact n'est qu'un guide pour l'obtention du tracé définitif.

Ce tracé théorique comporte des lignes brisées qu'il convient de remplacer par les parties droites et des arcs de cercle pour obtenir le tracé final de la route. C'est la partie la plus délicate du travail.

Le tracé réel va légèrement s'écarter du tracé théorique et cela conduirait à des terrassements, déblais et remblais. En effet, lorsque la longueur de l'axe entre deux courbes de niveau successives est inférieure à la longueur du tracé théorique, l'altitude atteinte par l'axe au point de rencontre de la courbe la plus haute, en suivant la déclivité fixée, est inférieure à la cote de cette courbe et il en résulte un déblai. Au contraire, lorsque la longueur de l'axe entre 2 courbes est plus longue que le segment du tracé théorique, la route s'élève au-dessus de la plus haute courbe en nécessitant un remblai. C'est inévitable, mais, il convient cependant de ne pas raccourcir systématiquement le tracé pour ne pas augmenter la déclivité ou pour ne pas aboutir à un déblai ou un remblai important à l'extrémité d'un tracé court.

Au fur et à mesure qu'on étudie le profil en long, on peut être amené à retoucher légèrement le tracé en plan pour améliorer les caractéristiques techniques de l'itinéraire.

Bien entendu, le travail d'étude au bureau doit être interrompu par de nombreuses reconnaissances sur le terrain, les tracés étudiés devant être parcourus à pied sur toute leur longueur.

IV-3- SURLARGEUR DANS LES VIRAGES

Il faut également tenir compte, au moment du projet d'exécution d'une route, d'une surlargeur à donner dans les virages.

En effet, les conducteurs sont moins habiles à se croiser sur une partie courbe que sur une partie droite, et il convient de leur réserver une plus grande marge de sécurité. De plus, un véhicule occupe par lui-même une largeur plus importante, le surplus étant représenté par la distance BC, d'autant plus marquée que le véhicule est plus long, et le rayon du virage plus petit.

On donne généralement une surlargeur de 5 à 10 % (avec minimum de 1,00 m) pour les rayons de 250 à 100 m, de 20 % pour les rayons de 50 m, et de 40 % pour les plus petits rayons. Cette surlargeur est prise

- soit du côté extérieur du virage
- soit du côté intérieur
- soit des deux côtés en conservant l'axe

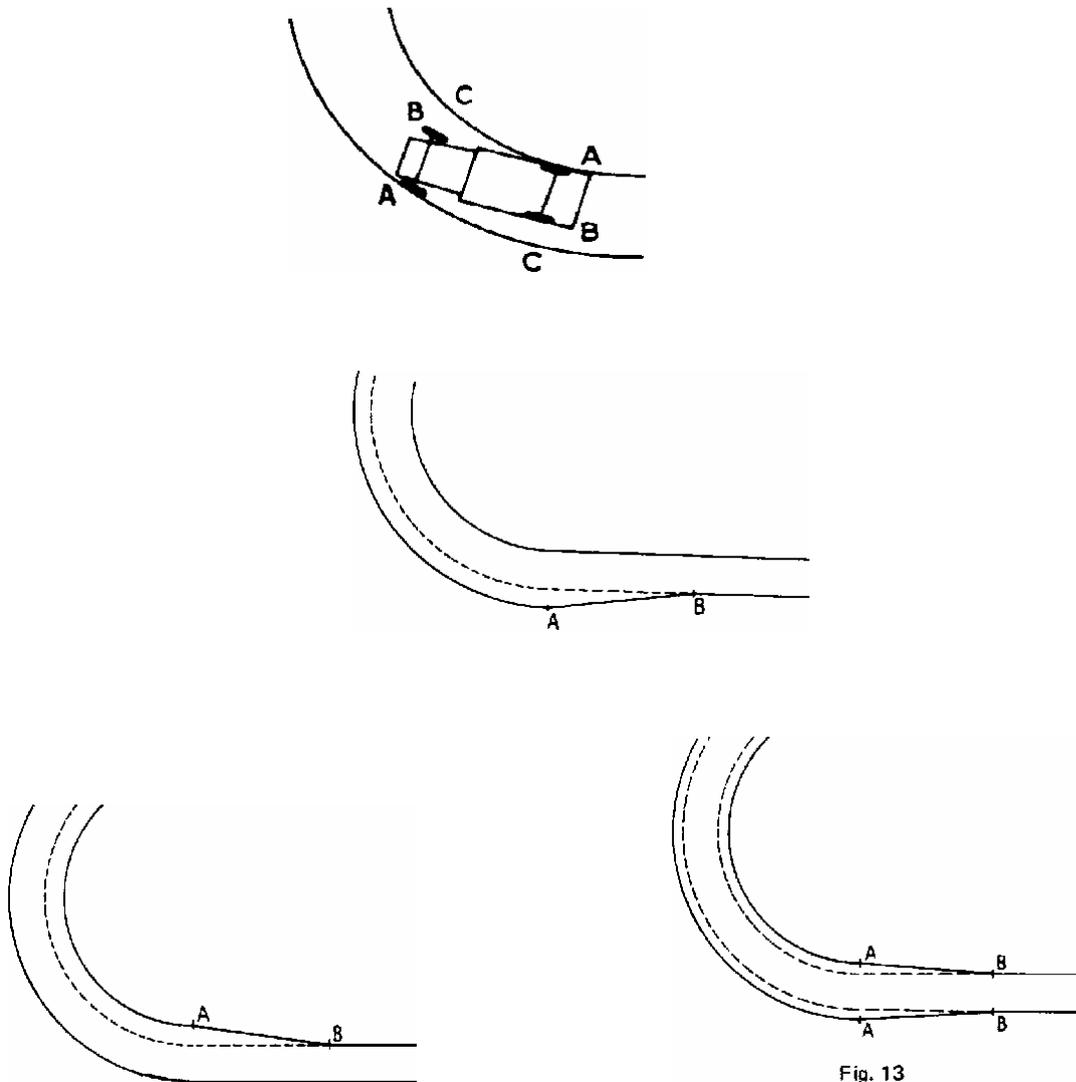
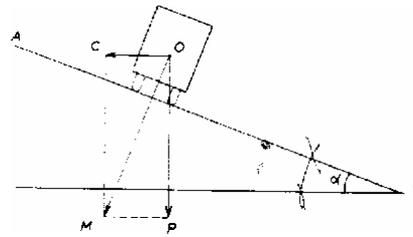
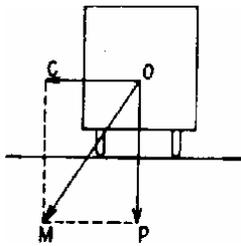


Fig. 13

IV-4- CALCUL DU DEVERS

Une route est une suite d'alignements raccordés par des courbes. Un véhicule se déplaçant dans un virage est soumis à plusieurs forces dont son poids P et sa force centrifuge C . La direction de la force résultante T doit être le plus proche possible de la perpendiculaire à la surface de la route. D'où, la nécessité de l'incliner d'un angle α par rapport à l'horizontale.

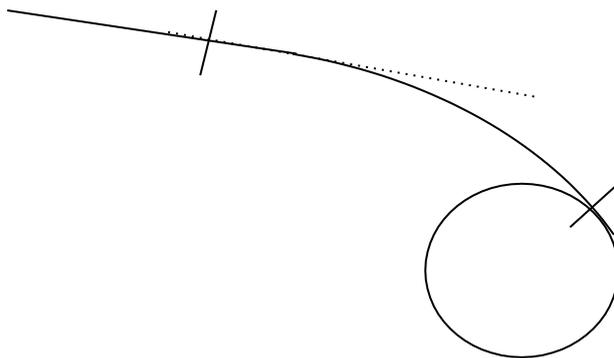
Ces deux forces se composent en OM , et l'on sait que si la composante passe en dehors du **polygone des roues**, le véhicule se renverse



Cette inclinaison α représente le dévers exprimé le plus souvent en pourcentage. Pratiquement, les dévers n'excèdent pas 7 % pour les routes nationales et 6,5 % pour les autres routes. Si le raccordement entre 2 alignements droits est uniquement circulaire, le véhicule est soumis à une force centrifuge qui était nulle l'instant d'avant.

Il est donc nécessaire d'introduire un dévers p variant de celui existant en alignement en dévers maximum au début de la courbe circulaire. Le dévers reste constant sur toute la partie circulaire.

Cette partie de raccordement sur laquelle le dévers va en croissant, doit permettre d'introduire progressivement, les changements d'équilibre subis par le véhicule. Ceci n'est possible que si le **raccordement est progressif**. Sa courbure varie de **zéro** à la fin de l'alignement droit à **$\frac{1}{R}$** au début de la courbe circulaire de rayon **R**

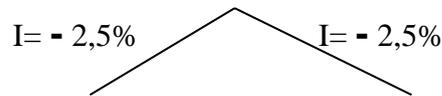


Pour les routes nationales, on considère les caractéristiques techniques données par les paramètres fondamentaux des projets routiers au chapitre "Tracé en Plan". Le dévers maximum p est donné par la formule :

$$p \% = 7 \times \frac{RH' - R}{RH' - RHm}$$

On arrondit le dévers p à 0,5 % près le plus proche.

Sur les projets routiers, on procède au dévers sans modification du profil en long de l'aire de la route : il y a abaissement de la partie de rayon intérieure et exhaussement (relèvement) de la partie de rayon extérieure (pour les routes nouvelles). Il faut tenir compte de l'inclinaison I de la chaussée en alignement droit qui est de l'ordre de 2 % ou 2,5 % selon les constituants utilisés.



On note pour I des signes ci-dessus.

Pour déterminer la **longueur minimale Lm de raccordement d'introduction du dévers**, on tient compte de la plus grande variation de dévers, c'est-à-dire (I % - p%) , p ayant le même signe conventionnel que celui choisi pour I. (I = δ)

$$L_m \geq (I\% - p\%) \times \frac{V_r}{7,2} = \frac{\delta + p}{2} \cdot \frac{V_r}{3,6}$$

Lm est en mètre et Vr en kilomètre/heure

Remarque importante : La longueur L de la clothoïde doit être telle que les conditions de confort par rapport à la vitesse de roulis (**mouvement d'auscillation d'un bord sur l'autre que prend un véhicule autour d'un axe longitudinal sous l'influence d'une force perturbatrice**) soient respectées.

$L \geq \frac{\delta \% + p \%}{2 \% / s} \cdot \frac{V_r \text{ (km/h)}}{3,6}$

- δ % : Dévers dans l'arc de cercle
- p % : Pente transversale en alignement droit
- Vr : Vitesse de référence

Le calcul qu'on pourrait faire sur la valeur théorique du dévers montre qu'elle serait nettement plus élevée que les chiffres donnés ci-dessus ; avec ces valeurs, il subsistera donc une partie non compensée de la force centrifuge qui provoquera une déformation de la suspension du véhicule et de ses pneus, et un léger dérapage transversal absorbé par le coefficient de frottement sur la chaussée. Il convient que ces effets ne soient pas trop importants pour que le véhicule conserve cependant sa stabilité.

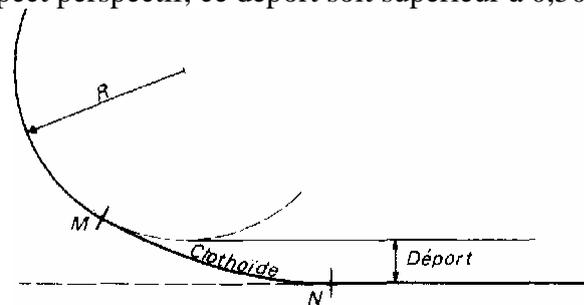
Le maximum du dévers est ramené à 7 % sur les routes nationales modernisées, et à 6,5 % sur les autoroutes, ce qui s'explique par le fait que les virages de petit rayon sont exclus. Même sur les routes secondaires, on se limite à un maximum pour ne pas rendre trop difficile la circulation des véhicules lents, les véhicules agricoles par exemple. Dans les régions où le verglas est fréquent, on se limitera également à des chiffres moins élevés.

Par contre, sur les routes rapides, le dévers sera prévu sur des virages de rayons plus importants. On donne au dévers des valeurs progressives 0, 1, 2, 3 %, etc... dans les zones de raccordement aux extrémités des virages pour que le dévers ait sa pleine valeur au début de la partie circulaire.

IV-5- COURBES DE RACCORDEMENT PROGRESSIF OU CLOTHOÏDES

Ces raccordements peuvent être de simples parties droites, des courbes paraboliques ou encore d'autres courbes à courbure progressive. On adopte pour les voies ferrées une parabole, une parabole cubique, une lemniscate ou une clothoïde.

Dans les projets d'autoroute, on a choisi la clothoïde pour ces raccordements progressifs en plan entre ligne droite et virages circulaires. Le cercle du virage n'est plus tangent à la partie droite, mais il en est déporté d'une certaine distance, qui permet de placer la clothoïde ; il est d'ailleurs recommandé que, pour des questions d'aspect perspectif, ce déport soit supérieur à 0,50 m .



On ne prévoit ces raccordements progressifs que sur les routes importantes, autoroutes et routes nationales, et pour des virages dont le rayon est inférieur à une certaine valeur dépendant de la vitesse de référence. Ce sera 1 800 m pour 120 km/h et 400 m pour 40 km/h sur les routes nationales nouvelles ou modernisées.

IV-5-1 Equation générale de la clothoïde : $A^2 = L \cdot R$

Coordonnées d'un point quelconque de l'arc de clothoïde par rapport aux tangentes principales

$$X = A^2 \left(1 - \frac{L^4}{40} + \frac{L^8}{3456} \right)$$

$$Y = A \frac{L^3}{6} \left(1 - \frac{L^4}{56} + \frac{L^8}{7040} \right) \quad \text{avec } L = \frac{A}{R}$$

Autres relations

$$\tau = \frac{L}{2R} \cdot \frac{200}{\pi}$$

$$X_m = X - R \sin \tau$$

$$\Delta R = Y - 2R \sin^2 \frac{\tau}{2}$$

$$TL = X - U \cotg \tau$$

$$TK = \frac{Y}{\sin \tau}$$

IV-5- 2 La clothoïde utilisée comme courbe de transition

La courbe de transition est un tronçon de clothoïde dont le rayon varie entre ∞ (jonction avec un élément droit) et le rayon de l'arc circulaire sur lequel se fait le raccord.

Pour chaque arc de cercle, deux courbes de transition sont nécessaires, l'une précédant l'arc circulaire, l'autre le suivant. Dans l'emploi de la clothoïde comme courbe de transition, il faut distinguer une forme symétrique et une dissymétrique. Dans la forme symétrique, le couple de clothoïdes se compose de branches égales ayant les mêmes éléments. Dans la forme dissymétrique, interviennent deux branches inégales avec des éléments différents. Le calcul des segments ST et ST' est différent dans les deux cas.

IV-5-2-1 La forme symétrique

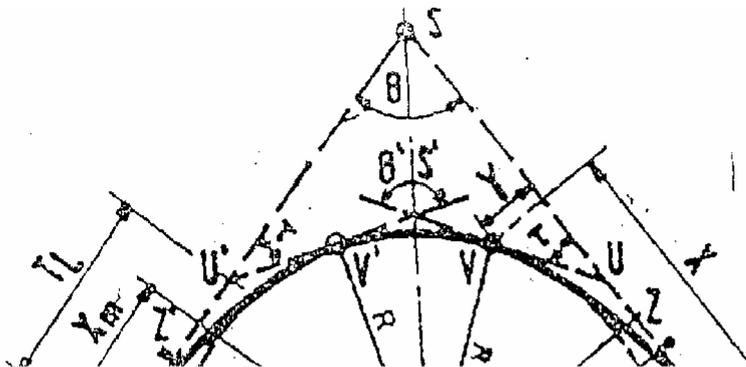
Calcul des segments ST et ST'

De la formule, il résulte :

$$* \quad ST = ST' = \operatorname{tg} \left(\frac{\pi - \theta}{2} \right) \cdot (R + \Delta R) + X_m$$

$$* \quad \theta = \theta' - 2 \tau$$

$$* \quad \theta' = \pi - 2 a$$



IV-5-2-2 La forme dissymétrique

Pour calculer les longueurs des segments ST_1 et ST_2 , il faut déterminer les quantités t_1 , t_2 et d . On a :

$$T_1 = \operatorname{tg} \left(\frac{\pi - \theta}{2} \right) \cdot (R + \Delta R_1)$$

$$T_2 = \operatorname{tg} \left(\frac{\pi - \theta}{2} \right) \cdot (R + \Delta R_2)$$

$$d = \frac{\Delta R_2 - \Delta R_1}{\sin (n - \theta)}$$

On tire alors les longueurs des segments ST_1 et ST_2 des relations

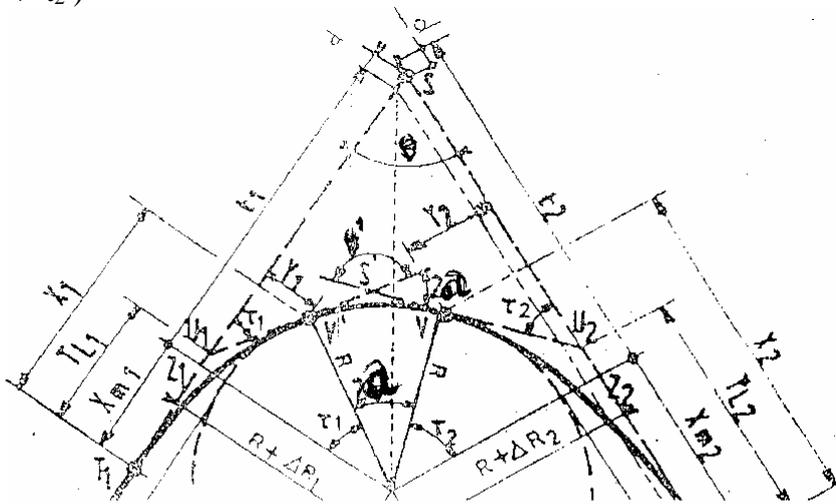
$$ST_1 = X_{m1} + t_1 + d$$

$$ST_2 = X_{m2} + t_2 - d$$

Pour l'angle au centre, on a :

$$2a = \pi - \theta'$$

$$\text{avec } \theta = \theta' - (t_1 + t_2)$$



Remarque : L'utilisation de la courbe de transition est recommandée lorsque $\theta \leq 100,00$ g

IV-5-3 La courbe à inflexion

La courbe à inflexion est une courbe en S, qui relie sans élément droit deux arcs de cercle $V'_1 V_1$ et $V'_2 V_2$ de courbures opposées. Elle se compose de deux branches de clothoïde, qui, à leur point origine commun $Tw1$ et $Tw2$ ont le même rayon $R = \infty$ et une tangente commune $S_1 S_2$.

Ces deux branches peuvent être de paramètres différents, mais en général, on choisira des paramètres égaux $Aw_2 = Aw_1$ donc une courbe à inflexion de parcours idéal.

Pour le calcul, on a aussi besoin des deux branches de clothoïde $T_1 V'_1$ et $V_2 T_2$ qui se raccordent à l'extérieur avec les arcs de cercle. La ligne complète se compose donc d'une succession comprenant : clothoïde $T_1 V'_1$ - arc de cercle $V'_1 V_1$ - courbe à inflexion $V_1 Tw_1 Tw_2 V'_2$ - cercle $V_2 V_2$ - clothoïde $V_2 T_2$.

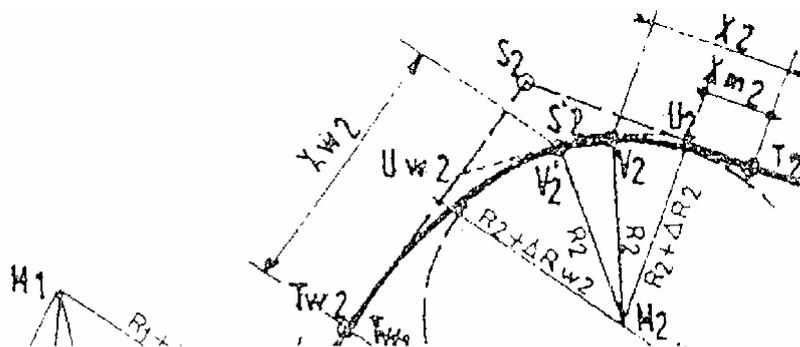
Aussi bien les paramètres A_1, Aw, A_2 que les rayons R_1 et R_2 peuvent être différents. (Aw paramètre de la courbe à inflexion).

Le calcul de la longueur des segments

$T_1 S_1$ et $Tw_1 S_1$ se fait comme pour une clothoïde de forme dissymétrique utilisée comme courbe de transition.

Il en est de même pour le calcul de la longueur des segments $Tw_2 S_2$ et $S_2 T_2$.

La valeur des angles au centre est obtenue à l'aide des formules données en V.2.... (la forme dissymétrique).



IV-5-4 La clothoïde à sommet

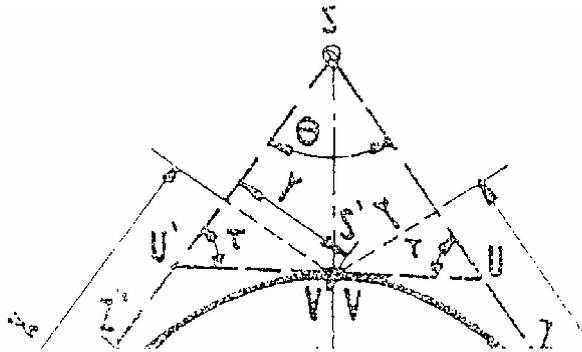
La clothoïde à sommet constitue le raccordement entre les deux éléments droits de direction différente sans interposition d'arc circulaire. Elle combine deux branches de clothoïde, qui ont à leur point de jonction le même rayon de courbure R_e . R_e est pour chacune des branches de clothoïde le plus petit rayon de courbure.

En employant deux branches égales de clothoïde avec des éléments égaux, on a la clothoïde à sommet symétrique. Avec des branches inégales et des éléments inégaux, on obtient la clothoïde à sommet dissymétrique.

a) La clothoïde à sommet symétrique

Pour la longueur des segments, on a :

$$ST' = ST = X + \operatorname{tg} \left(\frac{\pi - \theta}{2} \right) \cdot Y$$

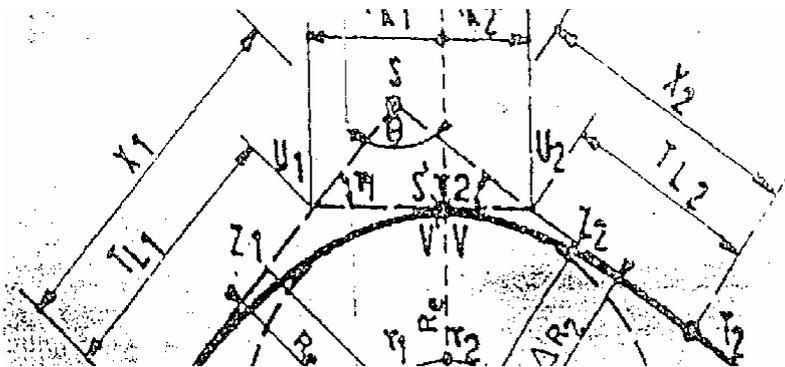


b) La clothoïde à sommet dissymétrique

Les longueurs des segments ST_1 et ST_2 se calcule au moyen des relations suivantes :

$$ST_1 = TL_1 + \frac{\sin \tau_1 (T_{K1} + T_{K2})}{\sin (\pi - \theta)}$$

$$ST_2 = TL_2 + \frac{\sin \tau_2 (T_{K1} + T_{K2})}{\sin (\pi - \theta)}$$



Remarque :L'utilisation de la clothoïde à sommet est recommandée lorsque θ est grand ($\theta \geq 100$ g).

IV-6- LE PROFIL EN LONG

IV-6- 1 GENERALITES

Le profil en long (PL) d'une route constitue un des trois éléments fondamentaux qui permettent de la définir.

Il représente la coupe longitudinale du terrain suivant le plan vertical passant par l'axe du tracé en plan permettant ainsi de définir le niveau de chaque point et de toutes les couches constitutives de la chaussée.

Le profil en long est défini par une succession de droites dont on connaît les déclivités (rampes ou pentes) , ainsi que certaines côtes indispensables. Le profil en long économique suivra au plus près le profil du terrain naturel (TN).

Un dispositif en léger remblai est préférable au léger déblai qui complique l'évacuation des eaux et isole la route du paysage.

Le profil en long qui n'est pas une véritable « représentation » en section du terrain et des ses aménagements, mais **un simple graphique** établi pour les besoins de l'étude, dépend étroitement du tracé en plan.

Pour l'établissement du profil en long TN, on considère les points régulièrement répartis le long de l'axe du tracé en plan et qui correspondent à un profil en travers chacun.

L'intervalle couramment employé entre 2 profils en travers successifs est de 40m (jusqu'à 50 m) en alignement droit et de 30m dans les courbes.

En principe, on place un profil en travers (PT) ou droit de chaque point caractéristique du tracée en plan c'est à dire l'origine, l'extrémité, les origines et fins de courbes, les origines et extrémités des clothoïdes de raccordement progressif et les milieux de courbes. Puis on complète la répartition des P.T. en fractionnant chacun des éléments de l'axe du tracé en plan en tronçons de longueurs sensiblement égales à la distance moyenne choisie la répartition des P.T.

La détermination de l'altitude T.N. en un point M peut se faire de plusieurs façons :

- par nivellement direct sur le site (tous les 50m en alignement droit et 30m dans les courbes)
- en bureau d'études (B.E.) par interpolation entre les courbes de niveau pour obtenir l'altitude des points désirés.

IV-6- 2 RAMPES ET PENTES ADMISSIBLES

(voir transparent en tracé en plan)

On choisit les rampes et les pentes en tenant compte de la puissance des véhicules, du type de véhicule, de l'intensité de la circulation (gêne pour les véhicules lents en côte), de la capacité de freinage dans les pentes.

Les pentes et les rampes sont toujours $< 6\%$ sur toute section de route nouvelle.

On limitera les rampes à 4% si la longueur est supérieure à 500 m. On limitera les rampes à 5% quel que soit la longueur dans les courbes.

On évitera les paliers ($0,5\%$ pour l'écoulement des eaux).

**IV-6- 3 COURBES DE RACCORDEMENT DU PROFIL
EN LONG AU POINT HAUT
(Rayon minimal en angle saillant)**

Le rayon de la courbure de raccordement est fonction de la vitesse de base et détermine la distance de visibilité. En tout point du tracé un observateur dont l'œil est placé à 1,00m au-dessus de la chaussée doit percevoir :

- un obstacle de 0,25m de hauteur à une distance égale à la distance d'arrêt.
- un obstacle de 1,2 m de hauteur égal à une distance égale au double de la distance d'arrêt.

On voit sur ce schéma que la visibilité tangente à la route pour le véhicule adverse permet de voir l'obstacle fixe de faible hauteur (branche tombée, petit animal, îlot séparateur, ou autre).

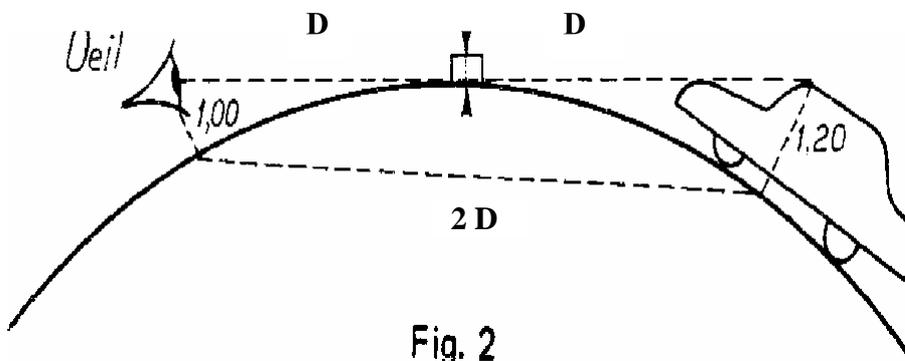


Fig. 2

On peut conjuguer cette disposition avec celle qui consiste à diviser la chaussée par un terre-plein central, planté d'arbustes, de façon à éviter à la fois les collisions de véhicules roulant en sens inverse, et, la nuit, l'éblouissement par les phares.

Rayon de raccordement aux sommets

On possède maintenant les éléments nécessaires au calcul du rayon du cercle de raccordement à placer à un sommet (fig. 3).

Soit A et B les points de la courbe où la visibilité est assurée entre les points A' et B' à la double distance de freinage $2d$, avec les hauteurs h_1 et h_2 au-dessus du sol.

On a :

$$(R + h_1)^2 = l_1^2 + R^2$$

$$(R + h_2)^2 = l_2^2 + R^2$$

On développe les premiers termes en négligeant b et h_1 d'où :

$$\begin{aligned} 2R h_1 &= l_1^2 \\ 2R h_2 &= l_2^2 \end{aligned}$$

Si on extrait les racines et on additionne, on obtient :

$$2R(h_1 + h_2) = l_1^2 + l_2^2$$

On peut écrire approximativement $l_1 + l_2 = 2d$

d'où :

$$\frac{2d^2}{(y/F, 4y/V)}$$

soit 1 m et 1,20 m, on trouve :

$$R \text{ V sommets} = 0,455 d^2$$

Les lettres R V indiquent un rayon dans le plan vertical du profil en long.

avec les valeurs de h_1 et h_2

Pour qu'un observateur dont l'œil est placé à 1,00m au-dessus de la chaussée puisse voir un obstacle de 1,20m de hauteur, le rayon R de la courbe de raccordement au sommet doit être égale à **R = 0,1 d²** où d est la distance de visibilité du véhicule.

IV-6- 4 RACCORDEMENT AU POINT BAS (Rayon minimal en angle rentrant)

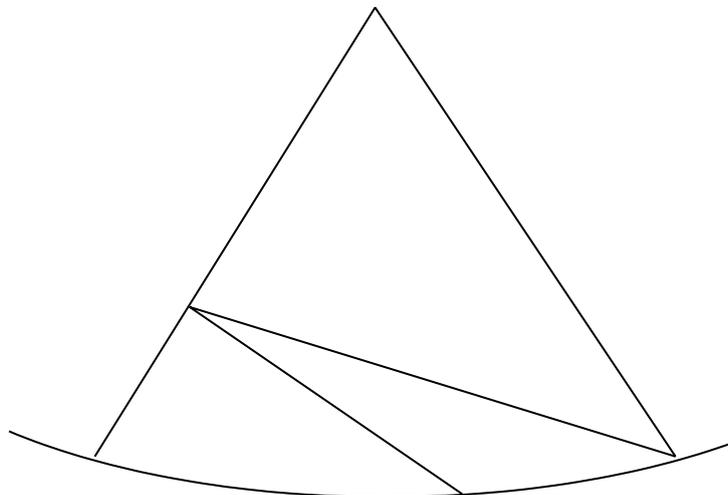
Pour les points bas, la condition de visibilité est toujours satisfaite. Le rayon de la courbe est fonction des conditions de confort par limitation de l'accélération verticale à $g/40$ pour les vitesses $V_r=80$ km/h. .

Le rayon R_{Vm} découle de considérations relatives à la visibilité de nuit (échange de faisceau des phares) pour les vitesses < 80 km/h. On limite la force centrifuge à $1/20$ de l'accélération due à la pesanteur.

Dans les points bas on raccorde avec des cercles mais pour des raisons dites de calcul on a avantage à prendre des raccordements paraboliques, ce qui d'ailleurs compte tenu des grands rayons ne s'aperçoit pas sur le terrain.

$$\text{On pose } \mathbf{mv^2/R} \leq \mathbf{mg/20} \Rightarrow \mathbf{R} \geq \mathbf{20v^2/g}$$

Le rayon minimal en angle rentrant est aussi calculé soit à partir des distances d'arrêt, soit à partir d'une condition de confort selon la vitesse de référence. Pour $V_r < 70$ km/h, le rayon minimal en angle rentrant doit permettre de voir dans le faisceau des phares d'axe horizontal situé à 0,75 m et de 1 degré d'ouverture, la distance d'arrêt en courbe d_2 .



Si l'on considère le triangle OBH :

$$OB^2 = OH^2 + HB^2 - 2OH \cdot HB \cos(OHB)$$

$$R^2 = (R - 0,75)^2 + d_2^2 - 2(R - 0,75) \times d_2 \cos(OHB)$$

$$= (R - 0,75)^2 + d_2^2 - (2R + 1,50) d_2 \cos(90 - 1)$$

$$= R(1,5 + 0,035 d_2^2) = d_2^2(1,026) + 0,75$$

$$R = \frac{0,5625 + d_2^2 + 0,026 d_2}{1,5 + 0,035 d_2}$$

Si $V_r = 80$ km/h, c'est la distance d'arrêt en ligne droite d_1 qui est prise en compte en remplaçant d_2 .

Pour $V_r = 80$ km/h

$$R = 0,5625 + d_1^2 + 0,026 d_1$$

$$1,5 + 0,035 d_1$$

Voici un tableau récapitulatif des rayons minimaux de raccordement au point bas par rapport à des vitesses de référence adoptées.

V km/h	40	60	80	100	120
d_2	45	80			
d_1			105		
Condition confort				$R > 0,315 V^2$	
Rayon minimal en angle rentrant	700	1 500	2 200	3 000	4 200

Rayon minimal absolu = V_r

Rayon minimal normal = $V_r + 20$ km/h

IV-6- 5 REPRESENTATION GRAPHIQUE DU PROFIL EN LONG

1. Montage du profil en long TN

Le document comporte à sa partie inférieure une cartouche normalisée dans laquelle on doit reporter avec précision et à l'échelle les éléments suivants par ordre de haut en bas :

- N° de profil
- Altitude du TN
- Altitude du projet
- Distances partielles
- Distances cumulées
- Déclivités
- Alignements droits et courbes
- Devers (facultatif)

2. Echelles

Pour la représentation graphique du T.N, on prendra comme abscisse, l'abscisse du tracé en plan et comme ordonnée, les côtes des lignes de niveau, qu'on pourra multiplier par 10 à souhait. Le but de cette multiplication est d'avoir un document plus lisible.

Habituellement, pour les projets routiers de grandes longueurs, on utilise les échelles 1/2000 en abscisse et 1/200 en ordonnée ; pour les projets de petites dimensions et les voiries urbaines, on utilise les échelles 1/1000 et 1/100 ; pour les VRD , on utilise les échelles 1/500 et 1/50

3. Représentation graphique

Le niveau zéro conventionnel est le niveau de la mer.

Mais en partant de ce niveau, les hauteurs peuvent atteindre plusieurs centaines de mètres. C'est pourquoi, pour une bonne représentation on choisit un plan de comparaison qui est un plan artificiel.

4. Remarque

Il est inutile de représenter les profils qui ne sont pas obtenus par intersection avec les courbes de niveau.

En effet, on suppose que entre 2 courbes de niveau, la pente est régulière et on représente le TN par un segment de droite.

Si on ne dispose pas de courbes de niveaux, mais simplement des points cotés on doit :

- soit tracer les courbes de niveau et on se retrouve dans le cas précédent.
- Soit joindre 2 à 2 les points les plus rapprochés situés de part et d'autre du tracé en plan et interpoler en supposant la pente du terrain constante entre ces 2 points.

5. Ligne rouge ou Profil en long projet

La ligne rouge représente les altitudes de l'axe de la chaussée terminée en tout point de la route. Elle se présente sur le PL sous la forme de successions de pentes et de rampes et parfois raccordés entre eux par des arcs de parabole. En principe pour des raisons d'économie, le projeteur essaiera de suivre de plus près le profil en long TN. Il est tenu de respecter les normes géométriques fixées. Le respect de ces normes géométriques pourrait amener le projeteur à s'éloigner du profil en long TN.

6. Guide pour le tracé du profil en long ou coordination du tracé en plan et du PL

Le profil d'une route a une influence directe sur le coût de sa construction, les coûts d'exploitation des véhicules empruntant la route et le nombre d'accidents. Il convient de respecter les principes suivants :

1. Lorsque la déclivité entre 2 droites du PL dépasse 0,5%, il faut en général un raccordement vertical entre les 2 droites pour un passage aisé de l'une à l'autre.
2. Assurer une bonne corrélation entre le PL et le tracé en plan .
3. Du point de vue sécurité, il ne faut pas un raccordement vertical qui se trouverait dans une courbe en plan ni en partie, ni complètement. S'il est inévitable d'avoir les 2 raccordements en plan et en PL au même endroit, il vaut mieux placer le raccordement vertical complètement dans la courbe en plan de façon à avoir leurs sommets au même point.
4. Un raccordement vertical et horizontal doivent être séparés par une distance minimale de 60 m .
5. Prévoir une distance de visibilité convenable au point haut du PL
6. Eviter les raccordements concaves très courts
7. Eviter une courte descente avant une longue rampe
8. Eviter la succession de 2 courbes de même sens dans le PL

7. Calcul du profil en long

Au départ, le profil en long de la future route se trouvera défini par une succession de droites dont on connaît les rampes ou les pentes ainsi que certaines côtes indispensables pour fixer leur position. On connaît en outre les rayons des raccordements à appliquer entre ces rampes et pentes.

IV-6-6 LE PROFIL EN TRAVERS

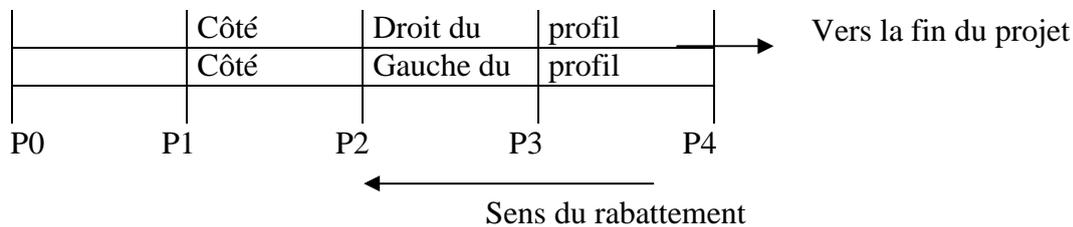
1. But et établissement

Les profils en travers ont pour but de calculer un volume de terrassement. Ils sont établis normalement à l'axe du projet et aux points caractéristiques du terrain (changement de pente, points bas, talwegs, points hauts).

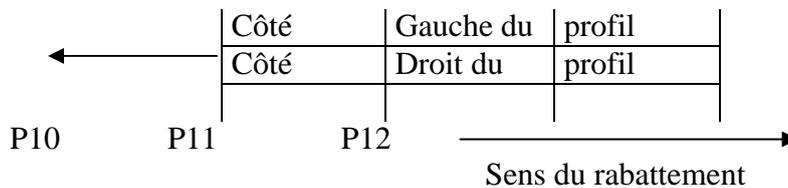
En terrain uniformément accidenté, on établira un profil tous les 30 à 50 m, en zone urbaine, leur écartement sera au maximum de 25 m. (parce qu'en ville, il faut plus de détails ; il faut souvent en plus des levés, de détails).

En général, le profil est levé sur une longueur double de celle de la plate-forme du projet (le profil type). Traditionnellement, les profils en travers sont supposés rabattus vers l'origine du projet (le côté gauche du projet devient le côté droit du profil et vis-versa).

Actuellement, on préconise l'inverse soit le rabattement vers la fin du projet et de cette façon, le côté droit du projet correspond au côté droit du profil.



Rabattement en regardant l'origine (côté droit du profil = côté gauche de l'axe du projet)



Rabattement en regardant l'extrémité (côté droit du profil = côté droit de l'axe du projet)

Les profils sont montés à l'échelle du 1/100^e en longueur et en hauteur (ceci afin de conserver les angles, donc les pentes des talus).

2. Le profil en travers type

Pour l'étude du projet et l'exécution de la plate-forme, on substitue en général un profil théorique simplifié.

Lorsque l'on reporte l'emprise de chaque profil sur le plan, et que l'on joint par une succession de lignes droites les points d'extrémité du profil situés du même côté par rapport à l'axe, on obtient les points "d'attaque" du sol par les parties en déblai ou les points de "base" du talus dans les remblais.

La surface totale du terrain se trouvant ainsi englobée dans le projet, prend aussi le nom de surface **d'emprise des terrassements**.

3. Calcul des profils en travers

Le profil en travers n'est pas complètement défini par le relevé des cotes du terrain naturel et l'application du profil type correspondant sur le graphique établi.

La position des points de passage de part et d'autre de l'axe reste à déterminer. Elle est obtenue par le calcul en appliquant les formules relatives aux pentes et points de passage. En général, on planimètre les surfaces en déblai et les surfaces en remblai entre les lignes du projet et les lignes de terrain naturel.

4. Calcul des cubatures

La cubature est l'évaluation des volumes de terre à déblayer et à remblayer. Cette évaluation est nécessaire pour l'estimation de la dépense et la réalisation du travail. (cubature = 80 à 85 % du coût du projet).

Éléments de calcul des volumes : Aires de profils en travers, surface, longueurs entre les profils en travers (distance partielle). La surface du PT est la partie comprise entre la ligne du projet et la ligne du TN. La surface respective des déblais et remblais est évaluée séparément en chacun des profils.

Méthode de la moyenne des aires : C'est la méthode la plus généralement employée dans les travaux publics. Elle consiste dans l'évaluation approximative du cube des terres compris entre deux profils en faisant le produit de la moyenne des sections de chacun d'eux par la longueur de l'entre profil (distance partielle).

Soit à évaluer le volume V compris entre le TN et la ligne du projet. Soit les profils en travers P, P1, P2, P3, P4 et les surfaces correspondantes S, S1, S2, S3, S4. l, l1, l2, l3, l4 étant les distances entre-profils.

On aura par application de la règle.

Cette formule peut s'écrire.

$$V = \frac{(S_0+S_1)}{2} L_0 + \frac{(S_1+S_2)}{2} L_1 + \frac{(S_2+S_3)}{2} L_3$$

$$\text{Soit } V = \frac{S_0 L_0}{2} + S_1 \frac{(L_1+L_2)}{2} + S_2 \frac{(L_2+L_3)}{2} + \dots$$

Les distances $\frac{L_0}{2}$, $\frac{(L_1+L_2)}{2}$, sont appelées "longueurs applicables"

C'est sous cette forme qui apporte une simplification dans les calculs et dans la rédaction des tableaux de métré qu'elle est généralement employée. Cette disposition admet implicitement que les volumes peuvent être évalués comme s'ils étaient des solides prismatiques ayant pour base la surface du profil considéré et pour hauteur la demi-somme des distances des deux profils entre lesquels se trouvent les profils.

5. Cas des profils fictifs.

On constate qu'une partie des terrassements est l'une en remblai et l'autre en déblai.

On calcule la distance du point de passage (intersection du TN et du projet) à chacun des profils voisins.

Dans ce cas, la relation est la suivante :

Considérons les triangles semblables AFC et DFB. M est la différence d'altitude entre le projet et le TN du point 1 ; n différence d'altitude entre le projet et le point 2. on peut donc écrire que :

Le profil fictif est situé au point de rencontre de la ligne TN et projet.

6. Mouvement des terres – Epure de Lalanne