

**Société Coopérative de
l'Association des Elèves des Ecoles Spéciales
de l'Université de Liège.**

UNIVERSITÉ DE LIÈGE
INSTITUT DU GÉNIE CIVIL
BIBLIOTHÈQUES

**COURS
DU GENIE CIVIL**



ROUTES

Notes publiées avec l'autorisation de Monsieur le Professeur CAMPUS

Chapitre I.

Moyens de transport et traction sur routes.

1) Moyens de transport à traction animale.

a) Transport direct. La charge est mise directement sur un moteur animé (animal de bât) qui la supporte et la transporte.

b) Tracéage. La charge repose directement sur le sol ou par l'intermédiaire d'un traîneau.

c) Voitures à traction animale, à deux ou un essieu (4 ou 3 ou 2 roues). Dans les véhicules à 2 roues, l'essieu est fixe. Dans les véhicules à 2 essieux, celui d'arrière est fixe, celui d'avant peut tourner autour de la cheville ouvrière O.

Dans les très longs véhicules, pour le transport de troncs d'arbres, par exemple, l'essieu arrière est parfois orientable. Les roues sont généralement mobiles autour des fusées, qu'elles embrassent par les moyeux, ce qui évite les glissements en courbe. Les roues devant sont souvent d'un plus petit diamètre que celles d'arrière pour permettre une plus grande rotation de l'essieu. Pour augmenter la rigidité latérale des roues, on établit les rais suivant un cône de révolution; l'angle α s'appelle écarteur. Mais les rais doivent être le plus possible normaux au sol de roulement; il faut donc incliner la fusée d'un angle φ , appelé carossage, voisin de α . Généralement, $\alpha = 4^{\circ}46'$ ($\frac{1}{12}$), $\varphi = 4^{\circ}20'$, d'où $\beta = \alpha - \varphi = 26'$.

2) Véhicules automobiles.

L'essieu arrière est fixe et généralement moteur. Pour éviter les glissements en courbe, tout en communiquant le mouvement aux 2 roues, calées sur l'essieu moteur, l'axe est divisé en deux parties, reliées par un différentiel dont les satellites permettent une rotation relative des 2 axes, sans interrompre l'égalité transmission du couple moteur, abstraction faite des petits frottements du différentiel. Les satellites sont fixés dans la boîte du différentiel qui porte à l'extérieur une grande couronne dentée qui reçoit le mouve-

ment d'un axe longitudinal par pignon conique ou vis.

Dans le cas de commande par chaîne, les roues motrices sont mobiles sur les fusées et le différentiel est monté sur l'arbre secondaire des pignons de commande.

L'essieu avant est aussi fixe, mais les roues sont orientables par des fusées pivotantes, commandées par deux leviers réunis par une bielle. Un des leviers est commandé par une biellette qui reçoit le mouvement du volant de direction. L'essieu avant peut être éventuellement moteur.

Les remorques des véhicules automobiles sont, en principe, analogues aux véhicules à traction animale. Le diamètre des roues est généralement voisin de 0,80 à 0,90, parfois 1,00 pour les poids lourds.

§ 2) Résistance à la traction dans le traînage. Sur un sol horizontal et indéformable, la résistance à la traction est égale à l'effort de frottement. Le coefficient de frottement est élevé sur route et dépasse souvent 0,50 : ce moyen de transport est donc défavorable. Il n'est bon que sur la glace ou la neige tassée, le coefficient de frottement est alors voisin du coefficient de roulement. Donc

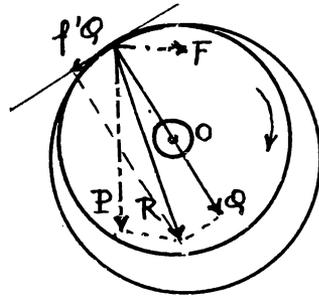
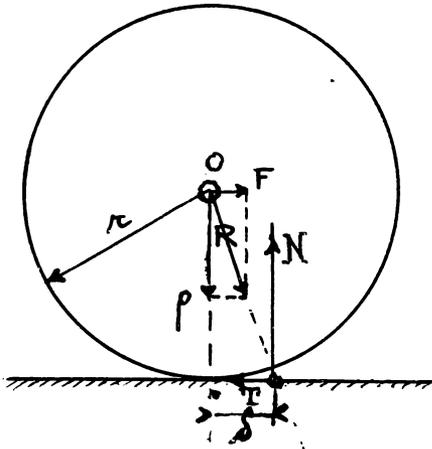
$$F = Pf,$$

F étant l'effort de traction horizontal, P le poids, f le coefficient de frottement.

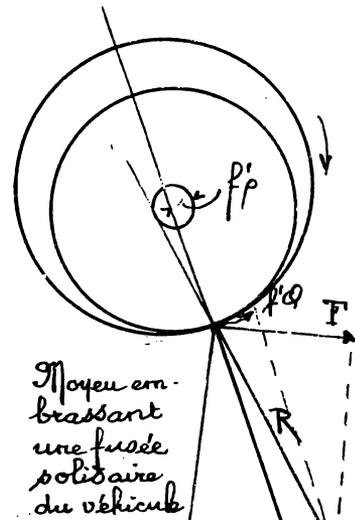
Valeurs du coefficient de frottement f.

Caisse en bois sur pavés	0,58	
Caisse en bois sur terre battue sèche	0,33	
Chêne debout bien dressé sur calcaire dur	(en repos) 0,64	(en mouvem) 0,29
Fer forgé bien dressé sur calcaire dur	0,42	0,24
Fer sur glace	0,04	

§ 3) Résistance à la traction d'un véhicule à traction animale en régime. - Pour faire rouler une roue rigide sur un sol dur horizontal en mouvement uniforme, il faut exercer un certain effort de traction. Cet effort F est toujours transmis par l'essieu au centre de la roue, il est horizontal. En le combinant avec la résultante P du poids propre de la roue et de la charge transmise par l'essieu, on obtient



axe dans un
cousinnet soli-
daire du véhi-
cule.



Moyeu en-
brassant
une fusée
solidaire
du véhicule

la force résultante R incli-
née dans le sens du roulement. L'équilibre exige que P
la réaction du sol soit égale et opposée. Elle se compose donc d'un effort
tangential T égal et opposé à F et d'un effort vertical N égal et opposé
à P
et décalé dans le sens du
roulement d'une longueur ρ par rapport au centre de la roue. On a :
 $\frac{\rho}{r} = \frac{F}{P}$, donc $F = P \frac{\rho}{r}$;
c'est la loi de Coulomb, de la résistance au roulement.

Le frottement du moyeu sur la fusée donne lieu à une autre résistan-
ce, qui s'exprime par un couple résistant $f'Q\rho$, ρ étant le rayon
de l'essieu. Comme f' est très petit (0,03 à 0,05) et que F est aussi fai-
ble par rapport à P , on confond généralement P avec Q et on écrit $f'P\rho$.
Pour équilibrer ce moment, il faut augmenter le couple de F et T de $\frac{f'P\rho}{r}$,
de telle sorte que la résistance totale horizontale à la traction devienne :

$$T = F = P \left(\frac{\rho}{r} + f' \frac{\rho}{r} \right).$$

La résistance au roulement, sans glissement et sans choc, sur une sur-
face horizontale dure et unie est donc proportionnelle à la charge et in-
versement proportionnelle au diamètre de la roue ; en outre, elle dépend de la
nature et des dimensions et de la fusée ainsi que de la nature du sol. La
formule est la même pour des roues calées sur un essieu, tournant dans
des coussinets.

Mais, pratiquement, il peut se produire des glissements, des chocs, en cas
de terrain inégal et des déformations en cas de terrain mou (cette dernière
éventualité ne doit pas être envisagée pour les routes modernes). Il en

résulte un terme supplémentaire dans la formule de la résistance à la traction, principalement pour tenir compte de l'effet des chocs. Il croît avec la vitesse. Il n'est pas strictement proportionnel à P, sauf s'il n'y a pas de suspension élastique, il dépend du poids non suspendu.

Considérons un véhicule à 2 essieux 1 et 2 dont les roues ont des diamètres $2\pi_1$ et $2\pi_2$. Les poids totaux sur chacun d'eux sont P_1 et P_2 , dont la somme est égale au poids total P. Désignons, pour chaque essieu, par π le poids de la partie supportée par l'essieu et ω le poids de l'essieu, des roues, etc.

Donc $P_1 = \pi_1 + \omega_1$, $P_2 = \pi_2 + \omega_2$, $\pi = \pi_1 + \pi_2$, $\omega = \omega_1 + \omega_2$.

Appelons f'' un coefficient de résistance supplémentaire pour tenir compte des chocs. S'il n'y a pas de suspension élastique, la résistance totale est :

$$F = F_1 + F_2 = \left(\frac{\pi_1}{\pi_1} + \frac{\pi_2}{\pi_2} \right) (\delta + f' \rho) + \left(\frac{\omega_1}{\pi_1} + \frac{\omega_2}{\pi_2} \right) \delta + (P_1 f_1'' + P_2 f_2'')$$

S'il y a une suspension élastique :

$$F = F_1 + F_2 = \left(\frac{\pi_1}{\pi_1} + \frac{\pi_2}{\pi_2} \right) (\delta + f' \rho) + \left(\frac{\omega_1}{\pi_1} + \frac{\omega_2}{\pi_2} \right) \delta + (\omega_1 f_1'' + \omega_2 f_2'')$$

Théoriquement, le coefficient f'' est inversement proportionnel au carré de π . Généralement, on a à peu près $\frac{\pi_1}{\pi_1} = \frac{\pi_2}{\pi_2}$; on peut admettre la même relation pour ω_1 et ω_2 , donc

$$F = F_1 + F_2 = \frac{2P}{\pi_1 + \pi_2} \delta + \frac{2\pi}{\pi_1 + \pi_2} f' \rho + \left\{ \begin{array}{l} P_1 f_1'' + P_2 f_2'' \\ \text{ou} \\ \omega_1 f_1'' + \omega_2 f_2'' \end{array} \right.$$

ω est généralement négligeable vis-à-vis de P_1 , (généralement $\omega < \frac{1}{4}$ ou $\frac{1}{5} P$) ; on peut le négliger et supposer $\pi = P$, donc

$$F = F_1 + F_2 = \frac{2P}{\pi_1 + \pi_2} (\delta + f' \rho) + \left\{ \begin{array}{l} P_1 f_1'' + P_2 f_2'' \\ \text{ou} \\ \omega_1 f_1'' + \omega_2 f_2'' \end{array} \right.$$

En vue de la détermination expérimentale des résistances de traction, on englobe le troisième terme dans les précédents et on écrit :

$$F = F_1 + F_2 = \frac{2P}{\pi_1 + \pi_2} (\delta + f' \rho + f'') = P f_1$$

f_1 étant le coefficient expérimental de résistance totale à la traction sur sol horizontal.

(Valeurs de f_1 )

. 7 .
 Valeurs de f_1 .

Terrain naturel sec en cailloutis et sable.	0,0634	0,065 à 0,250
Empierrement en état ordinaire.	0,0414	0,030 " 0,041
" " bon état sec.	0,0150	0,021 " 0,025
" avec boue molle.		0,038 " 0,050
" à ornières.		0,073 " 0,085
Lavage en bon état.	0,0238	0,030 " 0,070
" en très bon état.	0,0185	0,025 " 0,060
" mouillé.		0,023 " 0,030

Les chiffres de la 1^{re} colonne dérivent des expériences de Foncellet (1831-1870), ceux de la seconde des expériences de Morin (1837-1842). Dans cette colonne, les chiffres les plus bas correspondent à la vitesse de $5,4 \frac{\text{km}}{\text{h}}$, les plus élevés, à celle de $19,6 \frac{\text{km}}{\text{h}}$, sauf pour la 1^{ère} et la dernière ligne, pour lesquelles la vitesse supérieure est de $12,6 \frac{\text{km}}{\text{h}}$.

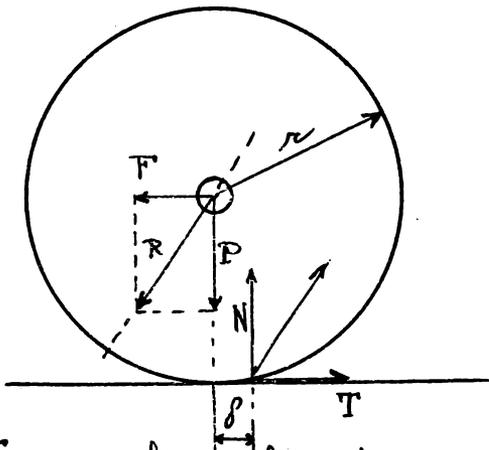
Ce coefficient est sensiblement constant avec faibles vitesses, il varie en sens inverse du rayon (non en raison inverse); il est indépendant de la largeur de la jante sur chaussée dure, à condition qu'elle soit assez large ($> 10 \text{ cm}$, par esc), mais pas en terrain mou, où il diminue quand la largeur croît. Il est indépendant de la vitesse sur route unie ou molle, mais croît avec la vitesse sur les sols inégaux. Cette augmentation est moindre pour les voitures suspendues que pour les autres. Les valeurs trouvées pour ce coefficient paraissent très variables d'après les expérimentateurs. Cela n'a rien d'étrange, car les conditions d'expérience influent énormément et les définitions très générales des types de routes envisagées peuvent cependant correspondre à des états réels très différents. Ces expériences sont généralement anciennes: on peut admettre que les valeurs sont plutôt élevées, les empierrements et pavages ayant fait des progrès depuis cette époque.

Pour le charroi lourd et lent, on admettra $f_1 = 0,04$ à $0,05$ pour le macadam ordinaire, selon l'état; $f_1 = 0,03$ " $0,04$ " " pavage en pierre, selon l'état et le macadam en très bon état; $f_1 = 0,02$ à $0,03$ pour le pavage en bois, le macadam et les revêtements modernes, selon l'état.

§ 4. Résistance à la traction d'un véhicule automobile.

Il faut y distinguer entre les essieux moteurs et non moteurs. Pour ces derniers, en régime, les formules sont, en principe, les mêmes que pour ceux à traction animale si les bandages sont rigides. Cependant, s'il y a des pneumatiques, quel que soit le rayon de la roue, la surface de contact est constante et ne dépend que de la pression intérieure, on peut considérer que f_1 est presque indépendant de r . De même, l'action élastique de la suspension et des pneumatiques réduit l'influence de la vitesse. Avec des bandages élastiques, non pneumatiques, les conditions de variation sont intermédiaires entre ces extrêmes, d'après le degré d'élasticité.

Pour les roues motrices, les conditions sont quelque peu différentes. Le mouvement est produit par un couple transmis à l'essieu. Il n'y a pas d'effort de traction proprement dit, mais au contraire, sous l'effet du couple et des réactions du sol, l'essieu moteur transmet une poussée nécessaire pour vaincre les résistances qui affectent les autres parties du véhicule ou du train.



L'essieu (ou le véhicule) moteur n'est pas soumis à un effort de traction, mais uniquement à un effort résistant; par contre, il développe un effort de traction.

Soit F cette poussée, P la charge verticale totale; la résultante est R . La réaction du sol doit être égale et de direction inverse et doit former avec R un couple équilibrant le couple moteur. Par suite de la résistance propre au roulement de la roue, cette réaction a une composante verticale dont l'alignement est déplacé de ρ dans la direction du roulement, comme dans le cas de la roue non motrice. Si M est le couple

$$M = P\rho + Fr = r(F + P\frac{\rho}{r})$$

Cette formule est trop sommaire, il faut tenir compte du couple résistant des frottements $\pi f' \rho$,

π étant la charge sur l'essieu, sans son poids propre.

En régime variable, il y a en outre un couple d'inertie à vaincre; il s'écrit :

$$\frac{\omega}{g} \gamma \frac{K^2}{\pi}$$

ω étant le poids des parties en mouvement de rotation,

K le rayon de giration correspondant,

γ l'accélération de la vitesse de translation (accélération angulaire = $\frac{\gamma}{\pi}$)

Couple élémentaire $m \left(\propto \frac{d\omega}{dt} \right) \propto = m \omega^2 \frac{d\omega}{dt} = m \omega^2 \frac{\gamma}{\pi} \quad \left(I \frac{d\omega}{dt} \right)$

Couple total $\frac{\gamma}{\pi} \int m \omega^2 = M K^2 \frac{\gamma}{\pi} = \frac{P}{g} K^2 \frac{\gamma}{\pi}$.

Donc :

$$M = \pi \left[P \frac{d}{\pi} + \pi f' \rho + \frac{\omega}{g} \gamma \frac{K^2}{\pi} + F \right]$$

Il reste à déterminer F . Soient P' le poids total transmis au sol par les autres essieux non moteurs, dont ω' le poids propre et π' la charge. Les rayons des roues sont généralement égaux; une première partie de F est destinée à vaincre la résistance au roulement de ces essieux, soit

$$P' \frac{d'}{\pi} + \pi' f' \rho + \frac{\omega'}{g} \gamma \frac{K'^2}{\pi^2}$$

Ces essieux non moteurs peuvent faire partie du même véhicule ou d'un autre remorqué. Il y a la force d'inertie $\left(\frac{P+P'}{g} \right) \gamma$

Ensuite, il y a la résistance de l'air dont l'expression est $k S v^2$, S étant l'aire du rectangle circonscrit au maître couple du véhicule, v la vitesse de déplacement,

k un coefficient expérimental, en moyenne 0,07 en fonction du m et de la l (0,0054 si S est en m^2 et v en km/h) [Voir AIPCR n°46, juillet-août 1926. On aurait $A = 0,0046 S v^2$ ou $0,06 S v^2$ (expériences en tunnels) ou, plus exactement $0,036 S v^{2,14}$].

La vitesse à mettre en compte dans cette formule est la vitesse relative de l'air et du véhicule, qui est supérieure ou inférieure à la vitesse de marche selon que la voiture marche contre ou avec le vent. Il en résulte que le vent debout peut notablement augmenter la résistance à l'avancement des automobiles.

Donc, sur terrain horizontal $F = P' \frac{d'}{\pi} + \pi' f' \rho + \frac{\omega'}{g} \gamma \frac{K'^2}{\pi^2} + k S v^2 + \frac{P+P'}{g} \gamma$
 et $M = \pi \left[(P+P') \frac{d}{\pi} + (\pi+\pi') f' \rho + \frac{\omega}{g} \gamma \frac{K^2}{\pi} + \frac{\omega'}{g} \gamma \frac{K'^2}{\pi^2} + \frac{P+P'}{g} \gamma + k S v^2 \right]$
 De la même manière que tantôt comme $\omega + \omega'$ est généralement $< \frac{1}{10}$

de $P + P'$, on écrit :

$$M = r \left[(P + P') f_1 + \frac{\omega}{g} \gamma \frac{K^2}{r^2} + \frac{\omega'}{g} \gamma \frac{K'^2}{r^2} + \frac{P + P'}{g} \gamma + k S v^2 \right],$$
 f_1 étant la résistance globale au roulement qui tient compte du roulement, du frottement des fusées et des chocs.

Dans cette formule, la poussée F est

$$F = P' f_1 + \frac{\omega'}{g} \gamma \frac{K'^2}{r^2} + \frac{P + P'}{g} \gamma + k S v^2$$

Il résulte de ce qui précède que le coefficient f_1 doit être le plus favorable avec les pneumatiques et relativement peu variable avec la vitesse. Pour les bandages en caoutchouc, la valeur est un peu supérieure (10%) à celle des pneumatiques aux faibles vitesses, mais l'écart augmente avec la vitesse. Elle est aux faibles vitesses inférieure d'environ 10% à celle des bandages rigides (métalliques) et l'écart augmente également avec la vitesse. On peut admettre pour la circulation automobile, les chiffres du tableau ci-après :

<u>Valeurs de f_1</u>	
Calloutis en bon état	0,0414 (1)
Empièrrement ordinaire	0,0352 (1)
" en bon état	0,0279 (1)
Pavage bon	0,022 (2)
Macadam bon	0,029 (2)
Pavage en bois propre	0,031 (2)
Revêtement asphaltique	{ 0,018 (2) 0,0221 (1)
Béton uni	0,0124 (1)

(2) d'après Le Gadrion.

(1) " M. Créhavo.

D'après la formule de Durrani et Julien, pour les revêtements ordinaires (empièrrements et pavages),

$$f_1 = 0,025 + 0,0007 V,$$

V étant la vitesse en km/h.

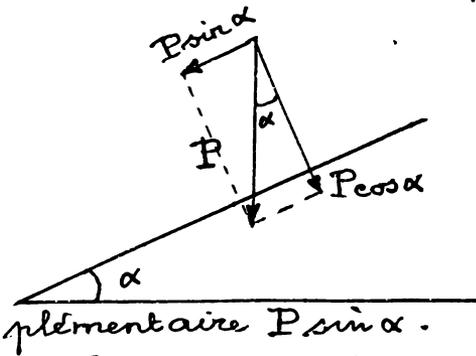
Donc, à la vitesse de 100 km par h, f_1 est à peu près quadruplé.

On admet souvent que la résistance au démarrage est supérieure de $\frac{1}{8}$ à celle en marche.

En régime, il faut faire dans les formules $\gamma = 0$; au démarrage, $v = 0$.

§ 5. Effets des pentes, rampes et courbes.

Les rampes et courbes augmentent la résistance à l'avancement de tous les véhicules; les pentes les diminuent. Dans la traction sur route, on n'a pas chiffré, semble-t-il l'effet des courbes, qui est d'ailleurs peu important. Celui des rampes et pentes sur la résistance à la traction peut s'exprimer par une formule unique algébrique, en considérant l'angle de pente comme positif en rampe et négatif en pente.



Soit α l'angle d'inclinaison du terrain sur l'horizontale. La force normale au sol devient $P \cos \alpha$; il faut donc multiplier toutes les forces verticales des formules précédentes par $\cos \alpha$.

En outre, il se développe une résistance sup-

plémentaire $P \sin \alpha$.

Comme α est toujours petit, on admet pratiquement $\cos \alpha = 1$ et $\sin \alpha = \text{tg } \alpha = i$. On écrit donc la résistance due aux rampes: Pi .

Si l'on compare à la résistance à la traction Pf_1 , en tenant compte des valeurs expérimentales de f_1 , on voit qu'une faible rampe suffit pour augmenter considérablement l'effort de traction. Une rampe de 0,05 le double avec du mauvais macadam ($f_1 = 0,05$) et le multiplie par 3,5 avec un bon revêtement moderne uni ($f_1 = 0,02$). Avec une rampe de 0,10, les facteurs deviennent 9 et 6. Donc, l'effet des rampes sur la résistance à la traction est d'autant plus sensible que le revêtement est plus perfectionné.

À la descente, l'effet des pentes est majeur et peut être supérieur aux résistances, surtout avec les revêtements très unis. Il en résulte qu'il faut freiner et que les fortes pentes sont dangereuses avec les revêtements très unis, souvent glissants.

§ 6. Moyens de traction.. Moteurs animés. - Dans le

transport direct, qui n'est pas avantageuse, il n'y a pas, à proprement parler, d'effort de traction. D'après Poncelet, un cheval moyen peut porter au pas (1,10 m/s) une charge de 120 kg, pendant 10

heures; au trot (2,20 m/") 80 kg seulement pendant 7 heures. Un homme peut porter 40 kg sur le dos pendant 7 heures et, en revenant à vide, jusqu'à 65 kg pendant 6 heures. 50 kgs sur une civière pendant 8 à 10"

Attelé à un véhicule, un cheval peut exercer un effort de traction proportionnel à son poids et dont le maximum en mouvement est $f q$, q étant le poids et f le coefficient de frottement (voir traînage). Pratiquement c'est donc $\frac{q}{3}$. On a établi que l'effort moyen le plus favorable est la moitié du maximum, soit $\frac{q}{6}$. Comme q varie de 250 à 600 kg et vaut en moyenne près de 400 kg, on voit que l'effort de traction normal d'un cheval est voisin de 70 kg. On admet que le travail journalier max. en kgm est $5400 q$ (q en kg), correspondant à l'effort de traction normal. Le parcours moyen est donc $5400 \times 6 = 32.400$ m. La vitesse normale du pas étant 1,10 m/'' ou $3960 \frac{m}{h}$, on voit que la durée normale du travail journalier est d'environ 8 heures. Le travail interne des muscles est sensiblement égal au travail utile dans les circonstances moyennes (Bredgold). L'effort, la vitesse et la durée journalière du travail peuvent varier, mais pour des valeurs différentes des valeurs normales, le travail utile est généralement réduit. Dans les pays de langue allemande, on se réfère à la formule empirique de Maschek:

$$F' = F \left(3 - \frac{v'}{v} - \frac{t'}{t} \right) \quad \text{ou} \quad \frac{F'}{F} + \frac{v'}{v} + \frac{t'}{t} = 3$$

F , v et t sont l'effort, la vitesse et la durée journaliers moyens.

F' , v' et t' , les mêmes éléments dans des circonstances différentes de la normale. Cette formule n'est applicable que dans des limites assez étroites; ses résultats sont erronés dans des cas extrêmes, tels que:

$$t = t' \quad v' = 2v \quad F' = 0 \quad (\text{incapacité de traction au trot})$$

$$v = 0 \quad t = 0 \quad F' = 3F = \frac{3}{2}q, \text{ ce qui représente l'effort}$$

maximum au démarrage (coup de collier). Or, d'après les auteurs allemands et d'après Poncelet, un bon cheval peut exercer sur un obstacle immobile un effort atteignant jusqu'à 400 kg, donc voisin de son poids. Ceci implique évidemment un bon appui des sabots sur les aspérités du sol.

D'après M. Durand-Claye, en mouvement, il ne faut jamais

faire dépasser l'effort $\frac{9}{3}$ et ne pas dépasser $\frac{9}{6}$ dès que le parcours est supérieur à 11 km; pour un parcours supérieur à 4,5 km, ne pas dépasser 0,225 q. Ces chiffres correspondent à la formule $F' = mq$, avec $m = \frac{1 - \sqrt{0,023L}}{3}$, L étant le parcours en km, inférieur à 11. Si $L > 11$, on admet invariablement $m = \frac{1}{6}$.

À la descente, un cheval ne peut exercer qu'un effort résistant très faible, de 0,055 à 0,083 q. Dans les attelages multiples, le rendement individuel diminue à mesure que le nombre d'animaux augmente. D'après Bockelberg, pour un attelage de

	1	2	3	4	5	6	7	8	chevaux, le
rendement est	1	0,98	0,87	0,80	0,73	0,64	0,55	0,49	

Un bœuf exerce un effort de traction de 60 à 100 kg, un mulet de 50 à 70 et un âne de 30 à 40. Un manoeuvre peut exercer normalement en poussant ou tirant un effort horizontal de 12 kg pendant 8 heures à la vitesse de 0,60 m/s.

Dans les véhicules à traction animale, on peut toujours, à cause des faibles vitesses et accélérations, négliger l'inertie et la résistance de l'air. L'équation du mouvement d'un véhicule de poids P, traîné par un cheval de poids q sur une rampe d'inclinaison i est donc :

$$mq = Pf_1 + (P+q)i$$

d'où

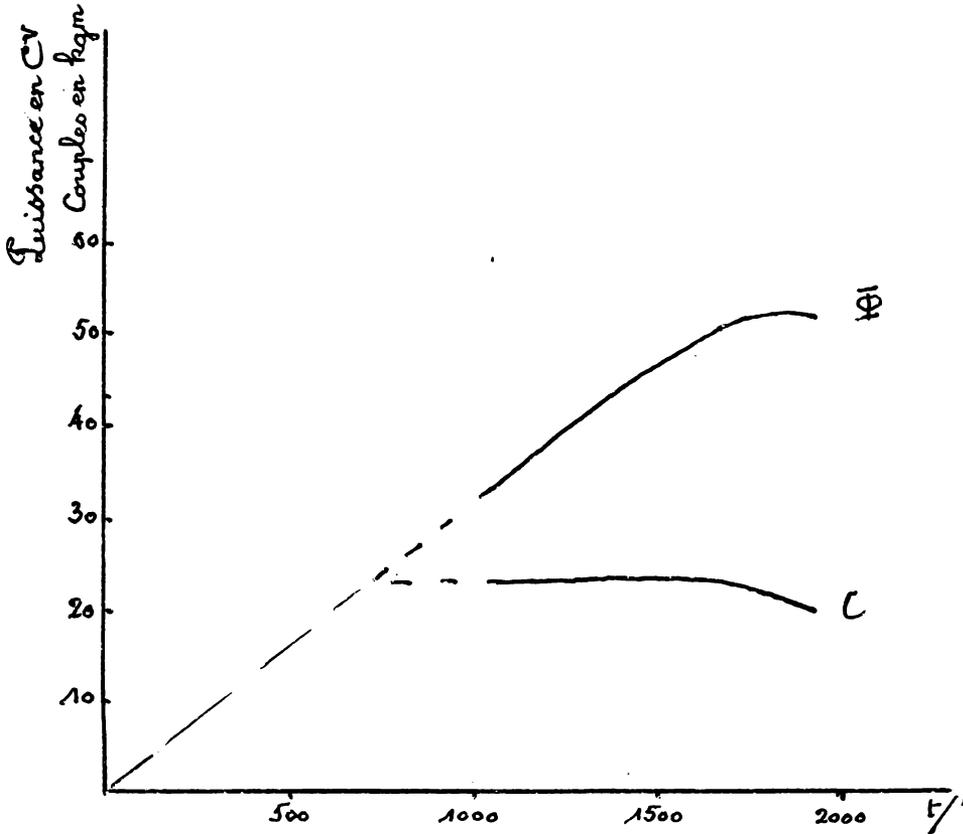
$$P = q \frac{(m-i)}{f_1 + i} \quad (\text{charge maximum})$$

et

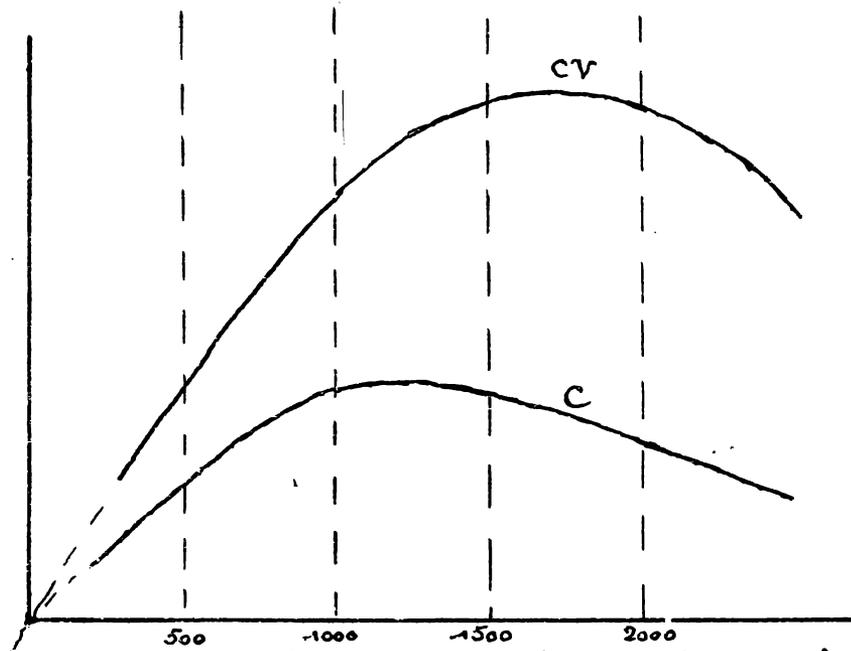
$$i = \frac{mq - Pf_1}{P+q} \quad (\text{rampe - id -})$$

§7) Traction automobile. Nous envisageons principalement les automobiles à essence, les plus répandues. Mais en principe, les conclusions de l'étude s'appliquent à la traction mécanique sur route en général.

La traction est produite par les essieux moteurs, qui reçoivent la force motrice du moteur par l'intermédiaire de mécanismes de transmission. Il n'y a généralement qu'un essieu moteur à l'arrière. Certains autobus ont deux essieux moteurs à l'arrière, sur boggy. Enfin, certains camions ont les 2 essieux moteurs.



L'étude de la traction doit être basée sur la connaissance des courbes de variation de la puissance et du couple moteur avec la vitesse angulaire. Ces courbes, d'après M. Boyer-Quillon, ont l'allure ci-contre dans une bonne machine. Le couple moteur est donc sensiblement constant dans des limites assez étendues de vitesse - 1000



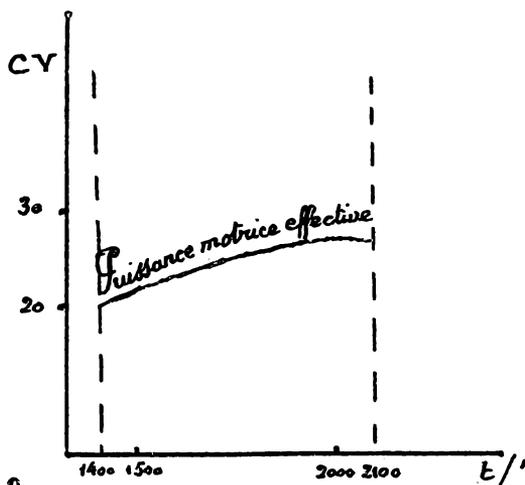
à 2000 tours par ' - entre lesquelles il faut maintenir la vitesse de marche. La partie initiale des courbes correspond à une marche instable car, à un ralentissement provoqué par une augmentation du couple, résistant, correspond une

diminution du couple moteur. La marche stable correspond à la branche horizontale décroissante de la courbe des couples moteurs, donc aux vitesses élevées de 1400 à 2100 t/m pour les voitures rapides à moteur poussé. C'est la zone du maximum de puissance et du meilleur rendement.

Pour les voitures de traction - poids lourds - il y a intérêt à augmenter

cette zone de décroissance, l'allure des courbes se modifie légèrement, elle correspond aux moteurs étouffés, à moindre vitesse de régime, mais couple moteur maximum plus élevé.

Le couple moteur sur la jante dépend du rapport de réduction de vitesse et du rendement des organes de transmission entre le moteur et la jante. Ce rendement est compris entre 1,60 et 0,80 pour les voitures en état convenable. On peut admettre dans les calculs pour une voiture en bon état assez neuve 0,70. Le changement de vitesse a pour but d'étendre l'intervalle de variation des vitesses de route et du couple résistant sans sortir de l'intervalle restreint de variation de la vitesse du moteur.

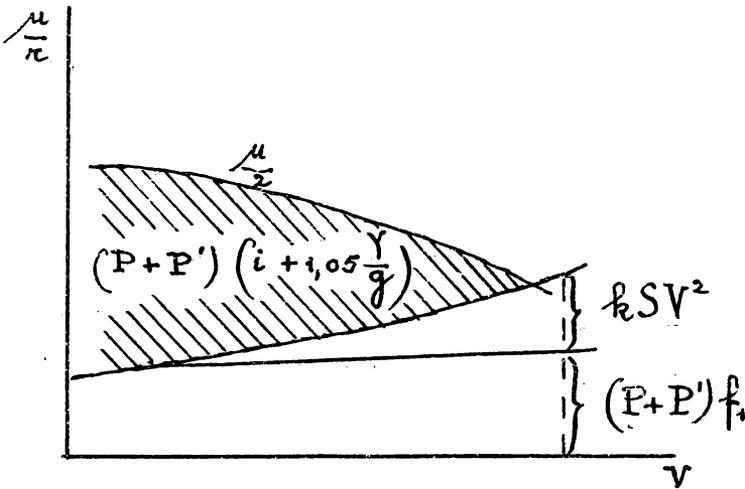
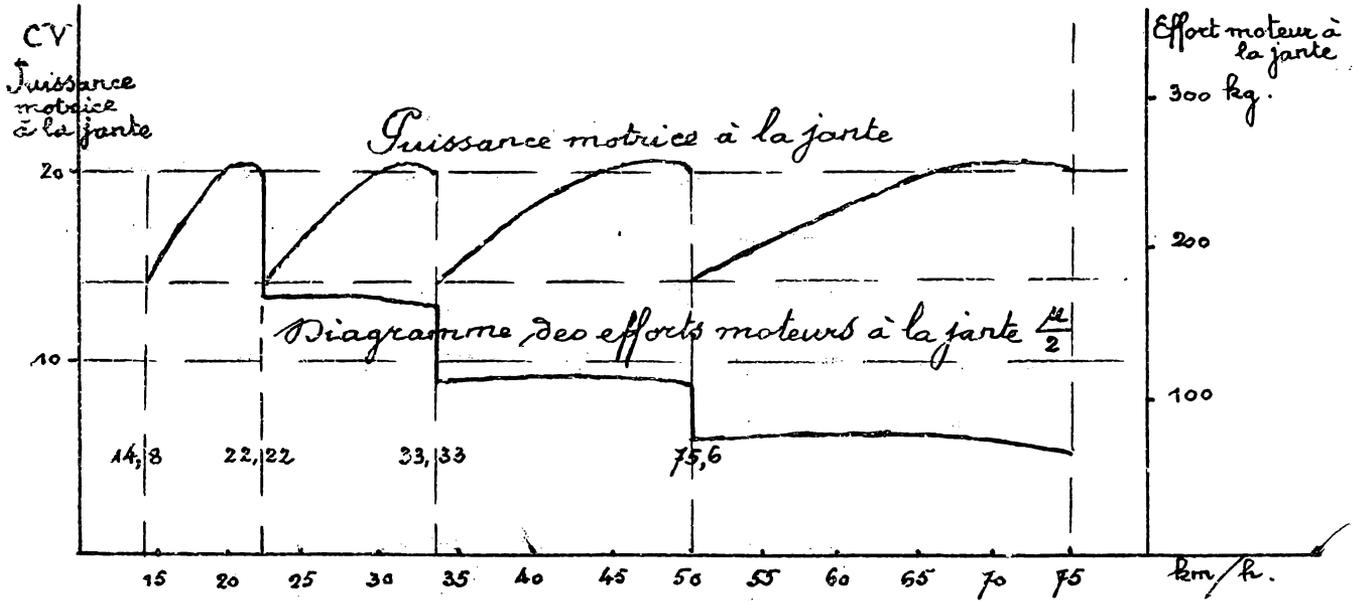


En prise directe, la vitesse maximum V_{max} de la voiture (p. ex : 75 km/h) correspond à la vitesse angulaire max ω_{max} (2100 t/'); à la vitesse angulaire minimum ω_{min} (1400 t') correspond donc $v_{min} = 50$ km/h. Le premier changement de vitesse doit être tel que v_{min} précédent = $v'_{max} = 50$ km/h correspond à ω_{max}

la réduction doit donc être dans le rapport $n = \frac{\omega_{min}}{\omega_{max}}$ ($= \frac{2}{3}$ dans le cas envisagé). S'il y a trois changements, les rapports consécutifs seront donc n, n^2 et n^3 ($\frac{1}{1,5}, \frac{1}{2,25}, \frac{1}{3,37}$ dans le cas envisagé).

La vitesse de marche normale la plus petite est alors $v'''_{min} = v_{min} n^3$ (14,8 km/h dans le cas envisagé).

En admettant que le rendement reste constant, approximation admissible par suite des limites restreintes de variation de ω et du soin apporté à la construction des transmissions, les couples moteurs à la jante sont augmentés dans les rapports $\frac{1}{n}, \frac{1}{n^2}$ et $\frac{1}{n^3}$. Le diagramme des couples moteurs à la jante en fonction des vitesses de marche a donc l'allure indiquée en tête de la page suivante. Le diagramme correspond à l'exemple concret ci-dessus, de changement de vitesse et à la courbe donnée de puissance du moteur pour un rendement de 0,70. Il donne les efforts moteurs à la jante, $\frac{M}{r}$, proportionnels aux couples.



Ce diagramme détermine tout le problème de traction.

On a, en effet :

$$\frac{\mu}{\pi} = (P+P') f_1 + k S v^2 + (P+P') i + \left[(P+P') + \omega \frac{K^2}{\pi^2} + \omega' \frac{K'^2}{\pi'^2} \right] \frac{Y}{g}$$

Le premier terme correspond à la résistance au roulement et est représenté dans le dia-

gramme par une droite légèrement croissante d'après le coefficient de Bocarri et Julien.

Le second terme correspond à la résistance de l'air et est représenté par une courbe parabolique, dont nous portons les ordonnées en addition de ceux du premier terme. Les ordonnées différentielles entre la courbe de $\frac{\mu}{\pi}$ et la courbe parabolique représentent les efforts moteurs disponibles pour gravir les rampes ou pour accélérer la marche. On en déduit donc la rampe maximum que peut gravir la voiture à une vitesse donnée ainsi que l'accélération max que peut prendre la voiture à une vitesse donnée sur une rampe ou pente donnée. Pour le terme de l'accélération, on admet généralement que la force vive des roues est égale à 5% de celle de tout le véhicule. Le terme d'accélération

peut donc s'écrire $1,05 \frac{(P+P')}{g} \gamma$ approximativement.

Ceci permet de résoudre tous les problèmes de traction. Observons que la puissance est $\Phi = \frac{\mu}{\tau} \frac{v}{\rho} = \frac{v}{\rho} \left[(P+P') f_1 + k S v^2 + (P+P') i + (P+P' + \omega \frac{K^2}{r^2} + \omega' \frac{K'^2}{r^2}) \frac{\gamma}{g} \right]$.

Elle est proportionnelle à la vitesse. Donc, à une résistance donnée correspond une puissance beaucoup plus élevée à grande qu'à petite vitesse et, comme le montre d'ailleurs le diagramme, les grands efforts de traction correspondent aux faibles vitesses. Le diagramme montre même qu'il peut y avoir aux faibles vitesses, notamment au démarrage, excès de puissance qui donne lieu au patinage, que nous étudions ci-après.

§ 3. Le patinage. Entre le sol et la roue s'exerce une réaction tangentielle que nous avons désignée par T et qui, dans le cas d'une roue non motrice, a pour expression :

$$T = F = P'(f_1 + i) + \frac{\omega'}{g} \gamma \frac{K^2}{r^2}$$

Pour une roue motrice, c'est :

$$T = F = P' f_1 + \frac{\omega'}{g} \gamma \frac{K'^2}{r^2} + \frac{P+P'}{g} \gamma + k S v^2 + (P+P') i$$

Il y a une limite à la valeur de T, qui résulte du frottement ou de l'adhérence sur le sol, c'est $T = P f$,

P étant la charge normale au sol transmise par la roue, f le coefficient de frottement.

Ce coefficient de frottement n'a pas été étudié d'une manière très approfondie. Faute de mieux, on se sert des coefficients suivants, qui ne distinguent pas entre l'état de repos et de mouvement.

	<u>Bandage en caoutchouc</u>	<u>Bandage métallique</u>
Savage en bois sec	f = 0,60	0,60
Savage en grès avec boue très grasse	f = 0,10	0,25
Revêtement uni poussiéreux	f = 0,72 à 0,80	Ces chiffres résultent d'expériences américaines assez récentes et montrent l'influence de la poussière et de l'humidité (Linckenheye - Etude sur les chaudières glissantes, Revue gén. des ponts, février 1926).
id uni légèrement mouillé (pluie fine)	0,58 " 0,66	
id très mouillé (averse)	0,830 " 0,950	
id sec après averse	0,98 " 1,05	

Avec les revêtements durs, les bandages lisses ou sculptés se comportent presque identiquement. Les antidérapants à fougères doivent être prescrits, Routes... 3

car ils n'augmentent pas l'adhérence et abiment les routes. C'est donc surtout la boue grasse sur les revêtements unis qui rend les routes glissantes, cependant certains revêtements d'asphalte très unis et soumis à une forte circulation, qui les polit en les recouvrant d'une très fine poussière d'usure sont aussi assez glissants, même à sec. Sur une boue d'argile visqueuse, f peut descendre à 0,06 d'après certains auteurs. Sur la neige durcie, le coefficient de frottement du fer est 0,04.

Pour combattre le glissement, il faut rendre les chaussées rugueuses, strier leur surface, employer des matériaux durs donnant une boue non grasse et non glissante et empêcher par le nettoyage, notamment l'arrosage à grande eau, la formation de boues.

En tous cas, $f > f_1$. Comme le terme dû à l'inertie de la roue est faible, il en résulte que le patinage de roues non motrices est impossible, sauf sur forte rampe très glissante et si les bandages sont en caoutchouc.

Tar contre, celui des roues motrices se produit si $T > Pf$ ou

$$Pf < P'f_1 + (P+P')i + kSv^2 + \frac{\gamma}{g} (P+P' + \omega' \frac{K'^2}{r^2})$$

ou

$$Pf < \frac{\mu}{r} - P'f_1 - \omega' \frac{\gamma}{g} \frac{K'^2}{r^2}.$$

Il en résulte que, pour qu'il y ait patinage, il faut que :

$$\mu = [Pf + f_1 + \omega' \frac{\gamma}{g} \frac{K'^2}{r^2}] r.$$

L'excès de puissance sert à augmenter la force vive des roues qui patinent. Les équations se transforment d'ailleurs lorsqu'il y a patinage et l'accélération des roues motrices devient $\Gamma > \gamma$.

On a

$$T = Pf,$$

donc

$$\mu = [P(f + f_1) + \omega' \frac{\gamma}{g} \frac{K'^2}{r^2}] r$$

$$\text{Mais } \mu = [(P+P')(f_1 + i + \frac{\gamma}{g}) + \omega' \frac{\gamma}{g} \frac{K'^2}{r^2} + kSv^2 + \omega' \frac{\gamma}{g} \frac{K'^2}{r^2}] r,$$

donc

$$P(f + f_1) = (P+P')(f_1 + i + \frac{\gamma}{g}) + \omega' \frac{\gamma}{g} \frac{K'^2}{r^2} + kSv^2.$$

Comme $\gamma = \frac{dv}{dt}$, on a une équation différentielle

$$P(f + f_1) - (P+P')(f_1 + i) = \frac{P+P' + \omega' \frac{K'^2}{r^2}}{g} \frac{dv}{dt} + kSv^2$$

de la forme $c = a \frac{dv}{dt} + bv^2$, d'où $dt = \frac{a}{c - bv^2} \frac{dv}{dt}$, dont l'intégrale est

$$t = \frac{a}{2\sqrt{bc}} \log \frac{v + \sqrt{\frac{c}{b}}}{-v + \sqrt{\frac{c}{b}}}, \quad (t=0, v=0)$$

ou

$$v = \sqrt{\frac{c}{f}} \frac{e^{2 \frac{\sqrt{bc}}{a} t} - 1}{e^{2 \frac{\sqrt{bc}}{a} t} + 1},$$

formules dans lesquelles

$$c = P(f + f_1) - (P + P')(f_1 + i)$$

$$a = \frac{P + P' + \omega' \frac{K^2}{r^2}}{g}$$

$$b = k^2 S.$$

En régime, $a = 0$, et on a :

$$v = \sqrt{\frac{c}{f}}.$$

En régime variable, on voit que v tend vers la même valeur $\sqrt{\frac{c}{f}}$ quand t croît.

Comme nous l'avons fait observer précédemment, aux faibles vitesses, donc aussi au démarrage, la puissance du couple résistant est faible et le moteur dispose d'un grand excès de puissance qui produit le patinage, surtout dans les voitures de tourisme, légères et puissantes.

L'accélération maximum au départ résulte de la condition limite du patinage et est

$$\gamma = g \frac{P(f + f_1) - (P + P')(f_1 + i)}{P + P' + \omega' \frac{K^2}{r^2}} \quad (\gamma = 0)$$

En annulant cette valeur, on obtient la déclivité limite absolue sur laquelle le véhicule peut démarrer et donc circuler; c'est $i = \frac{P}{P + P'}(f + f_1) - f_1$. Cette formule est exagérée du fait que la valeur de i est trop grande pour que l'on puisse substituer $i = \text{tg } \alpha$ à $\sin \alpha$; il faut donc y remplacer i par $\sin \alpha$. Ces formules sont pratiquement valables car, comme la vitesse est faible ou nulle, la puissance du moteur est suffisante pour faire patiner.

L'adhérence limite aussi la vitesse maximum possible qui résulte de la formule $k S v^2 = P(f + f_1) - (P + P')(f_1 + i)$, (puisque $\gamma = 0$).

On trouve des valeurs très élevées de la vitesse qui, combinées avec la valeur élevée de $\frac{4}{3}$ résultant de $T = Pf$ donnent lieu à des puissances énormes que peuvent tout au plus réaliser les voitures de course.

Pour les véhicules ordinaires, la vitesse est donc limitée par la puissance. Remarquons que les limites résultant de l'adhérence augmentent avec le rapport $\frac{P}{P + P'}$, que l'on peut appeler le rapport d'adhérence. Il est voisin de $\frac{2}{3}$ pour les voitures de tourisme à l'état statique. Le rapport d'adhérence statique des camions lourds est plus élevé et atteint 0,70.

0,80 en charge pour les camions de 2 à 5^t de charge utile. Le poids total varie de 2,25 à 2,00 la charge utile. Il existe des camions à adhérence totale (Latil, Panhard, etc.) ; la rampe limite devient $\sin \alpha = f$.

Mais les puissances spécifiques des camions sont faibles et les patinages se produisent moins dans ces véhicules, tout au moins en charge. L'adhérence des camions à un essieu moteur est déjà très élevée par rapport à la puissance spécifique et l'adhérence totale est une complication inutile, sauf pour les tracteurs légers devant remorquer de lourdes charges (artillerie).

Soit une voiture de tourisme de 1500 kg, dont 1000 kg sur l'essieu moteur arrière (P). Sur pavé gras, $f = 0,10$ et $f_1 = 0,03$. On voit donc que

$$i_{\text{lim}} = 0,67(0,10 + 0,03) - 0,03 = 0,057.$$

La voiture ne peut, dans ces conditions, gravir une rampe de plus de 5,7%. Supposons qu'à la vitesse de 14,4 km/h (4 m/s), cette voiture ait un effort moteur tangentiel maximum de 500 kg.

$$T = \frac{\mu}{r} - Pf_1 = 500 - 30 = 470.$$

Il y a possibilité de patinage si f est inférieur à 0,47, ce qui est fréquemment réalisé. La puissance correspondante à la jante est de 27 CV environ

Mais les possibilités de patinage sont encore plus grandes par démarrage brusque. Pour cette voiture, l'accélération maximum au démarrage en palier est $\gamma = g [0,67(f + 0,03) - 0,03]$.

$$\text{Supposons } f = 0,60, \quad \gamma = 3,85 \text{ m}/\text{s}^2.$$

En admettant que telle soit la vitesse au bout d'une seconde, la puissance moyenne correspondante est

$$\Phi_{\text{eff}} = \frac{1000(0,60 + 0,03 + 0,05 \frac{\gamma}{g}) \times 3,85}{2 \times 75 \times 0,70} = 23,8 \text{ CV.}$$

On voit que le démarrage brusque d'un moteur puissant peut déjà provoquer le patinage dans de telles conditions ; mais la facilité en est encore accrue si f est plus petit (sol glissant) et en rampe.

Supposons $S = 3 \text{ m}^2$ et $i = 0$, la valeur maximum possible est donnée par

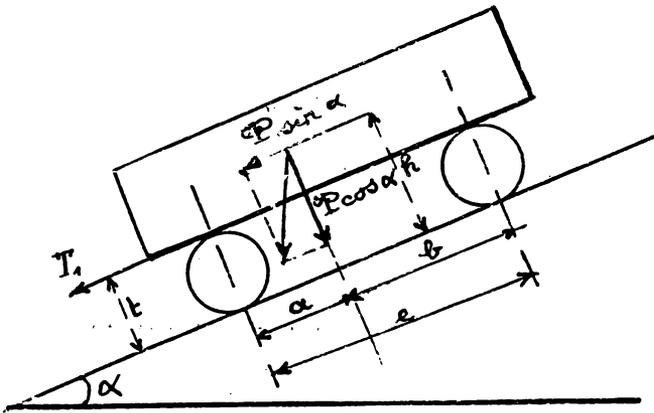
$$0,0054 \times 3 V^2 = 1000(f + 0,03) - 1500 \times 0,03.$$

$$\text{Supposons } f = 0,3 \text{ (revêtement humide)}. \quad V^2 = \frac{330 - 45}{0,0162} = 17600; \quad V = 132,5 \text{ km/h.}$$

La puissance correspondante serait $\Phi_{\text{eff}} = \frac{330 \times 132,5}{75 \times 36 \times 0,7} = 232 \text{ CV.}$

\$9.) Variation des charges d'essieu en mouvement.

La répartition statique des charges d'une voiture entre les essieux se modifie en mouvement; il se produit une surcharge de l'essieu moteur. Elle est surtout sensible pour les camions automobiles, comme il résulte de l'étude ci-après, d'après M^r. W. C. D. Macarman (Congrès de la route à Séville, 1923).



Désignons par P le poids total du camion et supposons l'essieu arrière, seul, moteur. A l'état statique, en palier, sur l'essieu moteur, la charge est

$$P_0 = \frac{P b}{e}$$

sur l'essieu avant

$$P'_0 = \frac{P a}{e}$$

Sur une rampe d'inclinaison α : $P_\alpha = P_0 \cos \alpha$.

Du fait de la composante, parallèle au sol, il s'ajoute une réaction

$$P_s = \frac{P h \sin \alpha}{e}$$

A l'état dynamique, en régime, la résistance au roulement décale les deux charges d'essieu vers l'avant d'une longueur $\delta = f_r$, donc la valeur correspondante de P_a est $\frac{P (b + \delta) \cos \alpha}{e}$, d'où un supplément de réaction

$$P_r = \frac{\delta P \cos \alpha}{e}$$

Le couple moteur sur l'essieu arrière étant μ , il en résulte un supplément de charge sur l'essieu arrière égal à $P_m = \frac{\mu}{e}$.

L'effort de traction exercé par le crochet de traction sur un train de remorques produit également un supplément de charge sur l'essieu moteur, égal à

$$P_t = \frac{T_1 t}{e}$$

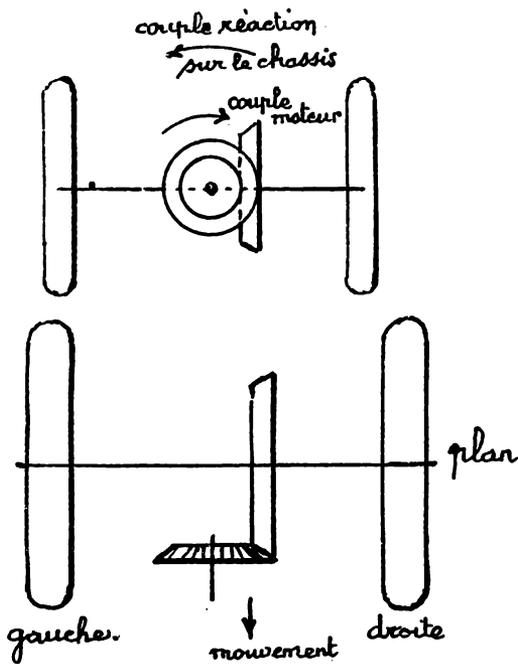
Enfin, le moment de résistance au roulement des roues d'avant produit le même effet et donne une surcharge

$$P_{av} = \frac{r f_1 P'_0 \cos \alpha}{e}$$

Donc, la charge totale sur l'essieu moteur devient

$$P = P_{\alpha} + P_{\rho} + P_{r} + P_{m} + P_t + P_{av}$$

$$P = P_0 \cos \alpha + \frac{Ph \sin \alpha}{e} + \frac{\rho P \cos \alpha}{e} + \frac{\mu}{e} + \frac{T_1 t}{e} + \frac{\kappa f_1 P'_0 \cos \alpha}{e}$$



On suppose la charge également répartie entre les deux roues, ce qui est vrai pour les camions à chaînes. Pour les autres systèmes, le poids de la roue gauche AR est augmenté (de $\frac{1}{4}$ pour les petits camions, à $\frac{1}{15}$ pour les lourds). On n'en tient généralement pas compte. La charge P_{av} est généralement négligeable, P_r toujours très faible, tous deux indépendants de la puissance et de la charge remorquée. Si T_1 est le poids du train remorqué, l'effet tangentiel a pour expression

$$T = \frac{\mu}{\kappa} - P f_1 = P' f_1 + P_s \sin \alpha + P_s (f_1 + \sin \alpha) + A,$$

A étant la résistance de l'air, que l'on néglige le plus souvent pour les camions en charge (faible vitesse). On considère l'état de régime, les accélérateurs étant toujours faibles. L'inéquation du patinage en régime est $P f > T$; elle s'écrit au départ ($A=0$)

$$\left[P_0 \cos \alpha + \frac{Ph \sin \alpha}{e} + \frac{\rho P \cos \alpha}{e} + \frac{\mu}{e} + \frac{T_1 t}{e} + \frac{\kappa f_1 P'_0 \cos \alpha}{e} \right] f > (P_s + P') f_1 + (P_s + P_s) \sin \alpha$$

Les valeurs de tous les éléments sont déterminés par mesure ou expérience. D'autre part :

$$T_1 = P_s (f_1 + \sin \alpha)$$

et

$$\mu = (P_s + P_s) (f_1 + \sin \alpha) \kappa.$$

L'inéquation en α peut être résolue et donne la valeur de l'inclinaison limite i résultant de l'adhérence.

En cas d'adhérence totale $P f > P_s \sin \alpha + P_s (f_1 + \sin \alpha)$;

si il n'y a pas de remorque $\sin \alpha \leq f$.

Monsieur Baarman a dressé d'après ses formules de ΣP , des tableaux pour les camions de types courants en rampes et avec remorques. Il en résulte que, au voisinage de la limite d'effort tangentiel

atteinte du fait de la charge remorquée, le poids adhérent peut être de 12 à 13% supérieur au poids adhérent statique et atteindre donc 0,78 à 0,90 du poids total. Par suite de cette forte adhérence et de la faible puissance spécifique des camions, la limite de l'effort tangentiel (intrinsèque) est généralement conditionnée par le couple maximum

$$T = \frac{\mu}{\pi} - P f_1.$$

Elle se rapproche de la limite d'adhérence pour des valeurs assez faibles de f , variant de 0,27 à 0,23, selon que le camion est à un ou deux essieux moteurs. Ce n'est qu'exceptionnellement que des valeurs inférieures de f sont réalisées. Le patinage des camions automobiles ne peut donc guère se produire qu'à vide et au démarrage, sur le sol glissant et surtout si un seul essieu est moteur.

La puissance du moteur ne permet donc pas, en règle générale, d'utiliser toute la capacité d'adhérence des camions, même à 1 essieu moteur. C'est ce qui explique que les camions, à deux essieux moteurs sont peu répandus; ils ne conviennent que pour la traction de très fortes charges remorquées par des tracteurs relativement légers (artillerie)

Par contre, l'emploi des trains à tracteurs à poids adhérent relativement faible, mais dont la remorque reporte une fraction de sa charge sur le tracteur, permet d'utiliser dans les conditions pratiques de charge et de rampe à la fois, l'adhérence et la puissance du moteur. Leur emploi est très souple et ils ont l'avantage de charges d'essieu relativement faibles, ce qui épargne les routes, les pneumatiques et les véhicules.

§10. Freinage. Le freinage a pour effet de bloquer certaines roues, qui glissent alors sur le sol. L'effort résistant correspondant est Pf . Sous l'effet de cette résistance, l'impulsion motrice étant supprimée, la voiture s'arrête après avoir parcouru un certain espace en un certain temps, en régime variable. Comme il se produit un rapide ralentissement, nous négligeons la résistance de l'air. De même, nous ne tenons pas compte de la force vive des roues.

Ces deux erreurs tendent à se compenser. Supposons l'essieu moteur seul freiné; la force retardatrice du freinage est Pf .

L'équation du mouvement est donc $Pf + P'f_1 + (P+P')(i + \frac{r}{g}) = 0$
ou :

$$\frac{dv}{dt} = -g \frac{Pf + P'f_1}{P+P'} - i.$$

En posant :

$$\frac{dv}{dt} = - \frac{Pf + P'f_1}{P+P'} g$$

$$v = v_0 - g \frac{Pf + P'f_1}{P+P'} t.$$

L'arrêt se produit au temps :

$$T = \frac{P+P'}{Pf + P'f_1} \frac{v_0}{g}.$$

L'espace parcouru se déduit de l'équation des forces vives :

$$(Pf + P'f_1) d = \frac{1}{2} \frac{P+P'}{g} v_0^2.$$

$$d = \frac{v_0^2}{2g} \frac{P+P'}{Pf + P'f_1}.$$

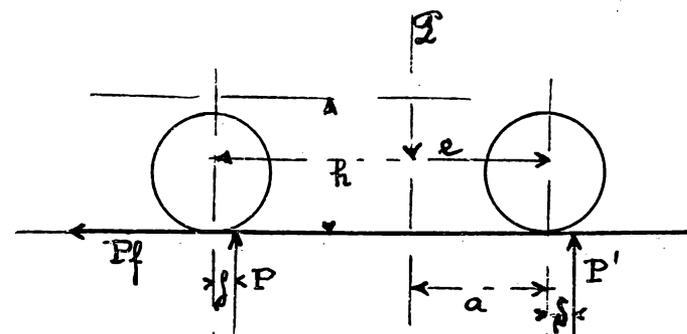
Généralement, $P'f_1$ est faible vis à vis de Pf .

Si toutes les roues sont freinées, $P'=0$ donc $v = v_0 - gft$.

$$T = \frac{v_0}{gf} \text{ et } d = \frac{v_0^2}{2gf}$$

Il se produit lors du freinage une variation de répartition des charges entre les essieux, analogue à celle qui résulte de l'état dynamique, mais d'effet inverse. L'essieu freiné est déchargé, l'autre surchargé d'autant. Cet effet est indifférent si tous les essieux sont freinés, ce qui augmente l'efficacité du freinage sur les 4 roues.

Soit h la hauteur du centre de gravité au dessus du sol. La force de freinage et les forces d'inertie forment un couple Pfh , qui est équilibré par un couple de réactions sur les essieux. L'es-



sieu freiné est donc déchargé de $\frac{Pfh}{e}$, e étant l'empattement. En général, $\frac{h}{e}$ est voisin de $\frac{1}{3}$ à $\frac{1}{2}$, on voit donc que la décharge de l'essieu freiné est assez importante et réduit sensiblement l'effet du freinage.

La valeur exacte de P se calcule comme suit :

$$P_{fh} + P_e = P(a + f_1 r)$$

$$P = \frac{P(a + f_1 r)}{f_1 h + e} = \frac{P a}{e} \frac{1 + \frac{f_1 r}{a}}{1 + \frac{f_1 h}{e}} = \frac{P a}{e} \left(1 + \frac{f_1 r}{a}\right) \left(1 - \frac{f_1 h}{e} + \frac{f_1^2 h^2}{e^2}\right)$$

$\frac{f_1 h}{e}$ est généralement voisin de 0,25 pour $f = 0,60$.

§ 11. - Fringalage. - Le patinage donne aisément lieu au fringalage, c'est-à-dire à des glissements latéraux. La raison en est aisée à comprendre. Lorsque les roues roulent sans glisser, un effort latéral $T' < Pf$ ne peut donner lieu à aucun glissement latéral. Mais quand les roues patinent, il se produit un effort longitudinal $T = Pf$, qui se combine avec T' et donne une résultante oblique $> Pf$, donc un glissement latéral. Cela se produit plus aisément d'autant que f est plus petit; aussi les patinages et les coups de frein brusques sur chaussée glissante sont très dangereux.

Chapitre II

Caractères généraux des routes. (au point de vue des transports)

§ 1. - Limites pratiques des rampes. - Elles dépendent de la topographie de la région et de la nature du trafic. En principe, il faut éviter les grands écarts d'inclinaison, c'est-à-dire éviter les surcharges des moyens de traction, ou d'alléger des véhicules ou la nécessité de moyens de traction spéciaux ou de renfort. Donc, les rampes limites seront plus faibles en pays plat qu'en pays accidenté. En pays de montagne, il n'est guère possible d'éviter de fortes rampes, mais il résulte du mode d'exploitation des forêts ou carrières que les véhicules montent généralement à vide ou peu chargés et redescendent en charge. Les fortes pentes ont donc moins d'inconvénients.

Actuellement, on admet qu'il ne faut pas dépasser des pentes de

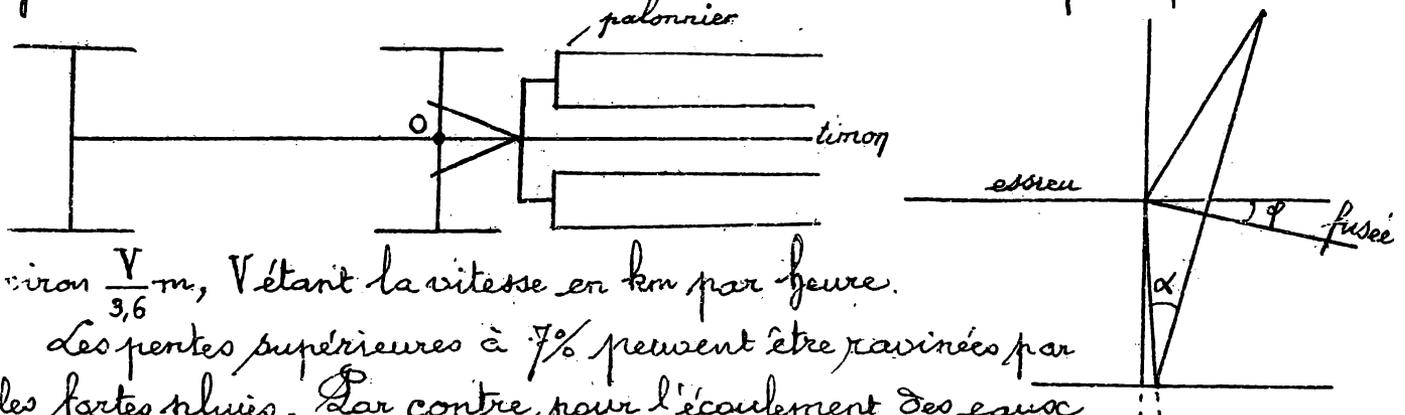
0,025	à	0,03	en pays plat,
0,03	"	0,04	" " moyennement accidenté,
0,04	"	0,05	" " très accidenté.

Pour les routes de moindre importance et les chemins, on peut aller un peu plus loin, ainsi qu'en région de hautes montagnes. Il est recommandable de ne pas dépasser 0,07 à 0,08. Dans les lacets, il ne faut pas dépasser 0,02. Les rampes exceptionnelles ne doivent pas avoir plus de 800 à 1000 m., sinon elles doivent être interrompues par des paliers ou des sections à faible pente (< 0,02).

Dans les courbes de petit rayon, il faut réduire les pentes d'après la formule $i' = \frac{R}{R_0} i$ dans laquelle i est la pente maximum, i' la pente réduite en courbe de rayon $R < R_0$, R_0 le rayon de courbure au delà duquel il ne faut plus réduire i . On peut admettre $R_0 = 50 \text{ à } 100 \text{ m}$ (30 en France).

En cas de ruptures de pente, il faut raccorder les 2 côtés de l'angle par un arc de cercle de rayon $R = 10V$, V étant la vitesse en km/h des véhicules les plus rapides pouvant circuler sur la route; R est exprimé en m. Il en résulte dans le passage du véhicule sur cette courbe une augmentation ou réduction de la pression de $\frac{V^2}{3,6^2 g R} = \frac{V^2}{98,1 \times 3,6^2 \times V} = 0,00078 V$ ou 0,078 V% due à la force centripète.

Pour $V = 60 \text{ km/h}$, $R = 600 \text{ m}$. et l'augmentation ou réduction de pression est de 4,7%. On peut aussi employer une parabole de raccordement qui, d'après M. Limasset, évite les oscillations des véhicules suspendus si le développement de la courbe suivant l'horizontale est égale à la longueur d'onde de l'oscillation du véhicule, c'est-à-dire pratiquement en-



viron $\frac{V}{3,6} \text{ m}$, V étant la vitesse en km par heure.

Les pentes supérieures à 7% peuvent être ravinées par les fortes pluies. Par contre, pour l'écoulement des eaux par les fossés, il faut éviter les paliers et donner toujours au moins 0,004 de pente. Pour éviter les routes boueuses, il faut au moins 0,014 de pente. Le trot est encore possible et non dangereux à la montée

comme à la descente jusqu'à 0,03 de déclivité. En dessous de cette limite, le frein n'est pas indispensable pour les véhicules à traction animale (pays plat).

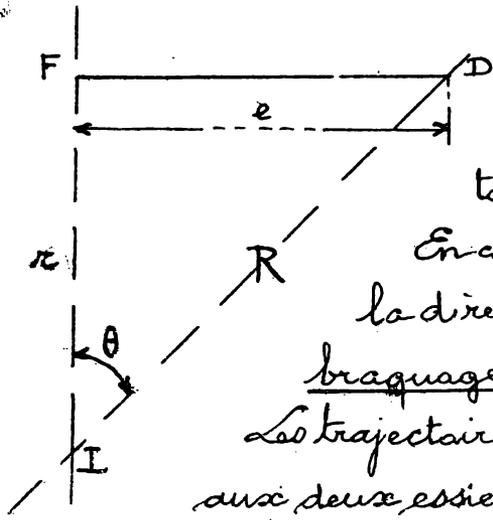
§2. Circulation dans les courbes. Les courbes ont pour effet d'augmenter la résistance à la traction. Dans les chemins de fer, des formules expriment cette résistance. Pour les véhicules sur routes, l'influence ne paraît pas chiffrable. Elle est d'ailleurs moindre, le véhicule n'étant pas lié à une trajectoire imposée et ayant plus de liberté de mouvement. Les frottements supplémentaires se réduisent à des frottements de rotation des jantes sur la chaussée. Pour les véhicules automobiles, les glissements qui pourraient être défavorables, à cause de la grande vitesse, sont supprimés par l'indépendance des roues directrices et l'action du différentiel. Mais il se produit des glissements des roues directrices par suite de l'incorrection de la direction.

L'effort de traction des animaux n'est réduit qu'en courbes de très petit rayon et surtout pour les animaux en flèche, dont l'effort de traction est oblique par rapport au véhicule. Le même effet se produit dans les trains automobiles en courbe de petit rayon. Généralement la rampe est réduite dans ces courbes, ce qui compense leur effet.

Nous examinerons plus loin les effets de la force centrifuge et le danger de dérapage. Sous ces efforts sont d'autant plus prononcés que le rayon de courbure est plus petit. D'autre part, dans son mouvement en courbe, le véhicule recouvre une aire plus large de la chaussée, ce qui exige une sur largeur d'autant plus grande que le rayon de courbure est plus petit. Il faut donc, en principe, éviter les courbes de faible rayon. Pour éclairer ce point de vue, nous étudierons brièvement le mouvement cinématique d'un véhicule en courbe.

En général, les véhicules ont l'essieu arrière fixe. L'essieu avant directeur peut s'incliner sur la position normale d'un angle appelé braquage. (30° à 35° pour les autos). Certains véhicules ont les deux essieux orientables, ce qui facilite le passage en courbe. Mais ce sont généralement des véhicules d'une longueur exceptionnelle, ainsi équipés pour leur permettre de parcourir les courbes dans les mêmes conditions que les véhicules ordinaires. Nous nous bornerons donc à étudier ceux-ci.

§3. Mouvement cinématique d'une voiture en courbe.



Nous représentons la projection horizontale de l'essieu directeur par son centre D. La distance FD est l'empattement. L'essieu fixe est toujours perpendiculaire à l'axe FD du véhicule.

En courbe, l'essieu directeur s'incline sur FD suivant la direction telle que DI . L'angle FID est l'angle de braquage.

Les trajectoires des points F et D sont évidemment normales aux deux essieux si il n'y a pas de glissements. Il en résulte que leur point de rencontre I est le centre instantané de rotation.

La droite FI étant invariablement liée au mobile, la courbe des centres instantanés de rotation est l'enveloppe de FI . Inversement, le mouvement est tel que FI roule sans glisser sur cette courbe dont la trajectoire de F est donc une développante.

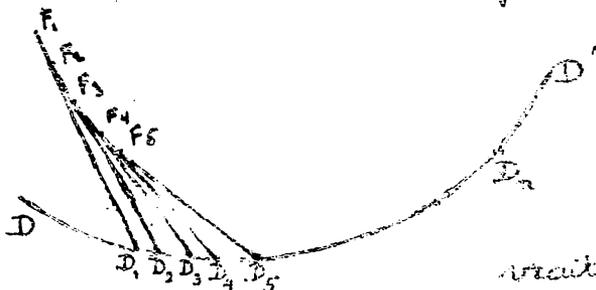
Il est apparent que l'angle élémentaire dont tourne l'essieu directeur est égal à la rotation élémentaire du véhicule (essieu fixe), augmenté de l'accroissement élémentaire de l'angle de braquage. Il en résulte que si l'angle de braquage est invariable, les trajectoires de F et de D sont deux cercles concentriques, ce qui apparaît d'ailleurs évident d'après la figure ci-dessus. I est, en effet, fixe si l'angle de braquage est constant.

Si r est le rayon de la trajectoire de F , celui de la trajectoire de D est $R = \sqrt{r^2 + e^2}$. L'angle de braquage constant correspondant est défini par $\sin \theta = \frac{e}{R}$ ou $\text{tg } \theta = \frac{e}{\sqrt{R^2 - e^2}}$.

Si l'on connaît la trajectoire de F , il est très simple d'en déduire celle de D , puisque FD est toujours tangent à la trajectoire de F et que $FD = e$.

Généralement, c'est le mouvement de D qui est directeur. Cette question théorique intéressante sort des limites utiles du cours.

Dans les cas pratiques où cette étude devrait se faire, l'ingénieur peut utiliser la méthode approximative ci-après. La trajectoire de D est DD' . La position



La trajectoire de D est DD' . La position

initiale du véhicule est F, D_1 . On envisage sur DD' plusieurs positions successives $D_2, D_3 \dots D_n$ assez rapprochées du point D . On détermine les points $F_2, F_3 \dots F_n$ sur $D_1 F_1, D_2 F_2, \dots D_{n-1} F_{n-1}$ tels que

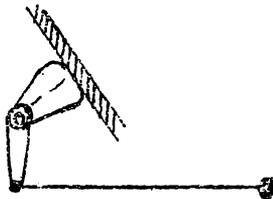
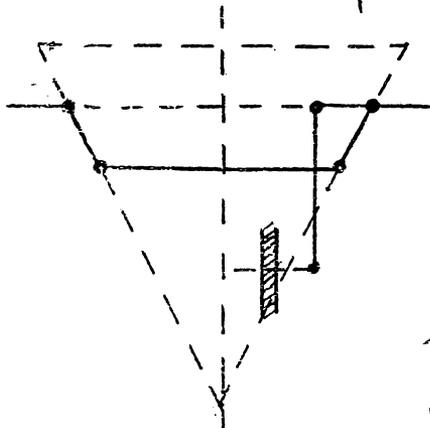
$$D_2 F_2 = D_3 F_3 = \dots D_n F_n = e.$$

La ligne brisée $F_1 F_2 F_3 \dots F_n$ représente la trajectoire de F avec une suffisante approximation.

Comme résultat utile de cette étude, il convient de noter que, lorsque l'essieu directeur suit une trajectoire droite et que l'angle de braquage maximum est de 30° , l'essieu fixe rejoint pratiquement cette trajectoire droite après un parcours qui n'est pas supérieur à 2,20 e.

Le dispositif de direction des voitures automobiles ne satisfait pas aux conditions d'un virage sans glissement. Pour cela, il faudrait que les prolongements des axes des fusées se coupent toujours en projection horizontale sur l'alignement de l'essieu arrière. En fait, cette condition n'est réalisée que pour une seule position des roues, correspondant à un angle de braquage moyen de 30 à 35° . L'inclinaison du levier de commande des fusées est déterminée en conséquence. Pour toutes les autres valeurs de l'angle de bra-

quage, il y a des glissements de roues. Anciennement, on réalisait la condition de Jeandaud, d'après laquelle les pro-

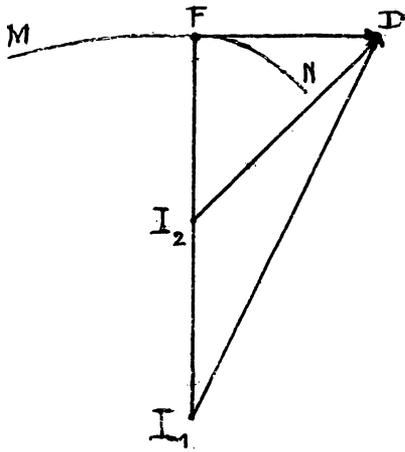


longements des leviers de fusées doivent se couper au centre de l'essieu arrière. Cette condition correspond à une valeur particulière de l'angle de bra-

quage correct. Pratiquement le point de convergence est toujours voisin du milieu de l'essieu arrière.

§4. Effet d'une variation brusque de courbure de la trajectoire du véhicule.

La trajectoire de F est l'enveloppe de FD ; il n'en est pas de même de celle de D . Si la trajectoire de F présente une variation brusque de courbure, il



en résulte un jarret dans la trajectoire de D, donc une variation brusque et finie de l'angle de braquage. Cela ressort suffisamment de la figure ci-contre.

Sauf à très faible vitesse, une variation brusque de l'angle de braquage est impraticable. Elle provoque des dérappages des roues avant et est très dangereuse. Il en résulte que, pratiquement, l'angle de braquage doit varier progressivement. L'essieu

s'écartera donc de la trajectoire prévue MN pour décrire une courbe à variation continue de courbure. Si MN est l'axe de la partie de la chaussée réservée aux véhicules circulant dans le sens considéré, F s'écartera de cet axe et empiètera sur les zones voisines de la chaussée affectées à d'autres usages, d'où risque de collision et nécessité de surlargueur.

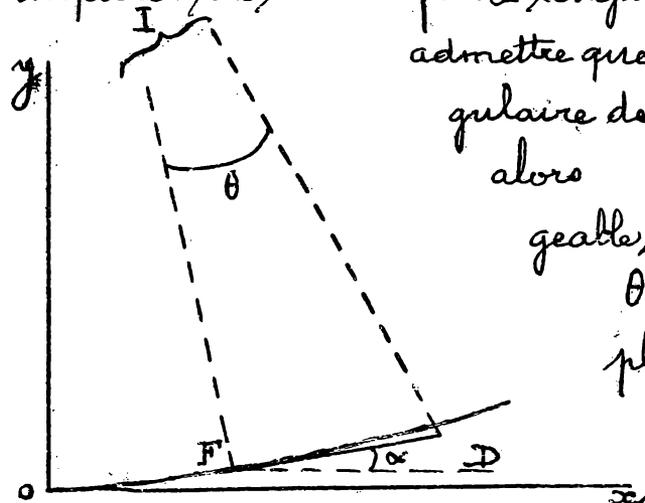
Pour cette raison, il est nécessaire d'éviter des changements brusques de courbure sur les routes importantes à trafic rapide. Il faut pour cela relier les alignements droits aux courbes et les courbes entre elles par des raccordements progressifs à variation continue de courbure.

§ 5. Raccordement progressif par arco de parabole cubique

Les raccordements progressifs ont beaucoup moins d'importance pour les routes que pour les chemins de fer, le véhicule n'ayant pas de trajectoire imposée. Ils sont de faible longueur. Dans ces conditions, nous pouvons admettre que l'angle de braquage et le mouvement angulaire de l'axe FD, sont très petits. On peut écrire

alors $\theta = \frac{e}{\rho} = e \frac{d^2 y}{dx^2}$, puisque $(\frac{dy}{dx})^2$ est négligeable par rapport à l'unité.

θ doit varier progressivement. Le plus simple est de le faire varier proportionnellement au chemin parcouru qui, suivant les hypothèses faites, nous confondons avec

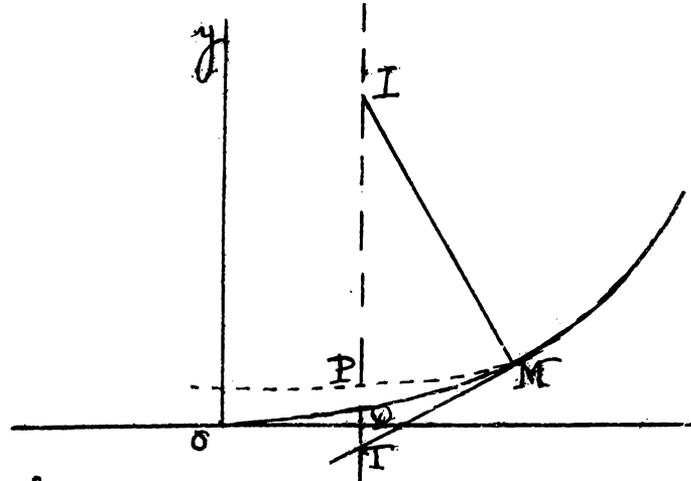


l'abscisse. Donc: $\theta = \omega x = e \frac{d^2 y}{dx^2}$, et $y = \frac{\omega x^3}{6e}$, la courbe partant de l'origine.

La courbe de raccordement est donc une parabole cubique.

Il existe d'autres courbes de raccordement, plus parfaites et plus transcendantes (voir Cours de Topométrie de M. d'Ocagne).

§6. Graci du raccordement progressif d'un alignement droit et d'un arc de cercle.



Supposons le problème résolu et soient O l'extrémité de l'alignement, M l'origine de la courbe circulaire MM' de centre I . Le raccordement parabolique est OM , dont O est le point d'inflexion, OX la tangente en O , et qui est osculateur en M à MM' . En

choisissant comme axes coordonnées la tangente OX au point d'inflexion (abscisses) et la normale au même point (ordonnées), l'équation est :

$$y = kx^3$$

d'où $\rho = \frac{1}{\frac{d^2y}{dx^2}} = \frac{1}{6kx}$, d'après les hypothèses du § précédent. En appelant L , la longueur du rac-

cordement, on a donc au point M :

$$x = L, \quad \rho = r = \frac{1}{6kL} \quad \text{d'où} \quad k = \frac{1}{6rL}, \quad r \text{ étant le rayon de la courbe circulaire.}$$

L'équation de la cubique est donc $y = \frac{x^3}{6rL}$.

L'ordonnée du point de contact M est $y_1 = \frac{L^2}{6r}$.

Selon la propriété connue de la parabole cubique, la sous-tangente est égale au tiers de l'abscisse. L'abscisse du centre de courbure est :

$$\xi = x - \rho \frac{dy}{dx} = \frac{x}{2}$$

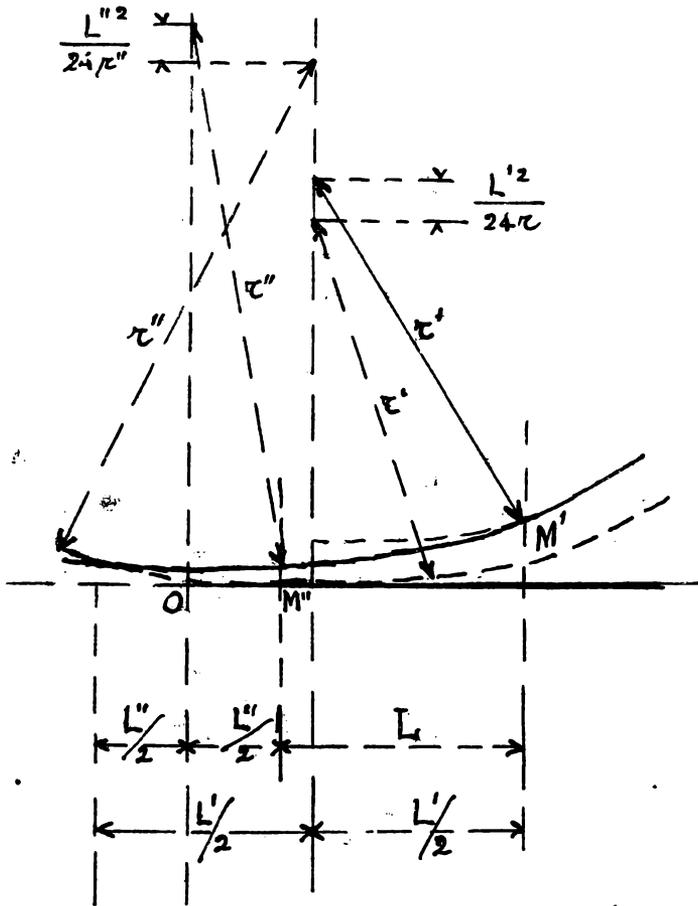
donc la moitié de l'abscisse correspondante de la courbe. Donc l'abscisse de I est $\frac{L}{2}$.

L'ordonnée de I est $\eta = r + PT - IQ$.

Or $IQ = \frac{y_1}{2} = \frac{L^2}{12r}$ et $2r \cdot PT = \frac{L^2}{4}$, d'où $PT = \frac{L^2}{8r}$. Donc :

$$\eta = r + \frac{L^2}{24r}$$

Donc, en l'absence de raccordement progressif, l'entrée en courbe se ferait en P. Le raccordement progressif a pour objet de substituer aux parties respectives OQ et PM de la droite et du cercle, un arc de parabole cubique OM et de déplacer le cercle perpendiculairement à l'alignement droit d'une longueur $\frac{L^2}{24r}$ dans le sens de la courbure.



Le tracé est simple. Le centre du cercle est déplacé perpendiculairement à l'alignement droit de $\frac{L^2}{24r}$ dans le sens de la courbure. Le raccordement de la parabole cubique avec la droite se fait au point d'inflexion, à distance $\frac{L}{2}$ de la normale à l'alignement droit, passant par le centre du cercle. Le raccordement avec l'arc de cercle se fait à distance $\frac{L}{2}$ de la même normale, du côté opposé.

§ 7. Raccordement progressif de deux arcs de cercles.

Pour permettre d'appliquer les

principes précédents d'usage très simple, nous envisageons au point de contact des 2 arcs de cercle l'existence d'un alignement droit infiniment court, suivant la tangente commune. Nous traçons ensuite les raccordements de cet alignement droit avec chacun des 2 arcs de cercles en réalisant les conditions voulues pour que les deux courbes de raccordement appartiennent à une même parabole cubique.

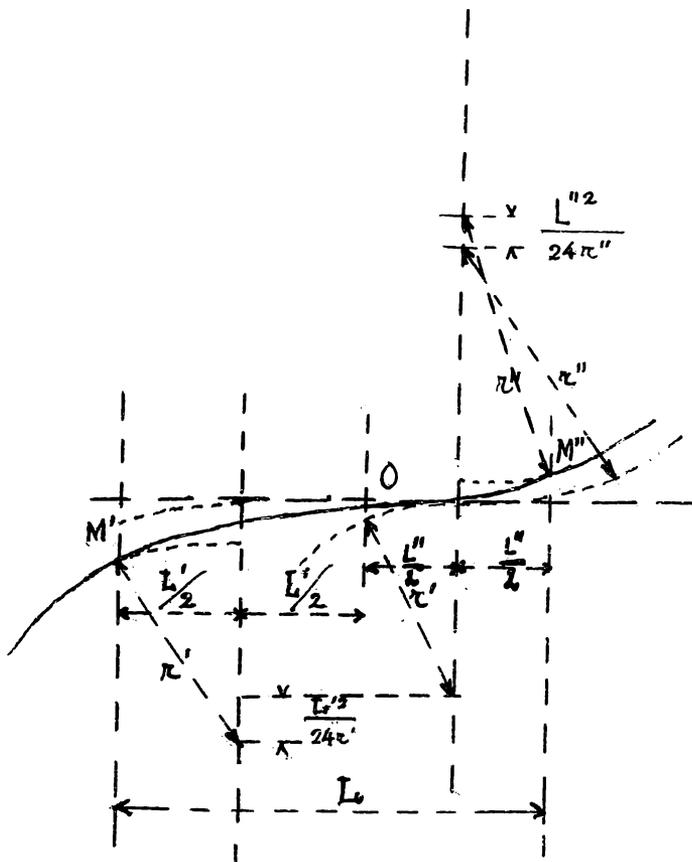
Soit L la longueur du raccordement de deux courbes de même concavité et de rayons r' et r'' et soit $r' < r''$. A partir du point d'inflexion de la courbe de raccordement avec la tangente commune primitive, il correspond au cercle de rayon r' une longueur d'arc L' et au cercle de rayon r'' une longueur $L'' < L'$. On a la relation $L = L' - L''$. Pour que la courbe de raccordement soit unique, il faut que

$$y = \frac{x^3}{6 \pi' L'} = \frac{x^3}{6 \pi'' L''}$$

donc $\frac{L'}{L''} = \frac{\pi''}{\pi'}$; donc $L' = L \frac{\pi''}{\pi'' - \pi'}$, $L'' = L \frac{\pi'}{\pi'' - \pi'}$

et $y = \frac{x^3}{6 L \frac{\pi' \pi''}{\pi'' - \pi'}} = \frac{x^3}{6 L} \left(\frac{1}{\pi'} - \frac{1}{\pi''} \right)$

La construction de la courbe de raccordement est donc des plus simples, suivant l'exposé du § précédent.



Dans le cas du raccordement de deux courbes opposées, de rayons π' et π'' , les conditions deviennent $L = L' + L''$.

$$\frac{L'}{L''} = \frac{\pi''}{\pi'}$$
 , d'où $L' = L \frac{\pi''}{\pi' + \pi''}$,
 $L'' = L \frac{\pi'}{\pi' + \pi''}$

et $y = \frac{x^3}{6 L \frac{\pi' \pi''}{\pi' + \pi''}} = \frac{x^3}{6 L} \left(\frac{1}{\pi'} + \frac{1}{\pi''} \right)$

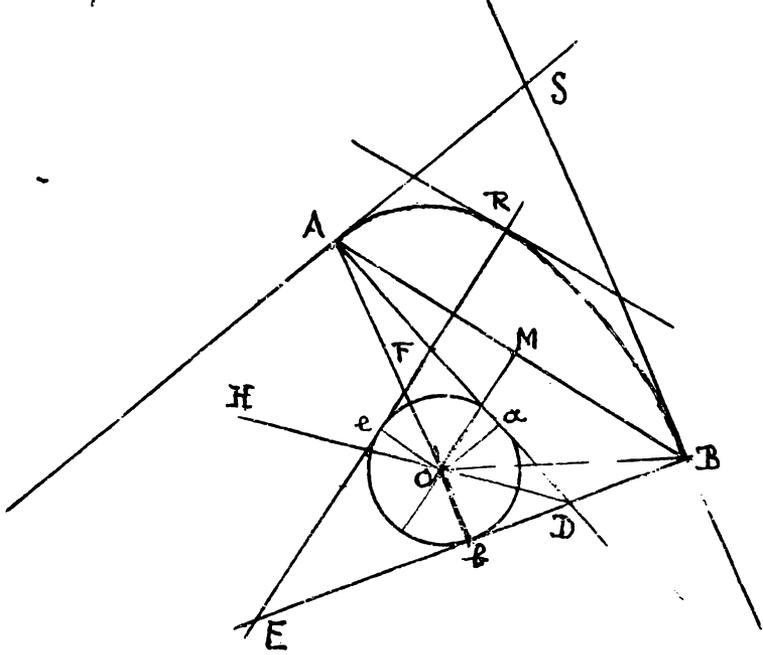
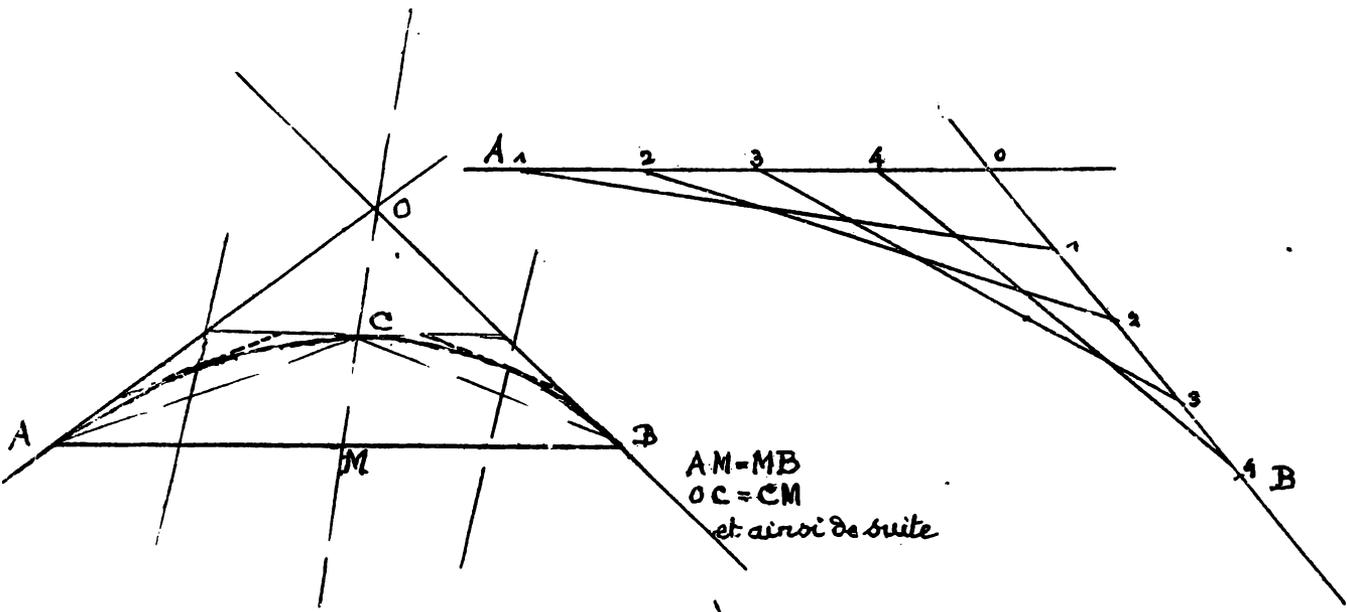
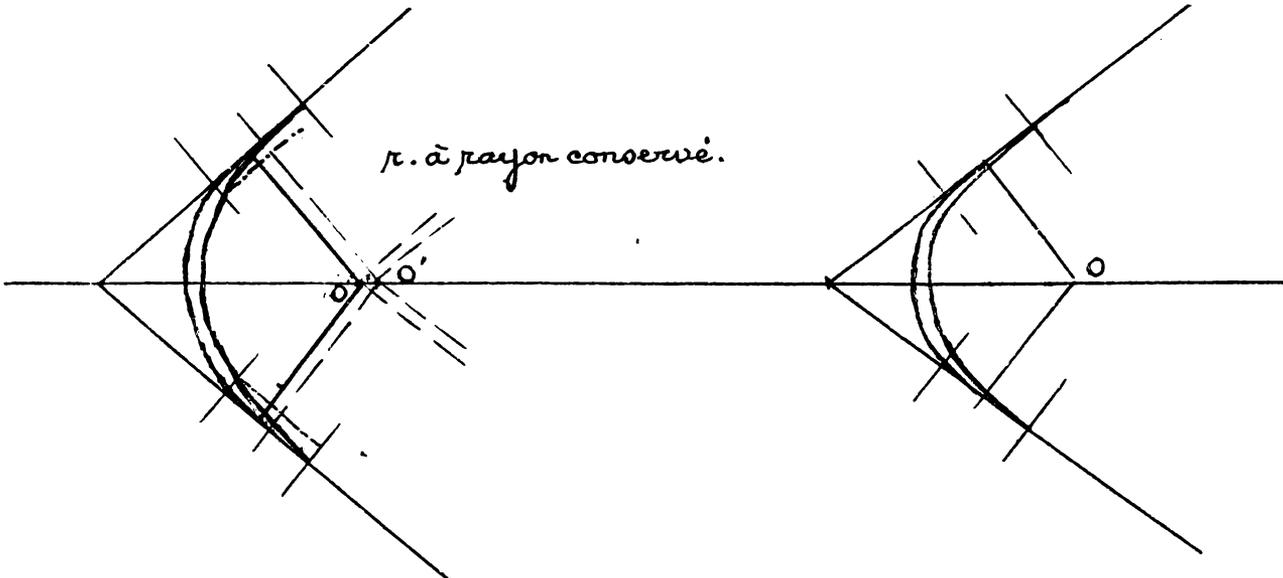
Le tracé se fait comme précédemment.

Une longueur de raccordement de 10 à 15 m. suffit entre un alignement droit et un arc de cercle et entre deux arcs de cercle de courbure concordante et de rayons différents.

Entre deux courbes circulaires opposées, il faut 30 m. pour la circulation rapide. Anciennement, on prescrivait d'intercaler des alignements droits entre deux courbes inverses ou de rayons différents. Mais ce tracé est à vrai dire défectueux s'il n'est pas accompagné de raccordements progressifs.

§ 8) Tracé des courbes. - Pratiquement les courbes sont généralement circulaires, plus rarement des paraboles du 2^e degré.

L'inscription d'une courbe circulaire de rayon donné entre deux alignements droits est une opération de géométrie élémentaire. Le centre du cercle se trouve sur la bissectrice de l'angle des deux alignements droits. Cette propriété se conserve si l'on insère entre les alignements droits et la



courbe deux raccordements progressifs identiques. Ces raccordements peuvent se faire en conservant le rayon de la courbe primitive (r . à rayon conservé), auquel cas le centre se déplace. Ou bien on conserve le centre primitif (r . à centre conservé), alors le rayon de la courbe diminue.

Pour les courbes paraboliques du second degré, on se sert de gabarits établis en vue de ne pas dépasser certaines limites de courbure ou bien on se donne a priori les longueurs des 2 segments de tangente à partir du sommet de l'angle. Il est très facile alors de trouver la direction diamétrale de cette parabole et, dès lors, d'en déterminer autant de points que l'on désire (voir fig. ci contre). Cette construction exacte est préférable à la construction approximative que l'on cite souvent et qui donne un tracé polygonal partout intérieur à la parabole.

Pour des raisons topographiques ou autres, il peut être utile de constituer la courbe par deux arcs de cercle de rayons différents. La construction est simple et permet une infinité de solutions. On choisit celle qui satisfait le mieux aux circonstances, compte tenu du rayon minimum. Soient SA et SB les segments de tangentes. Elevons en A et B les perpendiculaires à SA et SB qui se coupent en D. Soit O le point de rencontre de la médiane de AB et de la bissectrice externe DH de $\angle ADB$. Traçons le cercle de centre O tangent en a et b à AD et BD. Comme, par construction, $AO = BO$, on a $Aa = Bb$. Traçons la tangente en e au cercle, qui coupe AD en F et BD en E. Traçons un arc de cercle de centre E et de rayon EB qui coupe EF en R. On a :

$$Aa = AF + Fa = AF + Fe = Bb = BE - Eb = BE - Ee.$$

$$\text{Donc } AF = BE - Ee - Fe = ER - EF = FR.$$

Donc le cercle de centre F et de rayon $FR = FA$ complète la courbe.

Donc le cercle abc est l'enveloppe du diamètre commun EF.

En outre, on voit facilement que l'enveloppe de la tangente commune est un cercle concentrique tangent à SA et SB et que le lieu du point de contact R est un cercle concentrique passant par A et B.

Lorsque $SA = SB$, le cercle abc se réduit à son centre, la courbe ne peut appartenir qu'à un seul cercle. Le raccordement à deux cercles correspond donc

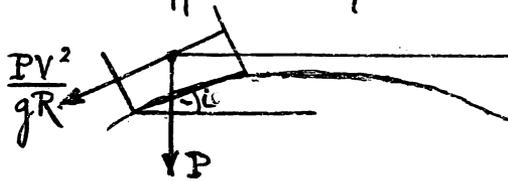
à $SA \neq SB$. Le rayon FR augmente lorsque l'angle REB diminue. La différence des 2 rayons est minimum lorsque FE est perpendiculaire à DH . Lorsque FE est perpendiculaire à SA ou SB , l'un des cercles est remplacé par 1 segment de droite, la courbe ne comporte qu'un arc de cercle.

Si l'on intercale en A , R et B des raccordements progressifs, les points de contact se déplacent. On prendra comme axe de départ la tangente commune et on procédera au tracé des raccordements en conservant les orientations des alignements droits. L'épave fera connaître les déplacements relatifs des centres et points de contact par rapport au sommet S de l'angle. (voir planches).

§ 9. Limite inférieure des rayons des courbes. - Il faut éviter les courbes de faible rayon et s'imposer une limite inférieure :

- pour réduire l'augmentation de l'effort de traction ;
- pour réduire les pertes de vitesse des automobiles ;
- pour réduire les effets de la force centrifuge et les tendances au dérapage ;
- pour réduire les surlarges à donner en courbe et aux raccordements ;
- pour améliorer la visibilité nécessaire à la sécurité de la circulation à grande vitesse.

Nous avons indiqué la possibilité du dérapage des roues, avant par modification brusque de l'angle de braquage. Le dérapage des roues arrière est un effet de la force centrifuge.



R Si P est le poids, V la vitesse, R le rayon de la courbe et i la pente transversale supposée vers l'extérieur de la courbe (voiture circulant à l'extérieur de la courbe sur une route à profil bombé), pour qu'il n'y ait pas dérapage, il faut que

$$Pf > \frac{PV^2}{gR} + Pi \quad \text{ou} \quad R > \frac{V^2}{g(f-i)} \quad \text{pour une vitesse donnée ou}$$

$$V^2 < Rg(f-i) \quad \text{pour une courbe donnée.}$$

Pour $i = 0,03$ et $V = 20 \text{ m/s}$ (72 km/h), il faut $R > 151 \text{ m}$. lorsque $f = 0,30$. La valeur de f est généralement supérieure, mais, sur les routes unies

pour automobiles et en cas de pluie ou de crachin, f peut être notablement plus petit. Si $f = 0,10$, dans l'exemple précédent, il faut $R > 584$ m. env.

Les courbes de la route pour autos de Milan aux lacs italiens ont toutes, sauf 4, des rayons supérieurs à 500 m. Le plus petit rayon est 400 m. Ces limites sont élevées; elles peuvent être réduites si la route présente un dévers. Ainsi pour $f = 0,10$, avec un dévers de 5%, la limite précédente peut être réduite à 272 m. Cependant, elle est encore de beaucoup supérieure aux rayons de 50 à 100 m. usités avant la traction automobile. Nous étudions le dévers et les surlargeurs à propos des profils transversaux. Ces questions acquièrent une importance toute particulière dans la construction des automobiles.

La question de visibilité est très importante également; on n'en tient généralement pas assez compte.

Si dans les formules indiquées pour le freinage, nous faisons $\frac{P'}{P+P'} = \frac{2}{3}$, et $f = 0,38$ (béton ou asphalte gras), en négligeant $P'f$, par rapport à Pf , on obtient $\frac{Pf}{P+P'} = 0,255$ et la distance d'arrêt est, en palier,

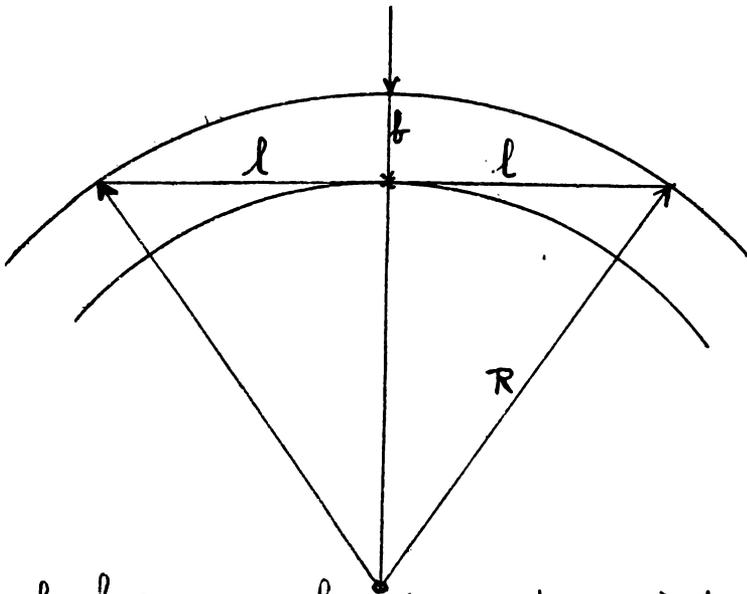
$$d = \frac{V^2}{0,510 \times 9,81 \times 3,6^2} = \frac{V^2}{65} \quad (d \text{ en m., } V \text{ en km/h})$$

Donc, pour :

$V =$	32	40	64	80	96 km/h,
$d =$	16	25	65	101	145 m.

Ces chiffres concordent avec ceux de M. Herbert S. Swan de New-York (Bulletin ALPCR, n: 33, mai-juin 1924). D'après le même, ils se modifient pour l'asphalte et le béton sec en tenant compte de ce que $f = 0,64$, mais ils augmentent pour l'asphalte glissant, car $f = 0,06$. D'après cela, pour éviter les collisions, il faut assurer une visibilité d'au moins 100 m, de préférence 150 m. selon les Américains et M. Hlouzek (Ech. St.)

Cette visibilité dépend de la nature des obstacles. Supposons la route bordée d'une forêt, de murs élevés ou d'un talus (déblai). La visibilité dépend du rayon de la courbe parcourue par le véhicule et de celui de l'obstacle, c'est-à-dire de la distance de l'écran à la voiture. Soit R le rayon de la courbe suivie par la voiture, b la largeur libre vers la concavité de la courbe au niveau des yeux du conducteur et $2l$ la visibilité minimum. On a $l^2 = b(2R - b)$,



d'où $R \geq \frac{l^2 + b^2}{2b}$ ou, approxima-
tivement $R > \frac{l^2}{2b}$.

Si $2l = 100 \text{ m}$ et $b = 8,00 \text{ m}$,

$$R > \frac{2500}{16} \text{ ou } 156 \text{ m.}$$

Certains font observer que c'est l'éclairage et la visibilité des obstacles pendant la nuit, qui doit être prise en considération. Toutes choses égales d'ailleurs, la visibilité devient plus réduite parce que

les faisceaux lumineux des projecteurs sont tangentiels à la trajectoire. Il en résulte que certaines zones vers l'intérieur de la courbe ne peuvent être éclairées à longue distance. Les phares auxiliaires orientables dont sont munies certaines voitures sont très avantageuses sous ce rapport. Si l'on admet que la voiture circulant à l'extérieur de la courbe doit éclairer laisière concave à une distance l en avant de la voiture, b étant la demi-largeur totale de la route au niveau des phares, le rayon minimum de la courbe est : $R \geq \frac{l^2 - b^2}{2b}$. Si $l = 100 \text{ m}$, $b = 8 \text{ m}$, $R \geq 621 \text{ m}$.

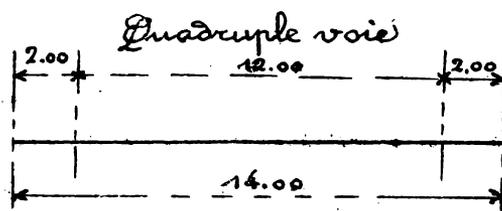
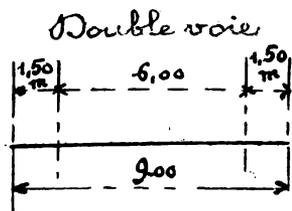
Cette limite est un peu élevée. Il faut tenir compte de la conicité des faisceaux lumineux, qui fait qu'une grande surface du sol est éclairée en avant de la voiture et qu'une partie du faisceau est inclinée vers l'intérieur de la courbe. D'autre part, il est évident que la prudence doit être augmentée la nuit.

Comme limites pratiques minima des rayons des courbes, on peut admettre 250 à 300 m. pour toutes les routes ordinaires importantes à trafic automobile rapide. Si le terrain est difficile, on peut diminuer selon les nécessités sans descendre en dessous de 100 m.

Pour les routes secondaires, selon l'importance, la limite sera comprise entre 100 et 50 m. On évitera, en tous cas, de descendre en dessous de la dernière limite.

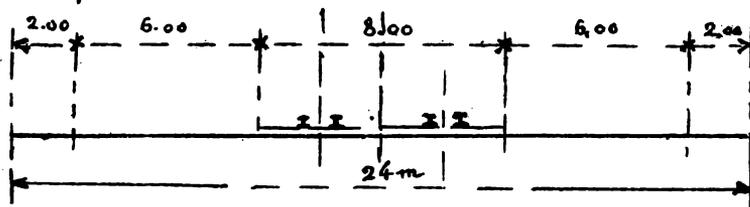
Pour les routes d'automobiles, on envisage actuellement 500 à 600 m.

§ 10. Largeur des routes en alignement droit.

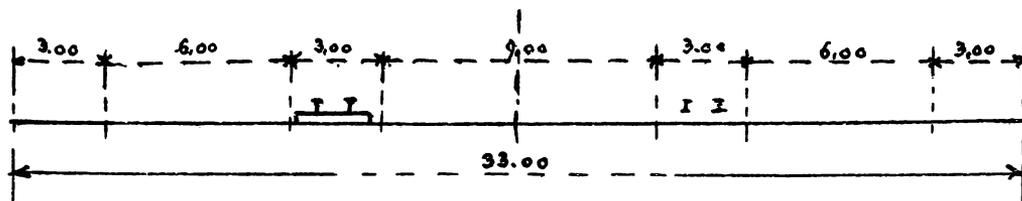


La largeur dépend du nombre de voitures qui peuvent circuler de front sur la route. La largeur maximum des voitures, généralement adoptée par les règlements nationaux ou internationaux, est 2.50 m. Afin d'assurer la sécurité de la circulation, à grande vitesse, il faut réserver une largeur de route de 3.00 par véhicule. Si l'on donne plus, les dimensions des véhicules sont élargies. Donc, la largeur de la chaussée, en m. est égale à 3 fois le nombre de véhicules pouvant circuler de front. Les anciennes grand'routes ont presque toutes 5 m. On les élargit à 6 m. Nous ne parlons pas des routes de 3.00 m. qui doivent comporter des croisements. Les routes importantes modernes se construisent à 9 ou 12 m. de largeur (Autostade de Milan aux lacs italiens). Parfois on sépare les deux bandes de 6.00 m. réservées aux deux sens de circulation par des bordures étroites en saillies, pouvant servir de refuge aux piétons. Cette disposition est dangereuse, mais il est utile de prévoir une bande de séparation, de couleur blanche.

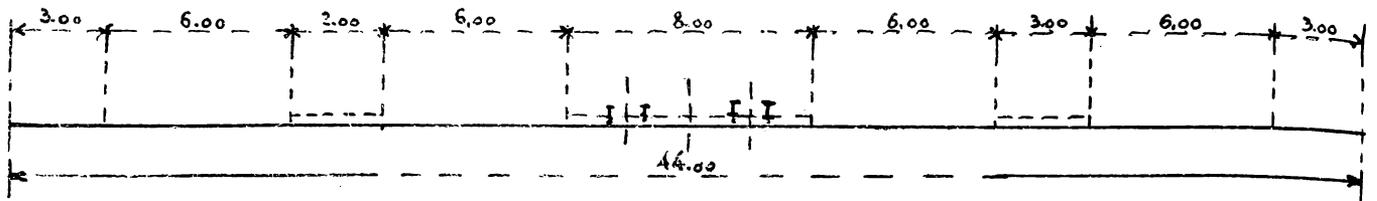
Dans certaines routes, des pistes spéciales pour cyclistes, cavaliers ou piétons sont disposées au milieu.



Quadruple voie et tramway.



7 voies avec ou sans tramways.



8 voies avec tramways.

Si un tramway suit la route, il faut le disposer sur une plateforme spéciale au milieu de la route. Pour les routes exceptionnelles, on sépare le trafic lent du trafic rapide; on obtient alors 3 ou 4 voies chaussées, séparées par des pistes spéciales et la plateforme du tramway (boulevards interurbains).

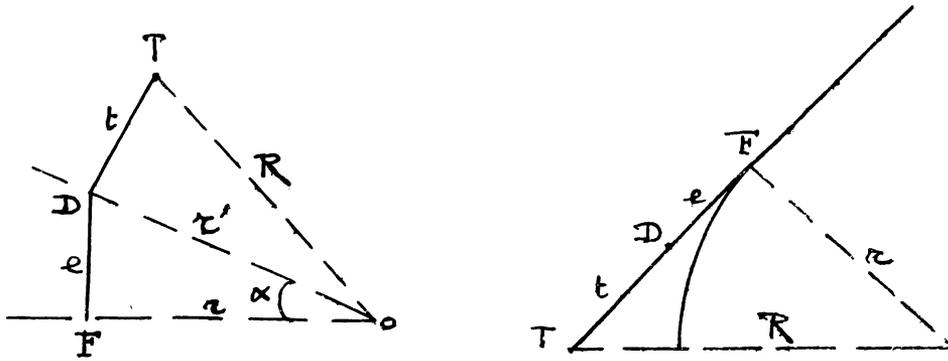
Des circonstances spéciales peuvent justifier d'autres dispositions, celles qui sont représentées ci-dessus sont purement rationnelles. Pour les accotements, il ne faut pas descendre en dessous de 1,00 m. et adopter 2,00 m. de préférence, surtout s'il y a des plantations. Dans certains cas, il est préférable de disposer un seul accotement très large d'un seul côté de la route, par exemple vers le côté du vide dans une route à flanc de coteau. La largeur est de 0,75 m. par piéton de front. Les figures ci-dessus indiquent quelques dispositions normales et les largeurs totales jusqu'aux bords intérieurs des fossés. Dans les villes ou aux abords, les largeurs des trottoirs et terre-pleins sont souvent augmentées pour les promeneurs, par raison d'esthétique, etc...

§11. Surlargeurs en courbe. Le passage des véhicules en courbe de faible rayon exige une surlargeur. On peut procéder graphiquement de la manière suivante selon M. Limasset. L'axe courbe de la chaussée étant tracé à une certaine échelle sur un dessin, on détermine la trajectoire de l'essieu avant, l'essieu arrière décrivant l'axe de la courbe. Ensuite on effectue le tracé de la trajectoire de l'essieu arrière en supposant que l'essieu avant décrive l'axe de la chaussée. L'écart des 2 trajectoires indique en chaque point la surlargeur nécessaire, qui est, en général, réalisée par moitié de part et d'autre de la largeur ordinaire. Il faut tenir compte éventuellement du timon et des véhicules spéciaux, qui peuvent circuler dans la courbe (transport de bois en grumes).

Ces surlargeurs ne sont nécessaires que dans les courbes de petit rayon et spécialement pour les véhicules à timons (traction animale), ainsi que pour les transports de grumes et les trains automobiles. D'après les dimensions courantes du charroi, la question des surlargeurs ne se pose qu'une fois pour les routes modernes ayant des rayons de courbes supérieurs à 50 m. Déterminer la largeur minimum nécessaire dans une courbe circulaire de petit rayon ou à l'entrée dans une telle courbe est un simple problème de géométrie élémentaire.

On a $r' = \frac{r}{\cos \alpha} = \sqrt{r^2 + e^2}$, $R = \sqrt{r'^2 + t^2} = \sqrt{r^2 + e^2 + t^2}$.

Si l est la largeur hors tout de la voiture attelée, la largeur minimum nécessaire pour le passage du véhicule en courbe est $l + (R - r)$. Pour conserver la même aisance qu'en alignement droit, la surlargeur nécessaire est $R - r$.



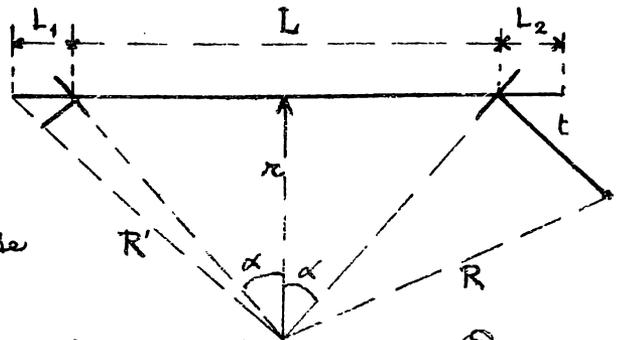
La limite minimum de r , pour un angle de braquage maximum de 30° à 35° est $r = \frac{e}{\tan \alpha} = 1,75 e$ environ.

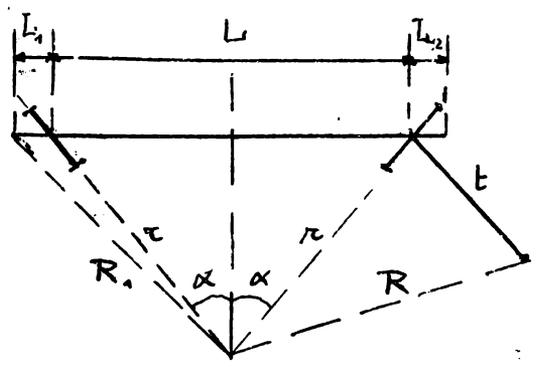
À l'entrée en courbe, $R = \sqrt{r^2 + (e+t)^2}$, la surlargeur nécessaire pour le véhicule suivant l'intérieur de la courbe est $(R - r)$. Pour un véhicule circulant à l'extérieur, le conducteur doit incliner l'attelage dès qu'il arrive à la courbe. La surlargeur correspond aux premières formules.

Pour le passage d'une grume sur 2 essieux orientables, les formules sont les suivantes.

Supposons que la grume ne puisse pas empiéter sur l'accotement.

Soit r le plus petit rayon libre pour l'axe de la grume. On a :





$R = \sqrt{\frac{L^2}{4} + t^2 + r^2}$, la limite de r est $\frac{L}{2tg\alpha} \equiv 0,9 L$

Il faut que $R' = \sqrt{r^2 + (\frac{L}{2} + L_1)^2} < R$

La largeur minimum nécessaire est $\frac{l}{2} + R - r + \frac{g}{2}$, g étant l'épaisseur de la grume.

Si la grume peut empiéter sur l'accotement, les roues peuvent en affleurer le bord. Alors

$R = \sqrt{(\frac{l}{2})^2 + t^2}$,

$r = L - \frac{l}{2}$.

le rayon minimum est

Il faut encore que $R' = \sqrt{(\frac{l}{2})^2 - \frac{L^2}{4} + (\frac{L}{2} + L_1)^2} < R$.

La largeur minimum nécessaire est: $R - r + \frac{l}{2}$.

§12) Profil transversal des chaussées.

Les chaussées présentent dans leur profil transversal un bombement qui s'exprime par le rapport de la flèche à la corde (p. ex. 1/40 ou 1/60). La raison de ce bombement est de produire le ruissellement des eaux pluviales vers les caniveaux ou fossés latéraux et d'éviter la formation de flaques. La pente doit donc être suffisante pour assurer l'écoulement, mais pas trop forte pour éviter le ravinement par suite d'une trop grande vitesse de l'eau. De plus, il y a antagonisme entre la condition du ruissellement et les desiderata de la circulation rapide, qui demande des chaussées très plates, peu bombées, afin d'éviter que les roues ne quittent le sol et le danger de fringalage.

L'étude théorique du bombement a été faite en vertu de la condition du ruissellement (voir Cours de routes, de M. Timasset). Elle ne présente guère d'intérêt pratique. Nous montrons dans le cours d'hydraulique appliquée que le profil transversal théorique parfait, écoulant l'eau en lame d'épaisseur constante, est un arc de parabole du 2^e degré. Cela suppose la chaussée unie. Or, les chaussées présentent des flaques qui retiennent l'eau. Le problème de leur vidange se fapre évidemment à l'analyse. On s'impose une certaine pente limite minimum en vue de réduire les quantités d'eau séjournant sur la chaussée. Dans la partie centrale de la route,

le profil parabolique ne procure pas une pente suffisante ; il faudrait y substituer des plans tangents au cylindre parabolique, se coupant dans le plan vertical passant par l'axe de la chaussée et inclinés suivant la pente limite. Comme la circulation serait gênée par l'arête du dièdre de ces deux plans, elle serait émoussée suivant un cylindre parabolique de raccordement, plus ou moins calculé en vue de la facilité de circulation.

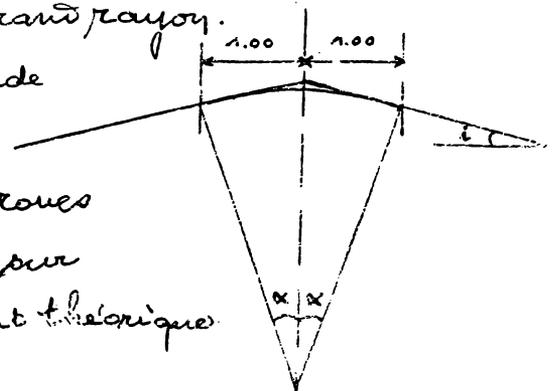
Un tel profil, dit rationnel, comporterait donc un petit arc central de parabole, prolongé par 2 tangentes en pente limite minimum, puis par deux arcs de paraboles, suivis eux-mêmes par des tangentes à partir du point où la pente transversale devient trop forte, à cause du danger de ravinement ou de glissement ou en vue de la circulation transversale.

En pratique, ce profil compliqué n'est pas utilisé, on emploie l'arc de cercle, la parabole ou l'angle dièdre émoussé.

Les deux premiers profils ont comme inconvénient de présenter une zone centrale assez large de pente insuffisante. La circulation s'y cantonne volontiers. Cette zone se dégrade donc rapidement ; les ornières et les flaques s'y forment et retiennent l'eau par défaut de pente. La dégradation de la chaussée est ainsi hâtée. D'autre part, pour les chaussées de grande largeur, le bombement et la pente vers les bords croissent fortement et acquièrent rapidement des valeurs excessives. On ne peut donc adopter ce genre de profil comme norme pour toutes les largeurs ; il ne convient que pour les chaussées étroites et secondaires (Moissenet, A.T.P.B. 1924, page 5)

On peut envisager un profil standard en arc d'hyperbole à asymptotes inclinées suivant la plus grande pente transversale. Pratiquement, ce profil est identique à celui en angle émoussé, c'est-à-dire à deux versants plans raccordés par un petit arc central de grand rayon.

Ce profil a partout, sauf dans l'étroite bande centrale, une pente suffisante. Le bombement est presque indépendant de la largeur. Les roues ne peuvent pas quitter le sol lorsqu'elles sont sur un versant, puisqu'il est plan. L'inconvénient théorique



que l'épaisseur de la lame de ruissellement croît du centre vers les bords n'est pas à retenir. Je préconise l'emploi de ce profil. La partie centrale aura environ 2,00 m. de largeur.

On a :
$$r = \frac{1}{\sin \alpha} = \frac{\sqrt{1+i^2}}{i},$$

pour

$i =$	0,05	0,04	0,03	0,02	0,01
$r =$	20,05	25,04	33,37	50,02	100,01 m.

En négligeant le raccordement courbe, le bombement est $\frac{1}{2}$ ou $\frac{1}{2i}$, i étant la pente transversale.

La pente i est d'autant plus faible que la chaussée est plus lisse et plus imperméable. On admet

pour les chaussées empierrées : $i = 0,04$ à $0,06$, bombement : $\frac{1}{50}$ à $\frac{1}{33}$,
 " " " pavées : $i = 0,03$ " $0,04$, " $\frac{1}{67}$ " $\frac{1}{50}$,
 " " " en béton, tarmac : $i = 0,02$ " $0,03$, " $\frac{1}{100}$ " $\frac{1}{67}$,
 " " " en asphalte : $i = 0,015$ " $0,02$, " $\frac{1}{133}$ " $\frac{1}{100}$.

En Angleterre et en Amérique, le profil est défini par les ordonnées de différents points par rapport à la corde comme axe des abscisses. Les pentes croissent du centre vers les bords, mais d'une manière atténuée.

La pente des accotements est généralement de 4%, parfois de 3% lorsqu'il y a un revêtement assez uni et peu perméable.

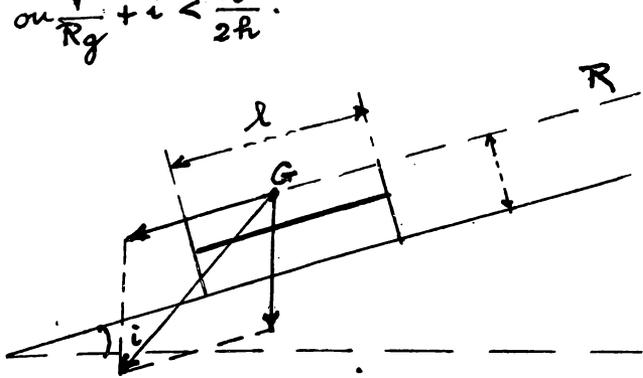
Lorsque le profil en long est incliné, il est utile de réduire l'inclinaison transversale, car la plus grande pente est égale à la racine de la somme des carrés des pentes longitudinales et transversales.

Pour les routes à flanc de coteau, on pourrait employer le profil à pente unique vers la vallée. Cette disposition est nécessaire dans les courbes concaves vers la vallée. Mais, ainsi que nous le verrons plus loin, le fossé vers le coteau est toujours nécessaire et, en outre, il faut prendre garde au ravinement du versant.

§ 13. Surhaussement ou dévers en courbe.

Nous avons vu que la force centrifuge peut produire le dérapage en courbe. Il tend surtout à se produire sur un profil bombé pour les voitures circulant à l'extérieur de la courbe, parce que la pente trans-

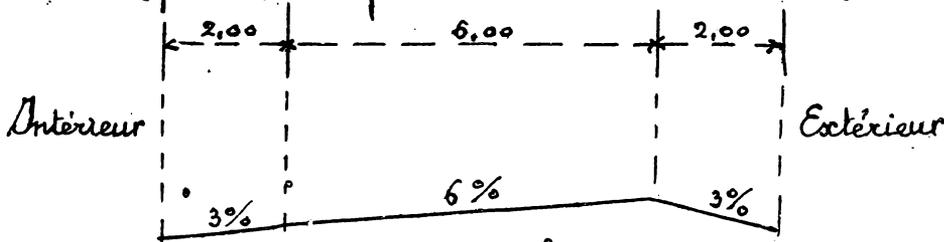
versale agit dans le même sens que la force centrifuge. La sécurité au dérapage est accrue en donnant au profil un dévers en courbe vers le centre, ainsi que nous l'avons déjà montré. La force centrifuge tend aussi à provoquer le renversement de la voiture, surtout dans la partie extérieure d'une courbe à profil bombé. La sécurité exige que $\frac{hV^2}{Rg} + hi < \frac{l}{2}$ ou $\frac{V^2}{Rg} + i < \frac{l}{2h}$.



La condition de sécurité au dérapage est $\frac{V^2}{Rg} + i < f$. $\frac{l}{2h}$ est généralement supérieur à f, ce rapport est voisin de 1.

Le danger de dérapage est donc supérieur au danger de renversement.

Cependant, par l'effet des forces d'inertie, le renversement suit fréquemment le dérapage. On peut considérer, en moyenne $f = 0,30$, ce qui correspond à des revêtements unis boueux. Il est évident que lorsque la route est glissante, ($f = 0,10$), il faut réduire la vitesse.



Dans les routes ordinaires, on donne aux courbes un dévers uniforme atteignant jus-

que 6% d'après le rayon. Si $R = 100$ m et $i = 0,06$, la vitesse maximum sans danger de dérapage ($f = 0,30$) est $v = 18,8$ m// ou $v = 66$ km/h.

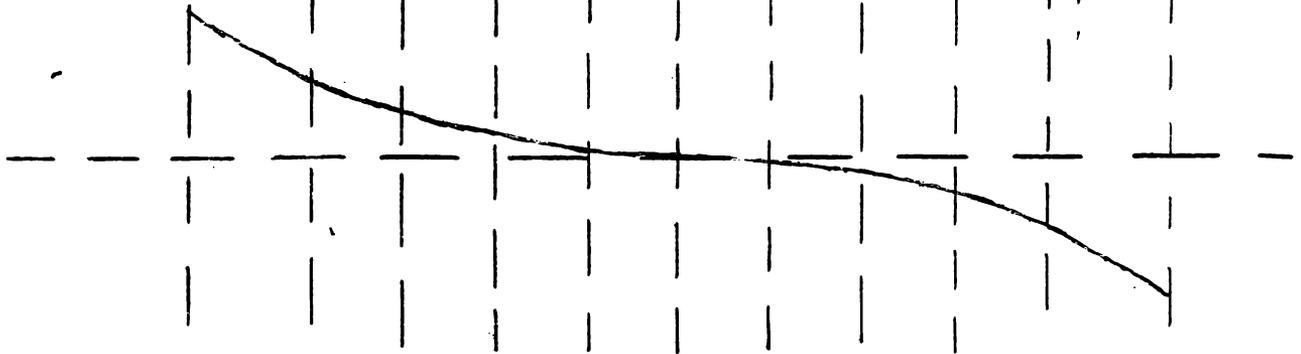
Pour les routes très larges spécialement réservées aux automobiles, ainsi que dans les virages d'autodromes, on peut adopter un dévers variable, donnant un profil en S, dont le type ci-contre est extrait du rapport de M. Hlaouzet (de Prague) au 4^e congrès de la route à Séville (1923). Il correspond à $R = 500$ m et $f = 0,10$.

Le profil surhaussé règne sur tout le développement de la courbe. Il se raccorde progressivement au profil normal dans les raccordements à courbe progressivement variée.

§ 14. Quelques particularités relatives aux routes de montagnes, (d'après l'instruction ministérielle française du 13-12-20). - Nécessité

maximum 8%, réduite à 5% dans les courbes de rayon inférieur à 30 m. Longueur maximum des rampes limites : 1000 m. Largeur (minimum) en alignement : 5,00 m,

Valeur (km/h)	150	140	130	115	100	100	115	130	140	150
Dévers %	26	21	17	11	6	6	11	17	21	26



Quand le rayon de courbure est inférieur à 30 m, on ajoute une sur-largueur, du côté extérieur, qui atteint 1,00 m pour un rayon de 15 m. Dans tous les cas où le rayon sur l'axe est inférieur à 30 m, on effectue des raccordements progressifs. Les lacets et courbes de petit rayon s'effectuent selon le tracé en boucle ci-dessus.

Le rayon minimum extrême de la courbe DE du tournant est 8,00. Les courbes CD et EF ont une courbure progressive. Leur longueur minimum est 10,00 ; de préférence 12 ou 15 m. Sur-largueur de 1,50 m. sur tout le développement de DE et jusqu'à 4,60 m. de part et d'autre sur les raccordements progressifs. Le surhaussement doit réaliser un dévers uniforme de 5% dans l'étendue de la courbe DE et il devient nul en C et F par transition progressive. En alignement droit, le bombement est très faible. Pour améliorer la visibilité, dégager les obstacles à la vue

Chapitre III

Étude des actions des véhicules sur les revêtements de routes

§1. - Actions normales.

Nous avons étudié antérieurement l'action des revêtements sur les véhicules, qui se manifeste par des résistances au mouvement de ces derniers. Inversement, les véhicules exercent sur les routes des actions qui en dégradent les

revêtements. Les actions normales sur une route d'inclinaison $i = \operatorname{tg} \alpha$ sont, pour chaque essieu : $N = P \cos \alpha$,
ou, en admettant $\cos \alpha = 1$: $N = P$.

On rapporte cette réaction à la largeur des jantes ou bandages. Si cette largeur est e pour chaque roue, la pression moyenne par centimètre de largeur est $\frac{N}{2e} = \frac{P}{2e}$.

Ces formules ne tiennent pas compte de l'action des ressorts, que nous examinerons à part.

Dans le cas des camions automobiles notamment, il faut tenir compte de l'augmentation de pression sur les roues arrière en mouvement sur rampe et avec charge remorquée, d'après les formules de M. Haarman. Elles sont également accrues en courbe et dans les ruptures de pente en cuvette lors que la piteuse est grande (en courbe, sur la roue extérieure, en cuvette, sur les deux roues).

Les actions normales agissent sur les revêtements par pression superficielle (empreintes dans les routes molles), par écrasement superficiel (charroi lourd sur bandages métalliques), par percussion, qui augmente encore les effets des actions normales ; par défoncement des routes à fondation insuffisante ou dont le sous-sol est mauvais (marécageux). Il est certain qu'il faut les limiter.

Les conclusions du 4^e Congrès International de la Route à Séville en 1923 ont renouvelé celles du 3^e Congrès à Bruxelles, qui ont été mises en vigueur par de nombreux pays.

La limite supérieure de $\frac{N}{2e}$ ou pression par cm. de largeur de jante pour l'essieu le plus chargé est 150 kg/cm pour les roues d'un diamètre inférieur à $1,00 \text{ m}$ et résulte de la formule

$$C = 150 \sqrt{d}$$

pour les roues d'un diamètre d (exprimé en m) supérieur à 1 m (C en kg/cm). Les pressions superficielles dépendent des surfaces d'empreinte et de la forme du bandage ; elles sont peu élevées pour les bandages élastiques (fig. 4, pl. 1)

Le rapport précité de M. Haarman montre que les camions automobiles

en mouvement, peuvent dépasser cette limite de 20 à 40%, notamment à cause des pressions additionnelles résultant de la traction. Cette remarque est importante et montre que les camions automobiles fatiguent beaucoup les routes par actions normales. Les tracteurs à trains remorqués sont très avantageux par contre, à ce point de vue.

C'est pour résister aux actions normales, qu'on a proposé de munir les routes de bandes de roulement particulièrement solides, par exemple, métalliques, destinées à répartir ces actions sur une largeur suffisante de terrain. Les intervalles sont alors revêtus assez sommairement (couche de gravier, pavage grossier, dalles). Ce système présente beaucoup d'inconvénients, surtout celui de la fixation de la voie; il ne convient pas pour une circulation importante et il n'est qu'exceptionnellement employé (certaines rues de villes d'Italie du Nord sont ainsi construites, notamment à Milan, Côme, Vérone. Les plaques de roulement sont en granit et ont 75 cm. de largeur sur 20 cm. d'épaisseur. L'intervalle est grossièrement pavé au moyen de galets).

Ce dispositif est parfois employé sur les ponts-routes, notamment en béton (chemin de roulement en béton) ou métalliques (chemin de roulement en plaques de fonte ou d'acier.). Il procure l'avantage d'un roulement plus doux, réduction des chocs et fixation du chemin des charges mobiles, toutes circonstances favorables à la sollicitation des parties portantes.

Les actions normales sont les actions les plus importantes dans le charroi hippomobile.

§ 2. Les actions tangentielles sont importantes surtout dans les voitures automobiles; ce sont elles qui dégradent le plus les routes.

La formule la plus générale de la force tangentielle exercée par les roues motrices sur une route est, si \mathcal{Q} est le poids total

$$T = \frac{\mu}{r} - P f_1 - \omega \frac{Y}{g} \frac{K^2}{r^2} = \mathcal{Q} \left(i + \frac{Y}{g} \right) + P' f_1 + \omega' \frac{Y}{g} \frac{K'^2}{r^2} + A$$

La signification des termes $\mathcal{Q}i$ et $P' f_1$ est bien connue, ainsi que celle du terme A .

Ainsi, sur une rampe de 5%, le terme Pi est :

- a) pour une voiture de tourisme de 1500 kg : 75 kg.
 b) " un camion de 10T au total : 500 "

Sur une route en bon macadam $f_1 = 0,03$, le terme $P'f_1$ vaut :

- pour a) $0,03 \times 600$ 18 kg.
 b) $0,03 \times 2000$ 60 kg.

Le terme dû à la résistance de l'air n'est pas très important. Si la voiture a) marche à 72 km/h, soit 20 m/s et possède un maître couple de 2 m²

$$A = 0,08 \times 2 \times 400 = 64 \text{ kg.}$$

Pour les camions automobiles, à cause de la faible vitesse, A est négligeable.

Les accélérations ou les démarrages peuvent développer des efforts tangentiels considérables. Pour augmenter la vitesse de 1 m/s (3,6 km/h), l'effort tangentiel nécessaire pour la

voiture a) est $\frac{1500}{9,81} = 153 \text{ kg.}$

pour la voiture b) $\frac{10000}{9,81} = 1020 \text{ "}$

Ces efforts, même pour une faible augmentation de vitesse, sont donc fortement supérieurs à ceux dus aux efforts de traction, à l'effet des pentes et à la résistance de l'air. Encore avons-nous négligé dans ces calculs le terme de l'accélération angulaire des roues avant, qui est faible vis-à-vis de celui relatif au véhicule entier (2% environ).

Mais ce n'est pas tout. Nous avons vu que les voitures, surtout celles de tourisme à grande puissance, peuvent patiner, même pour des valeurs de f voisines de 0,50. Déjà, pour une valeur plus modérée, telle que $f = 0,30$, le patinage de la voiture : a) donne lieu à un effort tangentiel

$$T = Pf = 0,30 \times 900 = 270 \text{ kg.},$$

plus élevé que tous les autres considérés jusqu'à présent. En cas de freinage, l'effort tangentiel prend la même valeur ; la limite de T est en tous cas Pf. Elle est très élevée (pour la voiture a) 540 kg. environ, pour la voiture b) 4800 kg.).

En cas de patinage, la vitesse des roues motrices s'accélère et les jantes exercent sur le revêtement un véritable meulage.

§ 3. Actions transversales.

Nous avons examiné les actions transversales :

- 1) Dérapage des roues avant par suite d'une modification brusque de l'angle de braquage, qui se traduit par un frottement de glissement des roues avant sur le sol.
- 2) Dérapage des roues arrière en courbe sous l'effet de la force centripète qui donne lieu à un glissement transversal des roues arrière.

Les valeurs des actions transversales précitées sont aisées à calculer, elles peuvent être élevées. Elles se composent éventuellement avec les actions T longitudinales et donnent une résultante rasante qui peut être élevée.

§ 4. Influence des discontinuités et aspérités de la chaussée et de ses déformations.

Les formules précédentes supposent que la chaussée est unie. Cette condition est très suffisamment réalisée par certains revêtements modernes en bon état. Les revêtements anciens : empierrements et pavages, ne la réalisent pas ; il en résulte des contraintes supplémentaires, tant sur le véhicule que sur la route.

Sur une chaussée unie, le mouvement de roulement s'effectue par déplacement continu du centre instantané de rotation, qui est le point de contact de la roue et du sol. La vitesse angulaire est $\frac{V}{r}$ ($V =$ vitesse de translation, $r =$ rayon de la roue). Sur une chaussée non unie, présentant des discontinuités (joints de pavages) ou des aspérités (têtes de chat, flaques), le centre instantané de rotation passe brusquement d'une position à une autre à distance finie et donne lieu à un choc accompagné d'une perte de vitesse. La perte de force vive est proportionnelle à la différence des carrés des vitesses initiales et finales. Comme elles sont liées par des relations géométriques simples résultant de la forme des discontinuités ou obstacles, on peut écrire que la perte de force vive totale est

$$\frac{\alpha}{2} \frac{q}{g} \frac{V^2}{r^2}, \quad (\alpha \text{ a comme dimension } l^2),$$

q étant le poids total des parties non suspendues du véhicule ($q = P$ si le véhicule n'a pas de suspension).

Il naît une résistance supplémentaire, égale et opposée à une réaction tangentielle φ des roues motrices sur le sol telle que, si L est le chemin parcouru :

$$\varphi L = \frac{\alpha}{2} \frac{g}{g} \frac{V^2}{r^2},$$

où :

$$\varphi = \frac{\beta}{2} \frac{g}{g} \frac{V^2}{r^2} \quad (\beta \text{ a les dimensions d'une longueur})$$

avec $\beta = \frac{\alpha}{L}$.

β est le coefficient de discontinuité ou de rugosité; il dépend du nombre et de la dimension des discontinuités et rugosités pour une longueur donnée; il peut varier donc d'une section à une autre d'une même route et dépend de l'état du revêtement. Ces termes augmentent rapidement avec la vitesse; ils peuvent augmenter sensiblement la valeur de f_1 , surtout avec des bandages rigides. Ils sont relativement importants pour les véhicules non suspendus à traction animale. Les bandages pneumatiques, par leur élasticité, absorbent une grande partie des pertes de force vive, selon l'expression consacrée, « ils boivent l'obstacle ». Ils atténuent donc fortement les effets des discontinuités et aspérités et les réactions correspondantes ne peuvent plus être considérées comme proportionnelles au carré de la vitesse.

Il en résulte que les réactions tangentielles des véhicules automobiles sur la route, dues aux chocs mêmes ne sont pas comparables, à celles dues aux accélérations, patinage et freinage. (D'après la formule de Bozarné et Julien, le coefficient de traction est à peu près quadruplé pour une vitesse de 100 km/h d'une voiture automobile).

Les effets destructeurs ne peuvent être appréciés d'après les réactions moyennes dues aux chocs, mais plutôt d'après les effets combinés des réactions instantanées pendant et après la période du choc et d'après les déformations de la surface de la route, qui en résultent.

Les effets sont les suivants pour une roue motrice:

Lorsque la roue aborde un obstacle, il se produit un choc, c'est-à-dire une action de courte durée mais intense, qui tend à rejeter l'obstacle vers l'avant, à le déchausser. Aussitôt après, la roue, ayant franchi l'obstacle, l'effort tangentiel, généralement élevé à cause de l'accélération consécutive à la perte de vitesse ou au bondissement de la roue, tend à chasser

violamment l'obstacle vers l'arrière. Ces efforts alternés et répétés ont pour effet de disloquer les constituants de la surface de la route. L'annonce résulte du patinage ou des efforts tangentiels élevés, de la succion des pneumatiques, actions qui tendent toutes à faire disparaître les fines matières d'aggrégation. La chaussée étant ainsi rendue discontinue, les chocs se produisent et forment ces flaques rondes caractéristiques de la circulation automobile, appelées nids de poule. Les matériaux en sont rejetés au loin sur la route où la circulation les écrase. En cas de circulation intense, lorsqu'une section est très attaquée, l'entretien ne parvient plus à maintenir cette situation et la route devient rapidement chaotique; il faut renouveler complètement le revêtement.

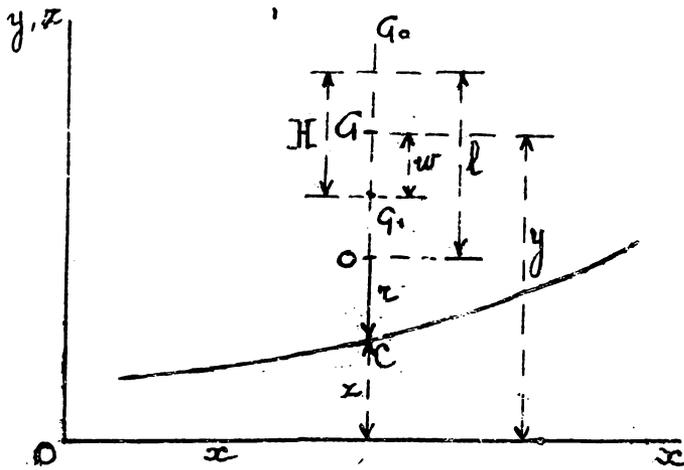
Les roues non motrices ont des effets moins destructeurs. Après le premier choc, agissant vers l'avant, l'action de l'effort tangentiel, réduit d'ailleurs, s'exerce dans le même sens. Il n'y a pas dislocation; un caillou descellé par le choc n'est pas arraché vers l'arrière; les flaques spéciales ne se produisent pas avec de telles roues, donc non plus avec les voitures à traction animale.

Les effets les plus à craindre de la circulation automobile sont donc surtout les actions tangentielles, très élevées pour les camions très lourds et lors du patinage des voitures rapides. C'est l'origine du processus de destruction. Les actions des chocs, qui naissent ensuite, provoquent la dislocation des éléments et la formation des nids de poule. Les fortes charges et les grandes vitesses sont principalement dangereuses; mais les premières plus encore que les secondes. Les camions lourds ruinent plus les routes que les voitures rapides.

Il faut craindre aussi les surfaces de pavement molles (asphalte, en été, tarmacadam avec excès de goudron), dans lesquelles les roues laissent des empreintes. Il en résulte tout d'abord une augmentation sensible de l'effort de traction, dont on peut établir une formule assez spéciale. (Voir Lucien Limasset, cours de routes, pages 33 à 35). Mais elle ne présente pas d'intérêt pratique et l'augmentation de l'effort tangentiel qui en résulte n'est pas caractéristique de l'effet sur les routes.

Les empreintes subsistent et s'approfondissent, donnent lieu à des chocs, le revêtement se plisse et finit par se disloquer.

§ 5. Effets de la suspension. La suspension diminue les chocs, elle ménage donc le véhicule et la chaussée, et diminue le tirage. La flexibilité des ressorts dépend de la charge et des inégalités de la chaussée, c'est-à-dire des dénivellations à franchir.



Appelons H la flexion du ressort à l'état statique sous la charge Q , $H - \omega$ une flexion instantanée quelconque et Q' la force correspondante du ressort.

D'après les lois de l'élasticité

$$\frac{Q'}{Q} = \frac{H - \omega}{H}$$

$$Q' = \frac{Q}{H} (H - \omega) = k (H - \omega) = Q - Q \frac{\omega}{H}$$

Recherchons l'équation générale du mouvement d'un essieu suspendu suivant dans le plan vertical une trajectoire courbe quelconque.

$$z = f(x).$$

Soit O le centre de la roue, qui touche la courbe en C . Donc $OC = r$. Soit G_0 la position du centre de gravité de la partie suspendue lorsqu'elle est soulevée de manière que la flexion et la charge du ressort soient nulles et désignons OG_0 par l . Soit $G_0G_1 = H$ la flèche statique.

La position instantanée de ce centre de gravité G est telle que son ordonnée est $y = z + r + l - H + \omega$.

À l'état statique $y_0 = z + r + l - H$. ($\omega = 0$) (position G_1).

Supposons que l'essieu se meuve avec une vitesse uniforme V , donc

$$x = Vt.$$

L'équation des quantités de mouvement du point G projetées sur un axe vertical, s'écrit:

$$\frac{Q}{g} d \left(\frac{dz + d\omega}{dt} \right) = \frac{Q}{g} \left(\frac{d^2z}{dt^2} + \frac{d^2\omega}{dt^2} \right) dt = \frac{Q}{g} \left(\frac{dx}{dt} \right)^2 \left(\frac{d^2z}{dx^2} + \frac{d^2\omega}{dx^2} \right) dt =$$

$$= \frac{V^2 Q}{g} \left(\frac{d^2 z}{dx^2} + \frac{d^2 \omega}{dx^2} \right) dt = \left[-Q + \frac{Q}{H} (H - \omega) \right] dt$$

d'où :

$$\frac{d^2 z}{dx^2} + \frac{d^2 \omega}{dx^2} + \frac{\omega g}{V^2 H} = 0$$

Le même théorème s'applique à la roue ; en appelant q le poids de la partie non suspendue et N la réaction du sol sur la roue, donne :

$$\frac{V^2 q}{g} \frac{d^2 z}{dx^2} dt = \left[N - q - \frac{Q}{H} (H - \omega) \right] dt$$

d'où :

$$N = Q + q - \frac{Q}{H} \omega + \frac{q V^2}{g} \frac{d^2 z}{dx^2}$$

Pour que la roue ne quitte pas le sol, comme le supposent les équations, il faut $N > 0$. N diminue quand ω augmente. Remarquons que $\frac{d^2 z}{dx^2}$ est indépendant de ω et ne dépend que du profil de la route (c'est sa courbure) puisque l'inclinaison est toujours très petite)

Si la chaussée est en pente uniforme, donc à profil rectiligne, $\frac{d^2 z}{dx^2} = 0$ et les équations deviennent

$$\frac{d^2 \omega}{dx^2} + \frac{\omega g}{V^2 H} = 0,$$

$$N = Q + q - \frac{Q}{H} \omega$$

L'intégrale de la première équation est de la forme :

$$\omega = A \cos \frac{x}{V} \sqrt{\frac{g}{H}} + B \sin \frac{x}{V} \sqrt{\frac{g}{H}}$$

Posons : $\frac{1}{V} \sqrt{\frac{g}{H}} = \frac{\pi}{a}$,

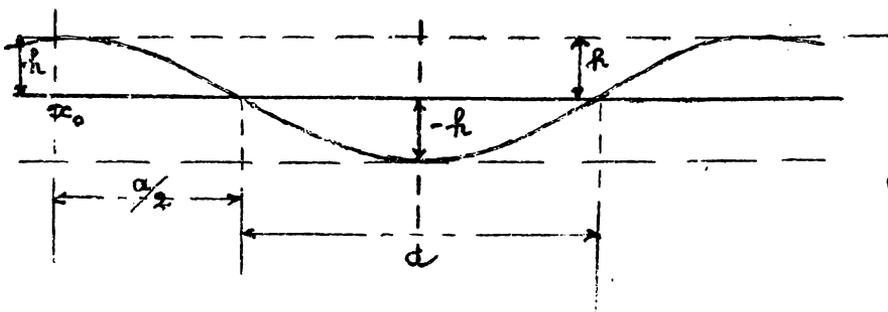
$$\omega = A \cos \frac{\pi x}{a} + B \sin \frac{\pi x}{a}$$

Posons : $A = h \cos \frac{\pi x_0}{a}$; $B = h \sin \frac{\pi x_0}{a}$; on obtient :

$$\omega = h \cos \frac{\pi (x - x_0)}{a}$$

Donc Q oscille autour de la position Q_1 de l'équilibre statique, la demi-amplitude est h et la demi-longueur d'onde est $\frac{a}{2}$ (car $\omega = 0$ pour $\pi \frac{(x - x_0)}{a} = \left(\frac{2K+1}{2}\right) \pi$, donc $x = x_0 + \frac{a}{2} + Ka$)

Si E est la durée d'une demi-oscillation $a = VE = \pi V \sqrt{\frac{H}{g}}$, donc $E = \pi \sqrt{\frac{H}{g}}$.



La réaction N oscille entre deux valeurs extrêmes

$$Q + q - \frac{Qh}{H} \quad \text{et} \quad Q + q + \frac{Qh}{H}$$

Pour que la roue ne

quitte pas le sol, il faut que

$$Q + q - \frac{Qh}{H} > 0 \quad \text{ou} \quad H > \frac{Q}{Q+q} h$$

Lorsque G ne dépasse pas la limite G_0 du ressort totalement détendu, il faut que $H > h$.

Lorsqu'il n'y a pas patinage lors de la décharge du ressort, il faut que

$$\left[Q + q - \frac{Qh}{H} \right] f > T$$

Où $T = P'f_1 + \mathcal{P}i$ en supposant le mouvement uniforme et négligeant la résistance de l'air. En remarquant que $Q + q = \mathcal{P}$, on trouve:

$$H > h \frac{1}{\frac{\mathcal{P}}{Q} \left(1 - \frac{h}{f}\right) - \frac{P'f_1}{Qf}}$$

En supposant $\frac{\mathcal{P}}{Q} = \frac{4}{3}$, $\frac{P'}{Q} = \frac{1}{2}$, $\left(\frac{P'}{\mathcal{P}} = \frac{3}{8}\right)$

on trouve $i = 4,09$, $f_1 = 0,03$ et $f = 0,30$ (hypothèse défavorable),

$$H > 1,13 h.$$

Pour tenir compte des imprécisions, il est bon de prendre $H \geq 2h$.

Remarquons que \mathcal{C} et a sont indépendants de h , mais ne dépendent que de H et V ; h est déterminé dans chaque cas d'oscillation par les circonstances initiales, en d'autres termes par l'impulsion, le choc qui donne naissance aux oscillations.

À titre d'exemple, considérons la chute brusque de la roue, d'une hauteur h par exemple, dans le fond d'une flèche. Nous supposons qu'il n'y ait pas d'oscillation préalable et nous prenons $\alpha_0 = 0$.

Lors $\alpha = \alpha_0 = 0$ le ressort est détendu de h et

$$\omega = h.$$

Il en résulte que $\omega = h \cos \pi \frac{x}{a}$.

L'amplitude totale de l'oscillation est $2h$.

La réaction est minimum pour $\omega = h$ naturellement, le danger de patinage est donc plus grand au point de chute, d'autant plus qu'il se produit des accélérations de la roue.

Si c'est une saillie de hauteur h que rencontre brusquement la roue, il suffit de transformer h en $-h$ dans le calcul précédent. Le danger de patinage est le plus grand pour $\cos \frac{\pi x}{a} = -1$, d'où $x = (2K+1) \frac{a}{2}$, donc surtout à distance $\frac{a}{2}$ au delà de la saillie.

Lorsqu'une saillie succède à une chute (entrée et sortie d'une flache), les amplitudes se superposent (coup de raquette) et la demi-amplitude peut valoir $2h$; c'est au point de chute que le danger de patinage est le plus grand, après la sortie de la flaque.

Si h est la profondeur des plus grandes flaches, il faut donc au moins

$$H = 4h.$$

On peut admettre $h = 0,06$ m, donc $H = 0,24$ m.

Dans ces conditions $E = \frac{1}{2}$ seconde environ.

À la vitesse moyenne de 10 m/s (36 km/h), il y correspond

$$a = 10 \times \frac{1}{2} = 5 \text{ m. environ.}$$

M^e Lissassot montre dans son Cours de routes que si le profil de la route est ondulé et que sa demi-longueur d'onde $b = a$, il peut se produire une véritable résonance et l'amplitude des oscillations du ressort va croissant et peut en provoquer la rupture. Dans un tel passage, qui correspond à une route couverte de flaches périodiques, donc en très mauvais état, il faut réduire la vitesse, de manière à rendre a beaucoup plus petit que b .

Quand une roue quitte le sol, la masse q est soumise à l'action de son propre poids et de la réaction Q du ressort, s'il n'y a pas d'oscillation préalable. L'accélération est donc :

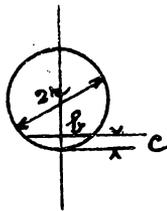
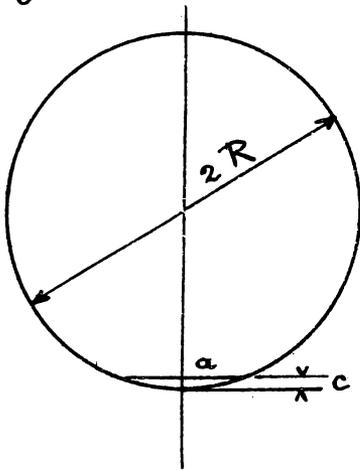
$$\frac{Q+q}{\frac{q}{g}} = g \frac{Q+q}{q}$$

Cette accélération peut être beaucoup supérieure à g (4 fois, par ex.). Elle se produit aussi chaque fois que les roues quittent le sol par bondissement (saillie élevée). Donc, quand une roue motrice quitte le sol, il y a patinage au point de chute, surtout avec les pneumatiques, à cause de leur élasticité. La chute de la roue est très rapide et violente, le fond des flaches, même très courtes, est toujours atteint. La flache est attaquée donc par le fond et par la sortie, comme nous l'avons vu en étudiant les actions tangentielles. Quand les flaches se succèdent périodiquement, la route devient dangereuse aux grandes vitesses. À la sortie d'un rechargement mal raccordé, il se forme une ornière transversale. Par suite des 2 sens de circulation, il se forme aussi deux flaques aux deux extrémités de toute saillie.

L'action combinée des ressorts des deux essieux donne lieu au mouvement de galop, qui résulte des superpositions d'oscillations.

Ce qui précède, suppose un plein rendement élastique des ressorts sans amortissement. Les ressorts ont des effets avantageux, mais leurs oscillations sont désagréables. Pour réduire ces inconvénients sans perdre les avantages, on emploie les amortisseurs, qui fonctionnent presque tous par frottement ou freinage (absorption d'énergie). Quelques-uns agissent par flexion.

§ 6. Pneumatiques et bandages.



Nous pouvons considérer un pneumatique comme un tore de rayon R , r étant le rayon du cercle générateur. Le contact avec le sol se fait suivant une ellipse indicatrice d'axes $2a$ et $2b$.

Soit c l'aplatissement. On a :

$$a^2 = 2Rc \quad \text{et} \quad b^2 = 2rc.$$

La surface de l'ellipse est $\pi ab = 2\pi c \sqrt{Rr}$.

Si p est la pression intérieure du pneu, la charge P portée s'exprime par

$$P = 2\pi c \sqrt{Rr} p.$$

d'où

$$c = \frac{P}{2\pi r \sqrt{Rr}}$$

La pression pratique des pneumatiques varie de 3 à 5,5 kg, d'après les charges. Il en résulte une flexion c généralement voisine de 1 cm. ou davantage avec les pneus-ballons.

Si nous considérons le pneumatique comme un ressort, il en résulte que la demi-période de vibration est $T = \pi \sqrt{\frac{c}{g}}$, soit environ 0,1 seconde. À la vitesse moyenne de 10 m/s (36 km/h) la $\frac{1}{2}$ longueur d'onde correspondante est $\lambda = 1$ m. environ.

Des ingénieurs américains (BAIPCR, n° 40, juillet-août 1925), supposent que ces vibrations favorisent les ondulations des routes en gravier et en bitume. On les rencontre surtout après les obstacles qui provoquent la

vibration des pneus. Celle-ci provoquerait donc davantage les ondulations que les efforts tangentiels, car on ne rencontrerait pas d'ondulations sur les fortes rampes. Cette influence n'est cependant pas démontrée. Les pneus-ballons augmentent la flexion et allongent la période; ils sont donc favorables à la route comme au véhicule. Il serait avantageux de munir les deux essieux de pneus à périodes différentes.

On voit donc que les pneus absorbent les petites inégalités et facilitent le tirage. Les grandes dénivellations, supérieures à c , sont seules transmises aux ressorts et, enfin, la partie suspendue ne reçoit d'action directe que des obstacles de hauteur supérieure à la flèche statique H des ressorts. (Voir fig. 4, pl. I).

Les pneumatiques n'ont pas que des effets favorables à la route. Leur vibration favorise le patinage au moment où les roues sautent (décharge). D'autre part, la réaction tangentielle de la route sur le pneu le déforme. C'est le glissement élastique des pneumatiques. Le bandage revient à sa forme primitive par une impulsion vive en quittant le sol. Ce retour exerce sur les matériaux du sol une action dynamique dirigée dans le même sens que l'action tangentielle. Le pneu augmente donc les effets destructeurs de l'action tangentielle des roues motrices, d'autant plus que la vitesse est plus grande. Leur action, combinée au déplacement d'air provoque les tourbillons de poussière. Le glissement élastique des pneumatiques donne lieu à une perte de puissance par réduction de la vitesse angulaire périphérique, qui devient $(1 - \epsilon) u$; elle réduit donc la vitesse du véhicule. Cette puissance est emmagasinée par le pneumatique, puis restituée en travail d'arrachement et de propulsion de la poussière.

Les antidérapants sont abandonnés; leur coefficient d'adhérence est, sur route dure, inférieur à celui du caoutchouc et leur action sur les revêtements est mauvaise.

Les bandages en caoutchouc plein exercent sur les routes une action élastique beaucoup moindre que celle des pneumatiques et d'autant moindre qu'ils sont plus usés. Ils absorbent mal les chocs et donnent un roulement dur. Le diagramme d'expérience ci-contre, extrait du cours

de M^e Le Gavrian, donne une idée de l'action comparatives des divers bandages. Ces expériences ont été répétées de nombreuses fois et confirment ces résultats.

En ce qui concerne l'usure, des expériences ont été faites également, notamment par la maison Michelin sous le contrôle des Ponts et Chaussées (Voir A. P. C., 1922, fasc. 3 et 5 : Sur l'usure des routes par les camions, par Bonfils). Ces expériences tendaient à prouver que les bandages pleins usent la route 2, 5 fois plus vite que les pneumatiques.

Quoiqu'il en soit, il faut proscrire pour la circulation les bandages métalliques et les bandages pleins usés. Certains bandages spéciaux à alvéoles ou vides internes ont une action élastique intermédiaire entre celle du pneu et celle du plein et sont donc, faute de pneus, recommandés pour les véhicules lourds. Les firmes qui les confectionnent allèguent même les résultats de certains essais qui montraient la supériorité des bandages semi-pneumatiques pour les poids lourds.

Chapitre IV.

Revêtements ordinaires: empièvements et pavages.

§ I. Généralités. — La partie de la route destinée à la circulation des véhicules (chaussée) doit recevoir un revêtement approprié.

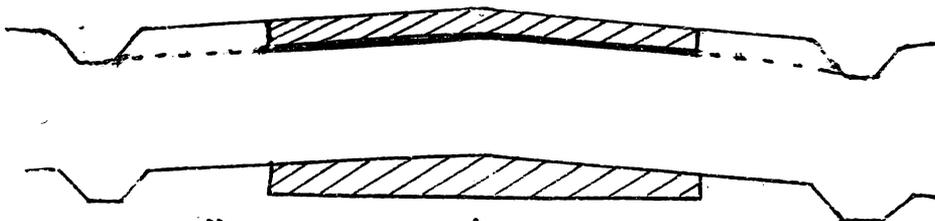
Un revêtement comporte en principe deux couches : une couche inférieure de fondation, de support ou de répartition ; une couche supérieure de roulement ou d'usure. Les dénominations définissent suffisamment leur objet.

Il arrive que les deux couches soient confondues ; c'est le cas des revêtements en briquillons, en gravier et de l'empièvement d'après le système original de Mac Adam. Ils comportent une couche plus ou moins épaisse, suivant les cas, de briquillons, graviers, galets ou de pierres cassées de calibres assez uniformes, mais modérés (de 0,03 à 0,06 cm). Ils sont

mis en place pile-mêle et cylindriques jusqu'à raffermissement suffisant, à moins que l'on ne laisse aux véhicules le soin de produire la compression. Ce sont des systèmes sommaires. L'épaisseur varie de 0,15 à 0,25 ou 0,30. On les améliore en triant les matériaux et en réservant le plus gros pour le fond, les plus petits et les plus durs pour la surface. On effectue le revêtement par couches successives de 10 à 12 cm. d'épaisseur, pilonnées ou cylindrées et on remplit les vides de la surface par une matière d'agrégation: sable rugueux ou pierrailles de petites dimensions. Le remplissage des joints est perfectionné par des arrosages.

Dans le cas d'un sol rocheux ou très résistant et inaltérable, la couche de fondation est superflue pour un empierrement. Pour d'autres revêtements, surtout monolithes, il faut intercaler une couche élastique ou de liaison (sable, béton maigre de ciment ou de bitume, etc.....)

§2. Préparation du sous-sol. Le revêtement est disposé dans une fouille ou coffre, effectuée dans la plateforme. Les terres de déblai sont rejetées latéralement pour former les accotements.



La profondeur du coffre dépend de l'épaisseur du revêtement et doit assurer la compensation avec le remblai des accotements. Si le terrain est imperméable, on donne au fond du coffre le même profil qu'à la chaussée, afin d'assurer son assèchement. L'épaisseur du revêtement est donc uniforme ou presque. Des rigoles transversales ou drains creusés dans les accotements et remplis de pierres cassées, ayant la profondeur du coffre, assurent l'écoulement des eaux d'infiltration vers les fossés.

Si le terrain est perméable, le fond du coffre peut être bombé ou horizontal. S'il est horizontal, le revêtement est plus épais au centre qu'aux bords. Cette forme est cependant peu recommandable tant pour le drainage que pour le revêtement, qui doit être, de préférence, plus épais aux bords.

qui au milieu. Les rigoles transversales des accotements ne sont pas indispensables en terrain perméable, elles sont toujours favorables. On y aura recours en les espaçant plus ou moins selon les circonstances locales.

En dernière analyse, c'est le terrain qui supporte les charges, plus ou moins réparties par le revêtement. Si le terrain est faible, la répartition doit être plus étendue, ce qui augmente la flexion du revêtement et exige de grandes épaisseurs ou des revêtements spéciaux et coûteux, résistant à la flexion (béton armé). Sur terrain mou, les revêtements sans liaison (empierrements) se déforment sous les effets des fortes charges; la route devient alors très mauvaise. Il y a intérêt, pour tous les revêtements, mais surtout pour les plus coûteux, à établir les routes sur le meilleur sol possible et à prendre toutes dispositions utiles en vue de raffermir ce sol. Les Américains ont poussé assez loin l'étude de cette question dans les dernières années, tant en vue des nombreuses routes en terre qui sillonnent leur pays, que pour l'établissement de leurs routes les plus perfectionnées en béton et asphalte. La Russie, où les routes en terre dominent, a suivi cet exemple.

Il faut au moins que le fond du coffre soit bien réglé et lisse, pour éviter les tassements locaux et les stagnations. Les Américains emploient des machines à faire les coffres; ils labourent le fond par des charrues mécaniques et le cylindrent ensuite pour le comprimer et le planir. La résistance du sol est ainsi sensiblement augmentée; la perméabilité et le pouvoir absorbant (capillarité) sont réduits. On a été jusqu'à étudier les effets de la composition du sol, résultant surtout de la granulométrie. On constate qu'il y a une teneur optimum d'argile, de 15 à 20% et que le sable doit présenter des calibres divers, notamment assez de poussière, pour former un squelette très compact. On retrouve, en somme, la règle générale de tous les bétons et mortiers, et aussi du corroi sable-argileux des digues.

On peut envisager la correction des terres après labourage et avant cylindrage.

Une petite addition de chaux peut être utile dans un terrain très

posables, à condition que l'acide carbonique de l'air puisse y pénétrer en vue de la prise.

Au lieu du cylindrage, on peut procéder au pilonnage, éventuellement mécanique.

Les terres des accotements doivent être, au moins pilonnées à la main, ou, mieux, cylindrées en vue de leur donner une consistance suffisante.

Mais la résistance d'un terrain dépend dans une très large mesure de son degré d'humidité. Le sol contient généralement, par capillarité, une certaine quantité normale d'humidité, qu'il y a intérêt à réduire par le cylindrage.

Lorsque la quantité d'eau augmente, les grains du terrain deviennent de plus en plus mobiles et la résistance diminue rapidement, ainsi que l'ont prouvé notamment les expériences américaines (voir planches).

Les Américains attachent, de ce fait, beaucoup d'importance au drainage du sous-sol, surtout pour les revêtements perfectionnés.

Si l'humidité est grande ou à craindre, on peut munir le fond du coffre de drains, par exemple un drain axial relié aux fossés par des drains obliques alternés ou, ce qui assure un drainage plus efficace, deux drains longitudinaux latéraux, dont se détachent à des distances dépendant de la perméabilité du terrain, des drains transversaux obliques en V prolongés éventuellement au sommet par des drains longitudinaux centraux continus ou discontinus. Ces drains consistent en petites rigoles de la profondeur d'un fer de pelle au moins; donc le fond présente une légère pente et qui sont remplies de pierrailles de calibres uniforme, de manière à laisser des vides pour l'écoulement de l'eau. Ce dispositif convient si la nature des terres (compactes) ne fait pas craindre d'entraînement qui provoquerait le colmatage des drains. Si le colmatage est à craindre, (terres pouvant devenir fluides à cause de la finesse des éléments), on place dans le fond des rigoles, sous la pierraille, des tuyaux de drainage en poterie perméable. On recouvre les drains à la surface, de gazons ou de paille ou de tourbe pour éviter au tant que possible le colmatage. Il faut noter que, dans certains terrains,

le colmatage est inévitable. Le seul moyen efficace de s'y opposer est de multiplier les sections d'écoulement de telle sorte que la vitesse de l'eau soit si faible que même les particules les plus ténues ne soient pas entraînées. Cela conduit, dans les cas les plus défavorables, à approfondir plus ou moins le coffre et à remplacer une partie des terres par du sable, de la cendrée ou du gravier perméable ou encore à amaigrir au moyen de ces produits le sol argileux, selon les principes précédemment énoncés. La couche perméable est reliée aux drains latéraux éventuels. Les moyens de drainage quelconques doivent être reliés de distance en distance aux fossés latéraux par des drains ouverts ou non traversant les accotements. Il est évidemment nécessaire que l'eau des fossés s'écoule elle-même, qu'elle ne soit pas stagnante. Ceci suppose une construction appropriée et surtout un bon entretien de ces fossés. Comme il n'est pas toujours assuré et que les eaux qui s'accumulent alors dans les fossés, constituent précisément une cause d'humectation du sous-sol, les Américains préfèrent pour leurs routes en béton, supprimer les fossés et les remplacer par des drains latéraux assez forts, dont les eaux doivent, bien entendu, aboutir à des exutoires appropriés. Ce procédé est peu appliqué en Europe, où on préfère le fossé ouvert, susceptible d'être entretenu commodément par les cantonniers. Le drain a en effet l'inconvénient d'être enterré et de ne pouvoir être entretenu facilement. Ceci est vrai surtout pour des petits drains ascendants ou transversaux. Les grands drains latéraux se placent sous les accotements et sont donc accessibles sans ouverture du revêtement. Ils sont beaucoup mieux protégés que les fossés contre les obstructions accidentelles, mais les obstructions ou colmatages sont inévitables à la longue. Ils peuvent être utiles dans les sections étroites, pour effectuer un élargissement en empiétant sur les fossés, enfin, là où les fossés ne tiennent pas (tranchées profondes). Les Américains vont, dans certains cas, jusqu'à s'opposer à l'ascension d'eau par capillarité en imprégnant la couche supérieure du sous-sol de goudron hydraté.

L'action du froid rigoureux sur un sol humide peut entraîner des

désordres dans les revêtements (voir plus loin). On peut isoler le sol contre la gelée par une forte couche de cendrée posée sous le revêtement, formant à la fois drain et écran.

§ 3) Fondation en enrochements ou hérissons.

Pour de nombreux revêtements, on emploie la fondation en enrochements ou libages, appelée hérisson. Elle a généralement 15 à 20 cm d'épaisseur, exceptionnellement davantage. Sur le fond du coffre préparé, on pose les pierres à plat, sur leur plus grande base, bien gisantes et jointives. Dans les vides, on introduit des pierres de dimensions moindres, de gros éclats que l'on chasse éventuellement au marteau, pour assurer un aussi bon serrage que possible. Les têtes saillantes sont ensuite abattues à la masse, de manière à avoir une épaisseur à peu près uniforme. Le hérisson est généralement limité latéralement par des bordures, constituées parfois par des libages ou par de longues pierres plates, la plus grande base reposant sur le sol. La bordure affleure parfois jusqu'à la surface de la chaussée, ce qui est toujours recommandable. Pour éviter le déversement des bordures et l'attaque latérale des revêtements par des ornières à la jonction des accotements, il est bon de contrebuter les bordures par un véritable prolongement du hérisson sous les accotements sur une courte longueur (0,50 m) ou par un petit massif de butée.

Les matériaux des hérissons ne doivent pas avoir des qualités mécaniques très élevées, la forme aussi peut être grossière. Ils doivent être stables physiquement et chimiquement, c'est-à-dire isotropes et inaltérables. À cet égard, je cite l'exemple d'un hérisson constitué par des roches argileuses qui, après peu de temps se débitaient en argile. Les qualités des matériaux sont généralement connues. Si l'on a des doutes, on observe pendant un temps assez long l'action des intempéries sur des blocs détachés. Dans les régions métallurgiques, les grosses pierres de laitier conviennent bien et sont économiques. Il faut qu'elles soient inaltérables; tous les laitiers ne conviennent donc pas : il faut un triage. Observons cependant que les altérations proviennent surtout des actions atmosphériques dont le hérisson est protégé par la couche d'usure. Les schistes ne conviennent pas à cause de la tendance au feuilletage (schistosité).

Cette fondation est employée surtout pour les empièvements, elle est convenable également pour les pavages (sauf les pavages en bois) pour les tarmacs, les revêtements agglomérés au bitume, c'est-à-dire pour les revêtements déformables ou souples. Elle ne convient pas pour l'asphalte comprimé ou coulé (trop mince) ni pour le béton (trop rigide).

Ses avantages sont d'être économiques, d'exécution facile, peu sensibles et d'être souples, déformables. Ils demandent toutefois un sol assez résistant, car ils ne répartissent les charges que sur une faible étendue, par contact direct de quelques libages et frottement interne sur les voisins.

Il faut toujours compter, surtout en remblai ou en terrain mauvais, sur des tassements initiaux. Après quelque temps de circulation, d'après la nature du terrain et l'importance du trafic, un état stable est atteint. Il est recommandable d'établir d'abord comme couche de roulement un empièvement, les tassements sont compensés par des emplois ou rechargements partiels. Lorsque la route ne bouge plus, on peut la recouvrir d'un revêtement perfectionné. Les anciennes routes empièrées constituent donc généralement d'excellentes fondations pour les revêtements modernes suffisamment élastiques.

Un empièvement à la Mac-Adam en gravier ou briquillon peut aussi constituer éventuellement une fondation suffisante s'il est assez épais et bien tassé.

Les hérissons sont les seules fondations convenables en terrain soumis à des affaissements miniers ou pour des routes contenant dans leur sous-sol des canalisations nombreuses (régions industrielles très peuplées).

Prix par m² environ 1,50 fr. or.

§ 4. Fondation en béton. Elle a supplanté la précédente pour beaucoup de voies modernes, surtout urbaines. Son action est différente; elle est rigide et élastique. La transmission des efforts varie entre deux modes extrêmes :

- a) dalle mince sur sous-sol ultrarigide : la transmission est presque locale, à peine répartie;
- b) dalle épaisse très rigide sur sol très mou : la répartition sur le sol

est étendue et presque uniforme).

Dans les cas intermédiaires, la répartition s'effectue suivant une loi dépendant des propriétés élastiques de la dalle et du sol. On peut étudier théoriquement des cas simples, basés sur des hypothèses. Mais la réalité est trop complexe pour que nous examinions ici ce problème : la dalle est de grande étendue et le sol n'y est pas constant. On admettra l'hypothèse simple et toujours défavorable de la répartition uniforme ; la dalle doit donc être assez rigide. Le problème reste malgré tout un cas compliqué de flexion de plaque. On peut envisager une longueur intéressée de la fondation égale au moins à sa largeur puis que la flexion est la même dans les deux sens. Le plus simple est de se rapporter aux dimensions qui ont donné satisfaction en pratique ou ont été déduites d'expériences. Voici, d'après M^e Eréhard, les données américaines ; toutefois la réduction d'épaisseur vers les bords n'est pas recommandable.

Nature de la circulation	Largeur	Épaisseur sur les côtés	Épaisseur au milieu.
Légère	5	15 cm	20 cm (limite inférieure)
	8	" "	22 "
	11	" "	24 "
Lourde	6	20 "	25 "
	9	" "	28 "
	12	" "	30 "

D'après les essais relatifs aux chocs, et avec un coefficient de sécurité 2, on a obtenu :

Poids total des camions en tonnes	Épaisseur minimum en cm.	Poids total des camions en tonnes	Épaisseur minimum en cm.
1	11 cm.	6	20,5 cm.
2	14 cm.	7	21,75 cm.
3	16 cm.	8	22,75 cm.
4	17,75 cm.	9	23,75 cm.
5	19,25 cm.		

Ces dimensions conviennent pour une route en béton, servant directement au roulement. Pour une fondation, elles peuvent être moindres, dans une mesure d'autant plus grande que la couche d'usure est plus épaisse et plus élastique. Il faut tenir compte aussi de la qualité du béton, de la présence ou non d'armatures. L'épaisseur variera entre 20 et 30 cm, s'il n'y a pas d'armatures; on pourra descendre jusqu'à 15 cm (exceptionnellement 10) avec du béton armé. Même pour les grandes largeurs, 30 cm est une limite à ne pas dépasser.

Pour une fondation, on peut admettre le dosage en volumes effectifs 1-2-4 ou 1-2,5-5. Si la surface sert au roulement, 1-2-3. Si le revêtement supérieur n'est pas imperméable, il faut une chape au mortier de ciment riche. Pour les fondations en béton, il faut un coffre très bien dressé et un sous-sol aussi consistant que possible et surtout de consistance uniforme. Il faut donc un très bon drainage. Si elles sont protégées par une couche de roulement assez forte des grandes variations diurnes de température, on n'a pas à se préoccuper des mouvements qui pourraient en résulter dans la fondation (Voir revêtements en béton).

En terrain inconsistant, il faut une armature. Le calcul et la répartition en sont, pour les raisons indiquées, très arbitraires. Une armature locale est utile aux endroits où le terrain change de consistance.

Les fondations en béton ont comme avantages leur solidité, leur résistance, l'imperméabilité, la confection mécanique rapide (villes) et leur stabilité immédiate.

Elles sont, par contre, chères, plus difficiles d'exécution, sonores, trop rigides (chocs). L'ouverture de tranchées est difficile. Prix par m² pour 20 cm d'épaisseur: 5 à 6 fr. or.

§5. Couche de roulement en empierrement ordinaire.

On répand sur la fondation en encochements une couche de pierres cassées de calibre uniforme. Le calibre peut être d'autant plus petit que la pierre est plus dure; il varie de 3 à 8 cm; 4 à 6 cm. sont des dimensions courantes..

Standardisation en Belgique des pierrailles.

Boefus du classeur	6 - 12 cm
Macadam	4 - 6 "
Macadam	2 - 4 "
Grenaille.	5 à 20 $\frac{m}{m}$
"	2 " 5 $\frac{m}{m}$.

On décèle une tendance à employer des calibres plus grands (8 et même 10 cm) avec plus de soin dans le répandage qui peut être régularisé à la main. On se rapproche ainsi du pavage à petits éléments. C'est, en somme aussi le pavage italien en galets qui se rencontre notamment en Lombardie.

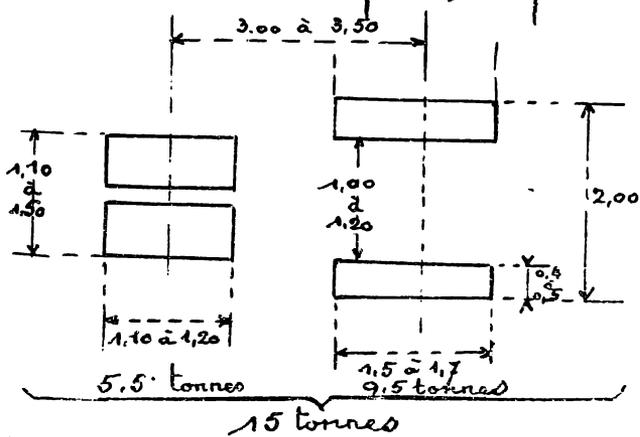
Les pierrailles doivent être de forme se rapprochant du cube; les plaquettes, aiguilles et pointes aigües doivent être évitées, car elles se brisent au cylindrage. La pierre cassée à la main est, souvent, supérieure pour cette raison. Le calibre est vérifié à l'anneau.

Il est inutile de donner une épaisseur supérieure à 8 à 10 cm après cylindrage (11 à 13 avant cyl.) Les pierrailles légèrement arrosées sont d'abord cylindrées jusqu'à tassement et raffermissement suffisant. Cela se reconnaît lorsqu'un caillou jeté devant le cylindre ne pénètre plus mais est écrasé. Le nombre des passages dépend du poids du cylindre, de la nature de la pierraille, de l'épaisseur de l'empierrement, etc... Il peut varier de 25 à 100, exceptionnellement davantage. Le cylindrage est commencé par les flancs, le centre n'est cylindrée que lorsque les flancs ont déjà acquis une certaine résistance.

Lorsque l'empierrement est raffermi, on le recouvre de matière d'agrégation: sable rude, poufsier, fine pierraille, que l'on introduit dans les joints au balai dur et en arrosant copieusement au tonneau d'arrosage. On continue à cylindrer. On introduit la matière d'agrégation en arrosant jusqu'à ce que tous les vides soient bien remplis et que l'eau ruisselle sur la chaussée. On recouvre la route terminée d'une couche de sable en excès (1 cm) que la circulation se charge d'enlever et d'introduire encore en partant dans les joints. Elle protège l'empierrement pendant le début de la mise

service. La quantité de matière d'agrégation varie d'après la dureté et le calibre de la pierraille, de 20 à 10%. Le sable peut être légèrement argileux (liant). La pratique doit montrer quelle matière d'agrégation convient le mieux au genre de pierraille. La quantité d'eau doit être d'environ 20 à 30 litres par m². Pour une route neuve, il faut moins arroser, de crainte de détrempier le sous-sol. Pour un rechargement sur une route ancienne, il faut arroser la route avant rechargement pour favoriser la prise.

On emploie des pierrailles d'origines les plus diverses. Elles doivent cependant présenter certaines qualités mécaniques : homogénéité, (cassage régulier), résistance et dureté (pour éviter l'écrasement), résistance à l'usure par frottement, une certaine ténacité (non cassante), une certaine tendance de prise ou liaison (dépend de la composition). Les meilleurs matériaux sont certains basaltes (Eifel) et porphyres (Belgique), les diorites, trapps (Vosges), granites, les quartzites et grès durs (Ourthe). Dans les régions calcaires, on emploie aussi les calcaires, même assez tendres. Le choix des matériaux est important : la durée et les frais d'entretien annuels en dépendent. Il est donc recommandable d'employer de bons matériaux, même s'ils sont plus chers, notamment si les frais de transport sont plus élevés. On procède à l'étude minéralogique des roches, on mesure la résistance à la compression et à l'usure sur meule ou dans des tambours rotatifs remplis de pierrailles. Il faut noter les bancs et surveiller l'extraction, car la qualité peut varier fortement dans une même carrière. L'expérience locale est le meilleur garant de la qualité des matériaux. Le prix moyen est de 1,50 fr. or par m² environ.



On n'emploie plus guère comme cylindres que des appareils mécaniques, principalement à vapeur, de 10 à 20 T selon l'importance du travail et la qualité des pierres, 16 T en moyenne. La disposition la plus courante est la disposition anglaise schématisée ci-contre.

Dans ce type, les pressions sont d'environ 40 kg/cm pour le cylindre avant non moteur et 100 kg/cm pour les cylindres moteurs. On emploie aussi les

Qualités mécaniques de divers matériaux d'empiècement.

Designation	Résistance à la compression en cubes (kg/cm^2)	Usure en cm après 4000 tours de meule sablée. (Paris)	Laboratoire.
Porphyre de Quenast	2842 à 3026	0,51 à 0,85	Paris
" " S ^t Raphaël	1445 " 2604	0,85 " 1,40	"
Grapp de Raon l'Etape	3052 " 4292	0,40 " 0,60	"
Basalte de l' Eifel	3150	0,55	"
Grès de Floreffe (quartzueux)	2340 à 2785	0,61 à 0,68	"
" d'Olloy (")	1703 " 2134	0,76 " 0,85	"
Quartzite de Barn/Sambre	3125 " 3202	0,41	"
" " Dongelberg.	2755 " 3071	0,75 de l'usure du porphyre de Quenast	Malines.
Grès psammite de l'Ouvrthe	2586 " 2948	0,74	Paris
	1529 " 2285	1,06 à 1,13	Malines.
Grès de Joncret.	2180	0,95	Paris
Calcaire de Courmai (Marbre noir)		1,60 à 1,68	"
Petit granite (Calc. de Soignies)		2,40 " 3,02	"
Saitier de haut-fourneau coulé en pains.		0,62 " 0,79	"
Arkosse de Couvin.	1,987	0,57	"
Silex de Maisières.	4272	0,12 à 0,17	"

rouleaux à un cylindre (monojante) ou à deux cylindres égaux (tandem). La pression est de 50 à 60 kg/cm^2 . La puissance varie de 10 à 20 CV, en moyenne 1,25 à 1,50 CV par tonne. La vitesse de travail est de 0,7 à 1 m./ m^2 . L'avancement est de 40 à 80 m^2 /par heure en moyenne pour les matériaux durs. La dépense est de 5 à 6 fr. or par heure environ.

Les chaussées ainsi obtenues conviennent pour une circulation moyenne légère; elles sont de bonnes qualités tant qu'elles ne sont pas dégradées ($f_s = 0,03$, bombement $\frac{1}{50}$). La circulation intense automobile, notamment des camions lourds les détériorent rapidement (1 à 2 ans). Elles peuvent durer 10 ans et davantage sous une circulation moyenne et légère.

Elles sont économiques de confection et d'entretien facile, mais coûteuses

lorsque les dégradations sont intenses. Elles ne sont pas imperméables et craignent le gel. En résumé, les empierrements, bien que constituant encore le revêtement le plus répandu, ne conviennent pas du tout pour la circulation moderne intense des véhicules automobiles, à cause du manque de liaison des éléments constitutifs.

Essai effectué au laboratoire de Mécanique appliquée de l'Université de Liège le 7 juillet 1927.

Essais de matériaux de pavage en grès.					
Epreuves cubiques.			Charge de rupture par compression.		Observations.
Numéro	Marque	Section	Totale	par cm ²	
1	13	40,5 x 40,5 : 16,4 cm ²	36.000	2195	Grès jaunâtre, limés. Plateaux secs.
2	"	" " "	27.700	1689	Grès id. Plateaux huilés.
3	"	" " "	31.000	1890	Grès id. " secs.
4	15	40,3 x 40,3 : 16,24 cm ²	24.000	1478	Grès bleu. " "
5	2	50,3 x 50,3 : 25,3 cm ²	59.300	2344	Grès jaunâtre, limés. Plateaux secs
6	2	" " "	L'éprouvette détériorée n'a pas été rompue par compression		

- 1) Les échantillons de grès jaunâtre présentaient des limés. La compression a été exercée perpendiculairement à ces limés.
- 2) Pour l'essai 2 les plateaux ont été lubrifiés à l'huile jaune fluide, non bouillie. La cassure s'est produite caractéristiquement par division en prismes.
- 3) Au cours de l'essai 3, on a tenté de mesurer le raccourcissement à l'aide d'un alinéa à cadran. On a lu 0,4 mm pour 25 T, à quoi correspond :

$$E = \frac{25000 \times 40,3}{16,4 \times 0,4} = 153.500 \text{ kg/cm}^2.$$

- 4) Au cours de l'essai 5, la croissance des efforts vers la fin de l'expérience fait d'environ 1000 kg/!
- 5) L'éprouvette 6 a été soumise à l'essai de la bille de Bunell :
Elle s'est rompue par fendage sous la pression de 3000 kg, cassure conchoïdale. - Sous la pression de 1000 kg, empainte 2,4 mm, Coeff. de densité 217
" " " " 500 " " 4,7 mm " " " 220

Grès.. Analyse complète.

Silice	94,85
Alumine et oxyde ferrique	3,50
Magnésie	0,30
Anhydride sulfurique	0,00
Perte au feu (eau combinée, anhydride carbonique etc.)	1,10
Éléments non dosés et pertes	0,25

Effectué au laboratoire de l'Etat à Malines. 100,00

Essai de divers échantillons de grès.

N° de l'essai	Désignation des échantillons essayés.	Section des éprouvettes	Compression		Usure											
			Charge de rupture.		Épaisseur de la tranche enlevée.											
			totale	par cm ²	Après un premier parcours de 1000 m.	Après un second parcours de 1000 m.	Après un troisième parcours de 1000 m.	Après un quatrième parcours de 1000 m.	Après un cinquième parcours de 1000 m.	Après un sixième parcours de 1000 m.	Minimum	Maximum	Moyenne			
1870	Cube de grès	5,4 x 5,4 = 29,16 cm ²	44500	1529,2	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
1871	id.	id.	57250	1967,3	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
1872	id.	id.	56750	1950,1	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
1873	id.	id.	66500	2285,2	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
3349	Cube de grès de 5,5 cm de côté	face A	—	—	0,19	0,18	0,18	0,55	1,13	1,06	1,13	1,095				
3350			face B	—	—	0,19	0,19	0,20					0,58			
3351	Cube de grès de 5,5 cm de côté	face A	—	—	0,17	0,17	0,17	0,51	1,06							
3352			face B	—	—	0,19	0,18	0,18					0,55			

Description de l'essai à l'usure: Les nombres ci-dessus expriment, en centimètres, l'épaisseur de la tranche enlevée par le frottement d'une meule sablée sur les deux faces opposées d'un cube chargé d'un poids de 250 grammes par cm², la meule parcourant un espace de 6000 mètres en 1 heure 40 minutes.

Les essais se font, à sec, au sable passant au travers d'un tamis de 324 mailles par cm² et retenu complètement sur les tamis de 4900 mailles par cm².

Banc d'épreuves pour matériaux de construction : Laboratoire
d'analyse chimique. - Koning & Bierfait, Quai de Costa, 104, Amsterdam.

Amsterdam, le 18 mai 1905.

1°) Résistance à la pression (moyenne des essais).

n° 1 : 3153 kg. par cm².

" 2 : 2335 " " "

" 3 : 2987 " " "

8475 kg. : 3 = 2825 kg. par cm².

2°) Résistance à l'usure.

Celle-ci a été déterminée sur des cubes d'environ 49 cm³ (7x7x7) après usure préparatoire sur une meule de 22 cm. de rayon pour la surface à soumettre à l'usure, sous une pression de 0,6 kg par cm² et 440 évolutions de la meule, qui effectue 30 évolutions à la minute.

Sur 22 évolutions de la meule, 20 grammes de grès n° 3 sont enlevés du cube soumis à l'usure.

Dimensions du cube	Poids équivalent.	Poids avant l'usure en grammes.	Poids après l'usure en grammes	Perte de poids en grammes.	Usure en cm ³ durant l'épreuve de 5 minutes	Usure en surface par cm ² en 5 minutes.
7x7x7 cm	2,68	907,5	887,0	20,5	7,65	0,156
7x7x7 "	2,68	887,0	866,3	20,7	7,76	0,158
7x7x7 "	2,68	845,6	830,6	15,7	5,97	0,122
					$\frac{21,38}{3} =$	$\frac{0,436}{3} =$
					7,13 cm ³	0,145 cm ²

Essais de matériaux.Compression, Choc, Usure.

Un échantillon de pavés adressé par ...

Cet échantillon constitué par deux pavés $0,14 \times 0,20 \times 0,16$ est parvenu au Laboratoire le 7 septembre 1923, contenu dans une caisse en bois, avec étiquette marquée:

Envoi de la S^te An^{me} d'Entreprises de Travaux Publics d'Arras, 14/16, rue Jeanne d'Arc à Arras. Il était présenté par la lettre d'envoi du 3 septembre de Monsieur Boutet, comme provenant de la vallée de l'Ouvette (Belgique).

Sur les instructions de M^e Boutet, ces pavés ont été repris par Monsieur Weber, lapidaire, qui a prélevé sur l'un d'eux les éprouvettes nécessaires, savoir: 6 cubes de $0,04$ m. d'arête et un prisme de $0,06 \times 0,04 \times 0,10$ m qui ont été rapportés au laboratoire le 26 octobre 1923.

Cet échantillon est formé d'un grès siliceux gris cendré avec une légère nuance bleuâtre à grains très fins, ciment dur perché de nombreux points de mica blanc broyé de pores cellulés moyennes. Cassure un peu bombée et ridée.

Cet échantillon a été soumis au Laboratoire à différents essais ayant pour but de déterminer:

- 1) Le poids du mètre cube de la pierre et sa résistance à la rupture par compression.
- 2) La résistance à la rupture par choc.
- 3) La résistance à l'usure par frottement sur une meule sablée.

1) Poids du mètre cube de la pierre et résistance à la rupture par compression.

Trois cubes de $0,04$ m. environ d'arête ont été régularisés par rodage à la température de 30 à 35° C, pesés et mesurés, puis soumis entre les 2 plateaux d'une presse hydraulique, à des pressions croissantes jusqu'à la rupture.

Les résultats obtenus sont indiqués dans le tableau ci-après:

	Poids du m ³ de la pierre en kilogrammes.	1 ^{er} craquement ou 1 ^{er} fissure. Charges en hectopiezés - (1)	Résistance à la rupture par compression en hectopiezés (1)
Graie de la vallée de l'Ouche (Belg)			
1 ^{er} cube	2666	"	2826
2 ^{me} "	2672	2677	2948
3 ^{me} "	2664	2390	2586
Moyennes:	2667		2787

(1) L'hectopiezé (loi du 2 avril 1919 et décret du 26 juillet 1919) vaut sensiblement 1 kilogramme par centimètre carré, ancien style, ou plus exactement 0,02 kilogramme-poids par centimètre carré.

2) Résistance à la rupture par choc.

Les trois autres cubes, de 0,04 m. préparés comme les précédents, ont été soumis à l'action du choc d'un mouton du poids de 4.500 kilogrammes tombant en leur milieu d'une hauteur constante de 1 mètre.

On a noté pour chaque cube le nombre de coups ayant déterminé le 1^{er} éclat, la première fissure et l'émiettement.

Les résultats obtenus sont indiqués ci-dessous:

	Poids du mètre cube de la pierre en kilogrammes.	Nombre de coups ayant déterminé:		
		le 1 ^{er} éclat	la 1 ^{er} fissure	l'émiettement
Graie de la vallée de l'Ouche				
4 ^e cube	2671	12	46	91
5 ^e "	2667	60	62	89
6 ^e "	2667	41	63	96
Moyennes:	2668			92

Résistance à l'usure par frottement sur une meule sablée.

Éprouve de 0,06 x 0,04 m. de base et 0,10 m. environ de hauteur et régularisée rodage, desséchée à la température de 30 à 35° centigrades, pesée et mesurée, posée sur une meule tournante en fonte saupoudrée de sable sous une charge calculée à raison de 250 grammes par cm² de surface frottante. L'usure ou perte de hauteur mesurée sur ce prisme après 4000 tours de meule (2000 tours sur chaque extrémité du prisme) correspond à un cours linéaire de 6.560 mètres, la meule tournant avec une vitesse unitaire de 2000 tours à l'heure a été trouvée = à 0 cm, 74.

Essai de divers échantillons de masses enveloppées de siege - Guillemain et 3' Obol les 6 et 13 juillet 1936.

N° de l'éprouve	Designation des échantillons essayés.	Section des échantillons essayés	Compression		Usure. Epaisseur de la tranche enlevée.					
			Charge de rupture totale	par cm ²	après un 1 ^{er} parcours de 1000 m.	après un 2 ^e parcours de 1000 m.	après un 3 ^e parcours de 1000 m.	après un parcours total de 3000 m.	total sur les 2 faces divisé par le nombre de parcours total de 6000 m.	
8277	Cube de puzos de 70 x 70 x 49,0	70 x 70 x 49,0	45.800	924,6	—	—	—	—	—	—
8			42.604	870,2	—	—	—	—	—	—
9			30.680	626,1	—	—	—	—	—	—
8230			45.400	925,5	—	—	—	—	—	—
1			face A	—	—	0,18	0,16	0,17	0,51	} 0,98
2			face B	—	—	0,17	0,16	0,14	0,47	
3			face A	—	—	0,24	0,24	0,24	0,72	} 1,43
4			face B	—	—	0,23	0,24	0,24	0,71	
5	face A	—	—	0,22	0,19	0,18	0,59	} 1,19		
6	face B	—	—	0,20	0,21	0,19	0,60			
7	face A	—	—	0,16	0,15	0,15	0,46	} 0,88		
8	face B	—	—	0,14	0,13	0,15	0,42			

Description de l'éprouve et de l'essai. Les nombres ci-dessus expriment, en centimètres, l'épaisseur de la tranche enlevée par le frottement sur une meule sablée sur les deux faces opposées d'un cube de puzos de 70 cm. de côté, chargé d'un poids de 250 grammes par cm², la meule parcourant un espace de 6000 m. en 1 minute 40". Les essais se font à sec, au double passant au travers d'un tamis de 324 mailles par cm² et relevant complètement sur le tamis de 490 mailles par cm².

§ 6) Perfectionnements apportés à la confection des empièvements.

On considère comme une amélioration de procéder au cylindrage au moyen de deux cylindres de poids différents, par exemple 12 et 16 tonnes. Le plus léger passe le premier et tasse les matériaux qui se mettent en place ; le second achève la compression. Il paraît que le revêtement est mieux fait et même qu'il y a économie. Le résultat peut être obtenu d'une manière plus simple au moyen d'un seul cylindre à surcharge variable (ballast). Il est évident que ce mode opératoire ne peut pas modifier notablement les qualités du revêtement.

Un autre procédé a été essayé en France. Le cylindrage est précédé d'un pilonnage effectué mécaniquement par une rangée de pilons fixés à l'arrière du cylindre. Sous l'effet des chocs assez énergiques mais non brisants, les matériaux s'enchevêtrent d'une manière stable, sans écrasements. Le cylindrage subséquent n'a plus qu'à serrer la masse sans déplacer les éléments. Il en résulte une compression plus rapide et un meilleur coincement des pierrailles. La résistance est donc accrue. L'arrosage doit toujours être abondant.

D'après le rapport de mission de M. Van Nolsom (ATPB 1912, fasc. 4), des essais ont été effectués à Melun avec un cylindre de 16,5 T muni de 4 pilons de 265 kgs, frappant 60 coups par minute à la vitesse d'avancement de 100 m. par heure (hauteur de chute 50 cm). Après un pilonnage unique, le nombre de passages du cylindre était réduit de 100 à 16 pour les flancs et de 120 à 40 pour le milieu. La quantité de matière d'agrégation est légèrement plus élevée (16 à 17%) qu'avec le cylindrage simple, parce qu'il n'y a pas de débris d'écrasement des pierrailles. Le procédé ne paraît pas s'être répandu, bien qu'il semble intéressant. La raison en réside sans doute dans le fait qu'il ne peut modifier les caractères de l'empièchement et le rendre apte à supporter la circulation automobile.

Lorsque l'on effectue le rechargement d'une route ancienne, il faut, au préalable, bien décaper la chaussée, c'est-à-dire enlever les poussières, parties friables et mobiles, abattre les crêtes et combler les flaches avec des matériaux bien serrés, puis arroser, avant de recharger. Pour assurer la liaison, il est recommandable de creuser à la pioche des ornières latérales limitant le chargement. Toutes ces opérations sont facilitées et mieux réalisées

par un défonçage mécanique préalable qui doit accompagner dorénavant tout rechargement. La défonceuse est trainée par le cylindre et consiste en une masse pesante roulant sur deux galets et portant, un petit nombre, (généralement 3), de dents en acier très dur qui arrachent les éléments de la chaussée. On procède ensuite à un réglage de la chaussée ainsi défoncée de manière à la remettre sous profil et on recharge ensuite à la manière ordinaire.

Une telle machine de 2 à 3^t laboure 3 à 4000 m² par jour. Prix : environ 5 centimes or par m².

§ 7) Perfectionnements apportés à la liaison des empièvements. La raison de l'infériorité des empièvements pour la circulation automobile réside dans le manque de liaison des matériaux, car les mêmes pierres dures servent de squelette aux revêtements modernes. On a cherché à donner plus de liaison aux empièvements afin d'éviter le déchaussement par les actions tangentielles.

Tous les procédés employés consistent à remplacer la matière d'aggrégation par une composition plus ou moins plastique ou liante : mortier, brai ou mastic, d'asphalte. Nous examinerons l'emploi de ces derniers produits lors de l'étude des revêtements au goudron et au bitume. Certains procédés spéciaux emploient même de l'argile.

Dans le procédé au mortier (voir : Le Gavrian : Les routes modernes. Exavaux du 4^e Congrès de la route à Séville en 1923 et rapport de M. M. Navvies et Nicolas à ce Congrès. Rapport de M. M. Piens et Huysen (Belgique) au Congrès de Milan, 1926), on emploie un mortier de ciment assez riche, car le liant doit être dur. On étale une couche assez épaisse de mortier sous l'empierrement ou mieux à mi-épaisseur ou encore au-dessus et on cylindre jusqu'à ce que le mortier reflue ou ait été chassé dans les interstices. Cette opération doit être terminée avant le commencement de la prise. On peut aussi introduire le mortier assez mou dans les interstices d'un revêtement cylindré sans matière d'aggrégation à l'aide de pilettes pneumatiques. Il faut laisser durcir suffisamment

avant de livrer à la circulation (quelques jours au moins). L'emploi du canon à ciment n'a pas donné satisfaction. Le mortier doit comporter au moins 300 à 400 kg de ciment Portland artificiel par m³ de sable. Le laitier granulé convient très bien par suite de ses qualités pouzzolaniques; il permet de substituer à une partie du ciment Portland de la chaux hydraulique ou d'employer le ciment de laitier.

En France, puis en Belgique, on a essayé de répandre comme matière d'agrégation, les constituants mélangés à sec du mortier. Après cylindrage de l'empierrement sec ou légèrement humide, on répand cette matière sèche, on balais et cylindre et on mouille en achevant le cylindrage.

Le procédé peut donner des résultats satisfaisants pour une circulation moyenne; il n'est pas trop coûteux (1 m³ de mortier pour 3 à 4 m³ de pierre cassée ou 25 à 30 litres par m²). Mais le dosage doit être assez riche et la pénétration du mortier dans la masse doit être réalisée le mieux possible par des moyens mécaniques appropriés. Augmentation du prix par rapport à l'empierrement: 25 à 50%. Il est recommandé de goudronner la surface.

Un procédé spécial qui, d'après les rapports, semble avoir donné des résultats relativement satisfaisants et pourrait se répandre dans les régions riches en pierres calcaires, est le procédé au silicate.

Il consiste à former un véritable béton en mélangeant à 1 m³ de pierre cassée calcaire (p. ex. macadam 4-6), un mortier de 200 à 300 litres de sable calcaire et de 45 litres de silicate de soude de 35,5 à 36°. De plus

$$\frac{\text{Si O}_2}{\text{Na}_2\text{O}} = 3,4.$$

Le mélange doit être intime, il peut se faire à la bétonnière ou sur la route.

On étend ce béton par petites couches bien réparties en veillant à conserver l'homogénéité, et on cylindre par sections (40 m). Lorsque la compression est suffisante (30 à 40 passages), on arrose (1,5 litre par m²) et on recylindre; le silicate remonte par taches à la surface. On balais et on cylindre jusqu'à ce que la route présente un enduit uniforme de silicate. S'il y a des arrachements, on mouille le cylindre. Après deux jours de séchage, la route livre passage à la circulation.

Ce mode d'exécution par mélange demande de l'expérience; il est un peu délicat au premier abord, mais il paraît le plus sûr. On a aussi employé des procédés par imprégnation, consistant à arroser l'empierrement d'une solution de silicate avant ou même après cylindrage. L'action ris que de n'être que superficielle.

Il semble que le silicate améliore les qualités des calcaires, surtout la dureté et l'imperméabilité. Cette amélioration est surtout efficace pour les calcaires moyennement durs et non argileux ($\Delta = 2000 \text{ à } 2700$, $R = 400 \text{ à } 1600$, usure : 10 à 2 cm). L'action chimique n'est pas complètement élucidée; il ne se forme pas de silicate de chaux, mais plutôt une dialyse du silicate avec dépôt de silice et éventuellement cristallisation du silicate. L'acide carbonique de l'air et la dessiccation interviennent, car l'action paraît surtout superficielle. Selon M. Fexet, les matières pulvérulentes quelconques favorisent le phénomène par adsorption et donnent un agrégat d'autant plus dur que les grains le sont aussi davantage. Donc, dans une route silicatée, on peut admettre que les phénomènes sont complexes. Pratiquement, seuls les calcaires témoignent d'une amélioration par le silicatage. Le procédé ne convient pas aux pays chauds. (Bibliographie: A.P.C. n° 1 et 6 1923, n° 5 1924, n° 6 1926, n° 4 1927. - B.A.J.P.C.R. n° 43 de janvier, février 1926; 50 de mars-avril 1927; 51 mai-juin 1927, article de M. Fexet.)

Les résultats semblent très intéressants, puisque, pour un prix d'exécution d'environ 1,5 fois celui d'un empierrement de même épaisseur (et même pierraille calcaire), la durée de vie est 3 à 5 fois plus grande pour une circulation moyenne et l'entretien est réduit de $\frac{2}{3}$ à $\frac{4}{5}$. La route donne peu de poussière et de boue, s'use uniformément et est peu sonore, plus imperméable et ne craignant donc pas la gelée. Le procédé est intéressant pour les régions riches en pierre calcaire et a déjà pris un certain développement. Il convient pour une circulation moyenne.

§ 8) Pavages en pavés d'échantillons. Dans les pavages, on pose à la main sur une assiette de fondation, des pierres de forme régulière voisine du cube, en les serrant bien. La qualité d'un pavage

Dépend de la qualité et de la forme des pavés et du soin de l'exécution, ainsi que de la solidité de la fondation. Le pavage est le revêtement le plus résistant, c'est celui qui convient le mieux aux poids lourds. Il lui faut donc une fondation solide, de préférence un empierrement ayant pris son assiette définitive. On interpose une légère couche de sable de 2 à 4 cm. pour donner de l'élasticité et compenser les petites différences de hauteur. Anciennement, on construisait le pavage sur forme de sable. La fondation était simplement constituée d'une couche de sable d'une vingtaine de centimètres.

Nous envisageons surtout dans la suite les pavages réguliers de haute qualité, non des pavages irréguliers ou des pavages réguliers médiocres. Les pavés doivent satisfaire aux conditions de qualité les plus sévères. Ils doivent être faits dans les meilleurs matériaux : homogènes, durs, résistants aux charges, aux chocs et aux frottements, tenaces et non cassants. La facilité de taille est aussi désirable. Ils ne doivent pas prendre le poli (glissement). Un des matériaux satisfaisant le plus complètement à ces conditions est le basalte dans ses meilleures qualités. Une garantie spéciale est toujours désirable, car certains basaltes subissent à l'air une altération chimique qui entraîne leur destruction rapide. Il se taille facilement, est très dur, tenace et peu glissant (Cifel).
Durée : 30 à 40 ans, selon origine et circulation.

Le porphyre est équivalent comme qualités mécaniques ; il se taille moins bien et devient glissant. Durée 30 ans et plus en voie principale.

On emploie encore en Belgique les quartzites, presque équivalents aux porphyres, moins glissants, mais peu abondants.

On emploie aussi les grès psammites ou grès de l'Ourthe, de qualité variable et parfois peu homogènes ; ils ne deviennent pas glissants.

Les grès ordinaires et les calcaires durs, tels que le petit granite, ne peuvent convenir qu'en bordures, caniveaux, etc....

À l'étranger, on emploie aussi les diorites, métaphytes, syénites et les granites qui donnent d'excellents pavés, peu glissants, mais parfois cassants. Ceux de certaines régions (Suède), sont importés en Belgique.

Les pavés de bonne qualité doivent être de formes très régulières, à faces parallèles et à arêtes vives, la tête et l'assiette doivent être planes, surtout la tête (grande base) qui ne peut présenter ni bosse, ni concavité. C'est la qualité qu'on appelle en Belgique, retailés ou demi-retailés. Il y a, aussi les qualités ordinaire et remaniée; elles se différencient par les tolérances. La section de tête est généralement carrée, parfois oblongue. Les boutisses, placés aux bords de la chaussée afin d'assurer la découpe des joints longitudinaux, sont plus longues que les autres. (Rapport 1,5/1).

Les dimensions sont standardisées en Belgique. Pour la circulation très lourde, on peut admettre l'échantillon $15 \times 15 \times 15$ ou les pavés oblongs, $13 \times 20 \times 15$; pour un pavage moins fatigué, on peut admettre l'échantillon $13 \times 13 \times 13$ ou le pavé oblong $13 \times 20 \times 13$. On emploie exceptionnellement des pavés plus grands ($17 \times 17 \times 17$) d'échantillon en Belgique, ou même davantage en Allemagne. Ces grandes dimensions sont inutiles.

L'exécution doit se faire sur une fondation solide. Un ancien empierrement convient. Il doit être exactement profilé et recouvert d'une couche de bon sable (légèrement argileux) de 3 à 5 cm d'épaisseur avant la pose. Les pavés sont posés en rangées transversales bien serrées au marteau, à joints aussi minces que possible, suivant le bombement et avec une surélévation de quelques centimètres entre deux bordures latérales. Ensuite, on enfonce les pavés, à la hie ou dame, au niveau voulu, ce qui accentue le serrage. Il arrive que l'on cylindre les pavages; le damage, s'il est plus coûteux, paraît préférable. On répand ensuite du sable que l'on introduit dans les joints par le moyen du balai et d'un arrosage. Dans les villes et même les grand'routes, on remplit parfois les joints d'un mastic de brai ou de bitume, versé à chaud, au moyen de cruches. Le brai de quindron ne convient guère, le bitume est plus coûteux. Ce procédé combat la poussière, rend le pavage imperméable et améliore l'uni de la surface. On peut aussi remplir les joints d'un coulis de ciment.

Les pavages ainsi exécutés constituent un excellent revêtement, résistant aux circulations les plus lourdes, les plus rapides et les plus intenses, d'une longue durée de vie et d'un entretien réduit et facile. Ils ajoutent

un bon roulement ($f_r = 0,03$, bombement $\frac{1}{70}$ environ au moins); ils deviennent aisément glissants. On emploie souvent des pavés de moindre largeur pour les rampes, afin de multiplier les joints et d'augmenter la rugosité. Ils sont coûteux (10 à 16 frs or par m^2). Le remplissage des joints augmente le prix de 1 à 2 frs. or par m^2 .

§9. Pavage en petits pavés. Constitue une forme plus moderne du pavage, qui a pris son origine en Allemagne. Les pavés sont de forme cubique et de dimensions réduites, $8 \times 8 \times 8$ à $12 \times 12 \times 12$, généralement la dimension moyenne. Il existe un échantillon standard 11/11/11 en Belgique. Leur forme doit être très régulière. Pour assurer leur résistance, on ne peut employer que les matériaux les plus durs tout en étant de taille assez facile: basalte, porphyre, grès dur, diorite). La qualité des matériaux est essentielle; si les matériaux sont médiocres, la ruine est rapide. On taille parfois de petits pavés dans les pavés d'échantillon retirés de la voirie et qui sont donc des matériaux éprouvés. La pose se fait sur fondation solide (empierrement), bien dressée et recouverte d'un lit de sable de 2 à 4 cm, par rangées concentriques en éventail. Les pierres les plus hautes et grasses au milieu des arcs, les plus petites aux extrémités. Les rangées aboutissent normalement aux bordures (Voir le Gavrian). On recouvre de sable et on dame, ensuite on arrose et balaye. On dame et répand du sable en arrosant, à plusieurs reprises, jus qu'à ce que le pavage soit inébranlablement ferme. On obtient une chaussée très unie, peu résistante à la traction, peu bombée, pas trop glissante avec des matériaux appropriés; pas poussiéreuse ni sonore, plus économique que le pavage d'échantillon et presque aussi résistante avec des matériaux de choix et une exécution soignée. Une expérience déjà ancienne a montré que ce revêtement résiste, dans ces conditions, aux charges les plus lourdes et au trafic très intense, à condition d'être l'objet d'un entretien très attentif, qui n'est d'ailleurs pas coûteux. Quelques routes belges sont pavées d'après ce système, elles sont parmi les meilleures. Le système mériterait d'être plus répandu et tend à le devenir. Le prix est d'environ 7 à 8 frs. or par m^2 pour un petit échantillon. Les joints peuvent être remplis au goudron,

bitume ou coulis de ciment.

§ 10. Pavages divers. - Nous ne citerons que pour mémoire les pavages en briques, assez répandus en Hollande. Il faut des briques très dures. On fabrique, à l'heure actuelle, d'après des procédés assez développés en Amérique, des briques spéciales à grande dureté; on emploie surtout pour leur confection du schiste houiller broyé. La résistance à l'écrasement atteint et dépasse 700 à 900 kg/cm², la résistance à l'usure est élevée; donc ces revêtements peuvent au point de vue technique, concurrencer le béton. Ils peuvent d'ailleurs être protégés par un goudronnage ou un asphaltage superficiel comme le béton. Le danger de formation de nids, de paules n'existe pas, la cohésion est grande. Mais il faut une pose très soignée, pour éviter les ruptures de briques par chocs. Il en résulte une dépense de main d'œuvre assez élevée, ce qui est un désavantage par rapport au béton. C'est un revêtement très approprié pour les promenades publiques, pistes cyclables, quais et lieux publics etc... et pour toutes routes à trafic même intense, mais de poids limité. Le prix de construction serait de 25% plus élevé que celui des routes en béton, mais la durée serait supérieure et les frais d'entretien moindres.

On emploie aussi des briques de laitier coulé, (Amérique) des pavés en béton de pierre dure, des pavés en céramique, des pavés en basalte fondu, en laitier de cuivre (Mansfeld) etc.. Ces procédés sont d'intérêt local ou spécial. Les principes de mise en œuvre sont toujours les mêmes, ainsi que les qualités requises. Les pavages en bois et en blocs d'asphalte seront étudiés dans les revêtements modernes.

Nous ne citerons aussi que pour mémoire les routes en rondins ou madriers, généralement à deux couches continues ou discontinues, l'inférieure longitudinale avec joints alternés, la supérieure transversale. Ce sont des routes de circonstance (militaires, coloniales, etc...)

Chapitre V.

Revêtements modernes.

Utilisent comme liants des hydrocarbures plastiques ou des liants hydrauliques; nous classerons aussi dans cette rubrique les pavages en bois et pavés d'asphalte.

§ 1) Liants hydrocarbonés. On emploie pour les routes les goudrons de houille des cokeries ou usines à gaz et les bitumes asphaltiques naturels ou artificiels, possédant des propriétés agglomérantes. Les premiers sont des mélanges complexes d'hydrocarbures fluides et solides principalement de la série aromatique ou non saturée; les seconds des mélanges complexes d'hydrocarbures des séries saturées. Les bitumes artificiels proviennent du traitement du pétrole brut et constituent à proprement parler des bitumes (> 95% d'hydrocarbures); les bitumes naturels ou minéraux contiennent presque toujours beaucoup d'impuretés minérales qui constituent avec eux des asphaltes naturels.

Les gisements les plus célèbres d'asphaltes naturels sont dans l'Amérique centrale, notamment l'asphalte lacustre de Trinidad, qui contient à l'état naturel 40% environ de bitume, 57% environ après raffinage. D'autres gisements moins importants (Berruendes, Maracaïbo), donnent après raffinage jusqu'à 95% de bitume. En Europe, on trouve surtout des asphaltes en roche à faible teneur en bitume (Calcaires asphaltiques de Val Eravers - Suisse - Seyssel - Obscans - France - etc.). Leur teneur varie de 6 à 15% de bitume. L'asphalte de Selenitza (Albanie) contient toutefois 75% de bitume. On peut, de ces asphaltes naturels, extraire des bitumes purs par dissolution dans le sulfure de carbone CS_2 . Cette opération ne doit pas se faire cependant pour l'application de l'asphalte aux routes; il convient pour l'emploi sans autre opération qu'un raffinage éventuel (notamment pour éliminer l' H_2O et le gaz des asphaltes lacustres).

Les bitumes asphaltiques artificiels (les plus abondants) sont obtenus par distillation, polymérisation ou oxydation du pétrole; ils sont presque purs. On considère commercialement comme bitumes, des produits contenant > 95% d'hydrocarbures solubles dans CS². Mélangés à des produits minéraux, ils forment des asphaltes artificiels. Les bitumes assez fluides sont employés comme fluidifiants ou flux, pour donner la consistance voulue aux asphaltes. Un mélange plastique de poudre d'asphalte et d'asphalte fluxé porte le nom de maotie d'asphalte.

Nous étudierons les qualités requises lorsque nous examinerons l'application de ces produits. Les principales sont l'adhésivité, la ductilité et la stabilité physique et chimique. Par suite de la complexité des produits, les essais sont très étendus, d'autant plus qu'on n'a pas encore adopté de méthodes et de spécifications uniformes. La standardisation des épreuves auxquelles doivent être soumis ces produits est toutefois sur le point d'être réalisée par un comité créé par le 5^e Congrès international de la route (Milan 1926)

La description détaillée des méthodes d'essai sort du cadre de ce cours, je renvoie à l'ouvrage de M^r Le Gavrian et aux publications de l'A. S. I. C. R., ainsi qu'aux rapports des Congrès de Séville et de Milan. Cette question est exposée dans le cours de chimie des matériaux techniques.

Les principales épreuves sont, d'après les décisions provisoires du comité de standardisation (Bulletin A. I. P. C. R. n° 52 juillet-août 1927):

- Goudrons et dérivés
- Dosage de l'eau
 - Consistance
 - Genève en carbone libre
 - Distillation fractionnée.
 - Essais accessoires {
 - Densité
 - Acides
 - Genève en naphthaline

- Bitumes, asphaltes et dérivés.
- Pénétration
 - Point de ramollissement
 - Tente à la chaleur
 - Solubilité dans CS² (teneur en bitume)
 - Ductilité
 - Essais accessoires {
 - Densité
 - Carbone libre
 - Solubilité dans l'éther, sulfurique, etc.

Ces épreuves se font d'après des méthodes conventionnelles, principalement celles de l'Association américaine d'essai des matériaux; ils intéressent plutôt le chimiste. Des essais des mélanges agglomérés, tels qu'ils sont mis en œuvre sur les routes, intéressent davantage l'ingénieur. - Consulter les « Recherches sur les revêtements de chaussées à liants goudronneux, bitumineux et hydrauliques » de R. Féret 1918.

Ils comportent :

- la détermination de la teneur en bitume soluble dans CS₂;
- la composition granulométrique (tamis);
- la densité apparente, la compacité, l'absorption d'eau;
- la plasticité et la déformation par la chaleur;
- la résistance à la compression, à la pénétration et au choc, ainsi qu'à l'usure par meule tournante ou au jet de sable.

Ces essais sont relativement simples.

Les liants hydrocarbonés sont mis en œuvre :

- en enduits superficiels;
- en enduits que l'on fait pénétrer profondément dans le revêtement (méthode de pénétration);
- en mortiers ou bétons (pierrailles ou sable agglutinés par un liant hydrocarboné, méthode d'imprégnation)

§ 2) Enduits superficiels de goudron. Leur principale fonction est d'éviter la formation de poussière sur les routes empierrées ou en béton, mais il est établi qu'ils augmentent la durée de vie des empièvements, souvent du double et davantage, à condition que les enduits soient bien faits et régulièrement renouvelés tous les ans ou tous les deux ans, d'après l'importance, de la circulation.

L'application du goudronnage superficiel est très répandue en Angleterre, moins en France et trop peu en Belgique.

Par suite de leur emploi étendu, les spécifications anglaises pour le goudron destiné au goudronnage superficiel sont, en attendant une standardisation plus définitive, celles qui conviennent le mieux (voir le Gavrian). Le goudron doit être déshydraté (moins de 1% en volume d'eau ou d'eau

ammoniacale), ne pas contenir de naphthaline, pas plus de 3% de phénol, pratiquement pas d'huiles légères. Il sera composé en majeure partie d'huiles moyennes, d'huiles lourdes et de brai (pas plus de 12 à 21% en poids de carbone libre). La densité doit être voisine de 1,19 et comprise entre 1,16 et 1,22 à 15° cent. Comme flux, on peut employer des huiles lourdes débarrassées d'eau, de naphthaline, d'anthracène et d'huiles légères, de densité comprise entre 1,065 et 1,085 à 20° cent. Donc le goudron brut ne convient pas. Il faut en enlever l'eau, le NH_3 , les huiles légères, les phénols et la naphthaline, pour ne conserver que les huiles moyennes et lourdes et les brais, produits stables et non volatils. Le produit obtenu est mis à la consistance désirée (d'après l'exposition et le chisot) par un flux approprié. Il faut notamment éviter le ramollissement en été. Dans les applications en petit, il arrive qu'on emploie du goudron brut, en le réchauffant à une température aussi élevée que possible pendant quelque temps. On élimine ainsi une grande partie des produits volatils. Si le goudron contient de l'eau en grande quantité, on ne parvient guère à dépasser 80°, car au-delà le goudron mousse et s'épanche. Pour éviter les insuccès, il est recommandable de mettre en oeuvre un goudron de composition appropriée et contrôlée.

Les liants hydrocarbonés subissent, en général, une modification de leurs qualités par des chauffages répétés et prolongés. Il y a une tendance à la polymérisation; la consistance augmente à chaque chauffage, la résistance aussi tout d'abord; au delà d'une certaine limite, le produit durcit et devient cassant. L'oxydabilité renforce le phénomène et tend à provoquer le durcissement. Les brais de houille s'oxydent et durcissent plus rapidement que les brais bitumineux; il faut donc, pour un goudron de composition convenable, éviter de chauffer au delà de la température moyenne nécessaire pour un bon arrosage et ne pas réchauffer plusieurs fois.

Le goudronnage se fera d'autant plus vite que peu de temps après un rechargement général, donc sur un empierrement en bon état. Sinon, on rétablit

l'uni de la chaussée par des emplois bien damés. Avant goudronnage, la chaussée doit être énergiquement balayée (au besoin mécaniquement). La chaussée doit être aussi sèche que possible et de préférence, chaude. On ne goudronnera donc dans nos régions que de mai à septembre et par beau temps. Pour de petites surfaces, (réparations) on peut employer des sècheurs à brûleurs de pétrole, dont la flamme est étalée sur la route par des écrans en tôle. Le goudronnage se fait en général à chaud, pour donner la fluidité voulue. Le chauffage s'effectue dans la tonne arroseuse même (petits modèles à main) ou dans des chaudières (depuis les plus petits modèles aux plus grands). Pour de grands travaux effectués au moyen de citernes arroseuses automobiles, on établit souvent un emplacement central de chauffage près du dépôt de goudron. Un type intéressant est la chaudière chauffeuse Lassailly. Le chauffage se fait par un serpentin de vapeur passant dans le réservoir. Le chauffage terminé, la vapeur est admise dans le réservoir et le goudron est ainsi introduit sous pression dans la tonne distributrice. Ensuite on ferme l'arrivée de vapeur et on arrose intérieurement le réservoir, la vapeur se condense et le vide produit sert à aspirer le goudron frais. L'opération recommence.

Dans les régions industrielles, on peut prendre le goudron chaud à l'usine, en tonnes automobiles. Il faut toutefois contrôler la composition.

Le goudron chaud est répandu aussi uniformément que possible : à la main (arroseurs), par tonnes (à la main, à traction animale ou automobile) et dans ce cas, par la gravité ou par pulvérisation sous pression. La pulvérisation peut se faire par le moyen d'une petite pompe rotative recevant son mouvement des roues du véhicule, soit par l'air comprimé ou la vapeur produits par un appareil monté sur le véhicule. Elle constitue certes un important perfectionnement ; elle demande un moindre réchauffage, assure une meilleure adhérence à la route et une très grande uniformité. La distribution se fait par rampes (gravité ou pression) ou par tuyaux et ajutage (pression). Lorsque le goudron est répandu par gravité, on le balaye, soit à la main, soit par un balai fixé sur le véhicule derrière la pompe distributrice, afin d'assurer

l'uniformité du répardage qui est indispensable; la quantité varie de 2 kg. (premier goudronnage) à 1 kg (goudronnages ultérieurs) par m². Il ne faut pas de vides, les raccords, si on opère par desri - largeurs, doivent être bien faits. Il serait désirable d'interrompre la circulation pendant quelques jours après le goudronnage, pratiquement ce n'est guère possible. On laissera refroidir pendant quelques heures, de manière que les huiles pénètrent aussi bien que possible dans la route. Puis on répard une couche de sable, parfois les produits même, du balayage; on l'enlève après quelques jours. L'usage du petit gravier n'est pas recommandable, il risque d'abimer l'enduit. Le sable sert surtout de protection, en cas de pluie, il faut sabler tout de suite.

Une route bien goudronnée prend après quelque temps de circulation un aspect uni; on constate que le goudron pénètre dans la chaussée sur une profondeur qui peut atteindre 5 à 6 cm. Il faut éviter un excès de goudron qui donne lieu à des ramollissements en été et à des boues en hiver, mais il faut que les pores soient bien fermés. La meilleure méthode semble celle de goudronnages fréquents mais modérés, sous pression.

En résumé, le goudronnage superficiel est recommandable et peut donner de bons résultats s'il est effectué avec de bons produits, par des moyens mécaniques perfectionnés, en bonne saison, sur une route en bon état, bien sèche et autant que possible bien exposée. Le goudronnage rendant la route plus glissante, il ne faut pas de pentes longitudinales supérieures à 5%; un bombement de $\frac{1}{50}$ convient. Le goudronnage convient mieux aux pierres dures qu'aux pierres tendres; il ne résiste bien qu'à une circulation légère ou moyennement lourde même active; il ne résiste pas aux poids lourds à bandages pleins.

Il y a intérêt à maintenir les routes goudronnées en bon état constant. Les flaches seront comblées le plus tôt possible avec un emploi de pierrailles et sable liés au goudron et bien pilonné. On regoudronnera périodiquement tous les ans si l'intensité de la circulation l'exige et même parfois à des intervalles plus rapprochés (Angleterre). Le prix de revient est d'environ 0,15 à 0,20 fr. or par m². Les frais d'entretien d'une route goudronnée peu-

vent être réduits de 50% et la durée de vie plus que doublée. Le goudronnage est donc techniquement et économiquement avantageux; c'est devenu le complément désirable des empierrements pour les routes où ce revêtement peut encore convenir.

Les goudronnages à froid se font parfois au moyen de goudron brut fluidifié par des huiles lourdes; procédé plus coûteux que le chauffage. Le résultat est moins certain et moins bon.

§ 3) Enduits superficiels de bitume. La grande production de pétrole qui donne d'énormes quantités de bitumes plus ou moins maus, fait que les répandages superficiels de bitumes à chaud ou en émulsion se développent aussi depuis quelques années. Les enduits au bitume ne présentent pas de différence de principe par rapport au goudron; ils sont plus coûteux. Le répandage à chaud est plus difficile que celui du goudron à cause du point de fusion plus élevé du bitume, qui exige un chauffage plus élevé. La viscosité est plus grande et le bitume se fige plus vite. Les obstructions sont donc à craindre et le bitume, trop froid n'adhère plus à la route. Les arroseuses pour le bitume doivent donc présenter des dispositifs assurant le chauffage jus qu'au moment du répandage. La pulvérisation sous pression élevée (plusieurs atmosphères) est très intéressante pour le bitume, à cause de la plus grande adhérence et en vue de régler la quantité, dans le prix de l'enduit. Dans de nombreuses régions, on emploie le bitume en mélange avec une proportion prépondérante de goudron (70%). On brie ou repand le bitume après goudronnage préalable; il faut moins de bitume et l'adhérence est meilleure (Voir travaux du Congrès de Milan). Il semble que le goudron soit beaucoup amélioré par l'addition de bitume, le prix est moindre que celui d'emploi de bitume pur. Le dosage optimum doit être étudié dans chaque cas. Par suite du pouvoir agglutinant du bitume, les enduits sont généralement recouverts d'une couche de gravillon.

§ 4. Émulsions. Pour la simple protection contre la poussière, les émulsions de goudron ou de pétrole constituent un bon procédé.

Les émulsions aqueuses de goudron ou de bitume, sont obtenues grâce à la présence d'un savon émulsionnant et d'un colloïde stabilisant (dextrine). Le mélange s'effectue à chaud, aux environs de 100°, par un intense brassage mécanique. Le produit est mis en oeuvre tel qu'il est (concentration 50%) ou bien on le prépare concentré (75%) et il doit être allongé d'eau au lieu de l'emploi. Puisqu'il ne craint pas l'eau, il peut être mis en oeuvre par tous temps. On emploie surtout des arroseurs à larges becs ou le répandage par vidange directe des fûts; les rampes d'arroseuses mobiles s'obtiennent rapidement. L'uniformité s'obtient par balayage. Puis on sable ou gravillonne. L'enduit sèche par évaporation de l'eau. Ces enduits se font plus ou moins épais. Les enduits épais se rapprochent, en réalité, des procédés de pénétration étudiés plus loin. D'une manière générale, ces produits ont comme inconvénient l'instabilité de l'émulsion, qui ne peut se conserver généralement que pendant une durée limitée et seulement en bonne saison.

D'autre part, la résistance et la liaison aux pierres semblent, vu son mode de confection, moins considérables que dans le procédé à chaud. Toutefois, un léger cylindrage ou la circulation même sont susceptibles d'améliorer la liaison par compression.

Le grand avantage de ces produits est de permettre en tout temps un repandage rapide, facile et à faible dosage ; ils conviennent bien pour la lutte contre la poussière et notamment pour les endroits saisonniers des routes des régions balnéaires, pour des endroits occasionnels de circuits automobiles etc, ainsi que pour l'entretien des routes au goudron ou asphaltiques.

Le Comité de standardisation prévoit comme essais essentiels pour les émulsions le dosage de l'eau et du bitume et fait étudier la question de la stabilité des émulsions et de l'influence des qualités des composants (émulsifiant et stabilisant). En somme, l'emploi des émulsions, qui présente de grandes facilités pour les repandages superficiels, semble susceptible de prendre une grande importance, par suite de l'insuffisance actuelle de production du goudron. En France, l'administration des routes a créé de nombreux centres d'émulsion en régie. Dans ces conditions, le procédé semble être très économique et satisfaisant.

Pour la lutte contre la poussière, on arrose aussi au moyen de solutions de sels déliquescents : chlorure de Ca, Mg ou eau de mer ; le sel cristallisé doit être enlevé avant la mauvaise saison.

§ 5. - Revêtements agglomérés au goudron (tar-macadam). Employés comme couche de roulement ou d'usure de 10 cm. d'épaisseur au plus. Comme fondation on emploie un ancien empierrement ou une fondation en béton, sans interposition.

Pour ces revêtements aussi, les spécifications anglaises sont recommandables pour le goudron. Densité 1,21 ; limites 1,19 à 1,24 à 15° C. Un peu moins d'huile et plus de brai ; ni eau, ni huiles légères, ni naphthaline, peu de phénols (2%) et mêmes limites pour le carbone libre qu'au § 2. Voir aussi les spécifications pour le brai (Le Gavriau).

Le procédé de pénétration est le moins répandu sur le continent. En Angleterre, il se fait en une ou deux couches. La pierraille, auparavant

séchée, est cylindrée sur 7 à 8 cm. d'épaisseur à sec, ensuite on verse à chaud le liant qui est un mélange par parties égales de brai fluide et de sable chauffé, ou de brai et de goudron, ou une composition analogue (divers brevets). Il en faut généralement 6 à 8 litres par m² ou davantage selon les cas. On recouvre aussitôt le liant d'une mince couche de criblures et on cylindre pour le faire pénétrer dans l'empierrement avant durcissement. Après durcissement on verse encore du sable et des criblures et on cylindre pour parachever. Les pierrailles, doivent être bien sèches et propres, elles sont passées dans un siveur dépoussiéreur. L'homogénéité du revêtement est incertaine. Si il y a trop peu de goudron, la liaison est mal faite. Là où il y en a trop, la route manque de consistance. Il faut donc un personnel expérimenté et un matériel approprié. Il est difficile de tenir le mélange de brai et de sable bien homogène; certains produits spéciaux sont peut être plus homogènes (craie ou chaux en poudre très fine). En tous cas le goudron fluide ne convient pas. Le procédé convient pour les déclivités, il est moins glissant que le tarmacadam par mélange.

Dans le tarmacadam fabriqué par mélange, la pierraille bien séchée et dépoussiérée est brassée mécaniquement à chaud avec du goudron approprié, de manière à être bien enrobée partout. La quantité par m³ dépend surtout de la surface totale des matériaux, c'est à dire du calibre. Elle est d'environ 50 kg par tonne de 4/6 et de 80 kg par tonne de criblures. On laisse souvent refroidir les matériaux en tas, l'enduit prend une consistance presque solide. Si l'on procède au placement à chaud aussitôt après mélange, on mélange du brai au goudron dans la proportion 1 : 3.

Les pierrailles sont de calibres divers dans une proportion bien déterminée pour former un béton compact. D'après les spécifications anglaises on peut envisager :

calibre	4 - 6 cm	57%
"	2 - 4 "	28%
"	0,5 - 2 "	15%

Ces matériaux sont encobés ensemble et placés pile - mêle ou bien parfois par couches superposées d'épaisseur et de calibre décroissant. On cylindre avec un cylindre moyen tandem (8 à 10 T), avec précaution au début (pour placer les matériaux) et moins fort que pour un empierrement. On répand ensuite une couche de criblures fortement cylindrées, puis une couche de sable goudronnée pour sceller. Après peu de jours, on met en service; après quelques semaines on achève par un goudronnage superficiel recouvert de fines criblures que l'on cylindre encore pour terminer. Les criblures ont pour but d'éviter autant que possible que la chaussée soit glissante. Bombement $1/60^{\circ}$. Le cylindre le plus adéquat est le cylindre tandem à deux jantes égales (parfois à moteur automobile) ou même monojante.

La fabrication du tarmacadam demande beaucoup de soins, il faut une installation appropriée. Il y a des types divers de machines d'opérations isolées ou réunies. Les conditions les meilleures semblent devoir être réalisées par les usines mobiles de moyenne grandeur, disposées en un point central d'un grand chantier, les matériaux étant conduits au lieu d'emploi par camions automobiles transportant les produits chauds. Ou bien, par les grandes usines installées dans le voisinage des carrières, la mise en oeuvre se faisant alors à froid après macération. Le produit doit être contrôlé ou garanti.

Pour les routes à circulation légère, les matériaux moyennement durs peuvent être préférables, ils se laissent mieux imprégner et réparent mieux l'usure. Si il y a des charges lourdes, il faut des matériaux durs, la confection demande alors beaucoup plus de soins.

Les laitiers de haut-fourneau conviennent très bien pour le tarmacadam. Le laitier doit être de qualité appropriée pour les routes (moyenne : 30% CaO, 40% SiO₂, 20% Al₂O₃, MgO 5%, divers 5%). La densité apparente du laitier encobé doit être 1500 kg/m³.

Certaines usines métallurgiques fabriquent du laitier goudronné en stock.

En Angleterre, on appelle "tarmac" un produit spécial qui serait obtenu

on imprégnant de goudron des pierrailles de laitier encore chaudes. Il ne présente pas de différences essentielles par rapport au produit ordinaire.

Il existe des variantes nombreuses, souvent des procédés particuliers. Ils comportent quelquefois l'addition de poudres inertes : sable fin, craie, chaux, etc... ou des mélanges divers de goudron, de brai et d'huiles, dans les derniers temps aussi l'addition d'une faible proportion de bitume ou de résine. Mais le procédé reste en principe le même.

Le goudronnage interne demande, comme le goudronnage externe, un entretien constant, fait à temps. Les flèches sont remplies le plus tôt possible d'un béton de brai bien pilonné. On l'approvisionne parfois d'avance en pains que l'on fond sur place dans une petite marmite. On goudronne périodiquement, par exemple tous les ans. Enfin, notons que l'on emploie aussi les émulsions de goudron et de brai pour les procédés par pénétration et par mélange. Les routes en tarmac sont d'excellentes caractéristiques, elles sont très bonnes pour le trafic léger et moyen et admettent un certain trafic lourd. Elles sont économiques : 1 à 2 frs ou de plus par m² que l'empierrement ordinaire. Elles sont faciles d'exécution et d'entretien ; les matières premières ne font pas défaut et sont susceptibles d'une production abondante par le développement de l'industrie chimique de la houille. Le procédé paraît donc susceptible de développement notamment en Belgique.

§ 6. - Revêtements agglomérés aux bitumes.

S'emploient également comme couche de roulement, sous des épaisseurs généralement plus faibles que le tarmac pour la couche de roulement proprement dite, généralement 5 cm. Se posent sur un ancien empierrement, même sur un pavage, bien que ce soit peu recommandable, ou sur une fondation en béton. Dans certains cas, une couche intermédiaire de liaison (bindre) est nécessaire.

Le principe du revêtement est le même que celui du tarmac, mais, par suite de la qualité supérieure et du prix élevé du liant, il convient d'apporter plus de soins à sa confection. Le procédé par pénétration peut être appliqué, mais il ne convient qu'aux régions, telles que

L'Amérique, où les bitumes sont abondants et bon marché. En outre, il faut des bitumes très mous. En Europe, où le prix élevé du produit, il n'est pas recommandable d'employer un procédé aussi sommaire et incertain.

Cependant les émulsions se prêtent spécialement au procédé de pénétration par enduit épais. La facilité de mise en oeuvre et la bonne adhérence de la chaussée rendent ce procédé intéressant et susceptible de développement sous réserve de la durabilité qu'établira l'expérience. Le mélange de goudron et de bitume peut aussi convenir à chaud, la proportion de bitume étant un peu supérieure à celle des enduits superficiels.

La pratique du procédé par imprégnation ne diffère pas en principe de celle du tarmacadam, sauf le soin à y apporter et la distinction en deux systèmes de revêtement différents : le mortier d'asphalte ou "sheet asphalt" et le béton d'asphalte ou "concrete asphalt", dont le premier n'a guère son équivalent dans les revêtements au goudron, tandis que le second correspond au tarmacadam ordinaire perfectionné.

Les dosages doivent être étudiés avec le plus grand soin, tant pour économiser le liant, qui est coûteux, que pour obtenir les meilleures qualités du conglomerat. La technique en est d'origine principalement américaine et les Américains ont employé tout d'abord les dosages les plus divers, entre lesquels il n'y avait apparemment pas de concordances, et dont il est difficile de déduire des principes directeurs à première vue. Il s'agit d'une multiplicité de procédés particuliers ; il n'est pas surprenant qu'il en résulte une certaine confusion. Les études de laboratoire et notamment les travaux du 4^e Congrès de la route (Séville 1923) et du 5^e (Milan, septembre 1926) ont essayé d'établir des règles principales qui permettent de déterminer dans chaque cas, en tenant compte des circonstances particulières, les compositions normales.

On consultera avec avantage les rapports de ces Congrès, ainsi que les articles publiés par M. R. Férét, de 1920 à 1926 dans le B. A. I. P. C. R.

Les principes essentiels à observer sont les suivants :

Il faut tout d'abord apporter un grand soin à la composition granulométrique du mélange de manière à réduire les vides de substratum

solide. Il en résulte une diminution de la quantité de bitume. Celui-ci doit remplir tous les vides, pour éviter la porosité, l'absorption d'eau et l'oxydation par l'air, qui durcit le bitume et le rend cassant. Mais il faut éviter excès de bitume, afin que le revêtement ne soit pas mou. Les Américains ont poussé ce dosage à un très haut degré en considérant un très grand nombre de calibres. Le dernier Congrès de DTBilan envisage un classement plus simple en :

1^o) gros agrégat retenu par le tamis à mailles carrées ayant 6 mm. de côté ($\frac{1}{4}$ pouce).

2^o) l'agrégat mou, passant à travers le tamis précité et retenu par le tamis standard n^o 200 (625 mailles par cm^2).

3^o) la farine passant à travers le tamis n^o 200 (ouverture 0,075 mm.).

Le bitume ne doit pas s'employer pur, mais associé à une matière minérale inerte en poudre impalpable : "filler" ou farine, soit de poussier, de la chaux, de la craie ou du ciment. Ce "diluant inerte" donne du corps au bitume et le rend moins sensible aux variations de température, il contribue à la compacité du conglomérat. Il remplit les plus petits vides et rend donc ainsi les espaces libres pour le bitume très petits, ce qui est avantageux à cause de son instabilité physique. (Voir Camerman, Annales de l'A. I. G 1921, fasc. I).

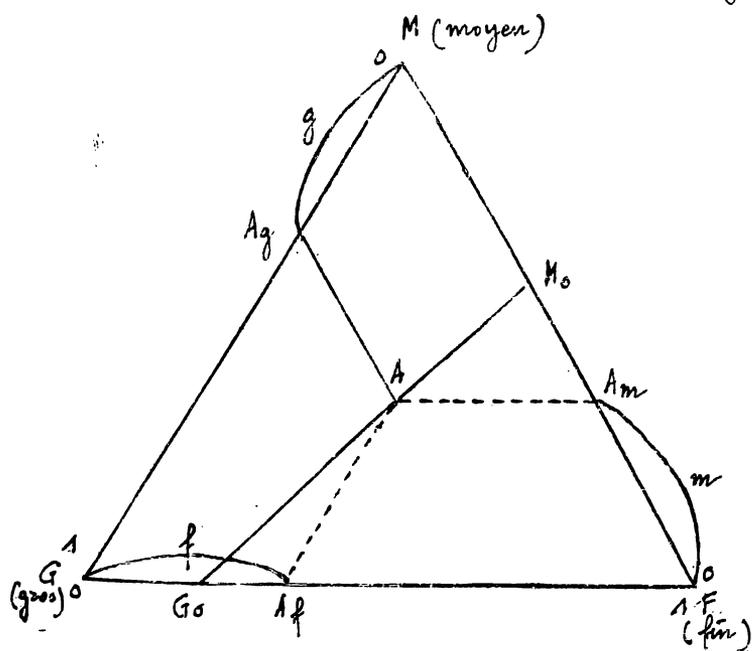
Les asphaltes naturels en contiennent naturellement. Comme pour éviter tous les grains du diluant, présentant une surface énorme, il faudrait trop de bitume et que le mélange se ferait mal, il faut ajouter aussi du sable fin ou moyen. La quantité du diluant paraît indifférente, on en prendra la proportion la plus forte possible pour conserver une consistance encore molle. Les grains moyens augmentent la compacité; les grains fins la résistance au choc. Enfin, la tendance se manifeste de mélanger du goudron au bitume, ce qui abaisse la température de mélange de l'agrégat et du liant et diminue le prix du bituit et de la préparation. L'attention est attirée sur l'influence des matières très fines en suspension dans les bitumes et goudrons, notamment le carbone libre, sur les propriétés adhésives et agglutinantes du bituit; elle doit encore faire l'objet d'études.

Le bitume doit présenter surtout des qualités d'agglutination, c'est-à-dire d'adhésivité et de liaison. Cette qualité est différente de la ductilité et n'a pas encore reçu de spécification précise. Le pouvoir agglutinant, la ductilité, la cohésivité constituent ce que l'on appelle les propriétés asphaltiques. Elles doivent être stables dans les conditions d'emploi, c'est-à-dire entre les limites de température qui correspondent au climat et à l'exposition. Les spécifications correspondantes ont trait au point de ramollissement et à la pénétration (consistance).

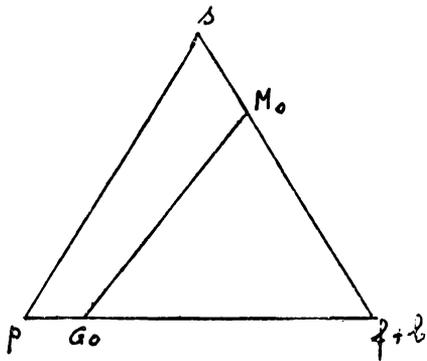
Nous avons déjà indiqué les effets des réchauffages successifs du bitume. On pourrait, dans chaque cas, établir par des essais de laboratoire, quel traitement thermique est susceptible de donner le meilleur résultat.

Aux essais, le calibre des pierres paraît assez indifférent, non leur nature minéralogique. Les résistances au choc et au frottement jouent un rôle marqué; il faut donc des pierres dures de bonne qualité: à cause de la faible épaisseur du revêtement, il est recommandable d'employer les petits calibres (25 mm maximum) en tous cas ne pas dépasser en calibre la moitié de l'épaisseur du revêtement. En Belgique, on emploie donc la grille standardisée 5-20 mm, éventuellement le 2-4 cm.

Monsieur Feret a étudié par les diagrammes triangulaires un grand nombre de mélanges présentés au 4^e Congrès de la route en 1923, principalement de source américaine. Il a réduit tous ces dosages en volumes absolus, d'après un classement unique basé sur les tamis américains, dont les principaux sont:



N°	200	80	40	10
Ouverture d'une maille en mm.	0,074	0,177	0,42	2,00



Appelons p, s, f et b les proportions en volumes absolus de pierres, sable, farine et bitume.

En considérant les mélanges entiers classés d'après :

fin : bitume + farine passent au tamis 200.

moyen : sable passant au tamis 10 et retenu au 200.

gros : pierres et criblures retenues au tamis 10.

il a constaté que les points représentatifs des mélanges sont très voisins d'une droite $G_0 M_0$, d'équation

$$\frac{p}{F G_0} + \frac{s}{F M_0} = 1$$

$$\frac{A Am}{F G_0} = \frac{M_0 Am}{F M_0}$$

$$A Am = g$$

ou
$$\frac{g}{F G_0} = \frac{F M_0 - m}{F M_0}$$

donc
$$\frac{g}{F G_0} + \frac{m}{F M_0} = 1.$$

En supposant le mélange plein, $p + s + f + b = 1.$

Donc

$$b + f = \left(\frac{1}{F M_0} - 1 \right) s + \left(\frac{1}{F G_0} - 1 \right) p = \frac{M M_0}{M \cdot F} s + \frac{G_0 G}{G_0 F} p$$

D'après les valeurs trouvées

$$b + f = \frac{s}{2} + \frac{p}{5}.$$

Le volume du bitume et farine = le demi-volume des sables + $\frac{1}{5}$ du volume des pierres et criblures.

Pour établir les proportions de farine et de bitume M^e Férét a considéré trois éléments : fin = bitume.

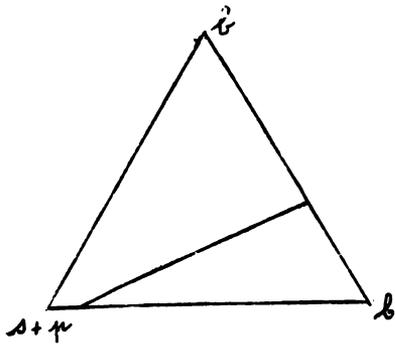
moyen = farine passant au tamis 200.

gros = tout le reste.

Il trouve encore une droite représentative d'équation

$$b = 1,46 f + 0,13 (p + s) \text{ en volume}$$

$$b = 0,55 f + 0,55 (p + s) \text{ en poids.}$$



Le poids du bitume = 55% du poids de la farine + 5% du poids des éléments grenus.

Enfin en divisant les sables (10-200) en

s^{fins} = du n° 80 au n° 200

s^{moyens} = du n° 40 au n° 80

s^{gros} = du n° 10 au n° 40

on obtient $s^{\text{fins}} = 0,6$ $s^{\text{moyens}} = 0,2$ s^{gros} en volume.

Lors des criblures et pierrailles, il considère

p^{fins} = du n° 10 au $\frac{1}{4}$ pouce (6,35 mm)

p^{moyens} = du $\frac{1}{4}$ pouce au $\frac{1}{2}$ pouce (12,7 mm)

p^{gros} = $> \frac{1}{2}$ pouce

On trouve $p^{\text{fins}} = p^{\text{moyens}}$ en volume.

Les grains moyens et fins sont à peu près en égales proportions, les gros grains sont généralement en très faible proportion.

Les études antérieures de M^{re} Feret (Bulletin A. I. P. C. R n° 14 avril 1926) ont montré qu'aussi bien pour un mortier que pour un béton, le maximum de compacité s'obtient avec des mélanges d'environ

$g \equiv \frac{2}{3}$ $f \equiv \frac{1}{3}$ $m \equiv 0$ en volumes absolus.

ce qui correspond à peu près à 60% de pierrailles et 40% de mortier en volume ou 2:1 en poids. Ces mélanges sont trop secs et difficiles à comprimer. Un béton plus gras est d'emploi plus facile, on abaisse la quantité de pierrailles à 50% ou 40% ce qui correspond environ à des proportions égales en poids.

D'après les formules moyennes des compositions américaines définies ci-dessus, on obtient les dosages ci-après en volumes absolus (Bulletin A. I. P. C. R n° 45 mai-juin 1926 - Et propos de la composition des revêtements asphaltiques, par F. Campus).

Mélange

	Sec	moyen	gras
Pierrailles	0,60	0,50	0,40
Mortier	0,40	0,50	0,60
Sable	0,185	0,266	0,346
Farine	0,046	0,054	0,064
Bitume	0,169	0,18	0,19
Pierrailles + sable	0,785	0,766	0,746
Substances minérales	0,831	0,820	0,810

Quant au sable, en combinant la formule moyenne américaine avec la condition de compacité qui d'après M. Camerman (op. cit.)

est

$$s' = 0,5 \quad (s'' + s''')$$

on trouve

$$s''' = 0,17 \quad \begin{array}{l} \text{n}^\circ \text{ du tamis} \\ (10 \text{ à } 40) \end{array}$$

$$s'' = 0,50 \quad (40 \text{ à } 80)$$

$$s' = 0,33 \quad (80 \text{ à } 200).$$

Cette composition est voisine de celle préconisée par M. Camerman.

On voit que dans les différents mélanges, la proportion totale de matières minérales est à peu près constante et voisine de 0,82; la proportion du bitume (bitume pur) est voisine de 0,18.

La proportion farine : bitume est voisine de 1 : 3,3. Toute la plasticité du mélange résulte en fin de compte du rapport pierreaille : sable, qui varie dans des limites étendues.

Le prix de ces différents mélanges doit donc être peu variable. On emploiera l'un ou l'autre selon les circonstances, par exemple le mélange sec ou moyen à éléments gros pour la circulation lourde; l'épaisseur sera relativement forte. Pour une circulation de poids moyen mais rapide, l'épaisseur peut être moindre; le mélange gras convient alors parce qu'il est plus ductile.

Les dosages précités sont voisins de celui que M. Camerman avait déduit d'autres considérations expérimentales et théoriques :

Pierraille : 0,54 Sable + farine = 0,28 Bitume = 0,18

en volumes absolus. Pour les dosages en poids, on envisage que le rap-
port du poids spécifique des pierrailles à celui du bitume est 2,65.

Pour le "sheet asphalt" ou mortier asphaltique, il faut faire :
dans la 1^{ère} formule $p = 0$, il reste

$$b + f = 0,50 \text{ (identique à la règle de Feret)}$$

Il y correspond

Sable : 0,67 (de la composition indiquée)

Farine : 0,10

Bitume : 0,23 } 0,33

Il y correspond en poids 10% de bitume, conforme au dosage préconisé
par M^{re} Camerman. La proportion de substance minérale est moindre, celle
de bitume beaucoup plus élevée. Ce système convient dans des circonstances
très spéciales : pénurie de matériaux pierreux, abondance de sable et abon-
dance commerciale de bitume ; voirie urbaine.

Le mortier d'asphalte est très glissant. Pour réduire cet inconvénient
on peut y incorporer une certaine quantité de pierrailles, 20% par exem-
ple, à vrai dire insuffisante pour former un béton proprement dit. Mais
on peut de la sorte envisager une variation continue de dosage, représen-
tée par un diagramme synthétisant les formules de M^{re} Feret (voir plan-
ches). Une réserve est à faire ces formules se rapportent aux mélanges
pleins. Par suite de la fluidité imparfaite des bitumes mis en oeuvre,
il peut subsister des vides, mais il faut évidemment, par le soin de la
confection, chercher à les réduire au minimum.

En résumé, les dosages doivent être soigneusement étudiés d'après les
conditions locales et en vue du but à atteindre. Les données précédentes
donnent des indications générales. Ces dosages devront être soumis aux
essais précédemment cités avant mise en oeuvre. Les bitumes aussi devront
être soigneusement étudiés avec le concours d'un ingénieur chimiste.
Les qualités doivent varier d'après le dosage et le but à atteindre, le
principal facteur à envisager est le climat (températures extrêmes).

Le triage et le dosage des matériaux sont soigneusement faits dans
des chantiers généralement centraux. Les matériaux bien propres,

manutentionnés mécaniquement, sont séchés et chauffés, puis malaxés à chaud avec la charge de liant et de farine. Il existe des malaxeurs continus et discontinus. Le conglomérat est transporté chaud en camions automobiles jusqu'au lieu d'emploi.

Les bétons bitumineux s'emploient en une couche de 5 cm, sur fondation solide, comme il a été dit. On cylindre au cylindre léger tandem, de 8 à 10 T, légèrement et jusqu'à ce qu'il n'y ait plus de vides apparents. On achève par un enduit superficiel de barit asphaltique à chaud recouvert de criblures et cylindrée. La pierre doit être de bonne qualité, car le squelette joue un très grand rôle. Le bitume ne doit pas être trop dur, mais très adhésif et ductile, pour éviter le détachement de la pierraille. Le revêtement n'est pas trop glissant.

On préfère parfois le sheet asphalt plus homogène. Il peut s'employer en couche plus mince (3 à 4 cm.) mais il faut alors interposer une couche de liaison ou bindér en béton asphaltique grossier, par exemple 5 parties de pierrailles et 2 de sable + 5% de bitume en poids (pierrailles 0,625, sable 0,25, bitume 0,125 en volume). Cette couche aura 4 cm d'épaisseur. En Europe, on fait généralement le sheet sans bindér, à 5 cm. d'épaisseur. Il est cylindrée au cylindre léger tandem 6 T jusqu'à compacité complète, puis saupoudrée de calcaire ou de ciment. On emploie aussi beaucoup actuellement les cylindres monojauges légers. Ce revêtement résiste surtout par la ductilité du bitume, qui doit être plus dur et tenace. Le revêtement est très homogène et uni, mais glissant. Aussi ajoute-t-on fréquemment au sable une assez forte proportion de criblures de 6 à 15 mm pour augmenter la rugosité de la surface, mais sans que la composition devienne un béton. On incorpore parfois aussi du gravillon en surface, par cylindrage, alors que la route est encore molle.

Observons qu'en Amérique on emploie aussi des bétons imparfaits: pierrailles enrobées de bitume, sans sable ni farine. Ce conglomérat contient des vides que l'on bouche tant bien que mal par une couche de scellement: couche superficielle de barit saupoudrée de criblures

et cylindrés. Ce procédé sommaire ne convient pas en Europe. La mise en œuvre des procédés précités demande en général beaucoup de soins (voir ouvrages spéciaux).

Les routes sont très roulantes, lisses, peu bombées ($\frac{1}{100}$ et moins). Il faut leur donner une bonne butée latérale par des bordures et tenir les revêtements jusqu'au contact des bordures, donc supprimer les caniveaux et, d'une manière générale, toute solution de continuité (voies de tramways). Ces routes deviennent facilement glissantes, sauf celles qui sont faites par le procédé de pénétration; il faut les tenir très propres, relever les vicarages en courbe et éviter les rampes de plus de 4%. L'entretien, comme pour le macadam, doit être très soigné, et soigneusement fait. Moyennant quoi ces chaussées peuvent avoir une longue durée, même pour une circulation moyennement lourde. Elles sont surtout agréables pour le tourisme. Le prix du revêtement varie de 7 à 10 frs or par m² environ.

§ 7. Revêtements d'asphalte en roche.

Les roches asphaltiques sont formées de calcaire pur ou dolomitique, dont la teneur en bitume est assez variable. Par mélange, on règle le dosage qui peut varier entre 6 et 13% en poids de bitume selon le climat et le poids du trafic. L'argile est défavorable, l'alumine ne peut doser plus de 2%.

a) Asphalte comprimé. - Ce revêtement est déjà ancien en Europe (1840 - 1850). Il utilise la poudre des roches de calcaire asphaltique finement broyées. La finesse doit être assez grande, la teneur en bitume varie de 6 à 13% en poids (en volume 14,5 à 28%). Les essais prescrits sont définis dans les ouvrages spéciaux (Voir Cahier des charges de la Ville de Paris). On exige notamment une résistance de 300 kg/cm². La poudre chauffée entre 115 et 140° dans de grands cylindres est versée sur la fondation en béton bien lisse (150 à 200 kg ciment par m³) sous une épaisseur telle qu'après damage, l'épaisseur soit de 5 cm. On pilonne ensuite jusqu'à compression suffisante avec des pilons chauffés de 20 cm de Ø; on emploie aussi aujourd'hui des pilons pneumatiques. Le procédé demande des ouvriers très expérimentés et des précautions spéciales à la

fonction des bordures, etc. C'est un revêtement qui convient surtout à la voirie urbaine. Il est très glissant. Prix environ 14 frs or par m². Voir rapport de M. M. Callanes et Torri au 4^e Congrès de la route 1923 (Italie).

b) Le mastic d'asphalte ou asphalte coulé.

(Voir rapport de M. Steiner, idem - Suisse) est employé depuis longtemps pour les trottoirs des villes, depuis moins de temps pour les chaussées. On obtient le mastic d'asphalte en mélangeant ensemble de la poudre calcaire asphaltique et un asphalte raffiné et fluxé et soumettant le tout à une cuisson appropriée. Le produit est coulé en pains de 25 kgs. Ils ne doivent pas contenir moins de 12 m plus de 18% de bitume pur en poids (en volume de 26,5 à 37%) ils doivent répondre à certaines spécifications, notamment de dureté (grande).

Pour la mise en oeuvre, aussi bien pour les trottoirs que pour les chaussées, on fond une certaine proportion de mastic d'asphalte avec un fondant approprié (asphalte raffiné choisi) et on y ajoute une certaine quantité de pierrailles ou de sable.

En Italie, pour les trottoirs :

Mastic d'asphalte à 14% de bitume	45%	} en poids.
Bitume naturel raffiné	5%	
Gravier ou sable	50%	

Cette matière est mise en oeuvre à chaud, comme les revêtements bitumineux, en simple couche de 6 à 7 cm. d'épaisseur ou en deux couches, l'inférieure de 4 cm contenant des pierrailles assez grosses, la seconde ou sable de 20 à 25 mm d'épaisseur. La proportion totale en poids de bitume est d'environ 10% pour les chaussées. Les dosages peuvent s'étudier d'après les principes exposés pour les revêtements bitumineux. Les trottoirs contiennent généralement du sable et des criblures, ils se font sous une épaisseur de 15 mm. La teneur en poids de bitume pur est supérieure à 13%. On peut remplacer l'enduit. Pour les chaussées, le revêtement en asphalte coulé manque de dureté (trop grande teneur en bitume), il ne convient qu'à une circulation de poids modéré et

en situation ombragée.

§ 8. - Carreaux et pavés d'asphalte. -

Les carreaux d'asphalte sont formés de poudre asphaltique comprimée à chaud, contenant généralement 11% de bitume en poids. La pression de fabrication est de l'ordre de 500 à 700 kg/cm²; la densité finale doit être d'environ 2. (Résistance 380 kg/cm²).

Les échantillons sont généralement 10 x 20 et 14 x 15, l'épaisseur varie de 1,5 à 5 cm. d'épaisseur d'après les applications.

Pour les épreuves, voir ouvrages spéciaux.

On pose sur une fondation en béton, à bain de mortier de 100 kg de ciment par m³ de sable, on enfonce au maillet de manière à laisser 1 cm. de mortier sous les carreaux. Les joints doivent être très serrés. On étend sur la surface finie un lait de ciment que l'on balaye pour introduire dans les joints; quand la laitance commence à faire prise, on balaye au sable pour sécher.

Les carreaux d'asphalte donnent de bons résultats comparables à l'asphalte comprimé, avec plus de sûreté même si les carreaux sont de bonne qualité. Sous l'effet de la circulation, les joints se serrent et deviennent imperceptibles. Ils conviennent pour les gares, ponts, halles, trottoirs, routes à trafic moyen. Plus récemment, on emploie les pavés d'asphalte ou asphalté-blocks, pavés d'origine américaine formés de béton asphaltique moulé et comprimé sous une pression de 500 kg/cm² à 700 kg/cm², la teneur en bitume varie de 6 à 9% en poids environ. La densité est d'environ 2.5. Les dimensions courantes sont 30 x 12,5 x 7,5 ou 5 cm.

Les pavés d'asphalte se posent comme les carreaux, ils conviennent dans les villes, où ils tendent à se substituer aux pavés en bois. Pour les routes interurbaines, le béton asphaltique monolithique semble préférable. (Voir Rapports au 4^e Congrès de la route à Séville en 1923 par M. J. De Ronck (Belgique), G. L. Hoimstreck (Amérique). Le prix est environ le même.

§ 9. - Lavage en bois. -

Le lavage en bois n'est plus un revêtement moderne au vrai sens du mot.

Après avoir connu la vogue au début du siècle, il est en recul devant les progrès des revêtements bitumineux. Son emploi était cependant réservé à la voirie urbaine, surtout pour les voies étroites à grand trafic, à cause de son élasticité et de son insonorité (absence de vibrations et de bruit). Ses défauts sont sa perméabilité, sa putrescibilité, son usure rapide et la difficulté d'entretien, sans compter le danger de fissuration ou de soulèvement.

Les dimensions courantes sont généralement,

longueur 16 à 25 cm.

queue 10 à 15 cm, généralement 12

largeur 8 cm. environ.

Les pavés sont posés sur une fondation en béton bien réglée et lissée à l'enduit du ciment. Les pavés sont posés sur champ, les fibres étant verticales. On pose les pavés en rangs normales à la circulation, à joints alternés, directement sur le béton ou avec interposition d'une couche mince de sable gonflonné. Cependant lorsque des sous pressions par infiltrations sont possibles, on draine la fondation.

Pour les joints, 2 systèmes sont en présence.

a) Le système des joints de largeur déterminée, réalisée par des réglettes en bois ou carton posées à la base des rangs, ou par des saillies. A Londres, on adopte 3 mm. On colle dans ces joints un mortier de ciment ou du brai ou les deux successivement. L'introduction se fait au balai ou à la raquette.

b) Le système dit sans joints : les pavés sont posés très serrés et les rangs sont pressés les uns contre les autres au moyen d'un marteau posé à plat que l'on bat à coups de masse. Ensuite on répand du brai comme ci-dessus dans le but de boucher les interstices. Par suite de leur petitesse, il n'est pas certain que l'on réussisse ; le 1^{er} système paraît plus sûr.

Les pavés de bois peuvent absorber beaucoup d'eau, ce qui les fait gonfler. Si cette dilatation n'est pas possible, le pavement se soulève. Aussi réserve-t-on entre le pavage et les bordures deux files longitudinales de pavés

avec joint de dilatation de 4 cm rempli d'une matière déformable : sable (perméable) glaise, sciure de bois ou sable goudronnés, bitume ou dispositifs élastiques spéciaux. C'est un inconvénient inhérent à ce revêtement. En été, par suite des chaleurs qui dessèchent le bois, il peut se former des dislocations.

On emploie généralement en France les bois tendres imprégnés de créosote, parce qu'ils sont moins chers, plus élastiques et rendus imputrescibles, leur source est plus régulière, les pavages se déforment moins et sont moins fragiles. (Résistance 300 à 500 kg/cm² selon le degré d'humidité). Dans les pays chauds où dominent les bois durs, on préfère ceux-ci. La pose sans joints leur convient peut être, car elle diminue les risques de martèlement et de fissuration.

Les pavages en bois demandent d'être tenus dans un très grand état de propreté. L'entretien en est difficile et coûteux. Le prix de revient est de 12 à 14 fr. or. Ces pavages peuvent être encore intéressants dans des cas spéciaux : revêtements de ponts, notamment de ponts mobiles (légereté et élasticité), dans les pays où le bois abonde, etc.

§ 10. Routes en béton de ciment monolithiques.

Ont acquis déjà un grand développement en Amérique, moindre en Europe où l'avenir leur réserve cependant de grandes possibilités, lorsque la technique en sera devenue plus courante. Voir H. Eréhard, op. cité B. A. I. P. C. R. n° 29 sept. - oct. 1928 ~ Rapports du Congrès de la route à Séville. 1^{ère} Question.

Routes

Les routes en béton de ciment ont le caractère des routes modernes : uni, homogénéité, imperméable, faible bombement. Elles ont de nombreux avantages. Elles sont faciles d'exécution. Les matériaux sont généralement abondants. Elles sont solides et très économiques si l'on considère à la fois les frais d'établissement et d'entretien. Elles ne sont ni boueuses, ni poussiéreuses, ni glissantes. Elles peuvent convenir à tous les terrains par suite de la possibilité de les armer. Enfin, après usure modérée, elles sont susceptibles de continuer à jouer le rôle de fondation et fournissent une excellente assise pour une couche de goudron ou bitume. En principe, le béton convient mieux comme fondation que comme couche d'usure.

Elles ont aussi des défauts : le manque d'élasticité, la sonorité, le danger de fissuration, l'aspect désagréable des routes fissurées, la difficulté d'ouverture des tranchées. Elles résistent mal aux chocs et conviennent donc peu pour le trafic lourd sur bandages métalliques (traction hippo-mobile) tel qu'il est encore répandu en Europe.

Les routes en béton peuvent être à double ou à simple couche. Le premier système paraît, à première vue, rationnel au point de vue de l'usure, mais on peut craindre que l'hétérogénéité du béton ne déforme le revêtement. Le second système n'est pas défectueux en principe. Le revêtement sert au roulement tout qu'il reste en bon état superficiel ; après, il sert de fondation à une couche d'usure rapportée. Lorsqu'il y a deux couches, l'inférieure est la plus épaisse, mais à faible dosage de ciment. La supérieure, au contraire, est assez mince, mais d'un dosage souvent très riche. Il faut nécessairement une bonne liaison, sinon la couche supérieure trop mince serait fragile. Le double bétonnage complique l'exécution ; il ne permet notamment pas l'exécution mécanique, telle qu'elle se fait en Amérique. A vrai dire, pour les routes épaisses, la meilleure méthode semble être celle de la simple couche épaisse en béton de bonne qualité, dont la surface est protégée de l'usure par un enduit superficiel de bitume, renouvelé en temps opportun.

La pente longitudinale peut atteindre 7 à 8% au maximum, ces routes conviennent donc pour les montagnes ; elles ne sont pas ravincées. Pente transversale 2 à 3%, bombement $\frac{1}{70}$ à $\frac{1}{100}$.

La préparation du sous-sol doit être particulièrement soignée. En Amérique les formes sont réglées au moyen de cerces et cylindrées. Le drainage est particulièrement important ; c'est pour les routes en béton qu'il est le plus soigné en Amérique. La raison en est d'éviter les différences de résistance du terrain, l'altération du béton par les eaux stagnantes et les effets du gel sur le sous-sol.

Pour ces raisons, on recommande beaucoup de poser les routes sur une couche épaisse et bien comprimée de cendrée, qui est à la fois perméable et isolante, et de recouvrir de même les drains d'une couche isolante de cendrée.

dans tous les cas où le gel est fort à craindre (Voir rapport de M^r G. Dahlberg (Suède) au 1^{er} Congrès de la route, 1925. 1^{ère} Question). L'épaisseur dépend de la profondeur que peut atteindre la gelée. Lorsque le sol humide gèle, il se boursouffle d'autant plus qu'il est plus humide et que le gel est plus profond. La neige isole très bien, de même que la tourbe et la terre végétale. Le béton est plus conducteur, de sorte que le sol gèle davantage sous la route. La route est soulevée avec le sol et subit des fissurations graves, généralement longitudinales. Lors du dégel, le sous-sol est gorgé d'eau et très peu consolidant, la circulation peut aggraver la destruction de la route. Il faut donc très bien drainer et isoler. Le béton mis en oeuvre doit être compact et dur.

Selon l'expérience américaine, la qualité des pierrailles n'influe pas énormément. Des expériences italiennes montrent cependant que la résistance à l'usure est d'autant plus grande que la pierre est plus dure et qu'il y a intérêt à employer des pierres assez dures et, en tous cas, au moins aussi dures que le mortier. La pierraille doit être de texture homogène, pour accroître la résistance au choc du béton. Le laitier cassé peut convenir. Le calibre doit être moyen, 2 - 4 cm. par exemple. Les petites pierrailles accroissent la résistance au choc. Le gravier ne convient pas, d'après les Américains. Il faut du sable quartzéux, graveleux, assez gros, ou du poussier de roche dure. La qualité du sable exerce une grande influence; la résistance de la route en béton dépend surtout de celle du mortier. Le ciment doit être du bon portland. Par suite des qualités de dureté et de la rapidité de durcissement, qui est très avantageuse pour les routes, les super-ciments et le ciment fondu sont particulièrement intéressants pour la construction des routes en béton.

Le dosage doit donner un béton compact et plein, plutôt riche et aussi dur que possible. Avec du bon ciment ordinaire, on emploiera le dosage 1 : 2 : 4 au moins, de préférence 1 : 2 : 3 (Congrès de Milan). Un dosage convenable donnera une résistance à la compression d'au moins 225 kg/cm² après 28 jours et de préférence plus grande. Pour ce qui est de la résistance à l'usure, la qualité du ciment et la richesse du dose influent sensiblement, mais pas de tout proportionnellement, de sorte que les valeurs moyennes

sont probablement les plus économiques. Il convient de noter que les pâtes de ciment pur ont une très faible résistance à l'usure et au choc. Pour ces propriétés, c'est surtout la qualité du sable qui importe.

Le béton doit être aussi sec que le permet une bonne mise en oeuvre, en moyenne le volume d'eau est égal ou $\frac{3}{4}$ de celui du ciment. Il est fabriqué à la machine, les différents types de bétonnières peuvent convenir. On peut établir une bétonnière ordinaire semi-fixe et la desservir, ainsi que le dépôt de matériaux et le chantier de bétonnage, par des voies Decauville. En Amérique, on emploie généralement des bétonnières spéciales, qui se déplacent en avant du chantier, et distribuent le béton, soit par gouttoles, ou par bennes roulant sur un bras distributeur. Les matériaux sont manutentionnés mécaniquement par des petits élévateurs à godets, courroies transporteuses, accumulateurs et grues à grappins etc, et transportés en Decauville le long de la route.

Pour les routes américaines en une couche, de forte épaisseur (voir graphique) le béton est mis en place et réglé entre des formes limitant latéralement le dallage, qui sont généralement en acier et servent en même temps de chemin de roulement aux machines. Le béton doit être bien homogène et placé sur l'épaisseur voulue. On le lisse au moyen de deux cerces en bois qui se déplacent longitudinalement. La 1^{ère} est légère et n'a pour objet que de régler le profil et enlever l'excès du béton. La seconde est lourde et on lui donne un mouvement alternatif vertical qui assure un certain battage, pour faire refluer le mortier à la surface et réduire les vides. Ensuite on cylindre transversalement avec un cylindre léger en bois manœuvré des deux bords au moyen de cordes, pour enlever l'eau en excès et accroître la consistance. Enfin, on lisse avec une courroie lisseuse assez large (15 cm), que l'on promène en lui donnant des mouvements longitudinaux et transversaux combinés, de manière à assurer un lissage parfait. Les bords sont lissés spécialement au moyen de truelles ou spatules à long manche.

Pour les grands travaux et les routes larges, ces travaux se font à la machine; le type en est la machine Lakewood. Les petites inégalités

sont enlevées à la main par des ouvriers se mouvant sur une passerelle légère roulant sur des formes latérales.

Comme bordures, on emploie des bordures rapportées en béton, saillantes ou non. Dans certains types, le dallage se relève aux bords pour former bordure solidaire du revêtement.

Le béton doit être protégé pendant le durcissement, pour qu'il ne des- sèche pas trop vite, qu'il ne subisse pas de basses températures et ne soit pas soumis trop tôt à la circulation. Aussitôt qu'il a fait prise, on l'arrose modérément et on le recouvre de bâches pendant 24 heures. Ensuite on recouvre d'une couche de sable ou de terre, que l'on maintient en état d'humidité pendant 15 jours par des arrosages répétés ou par un arrosage initial au chlorure de calcium. Parfois on l'entoure de diquelles en argile et on recouvre d'une couche d'eau.

La circulation ne pourra s'établir qu'après un temps plus ou moins long, d'après la saison. Les moins de 15 jours en tous cas et souvent bien davantage. On évitera de bétonner pendant le gel, les palliatifs ne sont pas recommandables.

La pratique américaine montre que les soins apportés à la confection c'est à dire : choix et dosage judicieux des matériaux, mise en oeuvre par des moyens mécaniques appropriés et notamment la protection attentive pendant le durcissement, sont les conditions indispensables du succès; elles doivent être toutes réalisées, comme dans le béton armé.

Depuis 1925 s'est développé en Amérique et en Europe l'usage du damage vibratoire du béton, qui s'effectue au moyen d'une masse lourde sur laquelle agit une masse plus légère mise en vibration, par un petit moteur à air comprimé par exemple. On se sert notamment de cette méthode pour incorporer au béton pendant le damage une mosaïque de pierre dure cassée répandue sur sa surface (procédé Vibrolitbit).

On revêt généralement les routes en béton d'un enduit au goudron ou bitume, renouvelé périodiquement, qui protège la surface et améliore l'aspect, mais qui augmente la résistance à la traction et adhère parfois mal. Il semble qu'un arrosage au silicate de soude soit préférable.

Il se fait avant la mise en service, 15 jours après la construction. La solution est uniformément étendue au moyen de balais. Elle assure un durcissement de la surface et retarde la formation des flocages. Des expériences japonaises (Y. Makiino, Concrete Roads, 1926) ont montré que le silicate de soude donne une légère augmentation de résistance à l'usure. Le chlorure de calcium, qui hâte la prise, produit au contraire une augmentation, qui peut être élevée, de l'usure. L'arrosage au CaCl_2 n'est donc pas recommandable.

Deux questions importantes et controversées sont celles des armatures et des joints.

Sur sol dur et stable, il ne faut en principe pas d'armature. Sur sol mou ou de consistance variable, l'armature est désirable en principe et d'autant plus que la circulation est plus lourde. L'armature augmente la solidité, uniformise les tensions et les températures et augmente la résistance locale. Les armatures sont souvent connectées d'avance, en treillis divers et se placent près de la face supérieure, à moins de 7 cm, ou entre la couche de fondation et la couche d'usure. Il est très difficile d'apprécier une forme rationnelle d'armature de résistance. Sur terrain mou, il faut, d'après des considérations statiques sommaires, une armature dans le sens longitudinal et dans le sens transversal, tout inférieure que supérieure.

L'armature inférieure doit être plus grande que l'autre et doit être renforcée près des bordures et près des joints. Pratiquement on armera doublement dans les deux sens, mais plus vers la face inférieure que vers la face supérieure. L'armature supérieure sert surtout à renforcer localement la surface de coulement. Sur un terrain discontinu, l'armature sera disposée en travers de la discontinuité.

La question des joints résulte de la tendance des routes en béton à se fissurer. Le retrait peut intervenir. Cependant si le durcissement est bien protégé par du sable humide, il peut être réduit. Il faut admettre que ce sont principalement les variations de température qui agissent. Les variations diurnes de la température provoquent des mouvements du

dallage, qui se soulève au centre dans le jour et se relève aux bords la nuit (voir planche 12).

Dans ces deux positions, l'action du poids propre et des surcharges peut donner lieu à des extensions alternées aux deux faces de la dalle et à la formation de fissures longitudinales. Les fissures transversales résultent des variations de température et du retrait. Il se forme aussi des fissures obliques, généralement peu étendues et surtout près des bords et joints. Les fissures ont une tendance à se former aux joints de reprise.

Il vient à l'esprit d'empêcher les fissurations par la constitution de joints de dilatation longitudinaux (pour les chaussées de plus de 6 m.) et transversaux, ces derniers écartés d'environ trois fois la largeur de la chaussée ou de la distance entre les joints longitudinaux. On aurait ainsi une succession de grandes dalles. On place souvent les joints transversaux obliquement, inclinés à 45° sur l'axe, afin d'éviter le choc simultané des roues. On constate que les joints n'évitent pas sûrement les fissurations et ils ont l'inconvénient d'être des points très délicats du revêtement. Il y a de ce fait une tendance à ne plus réserver de joints, ou bien on fait coïncider les joints avec les reprises. On laisse les fissures se former et on les obture ensuite, soit en les ouvrant et les remplissant de béton, ou en y coulant du bitume ductile.

Distance des joints d'après G. E. Goldbeck

$$f \mu d = e \sigma_b$$

$$d = \frac{e \sigma_b}{f \mu} = \frac{0,2 \times 70.000}{2 \times 480} = 11,60 \text{ m.}$$

$e =$ épaisseur (0,2 m.)
 $\sigma_b =$ résistance à la traction (70000 kg/m²)
 $\mu =$ poids par m² (480 kgs)
 $f =$ coefficient d'adhérence = 2
 $d =$ distance des fissures.

Il y a donc intérêt, pour réduire les fissures, à réduire f , c'est à dire à poser la dalle de béton sur un coffre bien lisse.

Des ingénieurs anglais ont proposé de tirer parti des joints pour confectionner les routes en béton par sections alternées; les vides ne sont remplis que lorsque les premières sections mises en place ont leur consistance définitive. Ce système a certains avantages techniques, le béton

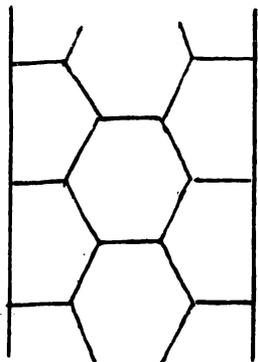
marge est plus facile et mieux fait, les joints moins fragiles. Mais les sujétions d'exécution sont plus grandes surtout avec les grandes machines. Cependant ce système est assez employé en Angleterre et en Belgique où l'on emploie un outillage plus réduit et léger. Les dalles ont de 5 à 10 m. de longueur; elles sont de préférence carrées. Il subsiste néanmoins des sujétions d'exécution. Selon la méthode usuelle des joints de contraction, je pense qu'une solution satisfaisante serait obtenue en bétonnant des dalles de 5 à 10 m. de longueur et en réservant des joints de 0,50 à 0,75 m, que l'on fermerait, après retrait suffisant des dalles et à température moyenne, au moyen d'un béton plastique bien damé.

Lorsqu'on réserve des joints, il faut prendre un soin tout particulier pour leur confection. On les remplit après coup de matière plastique restant malléable en hiver et ne fondant pas en été. On emploie parfois des dispositifs métalliques élastiques ou bien des dispositifs métalliques ayant simplement pour objet de protéger le joint. On réserve dans ce cas à la partie supérieure une petite cuvette pour le joint plastique: bitume, fibres imprégnées de bitume etc..... Tous ces dispositifs sont aléatoires.

La construction des routes en béton par dalles de dimensions restreintes, par exemple 5 m., a donné naissance en Amérique au système hexagonal. Il se compose de dalles moulées sur place et de forme hexagonale, c'est à dire dont les angles sont de 120° , sauf près des bordures, où ils sont de 90° . Le principe du système est surtout de renforcer les angles des dalles, qui sont des points faibles. Ces dalles sont armées.

§ 11.- Revêtements superficiels en béton.

Dans les pays non américains, on a essayé, en s'inspirant de la technique des routes américaines en béton, de construire des revêtements relativement minces sur des chaussées empierrées. Par suite des faibles épaisseurs d'emploi (8 et même 5 cm), on a cherché à donner à ces bétons des qualités spéciales d'élasticité ou de dureté et de résistance.



Ainsi qu'il a été exposé dans le § précédent, ces propriétés dépendent bien de la composition et du traitement du béton et il est donc rationnel de chercher les moyens de les développer. D'après les résultats d'expériences de caractère scientifique, les facteurs prédominants sont : la qualité du sable, la qualité du ciment et la richesse du dosage. Le

meilleur résultat semble correspondre à un dosage 1:2 et à l'emploi de ciment à haute résistance. La pâte de ciment pur ne donne pas de bons résultats et est d'un prix prohibitif. Ainsi qu'on le constate, une augmentation relativement modérée de la résistance à l'usure (qui est le critérium essentiel), exige une augmentation assez sensible du prix.

Divers "procédés spéciaux" se sont développés. Ils emploient des dalles minces sur d'anciens empièvements et ils établissent également de telles dalles sur des fondations neuves en béton moigre, ce qui revient aux routes monolithiques à double couche. Nous avons dit déjà que la simple couche en béton ordinaire de bonne qualité est préférable.

La dalle mince sur empièvement, même en béton spécial, est en fait tachée d'un défaut de conception. Si l'empièvement est bien assis, il n'en reste pas moins souple, surtout sous l'effet des lourdes charges tandis que la dalle mince est rigide. Elle est donc exposée à la désagrégation, sous l'effet des chocs des bandages durs surtout. La marge d'usure est faible et dès que elle-ci est assez accusée, la destruction de la route doit être à peu près aussi rapide que celle d'un empièvement. La couche résiduelle ne peut être d'aucun usage et doit être profondément décapée, sinon enlevée avant le renouvellement.

Ce défaut est aujourd'hui assez généralement reconnu et il y a une tendance à employer plutôt des dalles plus épaisses (0,10 à 0,15) en béton ordinaire ou de ciment à haute résistance. De bons résultats semblent avoir été obtenus au Japon par des dalles de 15 cm posées sur empièvement et formées d'une couche inférieure de 10 cm de béton moigre 1:3:6 surmontées d'une couche de "koschi", béton formé de

pierrailles et de ciment portland artificiel dans la proportion 1 : 1,5, soit 750 à 800 kg. de ciment par m³ de béton. Il faut de la pierraille très dure, de 2 à 4 cm. La résistance à l'usure est maximum. La dalle plus épaisse résiste mieux aux chocs et a une plus grande marge d'usure. Il y a d'ailleurs intérêt à la protéger par un enduit comme une route monolithique et à chercher à réduire l'usure du béton par des renouvellements périodiques de cet enduit.

§ 12. - Choix d'un revêtement. -

D'après tout ce qui précède, on emploiera de préférence pour le trafic léger, l'empierrement goudronné ou silicate, etc; pour le trafic moyen et assez intense, le tarmacadam, le béton ou les bitumes asphaltiques selon les circonstances locales;

pour le trafic lourd, surtout le pavage, sur une bonne fondation, éventuellement en béton. Il est à présumer que la forme la plus employée dans l'avenir sera le petit pavage.

Le choix du revêtement dépend certes beaucoup des circonstances locales. Mais les méthodes étant devenues plus nombreuses, la question devra faire dorénavant l'objet d'un examen plus approfondi que par le passé, au point de vue technique, économique et de l'exploitation.

Les essais de laboratoires semblent devoir jouer dans ces questions un rôle de plus en plus important, tant pour les épreuves de réception que pour l'établissement de spécifications plus définies que celles qui existent actuellement. Il sera des plus utile de noter exactement les observations faites sur les routes en service, afin de pouvoir les combiner avec les résultats des études de laboratoire.

Chapitre II

Ouvrages accessoires etc.....

§ 1. - Accotements. - Il a été question précédemment de la largeur (2,00) et de la pente (4-3%) des accotements ainsi que des drains transversaux ou saignées qui les traversent. Ils sont généralement en terre, mais lorsque la possibilité en existe, il est recommandable de les recouvrir de gros sable (laitier), gravillon, criblures, cendres, etc... Les accotements servent généralement de dépôt pour les matériaux d'entretien. Le développement et la sécurité de la circulation exigent cependant que les accotements soient laissés libres autant que possible. On établira donc de préférence des plateformes spéciales pour les dépôts de matériaux, en dehors des accotements vers l'extérieur de la route, par détournement du fossé ou en saillie sur le talus de remblai. Eventuellement on consolidera par des murets de pierres sèches si l'on doit rendre les talus trop raides. Si le fossé ne peut être détourné par manque de place, on peut le recouvrir d'une dalle (Route de Milan à Monza) ou placer un tuyau enterré. On placera ces plateformes si possible alternativement à droite et à gauche, tous les 50 m. par exemple.

Les accotements reçoivent les plantations des routes, généralement une rangée d'arbres à droite et à gauche dès que la largeur entre fossés dépasse 10 m. Les plantations sont favorables à la conservation et à l'entretien de la route, elles agrippent la circulation et jalonnent la route, leurs produits constituent une certaine source de revenus.

On placera les arbres à 50 cm. au moins des bords des fossés et à 1,50 m au moins de l'axe de la route et à 10 m de distance au moins dans chaque ligne, d'avantage si ce sont des arbres de grand développement. En Allemagne, on emploie beaucoup les fruitiers, en France ils sont admis également. Il y a une tendance à abandonner les arbres

à très grand développement à cause de l'entretien qu'ils demandent et du danger de chute de branches (danger qui existe surtout avec les arbres à bois tendre, par exemple les peupliers). D'autres sont délicats et souffrent de maladies (ex. les ormes). Les arbres à petit développement : acacias, aubépines, saules, tilleuls, marronniers ou les fruitiers sont plus recommandables. Les accotements larges, les pistes etc peuvent recevoir plusieurs rangées d'arbres, distantes d'au moins 4 mètres.

§ 2. - Trottoirs.

Dans la traversée des agglomérations ou à proximité, partout où il y a une grande circulation de piétons, il est désirable de surélever les accotements en trottoirs séparés de la chaussée par des bordures ou saillies de 12 à 17 cm, posées sur sable ou béton ou serrées dans l'encochement de base. En Belgique, ces bordures sont généralement en calcaire (petit-granit ou pierre de Meuse). Les dimensions sont standardisées. Pour la voie interurbaine, on emploiera par exemple le type vicinal : largeur 17 ou 15, hauteur 35, longueur 50 minimum. Les bordures des trottoirs de ville sont plus larges (jusqu'à 25 cm et ont des longueurs plus grandes : 1.20 à 3.00).

Si une voie ferrée est établie sur un des accotements, il est recommandable de surélever sa plateforme et de la séparer par une bordure de la chaussée. (Chemins de fer vicinaux belges). Les rails saillants sont en effet un danger réel pour les automobiles.

Si une route comporte plusieurs chaussées séparées par des pistes, avenues, voies ferrées etc, celles-ci sont surélevées et encloses de bordures. Les pistes reçoivent un revêtement en rapport avec leur destination : sable épais pour les pistes cavalières, carreaux, asphalte, karmac, béton pour les pistes cyclables, cendrée, gravillon, criblures pour les piétons, ballast pour les voies ferrées, etc.

§ 3. - Écoulement des eaux.

Nous avons parlé des dispositifs pour assurer le ruissellement des eaux de surface et le drainage du sous-sol. Ces eaux sont généralement recueillies vers les fossés latéraux en dehors de la plateforme de la route.

Ces fossés ne se calculent généralement pas, on leur donne des dimensions assez larges, généralement 50 cm de profondeur et de largeur avec pleins-fond et des talus $\frac{1}{2}$. Les talus sont gazonnés ou consolidés par des pierres sèches en terrain mou. Il faut une pente suffisante aux fossés et des émissaires convenables (cours d'eau naturels). Il faut empêcher toute stagnation dans les fossés, en assurer un bon entretien.

Si les accotements sont surélevés, les eaux de ruissellement sont conduites dans les fossés par des saignées. Si il y a une bordure, on dispose à son pied un demi-caniveau ou revers, généralement pavé, sauf si la route est en bitume, asphalte ou béton. Des gargouilles ou des saignées s'il s'agit d'une voie ferrée (C.F.V.B) conduisent les eaux de distance en distance vers les fossés ou les égouts. Le débit écoulé par un tel revers dépend de la pente et de la section. Celle-ci dépend de la pente transversale et de la hauteur d'eau. Si la pente transversale est faible, pour une même section, la hauteur d'eau est moindre, mais la largeur est plus grande. Il y a une limite à la pente transversale, il est désirable de ne pas dépasser 5%. Les sections sont donc faibles, il faut augmenter la pente, et multiplier les gargouilles ou saignées.

Dans la traversée des agglomérations, on remplaçait anciennement le fossé par un caniveau ou double revers pavé. Ce système est déficient, gêne la circulation, écoule mal les eaux dès que la longueur est grande et donne lieu à des mares, sauf si la route est en assez forte pente, auquel cas le système peut être suffisant. Il faut constituer les accotements en trottoirs, avec demi-caniveaux et gargouilles et remplacer les fossés par un ou des tuyaux (égout) posés dans les accotements. Dans les communes où il y a des égouts publics, la question ne se pose pas.

Même en rase campagne, il peut être avantageux, dans certains cas, de remplacer les fossés ouverts par des conduites enterrées (ex. très mauvais terrain humide, dont les conduites assurent en même temps le drainage, ou bien dans les passages rétrécis).

Dans les routes à flanc de coteau, il faut toujours un fossé du côté de la colline, sauf en cas de terrain tout à fait rocheux.

Ce fossé a surtout pour but de recueillir les eaux qui peuvent dévaler avec violence vers la route en cas de pluie torrentielle, le plus souvent en chassant beaucoup d'alluvions. Sous cette précaution, qui n'est même pas toujours suffisante, la route serait exposée à être ravinée, ou déchaussée ou fréquemment obstruée. Ce fossé peut recevoir aussi les eaux de ruissellement de la route, si elle est bombée ou si elle a une pente uniforme vers le fossé en courbe. Des gargouilles conduisent les eaux vers l'extérieur de la colline, en des endroits appropriés; éventuellement vers des descentes maçonnées ou en cascade. En tous cas, on n'aura plus recours à des cassés, caniveaux pavés traversant normalement ou obliquement la chaussée.

L'écoulement direct des eaux de ruissellement vers le pied de la colline en donnant à la route une pente transversale uniforme vers le vide ne peut se faire que s'il n'y a pas de danger de ravinement, donc surtout en terrain rocheux et nécessairement en cas de courbure concave vers le vide. S'il y a une banquette de protection, la pente doit être au contraire uniforme vers le fossé (dispositif d'ailleurs peu recommandable).

§ 4. Dispositifs de sécurité.

Se placent le long des routes en remblai élevé ou à flanc abrupt de colline. Les meilleurs systèmes sont à claire voie: bornes en pierre non taillée placées à distances rapprochées (1 à 2 m.), éventuellement réunies par des lisses; garde-corps métalliques ou en bois, parapets. Il faut veiller à un bon aménagement dans la plateforme et à une certaine stabilité au renversement.

Le dispositif des banquettes de sécurité en terrassements est peu recommandable, il demande de l'entretien et gêne l'écoulement des eaux.

Les dispositifs doivent être rendus visibles, c'est-à-dire être de couleur claire ou peints en blanc.

§ 5. Signalisation.

C'est une question importante depuis l'apparition de la circulation rapide, elle est particulièrement importante pour les routes de grand tourisme.

Il nous n'entrerons cependant pas dans les détails, c'est une question d'un ordre trop spécial, plus administrative que technique. La signalisation est généralement mal faite, parce qu'il est difficile d'arriver à un accord entre tous les intéressés et que les crédits sont déjà insuffisants pour le seul entretien qui passe avant tout. La signalisation est bien faite en France, comme l'administration des routes en général.

Il est désirable que la signalisation soit faite d'après ces règles internationales. La convention automobile internationale de 1910, qui a été révisée en 1926 en pose les principes et fixe quelques signes internationaux principaux : lacet, passage à niveau, cassés, etc.

Les principes à envisager sont les suivants :

- 1) attribuer aux routes un numéro d'ordre qui est inscrit sur toutes les plaques indicatrices de bout en bout ;
- 2) placer des plaques indicatrices des deux côtés de la route, pour chaque sens de circulation et de préférence établies du côté correspondant au sens de marche ;
- 3) sur chaque plaque, indiquer le nom de la localité la plus voisine et de la ville importante la plus voisine dans le sens de la marche, avec indication des distances kilométriques et éventuellement une flèche correspondant au sens de marche ;
- 4) signaler de la sorte tous les croisements aux embranchements ainsi que les entrées et sorties de localités ; cependant pour ces dernières plaques, le nom seul de la localité avec éventuellement, à la sortie, le nom de la localité voisine, peut suffire.

Les résultats de toutes les expériences montrent que la plus grande visibilité est assurée par une écriture blanche sur fond bleu vif.

Pour augmenter la visibilité de la plaque, on peut la border d'un cadre clair ou vif : blanc, jaune, rouge. L'écriture doit être de grandeur appropriée, les pleins assez larges et les intervalles entre lettres supérieurs en tous cas aux pleins. Une écriture assez trappe se lit le mieux (1:2).

Les plaques se posent I ou obliquement à la route, elles doivent être lisibles d'assez loin. Il ne faut donc pas craindre de les faire grandes,

Le bois est en fin de compte la matière qui convient le mieux dans ce cas. À défaut de supports naturels : façades, murs, etc, on les fixe sur des supports en bois ou métalliques ou de préférence en béton moulé d'avance (solidité, bon aspect, pas d'entretien). L'idéal serait de pouvoir suspendre les plaques en travers des routes, le système est trop coûteux.

Sur les routes de grand tourisme, on perfectionne en éclairant les plaques pendant la nuit et, aux environs des grandes villes, en élevant aux carrefours de véritables phares indicateurs. Dans l'intérieur des grandes villes, il n'y a généralement pas de signalisation indicatrice. On commence à se servir de divers signaux optiques ou acoustiques, généralement à manoeuvre électrique, pour la réglementation de la circulation.

Les routes sont généralement bornées ; les bornes sont kilométriques ; des bornes plus petites indiquent les hectomètres. Les bornes peuvent porter des inscriptions indicatrices. Si la signalisation est complète, ce surcroît assez coûteux est superflu. Il suffit que les bornes portent le numéro de la route et l'indication du kilomètre.

Les obstacles sont signalés à distance suffisante (150 m.) par les signes internationaux ou appropriés : passages à niveau (###), les bords (S) etc.

§ 6. - Ouvrages d'art. -

Les aqueducs, ponceaux, perrés, murs de soutènement, etc., sont étudiés dans d'autres parties du cours de génie civil. Les canalisations (eau, gaz, électricité, câbles téléphoniques, égouts, etc) doivent toujours être posés sous les accotements ou trottoirs, jamais sous la chaussée, sauf en cas d'obligation par exemple pour traverser.

Les ouvrages d'art ont un développement tout particulier dans les routes de montagnes. Les planches en montrent quelques exemples typiques, notamment les routes en corniches et en tunnels.

§ 7. - Voie urbaine. -

On peut de vue des questions de pure voirie et de circulation, les principes exposés dans le cours sont applicables. Leur adaptation

est une question de cas concret. Mais quantité d'autres considéra-
tions très spéciales interviennent : esthétique, hygiène, intérêts commer-
ciaux, police, etc...

L'étude de l'aménagement des villes s'appelle urbanisme. Elle
est assez récente en Belgique ; elle est exposée dans le cours d'architec-
ture civile. Il est essentiel d'établir en temps voulu les plans d'amé-
nagement et d'extension des villes et agglomérations, qui doivent
s'effectuer d'après des projets d'ensemble. Ils doivent permettre aux trans-
ports et à la circulation de s'effectuer dans de bonnes conditions ; c'est
un des points importants du problème et qui demande le concours de
l'ingénieur.

D'une manière générale, on doit réduire les déclivités limites dans
les villes.

Par contre, aux croisements, les rayons de courbure sont très faibles.
On déterminera, par les méthodes graphiques exposées, les surélargues
nécessaires. Aux carrefours importants, les ronds-points sont avan-
tageux.

Les revêtements de chaussées sont généralement perfectionnés : pava-
ges en pierres, bois ou blocs artificiels d'asphalte ou de béton, asphalte
comprimé ou coulé, revêtements en béton de ciment ou bitumineux. Les
trottoirs sont revêtus de dalles (système qui tend à disparaître) ou de
plattes en pierre dure (parés de faible épaisseur). Les carreaux d'as-
phalte ou de ciment et le pavage mosaïque à très petits éléments de
4 à 5 cm. couvrent mieux. On peut aussi établir des revêtements
en béton ou asphalte. Les bordures sont taillées. Les eaux de ruissel-
lement sont recueillies par des demi-caniveaux et évacués dans les
égouts, placés sous les trottoirs ou pistes, par des bouches d'égouts.
Toutes les canalisations doivent être autant que possible enterrées
sous les trottoirs ou pistes. A cause de la pente transversale des chaus-
sées et caniveaux, les véhicules peuvent empiéter vers le haut sur les
trottoirs. Les rails et réverbères doivent donc être en arrière du bord.
Actuellement, on préfère supprimer les rails, poteaux et édicules

quelconques, afin de dégager les trottoirs. Les câbles de tramways, les lampes électriques, etc... sont accrochés à des fils attachés aux façades ou à de hauts mâts placés tout à fait à l'extérieur. L'éclairage se fait de préférence par lampes puissantes suspendues à grande hauteur dans l'axe de la rue.

Dans les faubourgs et quartiers à faible trafic ou à circulation légère, le tarmacadam convient bien et est économique. En toute hypothèse, il ne faut jamais d'emblée paver une rue nouvelle, mais plutôt l'empierrement, en disposant les trottoirs assez haut pour permettre un pavage ultérieur sur l'empierrement. Les trottoirs sont revêtus de gravier, cendrée pilonnée ou de tarmacadam.

La réglementation de la circulation dans les villes sort du cadre du cours.

Un point délicat est la pose des rails de tramway; elle est traitée ci-après.

Chapitre VII

Voies ferrées sur routes.

§ 1. ~ Généralités. ~ Nous n'étudierons les voies ferrées sur routes que dans leurs rapports avec les routes. Les questions plus particulièrement ferroviaires : matériel, exploitation, etc.. relèvent du cours d'exploitation des chemins de fer.

§ 2. ~ Situations relatives de la route et de la voie ferrée. ~

Une voie ferrée d'intérêt local et une route se complètent parfaitement ; leur réunion est avantageuse pour toutes deux. Elles contribuent mutuellement à leur prospérité en assurant d'autre part une répartition du trafic. Le trafic lourd, le camion automobile lourd sont écartés de la route. Les arrêts multiples apportent un grand trafic au chemin de fer. Mais si cette union est favorable, il est nécessaire que les deux voies ne se gênent pas mutuellement, n'empiètent pas l'une sur l'autre.

La solution idéale est celle qui est généralement employée par les chemins de fer vicinaux belges : la voie est établie immédiatement à côté de la route, mais sur plateforme spéciale séparée par une bordure ou même par un fossé (Ch. de fer de Luxembourg à Mondorf). La chaussée reste entièrement libre, les voitures ne peuvent s'engager sur la voie. Le seul empiètement consiste dans la suppression fréquente d'un des accotements pour piétons. Il faut que l'écoulement des eaux superficielles de la chaussée soit assuré. On peut poser des gargouilles sous la voie ; généralement il suffit de réserver des saignées entre 2 traverses au droit d'une interruption dans la bordure.

Dans les voies très larges, à plusieurs chaussées, il est désirable de

poser les voies sur plateforme spéciale élevée des chaussées et éventuellement surélevée (Tramways de Bruxelles à Vilvorde, du littoral belge, etc) Cette disposition est même recommandable en ville, elle est peu usitée en Belgique.

Le système qui consiste à poser des voies de tramway en accotement des routes, sans les séparer, est à rejeter. Les voies ne peuvent être en chaussée que dans les traversées (croisements) et dans l'intérieur des villes et agglomérations, lorsque d'autres dispositions ne sont pas possibles. La pose des voies dans les chaussées est très défavorable pour la conservation de la chaussée et de la voie; d'autre part les véhicules liés à une trajectoire fixe constituent un grand obstacle à la circulation routière. La tendance moderne est dans la substitution des autobus aux tramways dans les agglomérations. Les rails en saillie constituent un danger pour la circulation des voitures rapides.

§ 3. - Pose des voies sur plateforme indépendante.

Sur plateforme indépendante, on pose les voies sur cendrée, ballast ou gravier et traverses. L'épaisseur du ballast est généralement de 35 cm. jusqu'au dessus des traverses. Les dimensions des traverses sont 2,20 x 0,20 x 0,10 pour la voie normale de 1,435 et 1,80 x 0,20 x 0,10 pour la voie étroite de 1,00. L'espacement normal des traverses est de 80 cm., sauf vers les joints, où il descend à 60 cm. L'attache se fait par tirefonds.

Les rails sont du type Vignole et pèsent de 20 à 30 kg/m et. Les traverses sont généralement en bois (chêne, hêtre ou sapin injectés). D'après des essais, il semble que des résultats intéressants pour la stabilité et l'entretien de la voie pourraient être obtenus par cylindrage du ballast avant la pose.

Les traverses en béton armé sont susceptibles d'un grand développement.

§ 4. - Pose des voies en chaussée.

La majeure partie des voies en chaussées sont posées en Belgique sur traverses, bien que ce système soit généralement peu en faveur à l'étranger. Cela résulte de la nature des chaussées qui sont presque toutes

constituées en pavés sur fondation de sable. Comme il faut toujours une petite couche de sable sous les pavés, ce que la hauteur du rail ne permettrait pas, on interpose des blocs en bois de hauteur voulue; parfois des selles métalliques. La fixation se fait par tirefonds. L'inconvénient est que ces voies exigent un entretien (reserrage des tirefonds, bouchage), qui n'est possible qu'en découvrant la route. Mais la voie qui est incluse dans la chaussée, est plus ou moins protégée contre le déversement. Néanmoins en Belgique, on réunit de distance en distance les rails par des entretoises plates en acier noyées dans les joints de pavage.

Pour le trafic léger, on pose les traverses sur le sable de la forme (5 T par essieu). Lorsque les charges sont plus importantes, il est préférable de constituer un ballast spécial. La cendrée convient assez bien.

Il n'est pas recommandable de poser le rail directement sur le sol ou le sable de fondation. Il faut constituer en dessous de chaque rail une vraie longrine en pierraille donnée ou mieux en blocage recouvert de pierraille. Ce système ne peut convenir cependant que pour le trafic très léger; il vaut mieux constituer une assiette ferme pour la voie au moyen d'un empierrement débordant de 50 cm. de part et d'autre des rails. Il comprendra un blocage (souvent en vieux pavés) recouvert de pierraille. S'il est cylindrique, ce système ne paraît pas inférieur à celui des traverses, tout en étant plus simple, plus économique et évitant de nombreux inconvénients. Dans une chaussée empierrée, on posera la voie de la même manière, la fondation sera donc un peu plus profonde sous la voie, mais sera continue avec celle de la chaussée. L'écartement est maintenu par des entretoises en acier plat boulonnées de distance en distance aux âmes des rails, de préférence par le moyen de petites équerres.

Sur des chaussées à fondation rigide (béton), le problème est plus compliqué. En principe, on peut poser les rails directement sur la fondation, mais de nombreux ingénieurs reprochent à ce système le manque d'élasticité qui rend le roulement dur et sonore et favorise l'usure ondulatoire des rails. D'autre part, il faut assurer alors un contact parfait entre le rail et le

Le béton pour éviter l'humidité au contact qui, avec le martèlement, peut dégrader la fondation. Enfin, on objecte le manque de fixation de la voie. Aussi la pose sans intermédiaire n'est-elle pas recommandable.

Comme dispositif perfectionné, on peut encastrier dans le béton des traverses en bois ou métalliques, sur lesquelles on pose les rails en laissant un intervalle entre le patin et le béton. Aux traverses, on peut substituer des blocs injectés, de dimensions suffisantes (auvers); aux traverses métalliques des selles ou des ancrages métalliques divers (par exemple des bouts de vieux rails). Lorsque l'on pose sans intermédiaires, pour éviter les vides, on peut encastrier le rail dans le béton; ce système est cependant peu recommandable, car en cas de réparation, on doit briser la fondation.

Le système anglais est préférable. Il consiste à couler à chaud entre le rail et le béton, après la mise en place, du brai ou du bitume dur qui se solidifiera en refroidissant. Cette interposition est plus ou moins élastique et est préférable à un coulis de ciment.

Si, avec un revêtement mince, la fondation en béton dépasse le niveau du patin du rail, ce dernier s'encastre ou de préférence se place dans une cuvette remplie de mortier de brai ou de bitume, afin d'assurer l'étanchéité tout en permettant une dépose assez facile.

Si c'est nécessaire, on renforce la fondation en béton sous les rails, par des espèces de longrines, ou sous toute l'étendue de la voie.

La fondation sur longrines ou sur une large plateforme en béton dans une chaussée à fondation non rigide n'est pas recommandable. La longrine en bois n'est recommandable en aucun cas, ni sur ballast, ni sur béton.

En chaussée, les rails sont toujours du type à gorge, Lhoenise ou Broca; les rails Vignole avec contre-rail sont abandonnés; le poids varie de 43 à 68 kg. environ. Ce poids élevé n'est pas exigé par la résistance, mais pour l'élargissement du patin, de la table de roulement, de la rainure et pour augmenter l'épaisseur de l'âme. La largeur du patin est généralement égale à la hauteur. De cette manière, malgré le manque de fixation, on obtient une voie assez stable et qui a assez de rigidité latérale pour

conserver son écartement par un simple entretoisement de 2 à 2,50 m. d'entredistance. On emploie de préférence les rails longs (18 m), à cause des grands ennuis dûs aux joints: infiltration d'eau, battement, dégradation de la fondation et du rail, prise élevée des jonctions, etc..

Aucun système d'éclissage, même avec sabots inférieurs enserrant les patins, n'a donné satisfaction. Aujourd'hui on supprime presque généralement les joints par soudure aluminotermique. Les rails sont en effet protégés contre les fortes variations de température et ne peuvent s'onduler à cause des revêtements rigides dans lesquels ils se trouvent: On recommande un acier assez dur et la trempe superficielle par l'air froid (procédé Sandberg, Revue de Métallurgie, janvier 1927). Les croisements doivent être en acier coulé spécial (au Mg), à gorge de profondeur réduite mais élargie, et être courbes sur toute la longueur de l'aiguille, afin de réduire la longueur des appareils posés en chaussée.

§ 5. - Assèchement des plateformes.

L'humidité du sol est très défavorable pour les voies ferrées, surtout en chaussée. Les terrains argileux surtout sont défavorables, parce que l'argile tend à remonter dans le ballast jusqu'à la surface, par suite du battement. Il faut donc toujours veiller à un bon drainage des voies et à les protéger contre les infiltrations d'eau.

Les chaussées supportant des voies doivent donc être spécialement bien drainées. Si le sous-sol est argileux et la fondation non rigide, il est recommandable de poser un masque en béton maigre sous le ballast des voies. On recommande aussi le ballastage en cendrée, qui est plus étanche. Il faut éviter les infiltrations d'eau aux joints des rails et le long des joints des rails avec le revêtement, ainsi que le séjour de l'eau sur les fondations rigides. On obtient le premier point par la suppression des joints. Pour le second, on assure une bonne liaison des rails avec revêtements en posant de part et d'autre des rails, contre l'âme, des briques de forme spéciale, fixées au mortier de ciment, chaux ou argile, ou des blocs de béton de forme spéciale, ou encore de bois imprégné; soit en garnissant l'âme de part et d'autre de béton de ciment, de brai ou de bitume.

On assure de distance en distance, par des appareils spéciaux placés aux points bas et aux boîtes de manœuvre des appareils, l'évacuation de l'eau circulant dans les ornières des rails. Le revêtement entre les rails et de part et d'autre doit être imperméable. L'empierrement ne convient donc pas; les pavages seront rendus étanches par obturation.

Lors de l'assèchement de la plateforme en béton, on peut établir de distance en distance des drains traversant la fondation (Bêta) et reliés aux drains de la chaussée.

§ 6. - Revêtements des chaussées. -

Tous les revêtements ne conviennent pas. L'asphalte, le bitume, le tarmac, le béton se détériorent rapidement à la jonction des rails et entre ceux-ci.

L'empierrement convient, mais n'est pas recommandable. Le pavage convient le mieux, les pierres davantage que le bois. Quelle que soit la nature du revêtement, on bordera donc les rails de part et d'autre d'une ou deux rangées de pavés en pierre ou bois ou, mieux encore, on pavera toute la voie jusqu'à 50 cm à l'extérieur de part et d'autre (zone dont l'entretien incombe généralement à l'exploitant).

On coulera du brai, du bitume ou du ciment dans les joints. Les pavages entre rails, surtout dans les courbes, exigent des dispositions un peu spéciales, notamment à cause de la présence des entretoises. Il faut employer les pavés les plus durs en bordure des rails.

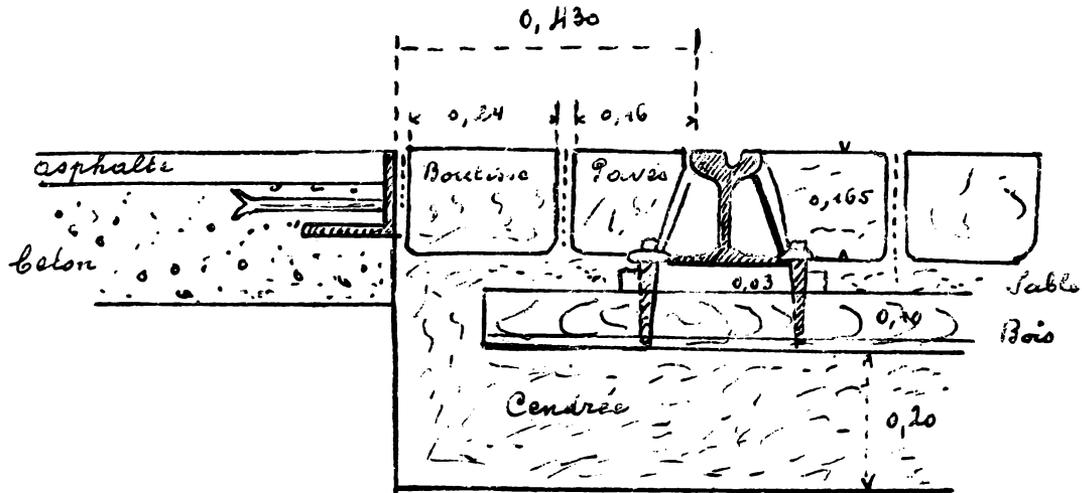
§ 7. - Quelques particularités techniques. -

S'il n'y a pas de fort trafic de marchandises et que le raccordement aux chemins de fer principaux n'est pas désirable, la voie de 1.00 m. est la plus avantageuse.

Les caractéristiques des routes, surtout modernes, s'adaptent très bien à ces voies.

Rampes limites. -

La traction à vapeur permet 4% sur de petites distances, la traction électrique (sans remorque) 15% et davantage.



Systeme des Boulevards centraux de Bruxelles.

Courbes -

Il est recommandé de ne pas descendre en dessous de 75m.; dans les villes les tramways peuvent avoir des courbes de rayon inférieur jus- qu'à 10 mètres.

Le gabarit des ouvrages d'art est voisin de 2,80 x 3,50.

On recommande les bondages cylindriques, qui permettent la pose horizontale et évitent la tendance à l'augmentation de l'écartement.



Chapitre VIII

Entretien - Exploitation.

§ 1. - Entretien. - L'entretien des chaussées est une des fonctions les plus importantes des services de voirie, l'état de la voirie et l'économie de gestion en dépendent au premier chef.

Supposons un entretien soigné. La dépense annuelle dépend de la nature du revêtement et de la nature du trafic. Nous considérons un revêtement superficiel depuis sa mise en service jusqu'à son renouvellement complet après N années.

Les dépenses moyennes annuelles d'entretien courant sont p (par m^2). Éventuellement, après un certain nombre d'années n , on effectue des réparations plus étendues du revêtement, pour un prix P' par m^2 . Enfin, après N années, on renouvelle complètement le revêtement pour un prix P par m^2 , compte tenu de la valeur éventuelle de remploi de l'ancien revêtement. La charge annuelle totale s'écrit dans ces conditions, si r est le taux de l'intérêt

$$\pi = \frac{Pr(1+r)^N + \sum P'r(1+r)^{N-n} + p}{(1+r)^N - 1}$$

C'est cette charge qui doit être la plus petite possible. La préférence doit être donnée, toutes choses sensiblement égales d'ailleurs, au revêtement qui donne la plus petite valeur de π .

π sera d'autant plus petit que P et P' seront plus petits, que N et n seront plus grands et que p sera plus petit. Mais alors que les premières variables sont indépendantes, la dernière p est dépendante de N ; les frais annuels d'entretien sont d'autant plus élevés que la durée de la route est moindre, c'est à dire qu'elle est plus fatiguée.

Nous avons considéré pour p une valeur moyenne, mais en réalité p varie suivant une loi qui ne pourrait être déterminée que par l'expérience.

On n'a guère de données à ce sujet, la question étant très complexe. En

fait, les services routiers envisagent généralement des hauteurs moyennes constantes, pour un type de revêtement et une nature de trafic déterminés. Lorsque les dépenses s'élèvent au-dessus de la normale et vont croissant, c'est un indice de la nécessité d'une réparation importante ou de la fin de la durée économique du revêtement, qui doit être alors complètement renouvelé.

La question est très délicate lorsqu'il s'agit d'une route nouvelle, parce que le trafic n'est pas connu avec certitude et que les erreurs d'évaluation peuvent être sensibles. Il faut opérer surtout par comparaison avec les routes existantes et ne pas arrêter tout de suite le type définitif de revêtement.

Si la route est construite sur un hérisson, on établit d'abord un empierrement et on observe la rapidité de son usure. Si la route est en béton, on se sert d'abord du béton comme couche de roulement. Il faut prendre à l'avance des dispositions de niveau, qui permettent la pose des revêtements superficiels définitifs prévus. Pratiquement, un macadam devra durer au moins trois ans, sinon il faut abandonner ce procédé. Pour un pavage, il faut au moins trente années, pour les charmaux, revêtements asphaltiques etc... une durée intermédiaire, mais au moins dix à vingt ans. Pour le béton, on compte environ 20 ans en Amérique, cette limite paraît élevée pour les revêtements minces européens. Quoiqu'il en soit, dans la comparaison des charges annuelles totales, il faut évidemment prendre pour tous les facteurs des valeurs correspondant à une même situation, ce qui n'est possible que par l'expérience ou les essais; il faut se méfier des valeurs stéréotypées ou normales, ainsi que des formules théoriques.

On distingue dans l'entretien, l'entretien courant et l'entretien périodique. Le premier s'effectue généralement par des agents de la voirie, appelés cantonniers; l'autre se fait aussi par entreprise.

Les cantonniers ont à entretenir et surveiller un canton dont la longueur dépend de l'importance et du revêtement de la route. Moyennant un bon système de surveillance, le travail des cantonniers est généralement satisfaisant et économique; il ne faut donc pas trop allonger les cantons (4 à 12 km). Pour un canton un peu long, il faut faire effectuer les déplacements à bicyclette. A l'époque des travaux ou en cas de besoin, on adjoint

des auxiliaires, parfois des équipes temporaires, aux contourniers des routes importantes.

Il y a divers systèmes d'entretien dont la distinction est cependant devenue assez surannée.

Le système du point à temps proprement dit consiste, en principe, à remplacer les couches d'usure dès qu'elles se manifestent, de manière à restituer constamment à la route ce qu'elle perd. Ce système ne peut plus convenir que pour les routes à trafic modéré.

Le système par aménagement consiste à laisser la route s'user au maximum. Lorsque cet état est atteint, on reconstitue en une fois la couche d'usure par un rechargement général. Dans l'intervalle, pour conserver l'uni de la route, on se borne au strict entretien, c'est à dire à l'entretien strictement nécessaire pour conserver l'uni sans restituer l'usure. Ces distinctions, énoncées par d'éminents ingénieurs français des Ponts et Chaussées, théoriciens de la route, au début du siècle dernier correspondent sans doute aux circonstances de l'époque (Voir Cours de routes, par L. Limmanet).

S'ils ne sont plus applicables à la lettre, ces principes peuvent guider encore dans l'entretien des routes à trafic automobile.

Les contourniers effectueront en tout temps l'épandage et l'ébouage de la route, le curage des fossés et d'une manière générale veilleront au bon fonctionnement de tous les dispositifs d'écoulement d'eau et de drainage, propreté et uni des accotements. Il est utile d'épandrer en temps de gel, et il faut aussi évacuer la neige dans les fossés et en dehors de la plateforme, autant que possible avant la fonte. Dans les pays à fortes chutes de neige, on emploie des chasse-neige. Enfin et principalement, ils feront disparaître le plus tôt possible les plaques spéciales ou nids de poules. Pour que ce soit possible, il faut que le revêtement soit approprié au trafic. Ainsi pour une route à trafic très intense, un empierrement ordinaire ne peut plus, au bout de peu de temps, parfois moins d'une année, être maintenu à l'état uni. Selon la terminologie, on voit que ce système n'est pas celui du point à temps, mais bien du strict entretien, effectué avec le plus grand soin et à temps.

On reconnaît, au point de vue de l'entretien, la supériorité des revêtements modernes, qui ne donnent ni poussière ni boue et qui, par leur cohésion réduisent les flaches; leur imperméabilité facilite aussi l'assèchement. Les pavages ne donnent pas non plus de flaches, mais ne sont pas tout à fait exempts de poussière et de boue, ni imperméables. Il faut veiller à la réduction des joints ou mieux les remplir de brai ou bitume.

Le remplissage des flaches d'empierrement se fait avec des pierrailles approvisionnées le long de la route. La flache est nettoyée, avivée, puis les matériaux sont versés avec de la matière d'agrégation, parfois la poussière de la route. L'emploi doit être bien pilonné pour éviter toute saillie, qui donnerait naissance à deux nouvelles flaches, et aussi pour être assez ferme afin de ne pas être disloqué par les actions tangentielles des autos. L'emploi du goudron ou bitume n'est pas recommandable, parce qu'il est plus dur que le revêtement courant et finit par être en saillie, il provoque alors la formation de nouvelles flaches.

Les routes en tarmacadam, béton ou mortier asphaltique, asphalte coulé se réparent par des emplois au goudron, bitume ou asphalte. On nettoie bien la flache, ou même on la découpe à angles vifs sur toute l'épaisseur pour les revêtements minces bitumineux ou asphaltiques. L'emploi est fait à chaud, par un matériel transportable spécial, et bien pilonné au ras du revêtement.

Lors d'asphalte comprimé on fait de même, avec les soins maxima; l'emploi se fait à la poudre d'asphalte bien tassée et pilonnée au moyen des pilons chauffés.

Lors du béton de ciment, on avive bien la flache, on lui donne une forme régulière et profonde, éventuellement au marteau pneumatique. Puis on humecte au lait de ciment et on pilonne le béton frais.

Les opérations correspondantes pour les pavages sont le soufflage et le repiquage. Le soufflage consiste à soulever légèrement les pavés enfoncés et à introduire du sable par les joints, de manière à relever le pavé d'une manière permanente. Il est affermi dans son alvéole au marteau. Des affaissements en forme de flaches donnent lieu au repiquage; on enlève les pavés, on rend au

sable de la fondation l'épaisseur voulue et on remet en place les pavés, en remplaçant éventuellement ceux qui sont brisés. Le repiquage et le soufflage sont surtout fréquents pour les pavages sur fondation de sable.

Tous ces travaux - sauf pour l'asphalte comprimé et les pavages en bois, procédés trop spéciaux - doivent être effectués autant que possible par les contourniers. Cependant, la tendance se manifeste déjà d'utiliser des équipes volantes de spéciaux : listes, transportées par camions automobiles avec les matériaux et le matériel nécessaires pour l'entretien, d'une manière analogue aux brigades mobiles d'entretien des voies ferrées. L'avantage est celui d'un travail plus concentré et rendu beaucoup plus puissant, par l'emploi d'appareils mécaniques appropriés et de force motrice.

Pour les empièvements liés au sable, au goudron, au bitume ou au ciment, il ne paraît pas désirable de procéder encore au strict entretien lorsque le revêtement est arrivé à la fin de durée. Plutôt que de reconstituer l'un d'un empièchement ordinaire, on préfère aujourd'hui le défoncer aussitôt avant déchargement.

Lorsqu'on abandonne l'empierrement ordinaire pour y substituer un autre revêtement plus perfectionné, on défonce et on rajoute la pierraille en quantité nécessaire pour reconstituer un profil régulier, puis on cylindre de manière à obtenir le profil désiré.

Pour les empièvements et les revêtements monolithiques, l'entretien périodique ne peut consister qu'en enduits superficiels, qui ne constituent pas non plus le point à temps. Cependant, pour les routes au bitume et en béton, il serait désirable d'arriver à limiter l'usure à celle des enduits superficiels, le revêtement sous-jacent restant intact.

Pour les pavages, dans l'intervalle des renouvellements, on procède en cas de besoin à des relevés à bout, qui consistent en dépavage de sections assez étendues et repavage sur sable partiellement neuf au moyen des pavés de remplissage ; les pavés brisés, trop déformés ou usés sont remplacés par des neufs. Anciennement, on plaçait en Belgique les pavés neufs dans la zone centrale de la route, on pavait les bords avec les pavés de remplissage. Ce procédé doit être prosaïque. Il est préférable de repaver d'abord d'un seul tenant avec les pavés de remplissage, puis d'achever avec pavés neufs. Les pavés rebutés sont divisés en catégories : les meilleurs sont approvisionnés le long de la route pour les repiquages

(ils ont par usure la hauteur convenable), les moyens sont mis éventuellement en oeuvre ailleurs pour des travaux accessoires (curieux) ou retillés comme petits pavés; les débris ou les plus mauvais sont employés dans les hérissons ou cassés comme pierraille.

Il est à remarquer que les relevés à bout bien organisés constituent un renouvellement progressif de la route, substitué au renouvellement global à longs intervalles. Après amortissement du pavage initial, il n'y a plus à considérer, au point de vue financier, que les charges d'entretien courant et périodique. Ce système est avantageux.

À l'occasion des rechargements généraux ou relevés à bout, on élargira autant que possible les anciennes routes, par élargissement du hérisson ou des formes de pavage.

L'élargissement du hérisson se fera à l'avance, par exemple en automne, ou au début du printemps, par des équipes placées sous les ordres du cantonnier.

Un grand service d'entretien de voirie a avantage à développer son matériel: camions automobiles et remorques pour les transports du matériel et du personnel, tonnes d'arrosage et de goudronnage, balayuses chasse-neige, machines d'entretien électriques ou pneumatiques, groupes électrogènes ou compresseurs, etc... En France, les services départementaux exploitent des carrières, des usines d'émulsionnage du bitume, etc... La Ville de Paris exploite des carrières de pavés, a une usine de fabrication de pavés de bois, un chantier d'épincage de petits pavés de remploi, etc... A Milan, une usine municipale prépare la poudre d'asphalte, etc...

Les cylindres demandent un grand capital et un personnel spécial. Il peut être aussi avantageux de procéder à la location à l'heure des cylindres avec matières et personnel. La conduite du cylindrage est assurée complètement et uniquement par le personnel de la voirie. Les services de voirie tendent de plus en plus à devenir des exploitations en régie tout comme les chemins de fer; les usagers payant sous une forme quelconque une redevance qui correspond aux frais d'entretien et d'administration.

§ 2. - Conditions financières et administratives de construction et d'exploitation des routes. -

Les questions financières relatives aux routes sont souvent très complexes, elles exercent naturellement une influence très grande sur leur établissement et leur conservation, mais elles dépendent à leur tour dans une grande mesure du régime administratif de la route. Nous examinerons d'abord le cas le plus simple, où le problème financier se présente sous un aspect tout à fait ordinaire, c'est celui d'une route construite par un exploitant pour son usage exclusif (exploitation agricole, forestière, minière industrielle, etc....) Il faut envisager les charges d'établissement et les charges d'exploitation. L'antagonisme de ces deux facteurs se montre très bien dans le cas simple envisagé.

Soit C le capital nécessaire pour la construction de la route, il dépend de sa longueur, de l'importance des terrassements et de la nature du revêtement comme facteurs variables. Il y a divers tracés possibles pour une route, plus économiques les uns que les autres. Les plus économiques seront ceux qui présentent à la fois une longueur pas trop grande et peu de terrassements. En pays moyennement ou très accidenté, ce tracé suppose de fortes rampes et des courbes de faible rayon. Dans tous les cas, on réduira beaucoup C en utilisant un revêtement bon marché. Les charges annuelles sont pour l'intérêt i et l'amortissement a du capital, $(1+a)C$, les frais annuels d'entretien e et enfin les frais d'exploitation E pour un trafic donné, donc au total

$$(i+a)C + (e+E).$$

Les deux termes de cette expression sont généralement antagonistes. Si le capital d'établissement est réduit, les frais d'entretien sont souvent plus élevés, à cause des rampes plus fortes, et surtout des revêtements peu durables. Mais principalement, pour un trafic donné, les frais d'exploitation s'élèvent fortement, à cause des fortes rampes, des courbes raides et de l'imperfection des revêtements qui augmentent beaucoup les frais de traction, limitant l'importance des charges et exigent parfois des véhicules de nature spéciale. (Comparaison avec les chemins de fer, ligne de Bruxelles à Ordon). Il faut rechercher la combinaison des deux facteurs variables qui donne le résultat

optimum. Si le trafic est très faible, le terme $(e + E)$ a peu d'importance, il faut réduire C ; si le trafic est très élevé, il faut réduire $(e + E)$ et généralement augmenter C .

La question présente déjà un aspect plus complexe lorsqu'il s'agit d'une route à péage. Ce régime, encore fort en honneur il y a un siècle, est économiquement rationnel et vient de recevoir une nouvelle application assez retentissante en Italie, par la création des autostrades. Ce régime se distingue, au point de vue financier, du précédent par le fait que les charges annuelles du constructeur ne sont plus que $(i + a) C + e$; les frais de traction grèvent les usagers, qui doivent en outre payer les droits D , perçus par le concessionnaire. Les frais d'exploitation sont donc $E + D$; d'autre part le concessionnaire s'arrange pour que

$$D \geq (i + a) C + e,$$

en tenant compte des charges d'administration et de perception.

Le concessionnaire paraît donc indépendant des frais de traction, il semble qu'il n'ait pas à s'en soucier et qu'il puisse délibérément réduire C autant que possible, sans égard à l'augmentation de E , qui ne l'affecte pas. Cette situation n'est cependant pas certaine; le concessionnaire ne peut agir ainsi que si le trafic est nécessairement assuré et qu'aucune concurrence n'est possible. Les usagers sont bien obligés de se laisser exploiter par un concessionnaire jouissant d'un vrai monopole. Mais il n'en est plus de même dès qu'il y a concurrence, et celle-ci doit s'établir à la longue. Ainsi, les chemins de fer n'ont pas tardé, dans leur voisinage, à supprimer les routes à péage. L'essor du transport automobile, qui provoque une renaissance de la grande voirie, fait maintenant une concurrence efficace aux chemins de fer et a fait renaître certaines routes à péage. Le concessionnaire intelligent ne cherchera donc pas à baser son entreprise financière sur un avantage arbitraire, et par cela même précaire mais cherchera à s'assurer une clientèle certaine et croissante, en offrant des avantages économiques, c'est à dire en cherchant à réduire $(E + D)$. Pour que D soit aussi grand que possible, il faut surtout réduire E , donc généralement augmenter C . Le problème est complexe, mais paraît soluble. Il semble avoir été résolu pour l'autostrade de Milan aux Lacs italiens. Cette route a été

constante à grands alignements droits, courbes de très grand rayon et faibles rampes. Toutes les voies de communication sont croisées en dessous ou au dessus. Le revêtement est de grande largeur et très uni. Il en résulte que les voitures automobiles font une économie sensible de carburant, de pneus et de temps par rapport au parcours sur les routes ordinaires existantes. Le concessionnaire prélève une taxe voisine de la moitié de cette économie. D'après les premiers résultats d'exploitation, la recette semble devoir être suffisante pour l'intérêt et l'amortissement du capital important engagé. Il est à remarquer que l'usager conserve encore, malgré la taxe, un bénéfice appréciable. (Voir R.U.M. 15 février 1928).

Un troisième cas, beaucoup plus complexe, est celui de la route publique. L'administration dont elle dépend supporte la charge annuelle $(i + a) C + e$, plus les frais administratifs. Les usages supportent les frais de traction E et participent, dans une mesure supérieure à celle des autres contribuables, sans charges $(i + a) C + e$. Il n'y a pas d'influences économiques directes qui régissent la question. En principe, l'administration devrait chercher à réduire ses frais; c'est ce qui arrive parfois et qui fait que les routes sont souvent établies d'une manière assez médiocre, ou mal entretenues. A la longue, les efforts des usagers, le prestige du progrès technique, le retour vers une exploitation rationnelle, etc. entraînent des perfectionnements, soit aux routes existantes, soit dans la conception des nouvelles routes. L'essor du trafic automobile et l'influence des groupements d'automobilistes ont déclenché un mouvement général d'amélioration des réseaux routiers. Mais la dépense est considérable et exige un vrai capital de premier établissement. On a laissé, dans certains cas, agir l'initiative privée en rétablissant les péages, ou bien on a établi un régime administratif se rapprochant des péages. On taxe la circulation automobile de droits assez élevés, en rapport convenable avec les frais de gestion et d'entretien des routes, ainsi qu'avec les frais d'exploitation des véhicules (afin d'éviter les taxes prohibitives). Le produit de ces droits est réservé à l'amélioration et à l'entretien des routes. L'administration se trouve alors placée un peu dans la situation d'un concessionnaire, elle a intérêt à augmenter ses recettes, donc à développer le trafic automobile, en réduisant les

frais d'exploitation, c'est à dire en faisant de bonnes routes.

§ 3. Règlementation de la circulation.

Nous avons envisagé trois modes d'exploitation. Le dernier, c'est à dire la voirie publique, est la règle. Cependant, on doit tendre à se rapprocher d'une exploitation en régie et à créer une balance de dépenses et de recettes spécialisées, provenant de la circulation.

La circulation doit être réglementée et recensée. L'ingénieur des routes est un des principaux intéressés à la question, et son influence doit être effective en ce domaine. Il faut éviter les excès de toute nature : excès de vitesse, excès de poids. Il faut tendre vers la suppression des bandages pleins, c'est le meilleur moyen d'assurer une limite de poids.

Il faut adapter la nature des routes à la circulation et, dans ce but, recenser la circulation par des comptages périodiques et, d'autre part, déterminer la capacité et le processus d'usure des routes, par des observations et des sondages. De ces observations, ainsi que des résultats des essais sur les matériaux dont on peut disposer et de l'expérience des méthodes que l'on peut mettre en oeuvre, l'ingénieur pourra déduire quel est le revêtement qui convient à chaque cas et quand il est opportun d'en changer.

§ 4. Leix des transports sur routes.

La question du prix des transports sur routes est très complexe, par suite de la nature même de ces transports, dont l'exploitation est libre et qui s'effectuent dans les conditions les plus diverses. Il en résulte aussi qu'il existe peu de documentation sur ce point, et qu'il est impossible d'établir des données numériques moyennes.

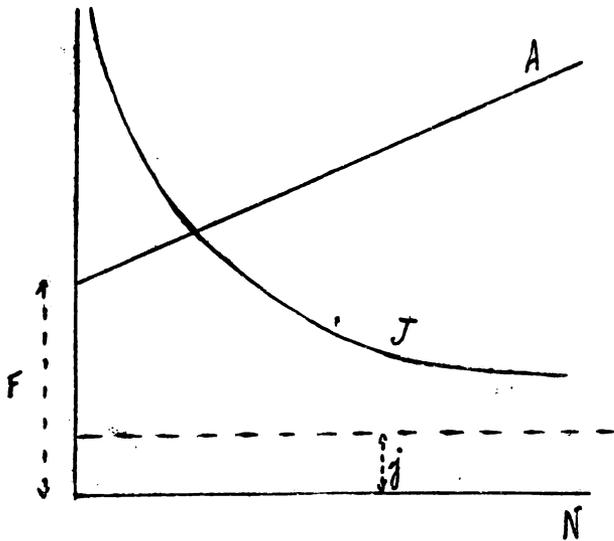
Nous nous bornerons donc à l'exposé de quelques principes généraux relatifs à l'économie des transports sur routes, en fonction des conditions d'exploitation et des caractéristiques techniques des routes.

Les frais d'exploitation annuels d'un véhicule et de son moyen de traction comportent une partie fixe F , qui provient :

- 1°) de l'intérêt du capital d'achat à P (i étant le taux, P le prix).
- 2°) de l'annuité d'amortissement $a(P-R)$ (a étant le taux d'amortissement correspondant à la durée normale du véhicule et R la valeur résiduelle)

3°) de charges fixes diverses : impôts et droits, assurances, frais de garage, etc, que nous désignons par C. Donc $F = i P + a (P - R) + C$.

Ensuite il y a des frais variables, qui dépendent de l'activité d'exploitation du véhicule. Le choix de l'unité est difficile. Certaines dépenses, par exemple carburant, huile de graissage, pneumatiques, entretien d'usage, etc. dépendent du parcours et, dans une certaine mesure, de la charge. Mais les dépenses relatives au personnel (salaires et charges corrélatives), qui sont importantes, doivent être rapportées de préférence à la journée comme unité.



Au total, dans une exploitation régulière, c'est la journée d'exploitation qui convient comme unité. Si j constitue la dépense journalière variable et si N est le nombre de jours d'exploitation, la dépense annuelle totale est

$$A = i P + a (P - R) + C + N j,$$

c'est une fonction linéaire de N .

La dépense totale par jour d'exploitation est :

exploitation est :

$$J = \frac{A}{N} = \frac{i P + a (P - R) + C + j N}{N},$$

c'est une fonction hyperbolique de N .

Donc, les frais journaliers d'exploitation diminuent lorsque le nombre de journées d'exploitation croît, mais d'une manière de plus en plus atténuée à mesure que N croît. Donc, l'économie d'exploitation exige que l'utilisation du véhicule soit suffisante.

Enfin, il importe que l'utilisation journalière soit bonne; on peut la rapporter, selon les cas, au km parcouru ou à la tonne transportée, de préférence à la tonne-kilométrique de parcours de charge utile. Si la moyenne est ($k \cdot t_k$) ton. kil. par jour (par exemple 200 par journée de 8 h pour 1 camion de 5 tonnes), le prix par tonne-kilométrique est $\frac{J}{(k \cdot t_k)}$ et est aussi une fonction hyperbolique de N ou de $N (k \cdot t_k)$.

Examinons maintenant quelle influence les caractéristiques des routes peuvent

exercer sur ces frais d'exploitation. Tout d'abord, si les routes sont en bon état, la durée de vie économique du véhicule peut être prolongée. Il en résulte une diminution du terme α ($P-R$), qui représente une fraction de quelques % de F . Mais cette observation montre précisément une objection que l'on peut faire à la formule générale ci-dessous. Il est évident que l'influence de l'état des routes ne peut s'exercer que dans la mesure des parcours effectués, elle dépend donc de N . C'est à dire que la durée économique dépend de N ; elle est plus exactement conditionnée par le parcours cumulé ou le tonnage kilométrique cumulé, et la durée sera donc d'autant plus courte que N est plus grand. Donc, α est, à vrai dire, une fonction de N et augmente lorsque N augmente; sa croissance est même plus rapide que celle de N . Cette correction n'est cependant pas susceptible de modifier les conclusions générales déduites de la formule et d'ailleurs, des éléments dont les formules ne peuvent tenir compte atténuent l'influence de N sur la durée économique du véhicule. Mais il en résulte que le bon état des routes réduit les frais fixes F dans une mesure d'autant plus importante que N est plus grand et que la réduction des frais journaliers totaux J est pour le moins constante et peut être de l'ordre de quelques % (p. ex 2,5% si la durée de vie est de 11 au lieu de 10 ans).

D'autre part, la partie de j (frais journaliers variables), qui dépend du parcours, est évidemment réduite si le revêtement de la route est meilleur et si les déclivités sont faibles. Selon les observations américaines, il semble que la consommation d'essence moyenne soit proportionnelle à la résistance à la traction. Cela signifierait que la vitesse moyenne sur les diverses routes est constante, car on peut considérer la consommation comme proportionnelle à la puissance. Cette condition est rationnelle car, si la vitesse augmente comme conséquence de l'état de la route, l'accroissement de résistance qui en résulte peut réduire ou absorber l'économie possible. En d'autres termes, l'accroissement de vitesse est coûteux, tout comme dans l'exploitation des chemins de fer. Néanmoins, on se rend compte que la substitution des revêtements modernes au macadam ordinaire et aux routes en mauvais état peut procurer des économies d'essence de quelques dizaines de % éventuellement, qui se traduisent par quelques % d'économie sur les frais journaliers totaux J .

Cette économie est généralement supérieure à celle qui a été envisagée en premier lieu.

Il y a une économie notable sur l'usure des pneumatiques. Selon M. Agg (É.U.A) l'usure des pneus est 17 fois moindre sur les bonnes routes en béton que sur celles en macadam.

Enfin, on peut estimer qu'il y a une économie de graissage et d'entretien.

En cumulant ces résultats, on arrive donc à la conclusion que la circulation sur de bonnes routes peut réduire les frais journaliers totaux d'exploitation T de plusieurs % (ordre de grandeur $\pm 10\%$) par rapport à la circulation sur de mauvaises routes. Des précisions sur ce point seraient évidemment intéressantes, mais elles ne peuvent être obtenues que très incomplètement par des recherches théoriques et il ne faut guère les attendre des exploitants, dont les mieux organisés seraient d'ailleurs seuls en mesure de donner des chiffres permettant la comparaison.

L'ingénieur des routes doit tenir compte de ces éléments et promouvoir le progrès technique de la voirie. Mais il faut envisager la contrepartie, c'est à dire les charges annuelles d'exploitation de la voirie. L'amélioration des routes serait illusoire si elle avait pour effet d'augmenter les charges d'une quantité supérieure à l'économie réalisée sur les frais de traction.

Il en résulterait logiquement une augmentation des taxes perçues sur l'exploitation des véhicules, qui supprimerait l'économie. Toutefois, à frais égaux, les bonnes routes seraient évidemment préférables. Mais heureusement, les revêtements modernes présentent toute une gamme de revêtements appropriés aux trafics divers et qui font que, compte tenu de l'importance de la circulation, les frais annuels totaux d'exploitation sont les moindres pour les revêtements les plus résistants.

Une taxe représentant une partie (p. ex. la moitié) de l'économie annuelle totale des frais d'exploitation des véhicules permet la conservation en état excellent et même l'amélioration continue d'un réseau routier actif.

Donc, le revêtement doit être approprié au trafic et l'on doit envisager surtout les pavages, notamment les petits pavés en pierre dure, pour le trafic le plus intense et pondéreux; le béton pour le trafic moyen, même intense, et le macadam amélioré pour le trafic léger et modéré. L'élément

essentiel de l'économie d'un revêtement est sa durée de vie. Une longue durée de vie réduit les charges financières et correspond nécessairement à de faibles dépenses d'entretien courant, puisque l'usure est minimale. La qualité des matériaux joue donc un rôle essentiel, plus que le prix.

Chapitre IX

Étude d'un projet de route. - Tracé.

§ 1. - Programme du projet. - Il constitue en somme l'énoncé du problème. Ainsi que nous le verrons dans la suite, il est généralement progressif, c'est-à-dire qu'il se précise par stades.

Les points principaux sont :

- 1) points de sujétion ou de passage obligé ou direction générale.
- 2) destination générale de la route.
- 3) nature ou nature probable et importance probable du trafic.
- 4) conditions d'exploitation et directives techniques spéciales éventuelles.

Ces données résultent de considérations générales qui s'imposent ou sont imposées à l'auteur du projet ; elles lui laissent plus ou moins de latitude. Ces considérations sont d'ordre économique, politique ou stratégique ; elles touchent aux intérêts généraux et particuliers. Il s'y ajoute parfois des directives techniques supérieures qu'il faut réduire au minimum pour ne pas entraver l'initiative de l'ingénieur chargé de l'étude du projet. Les conditions d'exploitation ont été étudiées dans le chapitre précédent. Leur influence sur l'établissement du projet en ressort suffisamment.

§ 2. - Points de sujétion ou de passage obligé ou direction générale. - Il faut nécessairement que soient définis les points terminaux ou un point initial et la direction générale. Ainsi se trouve déterminée la région géographique dans laquelle la route doit

être établie, ce qui permet la première étude, la plus générale, l'étude géographique. Elle se fait à l'aide de documents dont on dispose, et de reconnaissances.

Dans les pays administrés, les cartes topographiques à grande échelle facilitent cette étude au point de réduire fortement son importance.

Dans des groupements neufs, si l'on ne dispose que de cartes à petite échelle et peu détaillées, l'étude demande plus de réflexion et doit le plus souvent s'accompagner de reconnaissances isolées, préparées au moyen des cartes. On se sert éventuellement d'instruments topométriques de reconnaissance: boussole, baromètre, éli-mètre (angles verticaux) clinomètres (inclinaisons sur l'horizon). La photographie, et surtout la photographie aérienne, peuvent rendre actuellement de grands services. Dans les colonies ou pays peu connus, où les cartes sont trop générales ou trop vagues pour donner aucun renseignement utilisable, il faut procéder à la reconnaissance générale par les procédés indiqués ci-dessous; l'avion peut être considéré comme indispensable dans ce cas. Dans le cas extrême où il s'agit de créer sans tarder une voie de pénétration: piste plus ou moins large pour piétons, animaux de bât ou attelages, voitures automobiles spéciales ou non, le tracé et la construction de la route s'effectuent en même temps que la reconnaissance. Ils comportent des travaux élémentaires tels que jalonnement, défrichage, recherche de gués, de cols, construction de ponts de fortune, etc.. L'étude se réduit donc presque à l'étude géographique. Quelle que soit son importance, l'étude géographique fournit à l'ingénieur des renseignements généraux de la plus haute importance pour l'orientation des études postérieures: nature générale de la région à traverser, relief et hydrographie de la région, obstacles à franchir, nature probable du terrain, caractères démographiques et économiques de la région, agglomérations intéressantes, ressources de toutes natures pour la construction, etc.

Dans les régions exploitées et peuplées, il y a généralement divers points de passage obligés intermédiaires: agglomérations, usines, points de franchissement imposés par des cours d'eau ou d'autres obstacles etc. Il peut y avoir aussi des interdictions de passage, par exemple les routes pour automobiles, trafic rapide ou grand trafic, doivent éviter la traversée des agglomérations bâties, d'après les conceptions modernes.

Ces conditions résultent des considérations d'ordre général précitées (économiques, politiques, stratégiques, etc.). Elles déterminent une seconde approximation du tracé général en substituant à la droite joignant les points extrêmes une ligne brisée qui s'en écarte plus ou moins. La région géographique d'opération est ainsi précisée et l'on peut appliquer à chaque élément du tracé, entre deux points de sujétion successifs, les méthodes d'investigation exposées dans l'étude géographique, d'une manière plus détaillée comme il convient. À la suite de cet examen, l'ingénieur possède des éléments assez précis et nombreux pour permettre, sans peine, la conception du tracé de la route. Les points de passage obligé ne sont pas, bien entendu, des points mathématiques. Une certaine latitude est laissée à l'ingénieur qui, après étude des divers tronçons détermine les points de soudure les plus favorables.

Les études peuvent aussi inciter l'ingénieur à s'écarter assez d'un point de sujétion pour que la condition ne soit plus remplie; les raisons en doivent être justifiées et, éventuellement, le point de passage obligé abandonné doit être raccordé au tracé général par un embranchement.

§ 3. - Destination générale de la route. -

Donnée d'ordre essentiel, dont l'ingénieur doit tenir compte déjà dans l'étude géographique.

La route peut être une route de pénétration économique, de pénétration politique, et généralement aussi militaire dans ce cas. Elle peut être uniquement stratégique (défense nationale). Ou point de vue économique, elle peut être établie principalement dans l'intérêt de l'industrie (transports très pondéreux), ou du commerce (transport lourd et rapide), ou du tourisme (transport extra-rapide), ou dans un intérêt mixte. Elle peut avoir pour but la mise en valeur de régions naturelles dont on veut intensifier l'exploitation agricole, forestière ou minière. Son but peut être plus spécial encore, par exemple sportif ou expérimental. Il est inutile d'insister sur l'orientation générale que ces conditions doivent imprimer à l'étude géographique du tracé.

§ 4. - Nature ou nature probable du trafic. -

Cette condition, déjà plus particulière et précise, peut être confondue éventuellement avec la précédente.

C'est généralement le cas des régions dont l'organisation est déjà développée. Elle définit la nature des produits transportés, ainsi que celle des véhicules ou engins de transport. L'ingénieur en déduit une série d'éléments techniques: pentes admissibles, rayon minimum des courbes, etc.. qui sont déterminants pour l'établissement du tracé définitif. Elle lui suggère également de premières indications pour le profil en long et la nature du revêtement de la route, pour les ouvrages accessoires et les ouvrages d'art, etc.. Dans ces régions qui possèdent une organisation administrative très développée, ces éléments sont souvent soumis à une réglementation; l'ingénieur n'a donc qu'à rechercher et à appliquer les prescriptions réglementaires afférentes au cas concret.

§ 5. - Importance probable du trafic.

L'importance du trafic ne peut être supputée avec assez de précision que dans des cas spéciaux de détournement ou de doublement de tronçons de routes existantes, ou d'embranchements desservant des centres dont le trafic peut être assez exactement prévu. Dans le cas ordinaire de la construction d'une route nouvelle, l'importance du trafic ne peut être évaluée qu'avec une certaine probabilité, d'après la destination générale de la route, la nature de son trafic, les caractères démographiques et économiques de la région etc.. Des éléments plus précis peuvent être fournis par des statistiques relatives aux routes voisines ou analogues ou enfin, d'après les données ou prévisions, plus ou moins documentées ou justifiées, fournies par des groupements intéressés: industriels, groupements commerciaux, syndicats agricoles, etc.. En cette matière, il est nécessaire, tant pour l'auteur du programme que pour l'ingénieur chargé du projet, d'avoir les vues larges et de réserver intelligemment l'avenir, compte tenu des conditions financières.

Cette remarque a notamment de l'importance pour la fixation des alignements et la détermination des emprises. Par suite des facilités qu'elle offre pour les transports et les déplacements, une route attire généralement, dans un délai plus ou moins long, l'établissement d'installations riveraines: exploitations agricoles, ou industrielles, établissements commerciaux ou de plaisance, ou simplement maisons d'habitation. Ces établissements, fixés par la route, contribuent d'abord à la prospérité de son trafic. Si la région desservie est appelée à

un développement économique intense, ils ne tardent pas à apporter une entrave à la circulation, surtout à la circulation rapide; ils enserrant la route, congestionnent son trafic et l'étouffent. Les élargissements sont impossibles ou ruineux, à cause de la plus value des terrains riverains ou des im-mebles à détruire. Il faut envisager le doublement, qui est coûteux et qui lèse parfois les intérêts des riverains, dont il faut alors vaincre l'opposition. C'est la situation qui existe dans les régions industrielles qui se sont développées au cours du siècle dernier: Bonnage, bassin de Liège, le Nord français, Sarre, Ruhr etc., ainsi qu'au voisinage des très grandes villes: Paris, Bruxelles, etc.. Le développement des constructions et installations privées dans ces régions peut prendre même une telle importance, que la possibilité d'aménagement de voies de communication ultérieures peut être quasi empêchée. Il est donc de politique prévoyante, dans ce cas, de fixer des alignements assez reculés, de faire des emprises assez larges et, au besoin, de réserver des zones de terrain assez étendues pour permettre le développement futur des voies de communication d'après les nécessités du trafic, sans s'exposer à des expropriations ruineuses, ou même, à rencontrer des obstacles insurmontables.

Dans cet ordre d'idées, il convient de citer l'organisation qui a été créée dans le bassin de la Ruhr sous le nom de "Siedlungsverband des Ruhrkohlengebietes" (Association de colonisation du bassin de la Ruhr). Elle consiste en une association légale des autorités administratives locales (province, cercles, villes et communes); elle est pourvue de pouvoirs administratifs spéciaux, en vertu d'une loi, et fonctionne en collaboration avec les services de l'Etat, Travaux Publics, Chemins de fer, Télégraphes, etc.. Elle a pour mission d'étudier tous les nouveaux projets de voies de communication et de leurs annexes, principalement les routes, mais aussi les chemins de fer avec leurs gares, et les canaux avec leurs ports, ainsi que les projets de constructions urbaines (agglomérations, nouveaux quartiers) de manière à concilier et harmoniser leurs situations réciproques. Les nouvelles routes sont prévues avec des alignements très écartés, de manière que les emprises puissent être élargies dans la suite, en cas de besoin. Établissant des plans d'ensemble à longue échéance, d'accord avec les syndicats industriels et commerciaux, les chemins de fer, etc., cette association peut même définir des zones de terrain,

appelées zones de circulation, qui sont réservées (c'est à dire qu'il est interdit d'y édifier des constructions) et qui sont destinées à l'établissement de voies de communication futures, à construire lorsque, certains sièges étant épuisés, de nouvelles puits seront mis en exploitation dans les régions à desservir par ces nouvelles voies.

Cette organisation, manifestation du mouvement allemand "de rationalisation", peut nous paraître marquée de quelque outrance; elle contient cependant un principe dont d'autres pays peuvent tirer profit, notamment la Belgique, pour la mise en valeur du bassin de la Campine, par exemple.

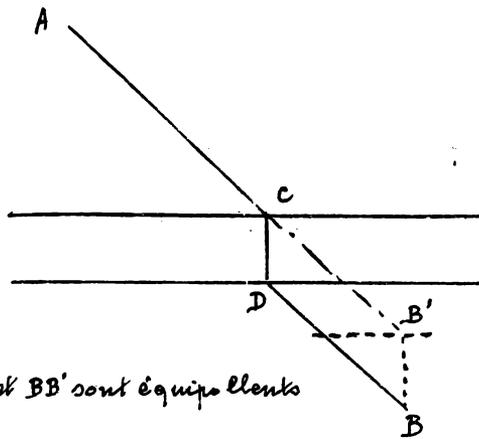
§ 6. ~ Tracé en terrain à faible relief. ~

Le tracé s'étudie et s'effectue sur des documents topographiques. Le problème consiste à rechercher la ligne du terrain satisfaisant le mieux au programme imposé et aux observations faites en cours d'études préliminaires. Il doit notamment satisfaire aux conditions de déclivités et de courbures maxima. Ce sont principalement ces limites qui différencient les caractères des tracés, dont l'étude développée est faite dans le cours de topographie.

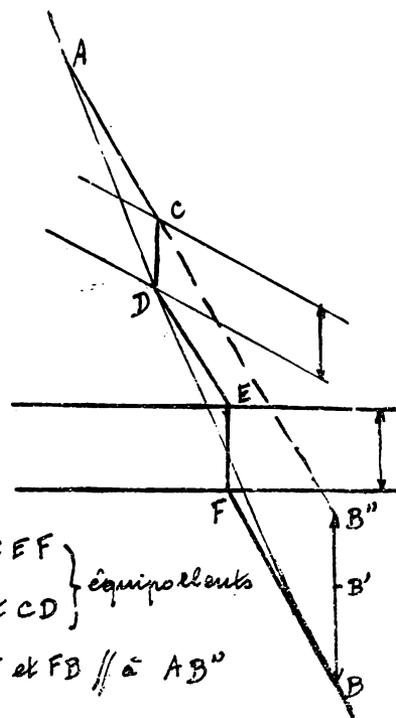
En pays plat, les pentes du terrain sont généralement faibles dans la direction du tracé et présentent peu de ruptures. Les obstacles ne sont pas d'ordre hypsométrique. Le tracé entre deux points de passage obligé successifs doit se rapprocher de la ligne droite. Cependant, s'il s'en écarte sans présenter d'éléments très inclinés sur la direction générale, l'allongement ne peut être considérable et il ne faut donc pas craindre les déviations pour éviter un obstacle, généralement coûteux à franchir directement.

Les obstacles seront: les immeubles et terrains de valeur, agglomérations, usines, parcs et châteaux, cimetières, jardins cultivés, vergers; les étangs, marais, tourbières, zones de mauvais terrains; les petits accidents topographiques (buttes, fouilles, etc..) et les voies de communication (chemins de fer, cours d'eau, etc.) Le plus souvent on évitera et on contournera ces obstacles; le tracé comportera une série d'alignements droits raccordés par des courbes de rayon convenable.

Dans les routes de vallées, il faudra établir le tracé de manière à rendre la route autant que possible insubmersible et, d'autre part, ne pas remonter trop haut, afin d'éviter de devoir franchir tous les contreforts et toutes les vallées latérales



CD et BB' sont équipollents



BB' et EF } équipollents
BB'' et CD }
AC, DE et FB // à AB''

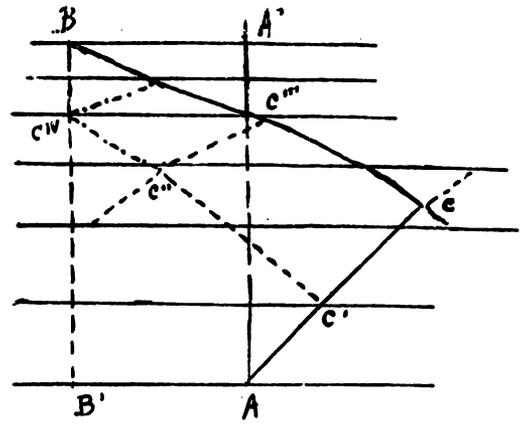
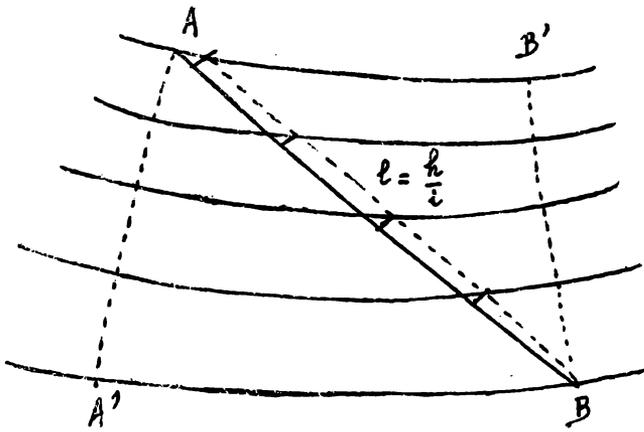
On sera ainsi conduit, si possible, à un tracé sinusoïdal, tant en plan qu'en profil en long, et d'altitude moyenne. Ce tracé permet une compensation facile des terrassements. Il faut prendre des précautions spéciales pour le franchissement des cônes de déjection, éviter les versants argileux (glissements et sautements) et, si possible, établir la route sur le versant nord ou ouest, qui donne l'exposition la plus favorable dans les climats humides; l'inverse peut convenir dans les climats secs.

Il faut éviter les paliers, donner toujours une faible pente.

Pour franchir un cours d'eau ou un chemin de fer, sous un angle donné, par le tracé le plus court, la construction géométrique ci-contre convient. Elle est analogue pour deux voies de communication voisines.

§ 7. - Tracé à flanc de coteau. -

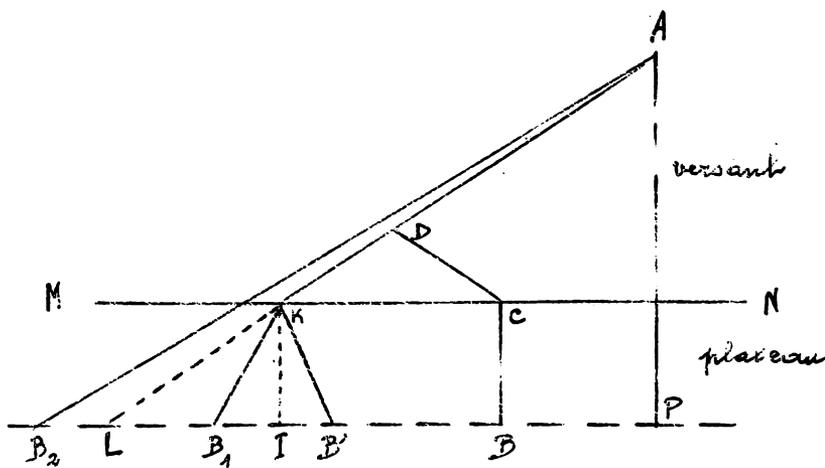
La plus grande pente moyenne du terrain est supérieure à la pente limite. Si h est l'équidistance des courbes de niveau, on tracera le sentier d'égale pente i par tronçons successifs de longueur $l = \frac{h}{i}$ entre les courbes de niveau successives. Si la distance entre deux courbes de niveau est $> l$ c'est que la plus grande pente est moindre que i en cet endroit. S'il s'agit de réunir 2 points A et B sur un versant, on trace les lignes de plus grande pente AA' et BB', puis partant d'un des points extrêmes, le sentier d'égale pente i (pente maximum). C'est ce sentier est entièrement compris



entre AA' et BB' , il est possible de réunir A et B par un sentier d'égal pente moindre que i , à déterminer par tâtonnements. Si le sentier d'égal pente sort de l'espace compris entre AA' et BB' , il faut en tracer deux en sens inverse à partir des 2 points extrêmes, leur point de rencontre constitue un lacet C . Si AA' et BB' sont très rapprochés, ce qui rejette très loin le lacet C , on a recours à un plus grand nombre de lacets.

Il y a plusieurs positions possibles pour les lacets ; il faut choisir les endroits les moins inclinés et il faut éviter de multiplier les lacets, qui sont des points défavorables de la route, quitte à allonger le parcours.

Dans le tracé définitif, on s'écarte du sentier d'égal pente pour obtenir des alignements droits raccordés par des courbes. Généralement le parcours



diminue, il faut donc tracer les sentiers d'égal pente avec une pente un peu plus faible que la pente limite. Il arrive que l'on puisse éviter les lacets pour gravir un flanc de coteau, en dé-

veloppant le tracé le long des versants d'une vallée transversale, on substitue ainsi une large boucle au lacet.

Les routes de crête peuvent avoir des avantages touristiques ; au point de vue de la construction elles sont généralement défavorables, les crêtes étant presque toujours accidentées.

§ 9. - Autres conditions générales relatives aux tracés.

En plus des conditions topographiques il faudra tenir compte encore d'autres considérations générales dans l'établissement des tracés.

- 1) relatives au terrain : rechercher les terrains résistants, perméables, bien exposés, éviter les zones d'affaissement houillers et les terrains inconsistants, éviter les terrains coûteux (exploitations agricoles, industrielles, etc...)
- 2) relatives aux autres voies de communication : se raccorder convenablement aux routes existantes, traverser les chemins de fer de préférence par des passages inférieurs ou supérieurs, traverser les voies navigables assez haut pour permettre l'établissement d'un pont fixe, choisir les points de passage de manière à réduire l'importance des ouvrages et à les avoir sur un terrain solide.
- 3) relatives à la dépense de construction et à l'exécution : réduire les terrassements et les transports de terres, éviter les déblais rocheux, etc..
- 4) relatives à la circulation et aux transports : toutes choses égales d'ailleurs, préférer le tracé réduisant les frais totaux de transport. Rationnellement, il faut entendre par là les frais d'exploitation proprement dits des transports, augmentés des frais d'exploitation de la voie.

§ 10. - Comparaison des tracés par les longueurs virtuelles.

Entre deux points, on peut généralement envisager plusieurs tracés. La chose doit se faire par comparaison :

- au point de vue de la dépense de construction,
- au point de vue des dépenses d'entretien,
- au point de vue des dépenses d'exploitation des transports.

La dernière question peut s'étudier par les longueurs virtuelles, c'est à dire par les longueurs horizontales donnant lieu au même travail spécifique utile ou aux mêmes frais spécifiques de transport. Cette notion a fait l'objet de nombreuses études pour les chemins de fer. Des formules ont été établies pour les routes dans l'hypothèse de la traction animale ; on peut les considérer comme surannées. Nous nous bornerons à une étude sommaire et générale applicable à la traction sur route, principalement mécanique.

Nous ne tenons pas compte du travail interne, c'est à dire que nous supposons le rendement constant. A une déclivité $\pm i$, comptée positivement en remonte,

correspond un effort résistant $\pm Pi$, P étant le poids du véhicule ou train. C est un effort moteur lorsque i est négatif (pente) et on peut l'envisager comme tel, dans le calcul des longueurs virtuelles, tant que la pente est inférieure à une limite au delà de laquelle il faut faire usage du frein. A toutes les valeurs supérieures de i , on doit substituer cette limite en pente. Donc, sauf le cas exceptionnel de possibilité de freinage par récupération (autobus électrique à trolley), les pentes ne comprennent les rampes que dans une très faible limite et il faut éviter les rampes perdues, c'est-à-dire contigües à une pente équivalente.

Soient Q le poids mort du véhicule ou train et C la charge utile, $P = Q + C$. Supposons d'abord que le véhicule circule à allure constante indépendante de la déclivité. Son coefficient de résistance à la traction est f_1 et son coefficient spécifique de traction est m , qui a été défini pour la traction hypomobile.

$$\text{Pour 1 véhicule automobile en ordre de marche } m Q v = \phi_m - f_1 Q v$$

$$\phi_m \text{ étant la puissance motrice effective à la pente. Donc } m = \frac{\phi_m}{Q v} - f_1 = \varphi(v)$$

Sur une rampe d'inclinaison i , l'équation du mouvement est

$$m Q = f_1 C + i (Q + C), \text{ d'où } C = \frac{m - i}{f_1 + i} Q.$$

En particulier

$$C_0 = \frac{m}{f_1} Q.$$

Les parcours et les frais étant les mêmes dans le même temps, la longueur virtuelle en rampe L_0 correspond au même tonnage-kilométrique, c'est-à-dire que $C_0 L = C L_0$, d'où

$$L_0 = L \frac{C_0}{C} = L \frac{m (f_1 + i)}{f_1 (m - i)} = L \left(1 + \frac{i}{f_1}\right) \frac{m}{m - i}.$$

Comme formule simplifiée, on emploie souvent $L_0 = L \left(1 + \frac{i}{f_1}\right)$, ce qui revient à ne pas distinguer entre le poids utile et le poids mort.

La majoration doit être en réalité plus grande, car $\frac{m}{m - i} = 1 + \frac{i}{m - i}$, d'où

$$L_0 = L \left(1 + \frac{i}{f_1}\right) \left(1 + \frac{i}{m - i}\right) = L \left(1 + \frac{i}{f_1} \frac{m + f_1}{m - i}\right)$$

Le facteur $\frac{m + f_1}{m - i}$ est > 1 en rampe et en pente $i < f_1$; il devient égal à 1 pour $i = -f_1$.

Une grave objection peut être faite à cette méthode, commode grâce à l'élimination du temps. C'est que, pour une rampe $i = m$, $C = 0$ et $L_0 = \infty$. Elle n'est donc applicable que si i est sensiblement $< m$. Mais, sur une forte rampe, on réduit la vitesse à la vitesse v' telle que $\frac{v}{v'} = n$, d'où $m' + f_1 = n (m + f_1)$

et $m' = nm + (n-1) f_1 > nm$.

En rampe, on a $m' Q = f_1 C + i (Q + C)$, d'où $C = \frac{m' - i}{f_1 + i} Q$.

En palier $C_0 = \frac{m}{f_1} Q$.

Dans le même temps, donc pour la même dépense, le parcours est n fois plus grand en palier qu'en rampe, donc

$$L_0 = L \frac{m}{f_1} n \frac{f_1 + i}{m' - i} = L \left(1 + \frac{i}{f_1}\right) \frac{mn}{m' - i} = L \left(1 + \frac{i}{f_1}\right) \frac{mn}{mn + (n-1)f_1 - i}$$

Par des transformations analogues à celles de la formule précédente, on obtient

$$L_0 = L \left[1 + \frac{1}{f_1} \frac{mn i + f_1 i - (n-1) f_1^2}{mn - i + (n-1) f_1} \right]$$

Sur une bonne route (béton) en forte rampe, on peut éventuellement négliger $(n-1) f_1^2$, on a alors approximativement $L_0 = L \left[1 + \frac{i}{f_1} \frac{mn + f_1}{mn - i + (n-1) f_1} \right]$. Le coefficient de majoration est moindre que celui de la formule précédente.

On obtient m d'un tracteur en divisant l'effort de traction T au crochet d'attelage par le poids Q du tracteur. On trouve par exemple, à la vitesse de 3,5 km/h. environ, $m = 0,60$ pour un tracteur de 22 CV indiques, pesant 1350 kg environ. Le coefficient m se rapproche donc de la limite d'adhérence aux faibles vitesses, il est inférieur aux vitesses plus grandes.

A l'aide de ces formules, on peut établir les longueurs virtuelles d'un tracé quelconque, en le divisant en tronçons de déclivités connues et additionnant les longueurs virtuelles partielles. Les pentes étant éventuellement réduites, il faut déterminer la longueur virtuelle pour chaque sens de circulation; parfois on envisage la moyenne des deux.

Annexe

Dispositifs de protection contre la neige, les avalanches et les chutes de pierres.

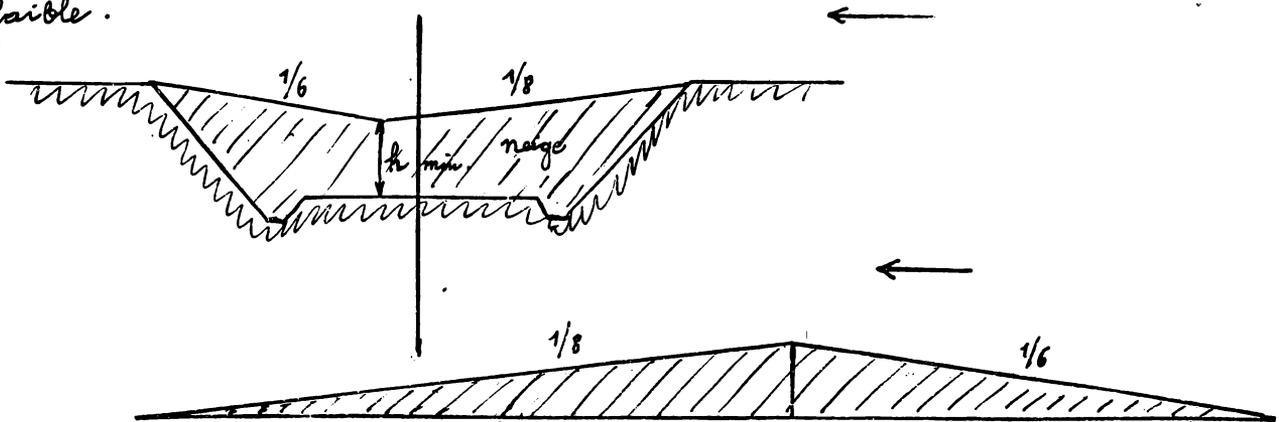
§ 1. - Obstructions par la neige. - La neige de chute forme une couverture de 0,40 à 0,50 m. pouvant atteindre exceptionnellement jusqu'à 2.00. Il n'y a pas d'autre moyen de protection que le déblai par chasse-neige, soit du type en V à ailes fixes ou réglables, traîné par cheval ou tracteur, ou poussé par la locomotive, auquel cas il est monté sur truck; ou encore du type à hélice (tranchées)

Le plus grand danger d'obstruction par les neiges provient des tourmentes de neige. La neige est chassée parallèlement au sol par le vent violent et peut venir combler les tranchées ou s'amonceler contre les remblais et les submerger. Les petites tranchées de moins de 6.00 m. de profondeur, surtout de 2 à 3 m., peuvent être comblées, les petits remblais de moins de 5.00 m. submergés; d'autant plus qu'ils sont plus bas. Au delà de 7.00, les remblais ne craignent plus guère. Dans les tranchées de plus de 6.00 m. de profondeur, il existe une capacité suffisante d'emménagement de neige pour qu'une passe libre puisse subsister au centre; une grande partie de la neige peut d'ailleurs franchir la tranchée. La question est évidemment influencée par la violence du vent, par sa direction et ses variations de direction. Les vents inclinés de moins de 20° sur l'axe de la tranchée ne sont pas dangereux, la neige est chassée dans la tranchée. Mais les obstructions peuvent se faire dans les changements de direction. Elles peuvent aussi se faire aux points de passage au remblai, où le vent peu incliné sur l'axe de la tranchée peut amener de grandes quantités de neige du dehors. Il peut aussi se produire des dépôts importants sur les routes à flanc de coteau, formant dépression, et aux carrefours.

L'importance des dépôts possibles dépend de l'hiverland libre. Jusqu'à 750 m. de profondeur, on admet 3 à 5 m³ de section de neige par 100 m. de profondeur, au delà la quantité décroît de 2 et même 1 m³ par 100 m. Mais la présence de cultures et obstacles de toute nature réduit la quantité à 1 m³ pour 100 à 150 m.

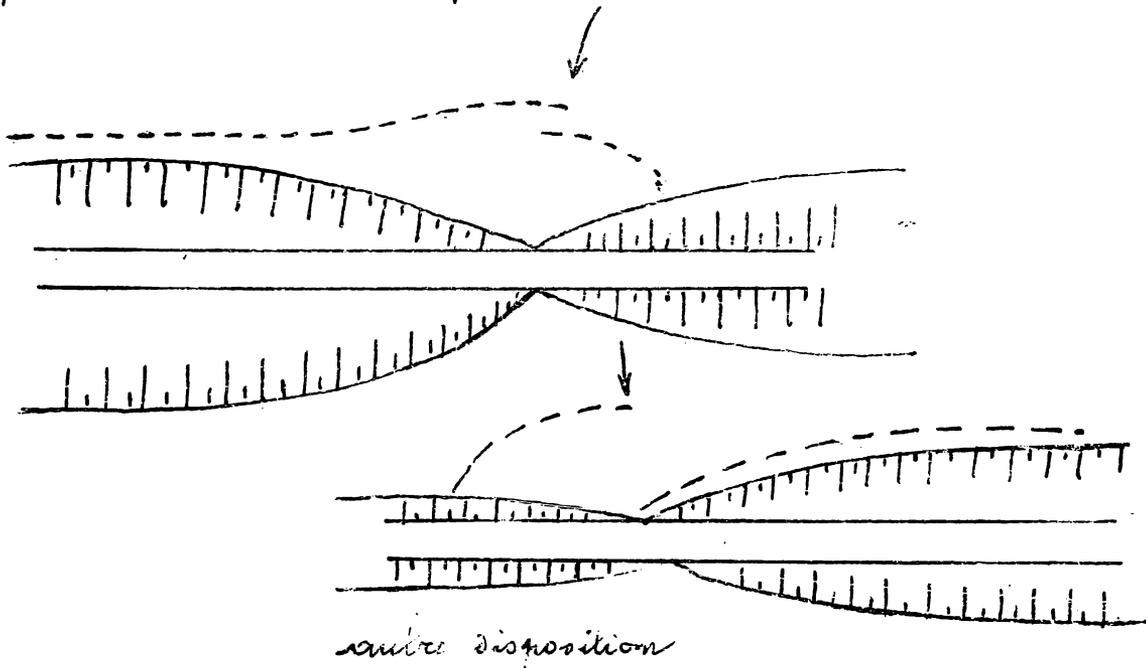
On peut donc ainsi approximativement évaluer les quantités de neige susceptibles de se déposer. L'observation est évidemment le meilleur guide.

§ 2. - Mesures de protection. - Sur les plateaux élevés où les amoncellements de neige sont à craindre, il faut éviter les remblais bas et les tranchées peu profondes ou bien, il faut leur donner des talus d'une inclinaison si douce que la neige ne soit pas arrêtée, soit $\frac{1}{6}$ à $\frac{1}{10}$. Cela n'est généralement possible que pour les faibles hauteurs ou profondeurs et si le prix du terrain est faible.



Si non il faut établir des dispositifs de protection. Si l'on observe un amoncellement de neige, soit contre un obstacle, soit dans une tranchée, on constate que le talus incliné vers le vent est généralement à 4:6; celui protégé du vent à $\frac{1}{8}$.

Si l'on établit des obstacles \perp au vent ou sous un angle très obtus, il se forme un tel amoncellement. Avec un obstacle plein, l'amoncellement se fait d'abord en amont, puis en aval. Avec un obstacle à claire voie,



l'amoncellement aval se fait en même temps que celui d'amont, dans une proportion d'autant plus grande que les vides sont plus grands.

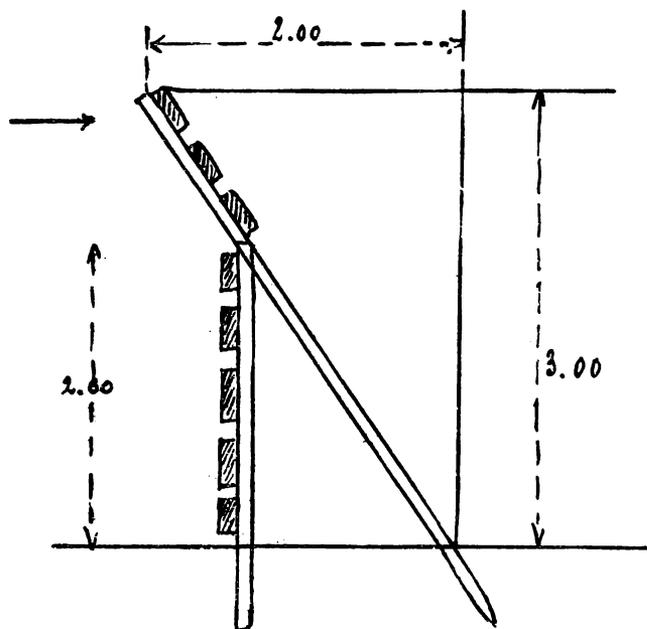
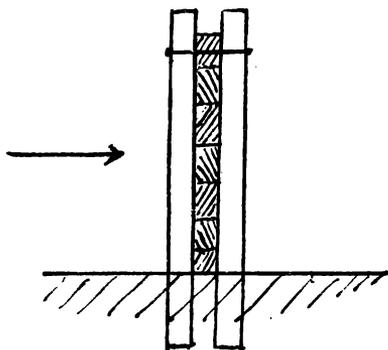
Le volume d'amont est donc connu, il ne dépend que de la hauteur de l'obstacle. Celui d'aval en dépend aussi uniquement, si la distance de l'obstacle à la tranchée est assez grande pour que la neige n'arrive pas à la tranchée. Mais ce dispositif demande beaucoup de terrain et, si la distance à la tranchée est assez grande, des entraînements de neige assez considérables peuvent y prendre naissance. On admet donc qu'une certaine quantité de neige peut être emmagasinée dans la tranchée. Il en résulte que, à volume constant de neige, la distance des dispositifs de protection à la tranchée augmente quand la profondeur diminue. Il faut prolonger les levées au delà du point de passage, de préférence au moyen d'une seconde levée, en chicane avec la première, et incurvée en vue de protéger l'entrée de la tranchée.

Le dispositif le plus simple est celui des levées // à la tranchée. On attend, plus d'efficacité des levées légèrement obliques par rapport à la tranchée et disposées en jalonné, mais le dispositif est plus coûteux. La hauteur des levées atteint jusque 3.00; au delà il faudrait les faire trop solides. On peut les établir alors au sommet d'un remblai ou, selon le procédé suisse, au sommet d'un premier amoncellement de neige de 3.00 m. de hauteur. L'amoncellement total peut ainsi atteindre 7 à 8 m.; au delà, la neige est emportée par le vent au dessus de la tranchée.

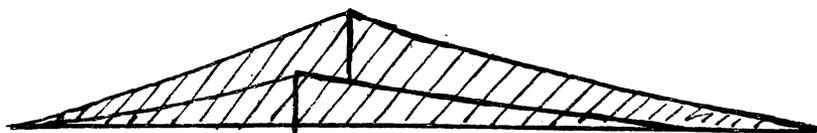
Lors des remblais, on établit sur les talus des obstacles normaux à ceux-ci, de préférence des haies et des plantations. Dans certains cas, on doit protéger les tranchées par des véritables galeries de couverture ou tunnels. Lors ces raisons, on prolonge parfois les tunnels pour éviter les tranchées profondes d'accès.

§ 3. - Dispositifs employés. - On peut employer des haies vives ou plusieurs lignes parallèles, des lignes parallèles d'arbres (conifères) des zones étroites boisées. Les arbres doivent être protégés par des levées jusqu'à ce qu'ils soient assez résistants par eux-mêmes. On peut élever des digues en terre, à talus aussi raides que possible et de 50 cm. d'épaisseur en crête, des murs de pierres sèches, de 50 à 60 cm. d'épaisseur et de 2 à 3 m.

de hauteur, consolidés par des piliers distants de 5.00.



Type d'avois (Ch^{ino} de fer du Midi - France)



Dispositif russe.

On peut établir ces installations à demeure, en matériaux résistants et durables, demandant peu d'entretien, tels que le béton, qui constitue le mieux.

En Russie, on préfère le système de l'amovibilité. Les pare-neige sont mis en place vers l'hiver. Lorsque le 1^{er} enneigement de 2 à 3 m. est formé, on les arrache et on les replante au sommet de l'enneigement, un peu en aval de la 1^{ère} position. Le système ne convient

Les dispositifs les plus employés sont, d'après le système d'avois, des parois verticales de 1 à 3 m. de hauteur, dont la partie supérieure est souvent inclinée vers l'amont. Elles sont soutenues par des poteaux simples ou pinnelés, avec des contre-fiches vers l'aval en cas de grande hauteur. On emploie souvent d'immenses traverses. La fermeture est formée de madriers jointifs ou à claire-voie, de 3 à 5 cm. d'épaisseur, ou bien des osiers ou clouons liés ou tressés, du treillis métallique mince (mailles de 9 mm très efficaces).

On a tout récemment mis en usage sur des plateaux élevés du Sud-Ouest Français, pour la protection des lignes de la Cie du Midi, des pare-neige du type d'avois en pièces moulées amovibles, tout en béton (Voir Ann. des L^{tes} et Ch^{ies} 1926 fasc. 5).

que si l'on a de la main d'œuvre et suffisance pour de tels travaux, exécutés dans des conditions assez dangereuses.

§ 4. - Protection contre les avalanches. -

On distingue les avalanches de surface, formées par des entraînements superficiels de neige dus aux vents violents, et les avalanches de fond, qui se produisent au moment du dégel et sont les plus dangereuses. Elles se produisent dans des couloirs d'avalanches, présentant comme les torrents un bassin de réception (entonnait), une gorge ou couloir, et un cône de déjection. On doit écarter les voies de communication autant que possible de ces couloirs, sinon les faire passer en tunnel sous le cône de déjection comme pour les torrents. Les galeries de protection en bois ne sont pas toujours assez résistantes; il vaut mieux employer la maçonnerie ou le béton armé.

On peut aussi disposer dans les couloirs d'avalanches des obstacles: murs de pierres sèches, picquets en bois ou métalliques entourés de pyramides de pierres, cavaliers de terre, plantations, disposés de manière à arrêter progressivement les avalanches, à les déverser, les briser et les diriger vers des endroits où elles ne peuvent causer de dégâts. Ces dispositifs sont inclinés de 20 à 50° sur la direction des avalanches. Ces dispositifs s'établissent dans les couloirs et sur le cône. Dans le bassin de réception, on cherche à éviter la formation d'avalanches par la plantation, qui s'effectue progressivement, au moyen d'espèces appropriées, du bas vers le haut.

§ 5. - Chutes de pierres. - Dans les tranchées rocheuses profondes ou au flanc des parois rocheuses abruptes, il se produit parfois des chutes de pierres, généralement à certains endroits toujours les mêmes, la stratification et la nature des roches en ces endroits étant causes du phénomène.

La meilleure protection est assurée par des plantations. Si elles ne sont pas possibles, on établit des parois de protection et d'arrêt en pierres sèches, ou en vieilles bûches jointives. Elles doivent être solides et il faut craindre le rebondissement des pierres. Il est bon de prévoir une fouille en amont des parois d'arrêt. Dans certains cas, il faut des galeries ou tunnels de protection.
