

Intérieurs des rails, varie de 1^m,435 à 1^m,45; le champignon ayant 0^m,06, on compte d'axe en axe des rails 1^m,51 environ. Cette largeur a été presque universellement adoptée.

En France, la largeur de 1 mètre paraît prévaloir pour les voies étroites. Quelques lignes, cependant, ont été construites à la voie de 0^m,60 (voir page 8).

Sur les chemins de fer allemands, d'après le BO, la largeur de la voie des lignes à voie normale est, en alignement droit, de 1^m,435. La largeur de la voie des lignes à voie étroite est, en alignement droit, de 1 mètre ou de 75 centimètres.

Dans les courbes d'un rayon de moins de 500 mètres, on donne à la voie un surécartement ne dépassant pas 30 millimètres sur les lignes principales et 35 millimètres sur les lignes secondaires (il existe sur ces dernières des courbes de 180 mètres de rayon).

On peut tolérer, comme conséquence du service, des réductions de largeurs atteignant 3 millimètres et des augmentations de largeurs atteignant 10 millimètres; mais, en aucun cas, on ne doit dépasser 1,465 mètres sur les lignes principales et 1,47 sur les lignes secondaires.

Gares communes. — Il n'est pas inutile de signaler à ce propos que, dans les gares communes, on ne doit pas s'interdire la faculté de faire circuler les véhicules de la voie étroite sur les voies larges, afin de pouvoir profiter de toutes les installations nécessitées par le trafic de la ligne à voie large. Mais, au lieu de poser trois rails sur les voies et plaques communes, il est préférable d'en poser quatre et de centrer ainsi la voie étroite au milieu de la voie large, sans quoi on ne pourrait, à cause du défaut de symétrie, tourner sur plaque un wagon bout pour bout, et l'effort nécessaire pour effectuer cette rotation serait considérable, par suite du porte-à-faux.

Inclinaison des rails. — Le rail ne repose pas verticalement sur la traverse; il est nécessaire qu'il présente une certaine inclinaison, le bandage des roues des véhicules étant conique au lieu d'être parfaitement cylindrique, afin de faciliter le passage dans les courbes.

L'inclinaison est généralement de 1/20 et peut atteindre 1/10 sur certaines lignes avec courbes de faible rayon. Dans la voie à double champignon, elle est obtenue par la forme même du coussinet qui sert de support au rail.

Dans la voie à patin, où le rail repose directement sur la traverse, on entaille la traverse, de manière à donner au rail l'inclinaison voulue; c'est ce qu'on appelle le *sabotage de la traverse*.

Aux États-Unis les rails ne sont pas inclinés.

En Allemagne, le BO porte, qu'en alignement droit, les points des arêtes supérieures des deux rails d'une voie qui sont situés sur une

même perpendiculaire à l'axe de la voie doivent être au même niveau, exception est faite pour les raccords des dévers.

Surhaussement dans les courbes. — La pose de la voie dans les courbes nécessite plusieurs précautions, dont la principale est le surhaussement du rail extérieur à la courbe. Ce surhaussement est nécessaire par l'existence de la force centrifuge, qui, composée avec le poids des véhicules, donne une résultante s'écartant légèrement de la verticale; le véhicule s'incline et les roues tendraient à abandonner le rail extérieur, si l'on ne le surélevait d'une quantité qui varie avec le rayon de la courbe et la vitesse des trains.

Deux formules servent au calcul de ce surhaussement. L'une, *théorique*, et qui est employée par un certain nombre de Compagnies, peut s'écrire sous la forme :

$$h = \frac{0,0118V^2}{R};$$

h = Surhaussement;

V = Vitesse en kilomètres à l'heure;

R = Rayon de la courbe en mètres.

L'autre, *empirique*, qui est aussi d'un usage répandu :

$$h = \frac{V}{R}.$$

Dans ces deux formules, on suppose que l'écartement d'axe en axe des rails est de 1^m,51.

Si on compare ces deux formules, on verra qu'elles donnent le même résultat pour $V = 0$ et $V = 84^m,74$, mais que la formule $\frac{V}{R}$ donne un excès de dévers qui, d'abord nul, augmente avec la vitesse pour atteindre un maximum pour la vitesse de 42 kilomètres à l'heure, et décroît ensuite à mesure que la vitesse augmente, pour redevenir nul quand la vitesse atteint 84^m,74.

Cet excès de dévers, fourni par la formule $\frac{V}{R}$, correspond, du reste, entre 20 et 60 kilomètres à l'heure, à l'excès de dévers qu'on avait l'habitude de donner en se servant de la première formule théorique.

Lorsqu'on se sert de la formule $\frac{V}{R}$, on a soin de classer d'abord les lignes du réseau en plusieurs catégories, suivant qu'elles sont parcourues par des trains express, directs ou omnibus.

La Compagnie de P.-L.-M. emploie les quatre catégories suivantes :

$$\frac{40}{R}, \frac{50}{R}, \frac{60}{R}, \frac{70}{R};$$

la Compagnie du Nord, les trois suivantes :

$$\frac{40}{R}, \frac{50}{R}, \frac{75}{R},$$

et l'État français :

$$\frac{40}{R}, \frac{50}{R}, \frac{60}{R}.$$

La Société des Chemins de fer économiques, pour son réseau à voie normale de 1^m,45, admet la formule :

$$\frac{40}{R}.$$

Pour les lignes à voie étroite (1 mètre et au-dessous), il semble avantageux de maintenir un excès de dévers qui, du reste, n'a pas le même inconvénient que pour les grandes lignes, étant donné le faible écart qui existe entre les vitesses extrêmes des trains.

La Société des Chemins de fer économiques et la Compagnie de Bône-Guelma emploient la formule :

$$h = \frac{V^2}{122R} \left(1 + \frac{1}{10} \right).$$

La vitesse V , en kilomètres à l'heure, qui figure dans ces formules, doit être la vitesse de marche *inscrite au livret de marche des trains*, et il n'y a pas lieu de tenir compte des augmentations de vitesse permises en cas de retard.

Le maximum de surhaussement doit être fixé, pour tous les cas, à 150 millimètres.

En Angleterre, quelques Compagnies adoptent, pour le calcul du surhaussement, une formule semblable à la formule théorique que nous avons donnée ci-dessus et qui porte le nom de formule de *Molesworth*. Le North Eastern diminue dans une forte proportion les résultats obtenus avec cette formule ; les autres Compagnies, quoique à un degré moindre, agissent de même.

D'autres Compagnies, enfin (le Great Western, le North British, par exemple), n'ont pas de formules pour le calcul du surhaussement et laissent aux poseurs le soin de rechercher celui qui convient le mieux dans chaque cas particulier.

Quant à la question de vitesse et au maximum de surhaussement, on semble admettre les mêmes conditions que celles dont nous venons de parler précédemment.

Pour les lignes à double voie en pente, il semblerait utile de modifier le surhaussement, suivant qu'il s'agit de la voie en pente ou de la voie en rampe, la vitesse des trains n'étant pas généralement la même sur les deux voies. Toutefois, on ne paraît tenir compte de cette différence que lorsque la pente dépasse 6 millimètres par mètre.

Les chemins de fer autrichiens estiment que, dès que la vitesse dépasse 90 kilomètres à l'heure, la valeur-limite des rayons de courbe doit être fixée à 500 mètres. Ast est d'avis que les courbes de plus de 400 mètres de rayon peuvent être franchies sans danger à la vitesse d'environ 100 kilomètres à l'heure, même si elles n'ont pas de surhaussement.

Le BO allemand ne prévoit que la *longueur* et non la *hauteur* du surhaussement, parce que les principes servant de base au calcul du surhaussement de la file extérieure varient avec l'importance de la fatigue de la voie, et qu'en certains points, dans les courbes des branchements et dans les voies de formation, par exemple, on peut et on doit complètement renoncer au surhaussement.

Le surhaussement de la file extérieure du rail des voies en courbes doit se continuer en diminuant sur une longueur aussi grande que possible, égale au moins à 300 fois la valeur du surhaussement.

Surécartement de la voie. — Si le surhaussement dans les courbes est admis en principe par tous les ingénieurs de chemins de fer, il n'en est pas de même du *surécartement*, c'est-à-dire de la différence de largeur de la voie en courbe et en alignement droit.

Un certain nombre de Compagnies de chemins de fer admettent un surécartement pour les courbes même de grand rayon, c'est-à-dire au-dessus de 1.000 mètres (Grande Société des Chemins de fer russes, État russe, État néerlandais, État suédois), d'autres ont fixé la limite aux courbes d'un rayon inférieur à 1.000 mètres (chemins de fer hollandais, Grand Central belge, État danois, Midi, chemins de fer de la Méditerranée (Italie)), d'autres à 500 mètres et au-dessous (Est français, État belge, Paris-Orléans, Midi français, Chemins de fer économiques).

La Compagnie de P.-L.-M. n'admet de surécartement que pour les courbes d'un rayon égal ou inférieur à 200 mètres.

La Compagnie de l'Ouest n'admet aucun surécartement, ainsi que l'État français, qui, avant 1889, l'admettait.

Pour son réseau à voie de 1 mètre, la Société des Chemins de fer économiques admet un surécartement de 0^m,015 pour les courbes au-dessous de 250 mètres de rayon.

Les ingénieurs anglais ne donnent aucun surécartement à la voie, même dans les courbes de moins de 200 mètres de rayon.

Le surécartement est fonction du rayon de la courbe, de l'écartement des essieux des véhicules, du jeu de la voie en alignement droit et surtout aussi du profil du bandage de la roue ; cette dernière considération est très importante.

Le jeu de la voie en alignement droit est, en France, de :

21 millimètres pour les Compagnies de l'Ouest, du Nord, de l'Est et de l'État :

26 millimètres pour les Compagnies de P.-L.-M. et d'Orléans ;
25 millimètres pour la Compagnie du Midi.

En Angleterre, le jeu est moindre et réduit à 14 millimètres pour tous les véhicules, sauf pour les roues motrices des locomotives, où, par suite de la réduction d'épaisseur du mentonnet, le jeu est porté de 20 à 22 millimètres.

Nous donnons ci-dessous le jeu en alignement droit admis par quelques administrations de chemins de fer :

État belge.....	11 ^{mm} ,5	Nord Emp. Ferdinand.....	10 ^{mm} ,0
Grand Central belge.....	11 ,0	État néerlandais.....	10 ,0
État danois.....	10 ,0	Chem. de fer hollandais....	16 ,0
État suédois.....	19 ,0	Ch. d. f. de la Méd. (Italie) .	20 ,0
Gothard.....	10 ,0	Ch. d. f. de l'Adriat. (Italie) .	3 ,0
Chemins de fer économiques.	29 ,0	Chemins de fer portugais... .	23 ,0
Gr ^e Soc. d. ch. d. f. russes...	20 ,0	État russe..... de 10,0	24 ,0

Chemins de fer économiques (voie de 1 mètre)..... 25^{mm},0

Nous ne pouvons nous étendre plus longuement sur cette question importante du surécartement dans les courbes, mais nous terminerons en citant les conclusions du rapport de M. du Bousquet au Congrès des Chemins de fer, à Saint-Petersbourg, conclusions adoptées par celui-ci :

1^o Pour toutes les courbes de rayon égal ou supérieur à 500 mètres et avec le matériel normal des chemins de fer, le jeu de la voie en courbe peut rester le même qu'en alignement droit, et cela même pour les lignes dont le jeu de la voie en alignement droit n'a qu'un minimum de 10 millimètres.

2^o Pour les courbes d'un rayon inférieur à 500 mètres, une augmentation du jeu de la voie paraît être utile. Cette augmentation doit être d'autant plus faible que le jeu en alignement droit est plus grand : elle dépend aussi de la forme du profil du boudin.

Aux changements de voie, aux croisements et aux traversées, l'écartement de la voie est toujours réduit ; cette réduction est généralement de 6 millimètres.

Raccordements. — Dans une courbe, le surhaussement devrait, *théoriquement*, exister sur toute la longueur de la courbe, à partir du point de tangence. Mais, *pratiquement*, on ne peut obtenir subitement à ce point le surhaussement ; il faut le gagner peu à peu par un plan incliné qui est généralement de 1 à 2 millimètres par mètre. Mais ce plan incliné doit-il commencer avant le point de tangence, ou ne doit-il commencer, au contraire, qu'au point de tangence, ou bien doit-il être à cheval sur celui-ci en ne donnant alors au point de tangence que la moitié du surhaussement ?

1 *Bulletin du Congrès international des Chemins de fer*, août 1892.

Tous ces systèmes présentent des inconvénients et on a cherché à placer le plan incliné sur une courbe de raccordement dont les rayons de courbure successifs varient depuis l'infini jusqu'au rayon de la courbe : chaque point de cette courbe correspond ainsi au surhaussement graduel, et les réactions des véhicules se trouvent annulées. Cette courbe de raccordement est généralement une parabole cubique 1.

Un certain nombre de Compagnies françaises ou étrangères admettent le raccordement parabolique, mais d'autres ne l'ont jamais admis ou l'ont abandonné. Ainsi, la Compagnie P.-L.-M. a toujours employé le raccordement circulaire légèrement remanié au jugé par les poseurs. La Compagnie du Nord, qui employait les raccordements paraboliques, a abandonné les rigueurs de cette règle en laissant aux chefs poseurs le soin de faire disparaître au jugé les jarrets de la voie, ceux-ci arrivent presque instinctivement à l'établissement de la portion de parabole du raccordement théorique.

Il est de toute nécessité d'établir un alignement droit entre deux courbes de sens contraire ; malheureusement, sur certaines lignes construites au début, on n'a pas tenu compte de cette condition essentielle, et il en résulte de très grandes difficultés pour répartir le surhaussement d'une manière convenable. Quelle doit être la longueur de cet alignement ? Certaines Compagnies admettent une longueur de 100 mètres, mais il semble résulter de la pratique que la longueur minimum peut être comprise entre 60 et 40 mètres pour les voies normales et se réduire à 20 mètres pour les voies de 1 mètre.

Règles du BO allemand. — Dans les voies principales directes, les sections en alignement droit et celles en courbe doivent être reliées par des courbes de raccordement. Entre deux courbes de sens contraire de voies principales directes, on intercale un alignement droit qui doit avoir, entre les extrémités des dévers, une longueur minima de 30 mètres pour les lignes principales et 10 mètres pour les lignes secondaires.

Rails longs et rails courts dans une courbe. — Dans les courbes, le développement du rail extérieur est plus grand que celui du rail intérieur. Il est donc indispensable d'employer un certain nombre de

1 Cette question des raccordements a fait l'objet de nombreuses études ; voir notamment : Chavès (*Société des Ingénieurs civils*, 3^e cah., 1865) ; Nordling (*Annales des Ponts et Chaussées*, 3^e cah., 1867) ; Comblor (*Annales des Ponts et Chaussées*, 3^e cah., 1869), dont la méthode a été adoptée par différentes Compagnies, notamment par la Compagnie de l'État et l'État belge ; du Bousquet (*Bulletin du Congrès international*, août 1892) ; Max. de Leber (*Revue des Chemins de fer*, janvier 1893).

rails courts pour la file intérieure. On obtient cette quantité N par la formule suivante :

$$N = \frac{D}{l} \left(1 - \frac{R - \frac{1}{2}e}{R + \frac{1}{2}e} \right).$$

D = Développement total de la courbe extérieure ;

l = Quantité dont le petit rail est plus court que le grand ;

R = Rayon de la courbe ;

e = Largeur de la voie.

Espacement des traverses. — Les joints des rails sont, en général, en porte-à-faux ; ils sont tantôt correspondants, tantôt alternés, mais plus souvent correspondants.

L'espacement des traverses dépend nécessairement de la charge que doit supporter la plate-forme sur laquelle est posée la voie.

Le calcul du travail du métal dans le rail, sous l'influence des charges mobiles, est une question très difficile. Lorsqu'une voie est soumise à l'action d'une charge roulante, les rails qui constituent cette voie ne se comportent nullement comme une poutre continue reposant sur des points fixes. Les traverses de support s'enfoncent dans le ballast, matière plus ou moins élastique, et la courbe de déformation suit d'une manière plus ou moins approchée ces enfoncements des traverses. Cette dernière considération rend le calcul extrêmement compliqué.

Dans les voies actuelles, le travail du métal atteint généralement, au milieu du rail, 12 kilogrammes par millimètre carré, et, au joint, 21 kilogrammes, c'est-à-dire à peu près la moitié de la limite d'élasticité du métal généralement employé pour les rails. Ci-dessous quelques chiffres sur l'espacement des traverses tel qu'il était adopté avec les anciens rails :

¹ Cette question a été étudiée par M. Zimmermann, dans son ouvrage très complet sur la matière et qui a pour titre : *Die Berechnung des Eisenbahn-Oberbaues*, et par M. Coëard, dans ses *Recherches expérimentales des conditions de stabilité des voies en acier*, publiées dans la *Revue générale des Chemins de fer* en 1880.

France.

Est....	Rails de 12 ^m ,00 ; 16 traverses : espacement			moyen 0,77 joint 0,60
Nord	—	14	—	moyen 0,87 joint 0,70
Ouest	—	15	—	moyen 0,83 joint 0,60
P.-L.-M.	—	18	—	moyen 0,72 joint 0,54
Midi....	Rails de 11 ^m ,00 ; 14	—	—	moyen 0,82 joint 0,60
P.-O.	—	14	—	moyen » joint »

Dans ces dernières années, par suite de l'augmentation de poids des nouvelles machines, on a augmenté aussi le nombre de traverses en même temps que l'on renforçait le rail lui-même. Au dernier Congrès des chemins de fer (Berne, 1910), M. Blum a indiqué 0^m,40 à 0^m,60 comme distance moyenne entre traverses de joints en Alsace-Lorraine ; en Bavière, on descend à 0^m,34. M. Müntz, de l'Est français, a signalé les excellents résultats du joint entre traverses espacées de 0^m,42 d'axe en axe, employé depuis vingt ans sur son réseau. Les traverses sont ainsi à 0^m,17 environ entre faces intérieures.

Les traverses sont enfoncées dans le ballast, qui est bourré tout autour, mais en laissant un léger creux au milieu, de manière que la traverse ne porte que sous le rail. Le ballast est réglé au niveau du rail du côté extérieur ; à l'intérieur, il est nivelé un peu au-dessus de la traverse.

En Angleterre, les Compagnies de chemins de fer donnent presque toujours au ballast une épaisseur de 0^m,51. Le niveau supérieur de celui-ci affleure, tant à l'intérieur des voies que dans l'entre-voie et sur les accotements, avec la surface supérieure des traverses. En général, la couche de ballast ne dépasse pas en largeur l'arête extérieure des traverses.

Écartement des voies. — D'après le BO allemand, l'écartement d'axe en axe de deux voies ne doit pas être inférieur à 3,50 mètres. L'écartement entre deux paires de voies ou entre une paire de voies et une troisième voie doit être de 4 mètres au moins d'axe en axe.

Dans les gares, à l'exception des voies de transbordement, les voies doivent être écartées au moins de 4,5 mètres d'axe en axe : des dérogations pourront être autorisées.

Les voies destinées à être séparées par un quai doivent être espacées d'au moins 6 mètres d'axe en axe.

Résistance de la voie et des ponts. — En France, les épreuves à faire subir aux ponts métalliques supportant des voies de chemins

de fer ainsi qu'à ceux établis pour le passage des voies de terre ont fait l'objet d'une circulaire ministérielle du 29 août 1891 revisant la circulaire ministérielle du 9 juillet 1877 sur les ponts métalliques et publiant, d'une part, le nouveau règlement relatif à ces épreuves, et d'autre part, des instructions pour l'application de ce règlement.

D'après le BO allemand, les voies et les ponts parcourus par des locomotives doivent pouvoir supporter avec sécurité des véhicules dont la charge par roues (mesurée au repos) est de 7.500 kilogrammes. En cas de construction nouvelle ou de reconstruction, cette charge sera portée à 8 tonnes en général et à 9 tonnes sur les voies particulièrement fatiguées.

La résistance des ponts nouveaux ou reconstruits sera calculée au moins pour la charge mobile indiquée ci-après :

Soit un train composé de deux locomotives placées dans la position la plus défavorable et d'un nombre illimité de véhicules attelés d'un seul côté ; les charges par essieu et les écartements seront :



ou bien :

Un essieu chargé de 20 tonnes, ou

↓
20^t

Deux essieux chargés de 20 tonnes chacun, ou

↓ 1,5 ↓
20^t 20^t

Trois essieux chargés de 19 tonnes chacun, ou

↓ 1,5 ↓ 1,5 ↓
19 19 19

Quatre essieux chargés de 18 tonnes chacun, ou

↓ 1,5 ↓ 1,5 ↓ 1,5 ↓
18 18 18 18

Voies métalliques. — Depuis quelques années, l'emploi des traverses métalliques a pris un certain développement. En Europe, sur un réseau d'une longueur d'environ 213.000 kilomètres, on pouvait compter, en 1891, 16.457 kilomètres avec voie métallique, soit environ 7,70 0/0. La plus forte proportion est en Allemagne, où, pour un réseau d'une longueur de 40.480 kilomètres, on trouve 14.137 kilomètres sur traverses métalliques, soit 34,8 0/0. Dans ce pays, cependant, la progression semble un peu se ralentir, mais cela tient, peut-être, à l'augmentation du prix du métal dans ces dernières années.

En Afrique, la proportion est de 24,80 0/0 ; en Asie, de 48,75 0/0 ; en Australie, de 1,75 0/0 ; et en Amérique, de 1,94 0/0.

Dans le monde entier, pour un réseau d'une longueur totale d'envi-

ron 582.275 kilomètres, on compte 39.908 kilomètres sur traverses métalliques, soit 6,85 0/0.

On emploie plusieurs systèmes de voies métalliques :

1^o La voie sur *plateaux métalliques*, caractérisée par les systèmes de Livesey, de Mac-Lellan, de Denham, employés dans les pays tropicaux et principalement aux Indes anglaises ; de Muller, appliqué sur le chemin de fer militaire de Berlin ;

2^o La voie sur *traverses métalliques* : c'est le système le plus répandu et les types de traverses sont très nombreux. Nous citerons parmi eux les traverses Vautherin, Berg et Marche, Hiltf, Heindl, employées sur les chemins de fer autrichiens ; Post, à profil constant ou variable ;

3^o La voie sur *longrines métalliques*, caractérisée principalement par les voies Hiltf et Harmann, employée en Allemagne.

Les rails sont fixés sur les traverses ou sur les longrines soit au moyen de crapauds et de cales ou clavettes, soit au moyen de crapauds et de boulons : c'est ce dernier système qui domine actuellement ; mais, il faut bien le dire, c'est là le point faible de la voie métallique.

Afin d'obtenir une voie stable, il est nécessaire d'employer des traverses d'un poids d'au moins 60 à 70 kilogrammes pour les voies très fatiguées, et le métal doit être en acier doux.

La voie posée sur traverses métalliques coûte-t-elle moins cher d'entretien que la voie sur traverses en bois ? Cette question dépend de bien des circonstances, et surtout du ballast employé : les dépenses d'entretien paraissent également diminuer au bout des deux ou trois premières années de service. En fait, les ingénieurs ne paraissent pas encore fixés sur cette comparaison des dépenses d'entretien, et le Congrès de Saint-Petersbourg a conclu à ce sujet : qu'il ressortait des renseignements présentés que la traverse métallique, quand elle est placée dans des conditions d'emploi rationnelles, peut produire une économie dans la dépense de main-d'œuvre d'entretien. Mais il conclut aussi à la continuation des expériences.

Aiguilles. — Les aiguilles ou changements de voies sont destinées à donner passage d'une voie sur une autre. Elles se composent d'une paire de lames mises en mouvement par un levier de manœuvre, à l'aide d'une tringle de connexion, et venant, suivant la position du levier, s'appliquer contre l'un ou l'autre des rails de la voie. Les rails extrêmes sont toujours fixes et continus ; l'une des lames constitue le rail intérieur de la voie déviée, et l'autre, le rail intérieur de la voie normale.

1 On trouvera des renseignements complets sur les différents systèmes de voies métalliques dans l'ouvrage de M. Harmann, ayant pour titre : *Das Eisenbahn Geleise*, et dont la *Revue générale des Chemins de fer* a donné un compte rendu dans le numéro d'octobre 1892.

DEUXIÈME PARTIE

TRACTION

CHAPITRE VIII

RÉSISTANCE DES TRAINS

§ 1. — Indication des résistances.

Comparaison des moyens de transport. — L'économie caractéristique des chemins de fer réside, d'une part, dans la substitution de la voie de fer aux chaussées empierrées ou pavées, d'où résulte une diminution de résistance au roulement; d'autre part, de la substitution de la locomotive aux moteurs animés, ce qui permet une augmentation de puissance considérable.

Un cheval peut porter à dos un poids de 150 kilogrammes; sur une route, il peut, selon la vitesse, traîner 1.000, 1.500 et même 3.000 kilogrammes (exemple l'ancien omnibus de Port-Marly à Rueil-gare), suivant que le chemin est en mauvais, en médiocre ou en bon état, tandis que, sur une voie de fer, il peut traîner jusqu'à douze chariots chargés de 300 kilogrammes de charbon, soit en tout 5.000 kilogrammes (exemple pris dans l'exploitation des mines de Sheffield).

Sous une autre forme, on peut dire que, pour un véhicule isolé, suspendu sur ressorts, circulant par un temps calme, la résistance au roulement, par tonne de charge brute et pour des vitesses variant de 1 à 3 mètres par seconde, est :

1 ^o Sur une bonne route pavée, de.....	15 à 30 kilogr. par tonne.
2 ^o — — empierrée, de..	30 à 45 —
3 ^o Sur des rails de tramways, de.....	7 à 10 —
4 ^o Sur des rails saillants, de.....	3 à 4 —

Résistances diverses à la traction. — Pour mettre un véhicule en mouvement sur une voie de fer, il faut vaincre un certain nombre de résistances variables, dont l'ensemble détermine quel doit être l'effort de traction.

Ces résistances sont les suivantes :

- 1^o La résistance due au glissement de la fusée de l'essieu dans le coussinet de la boîte à graisse ;
- 2^o La résistance due au roulement du bandage sur le rail ;
- 3^o La résistance due à l'influence de l'air et du vent ;
- 4^o La résistance due aux déclivités ;
- 5^o La résistance due aux courbes ;
- 6^o La résistance due aux obstacles accidentels.

§ 2. — Détermination des formules théoriques.

Frottement des fusées. — C'est un frottement de glissement; il dépend de la nature et de l'état des deux corps en contact, ainsi que du mode de graissage; d'après la loi de Coulomb, il est proportionnel à la pression qui le produit.

Soient P , le poids total du wagon; p , celui de ses essieux montés; f , le coefficient de frottement, c'est-à-dire le rapport constant entre le frottement et la pression. On a $P - p$, pression qui produit le frottement, et la valeur du frottement est $f(P - p)$.

Soient R le rayon de la roue, et r le rayon de la fusée; pendant un tour de roue, le travail du frottement sera $2\pi r f(P - p)$. A chaque tour de roue, le wagon parcourt une distance égale à $2\pi R$, de sorte que le travail de frottement rapporté à l'unité de parcours est :

$$\frac{2\pi r f(P - p)}{2\pi R} \quad \text{ou} \quad f(P - p) \frac{r}{R}.$$

Frottement des roues sur les rails. — C'est un frottement de roulement; il est proportionnel à la pression, inversement proportionnel au rayon de la roue et agit tangentiellement à cette dernière.

Soit f le coefficient de ce frottement, c'est-à-dire le frottement d'une roue de 1 mètre de rayon sous une pression égale à l'unité; la pression qui produit le frottement est égale à P ; le parcours du point d'application est le même que le parcours du wagon; le travail rapporté à l'unité de parcours du wagon est :

$$f \frac{P}{R}.$$

Résistance de l'air. — On admet que la résistance opposée par l'air est proportionnelle au carré de la vitesse et à la projection de la surface de ce corps sur un plan perpendiculaire à la direction du mouvement.

Soient S la surface de résistance du wagon; V , la vitesse; et K , un coefficient constant, le travail de cette résistance est :

$$KSV^2.$$

Total des résistances en alignement droit et en palier. — Si un wagon parcourt une voie droite et sans déclivité, le travail total à produire pour remorquer le wagon est exprimé par la formule suivante :

$$f(P - p) \frac{P}{R} + f' \frac{P}{R} + KSV^2.$$

Résistance due aux déclivités. — Lorsqu'un wagon est mis en mouvement sur une voie qui fait avec l'horizontale un angle α , le poids P du wagon se décompose en deux forces dont l'une $P \sin \alpha$ est parallèle à la direction du mouvement, et l'autre $P \cos \alpha$ est perpendiculaire à cette direction. Mais, sur les chemins de fer, l'angle α est assez petit pour que son cosinus puisse être, sans erreur sensible, considéré comme égal à l'unité ; la force $P \cos \alpha$ se confondra donc avec P , et le surcroît de résistance dû à l'inclinaison sera simplement égal à $P \sin \alpha$. Cette expression peut elle-même être remplacée par $P \tan \alpha$ à cause de la petitesse de l'angle α qui permet de confondre la longueur réelle du tracé avec sa projection horizontale. Or $\tan \alpha$ n'est autre que la pente par mètre ; si nous l'appelons i , la résistance due à la déclivité est :

$$Pi.$$

Cette expression représente également la valeur du travail de cette résistance pendant l'unité de parcours du wagon.

Résistance due aux courbes. — Elle se compose de trois parties : l'une produite par la solidarité des roues ; la seconde résulte du parallélisme des essieux ; la troisième est due à la force centrifuge. On néglige généralement celle-ci, parce qu'on la suppose annulée par le surhaussagement du rail extérieur.

La *solidarité des roues* produit un frottement dans les courbes ; en effet, la roue qui roule sur la file extérieure des rails parcourt un plus grand chemin que celle qui roule sur la file intérieure ; comme elles tournent ensemble et qu'elles ont le même diamètre, il faut nécessairement qu'elles glissent l'une ou l'autre ou toutes les deux ensemble sur les rails pour rattraper la différence de parcours. Soit R le rayon de la courbe mesuré sur l'axe de la voie, soit E l'écartement de celle-ci : lorsque le wagon avance de 1 la roue extérieure parcourt un chemin égal à $1 + \frac{E}{2R}$ et la roue intérieure $1 - \frac{E}{2R}$. La différence entre ces deux parcours ou $\frac{E}{R}$ représente le chemin parcouru par le frottement de glissement.

Pour simplifier, nous supposons que le glissement s'effectue sur un seul côté du wagon ; la pression exercée sur ce côté est alors $\frac{P}{2}$ et, si

nous appelons f' le coefficient du frottement, le travail de ce frottement sera :

$$f' \frac{P}{2} \frac{E}{R}.$$

Dans ce calcul on ne tient pas compte de la différence des diamètres de roulement des roues, diamètres qui ne sont pas égaux, en courbe, à cause de la conicité des bandages.

Le *parallélisme des essieux* produit également un glissement des bandages sur les rails : il en résulte un frottement dont le coefficient est encore f' . En appelant L la distance entre les essieux, on trouve que le travail correspondant au frottement est :

$$f' P \frac{\sqrt{E^2 + L^2}}{2R}.$$

La résistance due aux courbes se compose de deux termes et s'exprime par :

$$f' \frac{P}{2} \frac{E}{R} + f' P \frac{\sqrt{E^2 + L^2}}{2R}.$$

Résistance due aux obstacles accidentels. — Les défauts dans la surface des rails, la présence de petits corps étrangers sur la voie, les frottements dus aux mouvements de lacet, etc., font naître des résistances qui sont proportionnelles au poids du wagon et à sa vitesse ; on représente leur travail par le terme :

$$K'PV,$$

dans lequel K' est un coefficient constant.

Travail total. — Le travail total des résistances du wagon ou l'effort de traction nécessaire pour les vaincre se trouve représenté par la formule :

$$f(P - p) \frac{P}{R} + f' \frac{P}{R} + KSV^2 \pm Pi + f' \frac{PE}{2R} + f' P \frac{\sqrt{E^2 + L^2}}{2R} + K'PV.$$

Mais on peut remarquer que, pour un train entier, le poids p des roues est une fraction à peu près constante du poids total des véhicules. En prenant 1.500 kilogrammes pour le poids d'un essieu, 4.500 kilogrammes pour le poids d'un wagon vide et 4.500 kilogrammes également pour le poids de son chargement, on a $p = 1.500$ kilogrammes et $P = 9.000$ kilogrammes ; d'où :

$$P - p = 7.500 \text{ kilogr.} \quad \text{ou} \quad \frac{5}{6} P.$$

1 Sévén, *Cours de chemins de fer*, cité par Humbert dans son *Traité des Chemins de fer*.

En admettant cette approximation et en remplaçant $P - p$ par sa valeur dans la formule ci-dessus, on obtient :

$$\left(\frac{5}{6} f \frac{P}{R} + \frac{f}{R} + K'V + \frac{KSV^2}{P} \pm i + \frac{f'E}{2R} + \frac{f'\sqrt{E^2 + L^2}}{2R} \right) P.$$

Les quatre premiers termes de cette formule représentent la partie de la résistance qui est indépendante du tracé, celle qu'il faut vaincre d'un bout à l'autre du parcours ; c'est la résistance propre du train ; le cinquième terme représente l'influence des pentes ; les deux derniers celle des courbes.

§ 3. — Choix des formules pratiques.

Résistance propre du train. — Différentes formules ont été établies dans le but de réunir en bloc les trois résistances constituant la résistance propre du train.

Formule de Harding. — La plus ancienne, établie par M. Scott Russel et qui date de 1846, est basée sur des expériences faites par M. W. Harding ; elle donne, toutefois, des résultats sensiblement trop forts pour les faibles vitesses ; elle est suffisamment exacte pour les grandes vitesses et convient pour les trains de voyageurs.

$$R = 2,72 + 0,094V + 0,00484 \frac{SV^2}{P};$$

R = résistance en kilogrammes par tonne ;

V = vitesse en kilomètres à l'heure ;

P = poids du train ;

S = surface transversale maxima du train en mètres carrés. (On prend généralement S = 6 mètres.)

Formule de la Compagnie de l'Est. — A la suite d'expériences très complètes faites par la Compagnie de l'Est, MM. Vuillemin, Ghébard et Dieudonné ont établi les formules suivantes :

Trains de marchandises :

Vitesse de 12 à 32 km à l'heure.

Graissage à l'huile..... R = 1,65 + 0,05V

— à la graisse..... R = 2,30 + 0,05V

¹ Bulletin de la Société des Ingénieurs civils, 1867, p. 701.

Trains de voyageurs :

$$\text{Vitesse de 32 à 50 km à l'heure : } R = 1,80 + 0,08V + \frac{0,009SV^2}{P}$$

$$\text{— 50 à 65 km à l'heure : } R = 1,80 + 0,08V + \frac{0,006SV^2}{P}$$

$$\text{— 70 à 80 km à l'heure : } R = 1,80 + 0,14V + \frac{0,004SV^2}{P}$$

Ces formules, qui résultent d'expériences faites sur un matériel déjà ancien et qui n'était pas dans les conditions des véhicules actuels, surtout au point de vue du roulement, donnent aussi des chiffres trop forts.

Formule de la Compagnie d'Orléans. — La formule suivante, en usage à la Compagnie d'Orléans, paraît, au contraire, donner des résultats se rapprochant assez exactement de la pratique :

$$R = 1,50 + \frac{V^2}{1,100}.$$

Cette formule résulte des expériences qui ont été faites de 1857 à 1866 par M. C. Polonceau, puis continuées par M. Forquenot¹.

Formules Fink. — M. Fink, ingénieur autrichien, a proposé deux formules d'une application facile, l'une pour les circonstances favorables, l'autre pour les circonstances défavorables.

1^{re} Conditions favorables : voie et matériel en bon état, pas ou peu de courbes de moins de 500 mètres de rayon ; vent faible ; matériel graissé à l'huile, poids du train supérieur à 100 tonnes brutes :

$$R = 2,5 + 0,001V^2;$$

2^{es} Conditions moins favorables : nombreuses courbes de moins de 500 mètres ; vent fort ; graissage à la graisse ; poids du train inférieur à 100 tonnes :

$$R = 3,75 + 0,0015V^2.$$

On trouvera dans la *Revue générale des Chemins de fer*, numéro de mai 1890, les résultats très intéressants obtenus par M. Desdouts sur la résistance des trains. Ces expériences, faites avec le matériel de l'administration des chemins de fer de l'État, sembleraient indiquer, pour les grandes vitesses au moins, une résistance un peu inférieure à celle obtenue avec la formule d'Orléans.

Le matériel à bogie, d'après les expériences de M. Desdouts, semblerait donner une moyenne de résistance inférieure de 20 à 30 0/0 à

¹ Bulletin de la Société des Ingénieurs civils, 1868.

celle du matériel ordinaire; cette différence s'applique aux grandes vitesses et disparaît à la vitesse de 15 kilomètres à l'heure.

Résistance due aux déclivités. — L'influence des pentes est représentée, dans la formule générale de la résistance, par le terme i , qui mesure l'inclinaison de la ligne. On admet que chaque millimètre de rampe augmente la résistance de 1 kilogramme par tonne et que chaque millimètre de pente la diminue de la même quantité.

Résistance due aux courbes. — Si on prend pour f , E et L leurs valeurs courantes $f' = 0^m.20$, $E = 0^m.50$, $L = 3^m.60$, et qu'on porte ces valeurs dans la partie de la formule générale correspondant aux courbes, on a :

$$\frac{f'E}{2R} + \frac{\sqrt{E^2 + L^2}}{2R} = \frac{550}{R},$$

ce qui donne :

Pour $R = 1.000$ mètres, résistance par tonne	0 ^k 55
— 500 mètres, —	1 ,10
— 300 mètres, —	1 ,80

Mais les chiffres que l'on emploie dans la pratique sont un peu différents.

En pratique, on admet souvent les surcroits de résistance suivants :

Rayon de la courbe.	Augmentation de résistance par tonne.
1.000 mètres.....	0 ^k 5,30
500 —	1 ,50
300 —	3 ,00

Citons la formule employée par la Compagnie d'Orléans

$$R = \frac{1.000NV}{R^2},$$

dans laquelle N = nombre de véhicules; V = vitesse en kilomètres; R = rayon de la courbe.

D'après M. Polonceau, le supplément d'effort imputable aux courbes aurait les valeurs suivantes, pour un train composé de 35 wagons à marchandises marchant à 25 kilomètres à l'heure :

Rayon des courbes.	Augmentation de résistance par tonne.
1.500 mètres.....	0 ^k 5,00
1.400 —	0 ,05
1.300 —	0 ,15
1.200 —	0 ,30
1.100 —	0 ,50
1.000 —	0 ,75
900 —	1 ,05
800 —	1 ,40
700 —	1 ,80
600 —	2 ,25
500 —	2 ,75
400 —	3 ,30
300 —	3 ,90

Des expériences faites par M. Forquenot ont donné des résultats un peu moins forts pour les grands rayons :

Rayon des courbes.	Augmentation de résistance par tonne :	
	Train de 40 wagons vitesse 25 kilomètres.	Train de 12 wagons vitesse 50 kilomètres
1.800 mètres.....	0 ^k 5,35	0 ^k 5,40
500 —	1 ,40	1 ,50
300 —	3 ,90	4 ,10

Des expériences faites à faible vitesse sur le chemin de fer de l'État saxon¹ ont donné les résultats suivants :

En palier et alignement droit	2 ^k 5,48	
— et courbes de 283 ^m de rayon...	3 ,92, soit en plus...	1 ^k 5,44
— et courbes de 170 ^m de rayon...	5 ,81	— ... 3 ,33

Des expériences faites à la Compagnie Paris-Lyon-Méditerranée ont donné les résultats suivants :

Rayon des courbes.	Augmentation de résistance par tonne :		
	trains express 10 véhicules.	trains de voyageurs 20 véhicules.	trains de marchandises 50 véhicules.
1.800 mètres....	0 ^k 5,50	0 ^k 5,55	0 ^k 5,75
800 —	0 ,60	0 ,70	0 ,90
500 —	1 ,00	1 ,15	1 ,50
400 —	1 ,20	1 ,50	1 ,80
300 —	1 ,70	2 ,10	2 ,50
250 —	2 ,00	2 ,30	3 ,00

¹ Revue générale des Chemins de fer, juin 1892.

Le Ministre des Travaux publics a institué, en 1892, une Commission dite *Commission des courbes à faible rayon*, dont le but était d'étudier si le matériel normal des Compagnies françaises pouvait circuler dans des courbes de 200 et 150 mètres de rayon et de déterminer le surcroît de résistance provenant de cette circulation. Ces expériences ont été exécutées à Noisy-le-Sec, sur le réseau de l'Est.

Il résulte du rapport de M. Le Chatelier¹, secrétaire de la Commission, dont les conclusions ont été approuvées par le Congrès des Chemins de fer tenu à Saint-Petersbourg, en août 1892, que :

1° Le matériel ordinaire actuel de la voie normale peut généralement passer dans des courbes de 150 mètres de rayon, à vitesse réduite :

2° Que le surcroît de résistance dû aux courbes peut être évalué en pailier à 4^k,9 par tonne pour les courbes de 200 mètres de rayon et à 6 kilogrammes pour les courbes de 150 mètres de rayon.

Le rapport ajoute, toutefois, que ce chiffre n'est qu'une indication et qu'il est bien entendu que le surcroît de résistance peut varier dans des limites très étendues.

Ces essais ont démontré que, pour des vitesses inférieures à 30 kilomètres à l'heure, dans la courbe de 200 mètres, et à 40 kilomètres, dans la courbe de 150 mètres, *sur voie sans dévers*, le surcroît de résistance devient invariable. Pour des vitesses supérieures, il croît avec la vitesse, mais des vitesses supérieures sont inadmissibles pour d'aussi faibles rayons.

On a également trouvé que le dévers avait une influence favorable et que, pour des rayons de 200 et 150 mètres, la réduction de résistance était de 20 0/0 pour un dévers de 0^m,08 et de 30 0/0 pour un dévers de 0^m,16.

L'influence de l'écartement des rails, ou du jeu des essieux montés dans la voie, ne paraît pas avoir une importance sur la résistance.

Des voitures à écartements respectifs de 3^m,50, 5 mètres et 5^m,90 ont fourni des valeurs absolues de surcroît de résistance très voisines et, d'ailleurs, peu élevées : l'écartement des essieux a donc peu d'influence sur la résistance.

La forme de profil du bandage paraît, au contraire, avoir une grande importance. Les bandages dont le boudin a une forme coupante, comme ceux employés sur le matériel de la Compagnie de l'Ouest, ont donné dans les courbes une atténuation de 1/3 sur le surcroît de résistance correspondant aux bandages normaux. Disons à ce propos que les grands réseaux français se sont mis d'accord en 1908, sur des profils à adopter pour les bandages des locomotives et des véhicules.

Résistance de la machine et du tender. — A la résistance du train, calculée d'après les formules précédentes, et en tenant compte

¹ Bulletin du Congrès international des Chemins de fer, août 1892.

des résistances dues aux rampes et aux courbes, il faut ajouter celle de la machine et de son tender. Cette résistance se compose de trois éléments :

1° Résistance de la machine et de son tender considérés comme étant de simples véhicules ;

2° Résistance due aux frottements du mécanisme, la machine roulant à vide ;

3° Résistance due aux frottements additionnels résultant de la pression de la vapeur.

Formules de la Compagnie d'Orléans. — La Compagnie d'Orléans prend pour chiffres des résistances propres de la machine :

Machines à roues libres.....	12 kilogr. par tonne
— à 4 roues accouplées.....	15 —
— à 6 roues accouplées.....	18 —
— à 8 et 10 roues accouplées.....	20 —

On applique au calcul de la résistance du tender, lorsqu'il est séparé, la même formule que pour les wagons.

Formule de la Compagnie de l'Est. — D'après MM. Vuillemin, Ghébard et Dieudonné, ingénieurs des chemins de fer de l'Est, la résistance totale de la machine seule peut être approximativement évaluée ainsi par tonne de son poids :

Machines à roues libres.....	9 à 10 kilogrammes
— à 4 roues accouplées.....	11 à 12 —
— à 6 —	15 —
— à 8 —	25 —

La partie de cette résistance spécialement due au mécanisme peut être représentée par les chiffres suivants, par tonne du poids de la machine :

Machines à roues libres.....	5 kilogrammes
— à 4 roues accouplées.....	7 —
— à 6 —	9 —
— à 8 —	14 —

Si on considère la machine réunie au tender, la résistance totale est, d'après les ingénieurs de l'Est, par tonne du poids de ces deux véhicules réunis, aux vitesses normales du service :

Machines à roues libres.....	8 ^k ,000
— à 4 roues accouplées.....	10 ,500
— à 6 —	12 ,500
— à 8 —	20 ,000

La résistance du tender seul peut être évaluée à environ 6 kilogrammes par tonne pour les trains de marchandises, et à 7 ou 8 kilogrammes pour les trains express.

Formules de Gooch. — En Angleterre, M. Daniell Gooch a proposé, d'après une loi énoncée par M. de Pambour¹, de représenter la résistance de la machine par la formule :

$$R = C + 0,15 \frac{T}{V},$$

dans laquelle C est une résistance constante indépendante du travail et de la vitesse de la machine ; T, le travail disponible sur l'essieu moteur ; V, la vitesse de la machine ; $\frac{T}{V}$ représente l'effort de traction mesuré sur les roues motrices. D'après M. Couche, la relation ci-dessus ne peut être établie avec certitude.

Formules de Welkner. — En Allemagne, M. Welkner a proposé de représenter par les formules suivantes la résistance totale d'une machine à six roues et de son tender :

$$\begin{aligned} \text{Avec les roues libres} & \dots\dots\dots R = 6 + 0,0044V^2 \\ \text{— 4 roues accouplées} & \dots\dots\dots R = 8 + 0,0044V^2 \\ \text{— 6 — — — — —} & \dots\dots\dots R = 12 + 0,0044V^2 \end{aligned}$$

dans lesquelles R est la résistance en kilogrammes, et V la vitesse en kilomètres à l'heure.

Formule Sanzin. — Après de nombreuses expériences exécutées avec des locomotives à vapeur de types et de constructions variés, roulant seules et à vide sur des déclivités de grande longueur, M. Sanzin a établi la formule ci-dessous, donnant la résistance des locomotives en fonction de leur poids, du nombre d'essieux accouplés et de la vitesse :

$$w = \frac{L(1,8 + 0,015V) + R \left(a - \frac{V}{D} \right) + 0,006FV^2}{G},$$

dans laquelle :

w = la résistance totale spécifique de la locomotive et du tender en kilogrammes par tonne ;

L = charge sur les essieux porteurs de la locomotive et du tender en tonnes ;

R = charge sur les essieux accouplés de la locomotive en tonnes (poids adhérents) ;

G = poids total (L + R) de la locomotive et du tender en tonnes ;

V = vitesse en kilomètres à l'heure ;

D = diamètre des roues accouplées en mètres ;

F = surface frontale de la locomotive en mètres carrés, tout compris ;

¹ *Traité des Locomotives*, 2^e édition, 1840.

a et b sont des coefficients dont les valeurs, données ci-dessous, ont été trouvées par l'expérience et sont fonction du nombre de roues accouplées :

$$\begin{array}{lll} \text{Pour locomotives à 2 essieux accouplés : } a = 5,5 & b = 0,08 ; \\ \text{— 3 — — — — —} & a = 7, & b = 0,10 ; \\ \text{— 4 — — — — —} & a = 8, & b = 0,28 ; \\ \text{— 5 — — — — —} & a = 8,8 & b = 0,36. \end{array}$$

Résistance totale d'un train. — Lorsqu'on veut exprimer approximativement la résistance totale d'un train, y compris la machine et le tender, on se contente quelquefois d'augmenter de 25 0/0 le coefficient de la formule de Harding et d'y remplacer P par le poids total P', comprenant la machine et le tender : en prenant S = 5 mètres carrés, cette formule devient alors :

$$R = 3,40 + 0,118V + 0,03 \frac{V^2}{P'}.$$

Elle donne les résultats suivants pour les différentes valeurs de V et de P'.

V	P' = 100 tonnes	P' = 200 tonnes	P' = 300 tonnes
kilom. à l'heure	kilogr.	kilogr.	kilogr.
30	7,21	7,08	7,03
40	8,60	8,36	8,28
60	11,56	11,02	10,84
80	14,76	13,80	13,48
100	18,20	16,70	16,20

§ 4. — Exemples numériques.

Premier exemple. — 1^{er} Un train express pesant 150 tonnes est remorqué à la vitesse de 70 kilomètres à l'heure par une machine pesant 48 tonnes attelée à un tender pesant 34 tonnes, sur une rampe de 5 millimètres ; quelle sera la résistance ?

La résistance par tonne sera, d'après la formule d'Orléans (p. 94),

$$R = 1,50 + \frac{70^2}{1,400} = 5^{\text{kg}},95 ;$$

en y ajoutant la résistance due à la rampe de 5 millimètres, qui est de 5 kilogrammes, on aura :

$$R' = 5^{\text{kg}},95 + 5^{\text{kg}} = 10^{\text{kg}},95.$$

Le poids total du train est de :

$$150^T + 48^T + 34^T = 232^T.$$

La résistance du train est donc de :

$$10^k,95 \times 232^T = 2.540^k,40.$$

La résistance de la machine, d'après les chiffres admis par la Compagnie d'Orléans (p. 98), et en admettant une locomotive à 2 essieux couplés, est de :

$$48^T \times 15^k = 720^k.$$

La résistance totale au contact des roues motrices sera donc :

$$2.540^k,40 + 720^k = 3.260^k,40.$$

Deuxième exemple. — Un train pesant 80 tonnes est remorqué à la vitesse de 30 kilomètres à l'heure par une machine tender à 6 roues accouplées pesant 39 tonnes, sur une rampe de 16 millimètres par mètre avec courbes de 300 mètres de rayon ; quelle sera la résistance ?

La résistance par tonne sera, d'après la formule d'Orléans :

$$R = 1,50 + \frac{30^2}{1.100} = 2^k,32;$$

en y ajoutant la résistance due à la rampe de 16 millimètres, qui est de 16 kilogrammes, on aura :

$$R' = 2^k,32 + 16^k = 18^k,32.$$

La résistance due à la courbe de 300 mètres de rayon est de 3 kilogrammes par tonne, qui, ajoutée à la résistance précédente, donne :

$$18^k,32 + 3^k = 21^k,32.$$

Le poids total du train, y compris la machine, étant de :

$$80^T + 39^T = 119^T,$$

la résistance totale sera :

$$119^T \times 21^k,32 = 2.537^k,08.$$

La résistance de la machine tender à 3 essieux accouplés étant de 18 kilogrammes par tonne, soit pour la machine :

$$39^T \times 18^k = 702^k,$$

on aura pour la résistance totale au contact des roues motrices :

$$2.537^k,08 + 702^k = 3.239^k,08.$$

Troisième exemple. — Un train pesant 118 tonnes est remorqué à la vitesse de 80 kilomètres à l'heure par la machine et le tender du premier exemple ci-dessus ; quelle sera la résistance ?

D'après les formules de l'Orléans, la résistance sera :

$$\left(1,50 + \frac{80 \times 80}{1.100}\right) 200 + (48 \times 15) = 2.182 \text{ kilogrammes.}$$

D'après la formule de Harding, modifiée comme il est dit page-87, elle sera :

$$3,40 + (0,118 \times 80) + 0,03 \frac{80 \times 80}{200} = 2.760 \text{ kilogrammes.}$$

ou, en prenant le chiffre indiqué dans le tableau de la même page pour $V = 80$ et $P = 200$:

$$200 \times 13,80 = 2.760 \text{ kilogrammes.}$$

Ainsi qu'il est dit page 92, la formule de Harding donne des résultats un peu forts.