

CHAPITRE XV

DÉTERMINATION, PAR LE CALCUL ET PAR L'EXPÉRIENCE, DES RÉSISTANCES AU MOUVEMENT DES WAGGONS SUR LES CHEMINS DE FER.

Nous avons eu déjà l'occasion de parler des résistances que le moteur éprouve pour remorquer les waggons sur les chemins de fer. L'étude analytique et numérique de ces forces est du plus grand intérêt pour l'ingénieur ; elle sert de base à tous les calculs qu'il entreprend dans le but de déterminer autant que possible l'influence qu'exercent, sur les frais d'exploitation, le tracé et le profil de la voie et le mode de construction du matériel roulant ; elle lui permet de déterminer d'avance, au moins par approximation, les résultats qu'il obtiendrait en apportant certaines modifications à ce matériel ou à ses moteurs.

Quand un waggon se meut sur une portion de voie droite et de niveau, les résistances normales qu'il éprouve sont de trois espèces, savoir :

1° Le frottement des fusées qui tournent dans les boîtes à graisse ;

2° Le frottement des roues qui se meuvent sur les rails, frottement dû à une déformation imperceptible des roues et des rails.

3° La résistance qu'oppose l'air au mouvement des waggons.

Indépendamment de ces résistances normales, il éprouve des résistances accidentelles, telles que celles dues à l'action du vent, aux inégalités de la voie, etc.

Les premières peuvent être seules soumises au calcul.

DÉTERMINATION ANALYTIQUE DES RÉSISTANCES NORMALES.

Résistance en plaine et en ligne droite.

Résistance due aux frottements. — Le mouvement de translation du waggon sur la voie donne lieu à un mouvement de rotation des roues et essieux.

Chaque élément superficiel des fusées se trouve successivement et d'une manière continue en contact avec un même élément des coussinets ; il y a donc glissement des fusées sur les coussinets, et, par conséquent, frottement.

Le frottement de glissement, d'après Coulomb et Morin, est proportionnel à la pression ; il varie avec la nature et l'état des surfaces et avec l'enduit ; mais il est indépendant de l'étendue de ces surfaces et de la vitesse¹.

Soit donc :

P la pression exercée par les coussinets sur les fusées, ou, autrement dit, le poids du waggon et de sa charge, moins celui des roues et essieux ;

f le coefficient de frottement, c'est-à-dire le rapport du frottement à la pression (rapport qui variera avec la matière dont sont composés les fusées et les coussinets, avec le fini de leur exécution et le mode de graissage) ;

Le frottement des fusées contre les coussinets sera :

$$fP.$$

Soit R le rayon des roues ;

Et r le rayon des fusées ;

Pour un tour de roues le waggon parcourra sur les rails un espace $= 2\pi R$. Chaque point des fusées sur les coussinets un autre espace $= 2\pi r$.

Tandis que le waggon parcourra un espace $= 1$, les fusées gliseront donc d'une quantité $\frac{2\pi r}{2\pi R} = \frac{r}{R}$.

¹ Nous verrons plus loin que de nouvelles expériences paraissent établir que le frottement de glissement diminue quand la vitesse augmente ; il paraîtrait même qu'il n'est pas tout à fait indépendant de l'étendue de la surface.

Le travail du frottement des fusées sera par conséquent pour ce même parcours :

$$fP \frac{r}{R}.$$

Le frottement des roues contre le rail est un frottement de roulement¹, car chaque élément de la jante des roues est mis successivement et d'une manière continue en contact avec un élément différent du rail. — *Admettons que le frottement de roulement est proportionnel à la pression; qu'il varie avec la nature et l'état des surfaces en contact; mais qu'il est indépendant de l'étendue de ces surfaces et de la vitesse.*

Soit p le poids des roues et essieux, $P + p$ sera la pression totale que les roues exercent sur les rails, f' le coefficient de frottement;

Nous aurons pour l'expression du travail du frottement de roulement pour un parcours égal à l'unité de distance :

$$f' (P + p).$$

La résistance au pourtour des roues varie avec la grandeur de la roue, car on sait que les grandes roues passent plus facilement par-dessus les obstacles que les petites. L'expérience donnera donc des valeurs variables pour f' , suivant que les roues seront plus ou moins grandes. Mais les roues des waggons étant toutes de même diamètre ou à peu près, et la résistance au pourtour étant très-faible, f' peut être considéré comme un coefficient constant pour des surfaces de contact semblables.

Résistance de l'air. — Lorsqu'un corps se meut dans un fluide indéfini en repos, l'atmosphère, par exemple, il éprouve une résistance de la part de ce fluide.

De nombreuses expériences entreprises pour déterminer les lois et l'intensité de cette résistance ont donné les résultats suivants, que nous empruntons à l'ouvrage de M. de Pambour.

¹ Cette expression est impropre, car la résistance au pourtour de la roue n'est pas réellement un frottement, c'est une résistance semblable à celle que la roue éprouverait pour passer par-dessus un obstacle. Nous conserverons toutefois l'expression de frottement de roulement, parce qu'elle est généralement admise.

La résistance de l'air est proportionnelle au carré de la vitesse. Elle est proportionnelle à la projection de la surface du mobile sur un plan normal à la direction du mouvement.

Elle est d'autant plus faible que le mobile est plus allongé dans le sens du mouvement¹.

Si deux surfaces se masquent exactement, la résistance éprouvée par la surface masquée est égale à une fraction de la résistance supportée par la surface antérieure. — Plus l'espace qui sépare les deux surfaces est faible, plus aussi la résistance exercée sur la surface masquée sera diminuée.

Soit Q la résistance cherchée ;

A la projection de la surface antérieure du corps traversant l'air suivant une direction normale ;

V la vitesse du mouvement ;

ε un coefficient variable avec la longueur du corps ;

θ un coefficient constant ;

On admet généralement que la résistance de l'air sera exprimée par la formule suivante :

$$Q = \theta \varepsilon A V^2.$$

Il en résulte que l'équation qui exprime le travail résistant total, pour l'unité de distance parcourue par un convoi qui se meut en plaine et en ligne droite, est :

$$T = fP \frac{r}{R} + f'(P + p) + \theta \varepsilon A V^2.$$

¹ Cette diminution de la résistance avec la longueur des corps s'explique de la manière suivante :

Supposons une plaque mince se mouvant dans l'atmosphère. L'air, après avoir débordé cette plaque, se précipite immédiatement derrière avec une grande vitesse, et entraînant dans son mouvement une poupe fluide, produit un vide relatif derrière. Mais, si le corps en mouvement est un prisme allongé, l'air, en suivant sa paroi latérale, perd d'abord une certaine portion de sa vitesse acquise, et par conséquent, après avoir dépassé la face postérieure de ce prisme, il ne se répand plus derrière lui qu'avec une force de plus en plus réduite : d'où résulte qu'il y produit un vide partiel ou une non-pression moins considérable que dans le cas d'une simple surface. Et, comme nous avons vu que la résistance définitive éprouvée par un corps en mouvement est la différence entre la pression de l'air en avant et le vide partiel créé en arrière, il s'ensuit que les corps allongés éprouveront définitivement dans l'air une résistance moindre que les corps dont l'épaisseur ne sera que très-faible.

Résistance sur une rampe en ligne droite.

Sur un plan incliné faisant avec l'horizon un angle α , la pesanteur qui sollicite le waggon, et qui est toujours verticale, se décompose en deux forces : l'une, perpendiculaire au plan, qui constitue la pression des roues sur ce plan; l'autre, parallèle aux rails, qui entraînerait le waggon vers le pied de la pente si elle n'était détruite par une force contraire. Si le waggon doit gravir la rampe, le moteur devra faire équilibre, non-seulement au frottement des waggons, mais encore à cette composante de la pesanteur parallèle au plan.

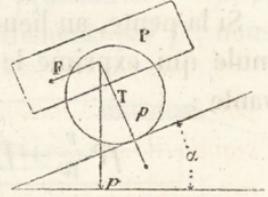


Fig. 628.

En se reportant à la figure 628, on voit aisément que cette force F est exprimée analytiquement par

$$(P + p) \sin \alpha.$$

On voit de même que la pression des coussinets sur les fusées, pression qui donne lieu au frottement de ces fusées¹, est égale à :

$$P \cos \alpha.$$

Et enfin que la pression exercée par les roues normalement aux rails a pour valeur :

$$(P + p) \cos \alpha.$$

Le travail que le moteur devra exercer sur le waggon pour que celui-ci conserve la vitesse qu'il possède à un instant donné sera donc, par unité de chemin parcouru :

$$fP \cos \alpha \frac{r}{R} + f' (P + p) \cos \alpha + \theta \varepsilon AV^2 + (P + p) \sin \alpha.$$

En général, les inclinaisons que l'on rencontre sur les chemins de fer sont telles que l'on peut considérer $\cos \alpha = 1$ ² et $\sin \alpha = \text{tg } \alpha$;

¹ Le moteur, en agissant dans la direction du mouvement sur la fusée, produit une nouvelle pression déterminant un nouveau frottement; mais cette pression est tellement faible, que généralement on n'en tient pas compte.

² Bien que $\sin \alpha$ soit une quantité très-petite aussi bien que celle dont $\cos \alpha$ diffère

nous avons donc pour expression pratique du travail à exercer par le moteur :

$$fP \frac{r}{R} + f' (P + p) + \theta \varepsilon AV^2 + (P + p) \operatorname{tg} \alpha.$$

Si la pente, au lieu d'être descendante, était ascendante, la formule qui exprime le travail de l'effort de traction serait la suivante :

$$fP \frac{r}{R} + f' (P + p) + \theta \varepsilon AV^2 - (P + p) \operatorname{tg} \alpha.$$

Résistance dans les courbes.

Les résistances qu'éprouve un waggon ou un convoi en parcourant une courbe sont de plusieurs espèces et sont dues à différentes causes.

En premier lieu, les roues sont généralement de diamètre égal et fixées sur les essieux. Or, soit :

a la demi-largeur de la voie (fig. 629);

ρ le rayon moyen de la courbe;

Les distances parcourues par les deux roues d'un même essieu dans le même temps seront entre elles comme les rayons des deux files de rails, soit

$$\therefore \rho - a : \rho + a.$$

Il résulte de cette différence dans les chemins parcourus par les deux roues qu'elles devront glisser; celle qui se trouve sur le rail intérieur le fera de manière à retarder son mouvement, celle du rail extérieur de manière à l'accélérer.

Le centre de figure du waggon parcourant un espace égal à 1, les

de l'unité, on ne saurait, comme pourraient le supposer des personnes peu habituées au calcul, la négliger comme cette dernière, car l'erreur commise serait alors beaucoup plus grande. En effet, soit $\cos \alpha = 1 - \beta$ et $\sin \alpha = \delta$. Si on suppose $\cos \alpha = 1$, l'erreur commise est de

$$\left\{ f \frac{r}{R} P + f' (P + p) \right\} \beta;$$

ou, comme l'ensemble de ces frottements est généralement représenté par le rapport $0,005 (P + p)$, l'erreur est de $0,005 \beta (P + p)$, c'est-à-dire des trois millièmes d'une quantité déjà très-petite multipliant le poids du waggon. $\sin \alpha$ étant considéré comme égal à δ , l'erreur commise serait de $(P + p) \delta$, soit d'une fraction du poids total égale à la petite quantité δ tout entière.

roues intérieures avanceront de $\frac{\rho - a}{\rho}$, les roues extérieures de $\frac{\rho + a}{\rho}$, le glissement de chacune d'elles sera donc de $= \frac{a}{\rho}$.

Or les roues exercent sur les rails une pression $= P + p$; si donc nous représentons le coefficient de frottement par f'' , nous

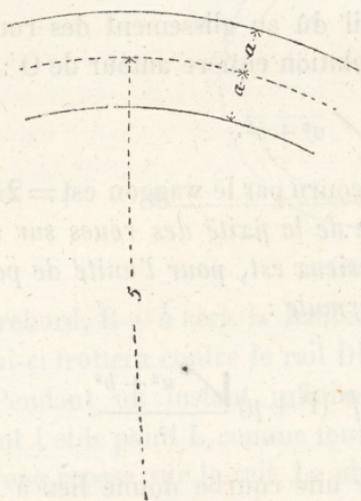


Fig. 629.

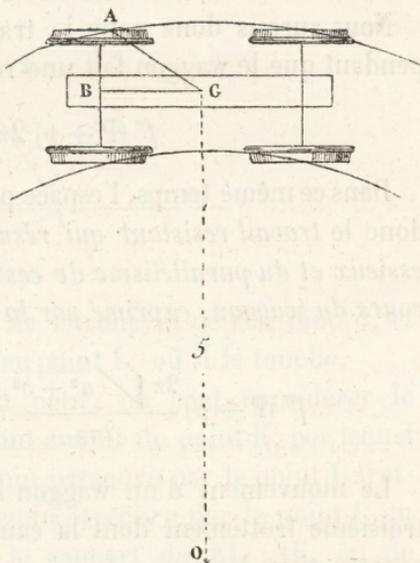


Fig. 630.

aurons pour expression du travail résistant résultant de la fixité des roues sur les essieux, pour l'unité de parcours :

$$f'' (P + p) \frac{a}{\rho}.$$

Les essieux d'un même wagon sont maintenus parallèles par les plaques de garde.

Les roues, au lieu d'être tangentes aux rails, prennent une direction qui est celle de la corde (fig. 630); par suite, les roues de devant tendent à se porter en dehors, celles de derrière à se porter en dedans des rails. Elles ne pourront donc rester sur ceux-ci que par un mouvement de glissement dans le sens du rayon de la courbe. De là un nouveau frottement.

Le glissement tangentiel que nous avons déterminé précédemment et le glissement suivant le rayon se combinent de telle sorte

que, tandis que le wagon décrit un cercle entier autour du centre O de la courbe, chacun des points de ce wagon décrit également une circonférence entière autour du centre de figure G du rectangle formé par les points de contact des roues et des rails¹. Le rayon correspondant à ces points de contact est $GA = \sqrt{a^2 + b^2}$, b étant la demi-distance BG des deux essieux.

Nous aurons donc pour le travail dû au glissement des roues pendant que le wagon fait une révolution entière autour de O :

$$f'' (P + p) 2\pi \sqrt{a^2 + b^2}.$$

Dans ce même temps, l'espace parcouru par le wagon est $= 2\pi\rho$, donc le travail résistant qui résulte de la fixité des roues sur les essieux et du parallélisme de ces essieux est, pour l'unité de parcours du wagon, exprimé par la formule :

$$f'' (P + p) \frac{2\pi \sqrt{a^2 + b^2}}{2\pi\rho} = f'' (P + p) \frac{\sqrt{a^2 + b^2}}{\rho}.$$

Le mouvement d'un wagon sur une courbe donne lieu à un troisième frottement dont la cause est indépendante du mode de construction des roues et essieux.

En effet, ce mouvement curviligne ne peut avoir lieu si un wagon n'est sollicité à chaque instant par une ou plusieurs forces qui le contraignent à s'écarter de la direction rectiligne que l'inertie tend à lui faire conserver. Ces forces sont les pressions que le rail extérieur de la voie exerce sur les bourrelets des roues extérieures; elles sont dirigées dans le sens du rayon de la courbe; leur expression est :

$$\frac{P + p}{g} \frac{V^2}{\rho},$$

dans laquelle g représente l'accélération due à la pesanteur, accélération égale à $9^m,81$ pour nos latitudes².

¹ Cela n'est pas mathématiquement exact. Le wagon ne tourne pas toujours autour de son centre de figure; mais nous pensons que cette supposition peut, en pratique, être admise sans inconvénient.

² Habituellement on explique les phénomènes que nous venons d'énoncer en disant

Ces pressions donnent lieu à un frottement $f''' \frac{P+p}{g} \frac{V^2}{\rho}$, f''' étant le coefficient de frottement des bourrelets des roues contre les rails.

Soit $R = IK$ le rayon de la roue (fig. 651), $h = KM$ la hauteur

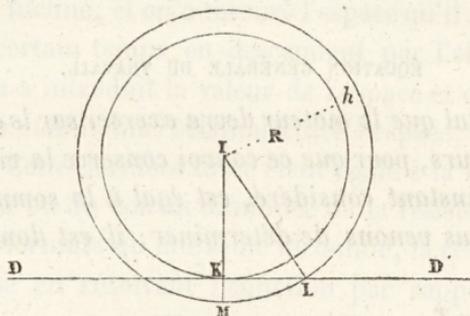


Fig. 651.

du rebord, $R + h$ sera la hauteur de la roue et de son rebord, et celui-ci frottera contre le rail DD' au point L , où il le touche.

Pendant un instant infiniment petit, on peut considérer le point I et le point L comme tournant autour du point K , par lequel la roue repose sur le rail. Le chemin parcouru par le point L frottant contre le rail sera donc au chemin parcouru par le point I , ou par le waggon lui-même, dans le rapport de $KL : IK$, ou de $\sqrt{(R+h)^2 - R^2} : R$, ou enfin de $\sqrt{2Rh + h^2} : R$.

Tandis que le waggon parcourra un espace $= 1$, le point L parcourra un espace $\frac{\sqrt{2Rh + h^2}}{R}$, et le travail du frottement dû à la force centrifuge sera, pour l'unité de parcours du waggon

$$f''' \frac{P+p}{g} \frac{V^2}{\rho} \frac{\sqrt{2Rh + h^2}}{R} \quad 1.$$

que le mouvement curviligné fait naître une *force centrifuge* qui applique les rebords des roues extérieures contre le rail extérieur de la voie.

Cette manière d'envisager la question n'est pas très-rationnelle; cependant nous nous servons, dans le courant de cet ouvrage, de l'expression *force centrifuge* parce qu'elle est adoptée par la plupart des auteurs.

¹ Nous avons cherché dans ces calculs à indiquer l'effet sensible et le résultat général, sans entrer dans des détails qui ouvrent un champ indéfini de doutes et de controverse sans grand profit pour la pratique. Les lecteurs qui voudront approfondir davantage la question pourront consulter des articles fort intéressants publiés dans les *Annales des ponts et chaussées* par MM. Dupuis et Reinhard, et un mémoire lu à l'Institut par M. Wissocq

Le travail résistant additionnel résultant du passage d'un convoi dans une courbe est donc, par unité de parcours du convoi :

$$f'' (P + p) \frac{\sqrt{a^2 + b^2}}{\rho} + f''' \frac{P + p}{g} \frac{V^2}{\rho} \frac{\sqrt{2Rh + h^2}}{R}.$$

ÉQUATION GÉNÉRALE DU TRAVAIL.

Le travail total que le moteur devra exercer sur le convoi pendant l'unité de parcours, pour que ce convoi conserve la vitesse qu'il possédait avant l'instant considéré, est égal à la somme des travaux partiels que nous venons de déterminer; il est donc exprimé par la formule :

$$T = fP \frac{r}{R} + f' (P + p) + 0,03AV^2 + (P + p) \operatorname{tg} \alpha + \\ + f'' (P + p) \frac{\sqrt{a^2 + b^2}}{\rho} + f''' \frac{P + p}{g} \frac{V^2}{\rho} \frac{\sqrt{2Rh + h^2}}{R}.$$

L'effort de traction s'exerce toujours suivant la direction du déplacement du moteur; on obtiendra donc sa valeur en divisant le travail moteur exercé pendant un certain temps par le chemin parcouru dans ce même temps. Comme nous avons déterminé constamment le travail moteur correspondant à un parcours égal à 1, il est évident que la valeur en kilogrammes de l'effort de traction sera la même que la valeur en kilogrammètres obtenue au moyen de la formule que nous venons de donner.

DÉTERMINATION DES COEFFICIENTS.

Expériences diverses.

Moyens d'expérimentation. — Il reste maintenant à établir la valeur des différents coefficients qui entrent dans cette formule. Coulomb a déterminé depuis longtemps les coefficients de glissement f et f' entre des surfaces métalliques graissées ou non graissées; mais, comme il n'a pas opéré exactement dans les conditions où se trouvent les véhicules roulant sur un chemin de fer, on a jugé convenable de les déterminer de nouveau par des expériences faites sur des wagons isolés ou sur des convois.

On a employé pour cela différents procédés.

Quelquefois on a intercalé un dynamomètre à ressorts ou le dynamomètre de M. Morin entre le moteur et les véhicules.

D'autres fois on a abandonné à lui-même un waggon ou un convoi sur un plan incliné, et on a mesuré l'espace qu'il avait parcouru au bout d'un certain temps en descendant par l'effet seul de la gravité; puis on a introduit la valeur de l'espace et du temps dans une formule qui établit une relation entre l'espace, le temps et la force motrice¹. Cette dernière force étant égale à la composante du poids du waggon ou du convoi diminuée de la résistance totale, on n'a plus dans la formule qu'une seule inconnue, la résistance totale. On la détermine en résolvant l'équation par rapport à cette résistance.

Un troisième moyen, pour déterminer la résistance d'un waggon, consiste à le faire marcher librement sur deux plans, inclinés en sens inverse, qui se raccordent par une courbe. Le waggon remonte le second plan incliné en vertu de la vitesse qu'il a acquise en descendant le premier; mais il s'élève sur le second plan à une hauteur moindre que celle dont il était descendu. La différence des deux hauteurs introduite dans une formule conduit à déterminer l'inconnue².

Enfin, on a laissé descendre un train de waggons sur un plan incliné. Le train était mis et entretenu en mouvement par la composante de son poids parallèle au plan; mais la résistance totale, comprenant les frottements, qui sont sensiblement indépendants de la vitesse et de la résistance de l'air, qui varie comme le carré de la vitesse, allait croissant avec la vitesse, jusqu'à ce que, devenue égale à la force motrice, elle lui fit équilibre. La vitesse cessait alors de croître, et le mouvement devenait uniforme. Notant la vitesse au moment où le mouvement était devenu uniforme, on avait pour

¹ Voir la formule dans le *Traité* de Wood, traduit de l'anglais par MM. de Montricher, de Ruolz, de Franqueville, et dans la seconde édition du *Traité* de Pambour sur les locomotives.

² Cette formule est très-simple; il en résulte que le rapport de la résistance à la charge a pour mesure la différence de niveau des points de départ et d'arrivée, divisée par la somme des espaces parcourus sur les deux plans: le calcul qui y conduit est développé dans le *Traité* de Wood, p. 429. (Note de M. Montricher.)

la valeur de la résistance à cette vitesse celle de la composante du poids du convoi.

Pour obtenir la résistance à une autre vitesse, on opérait sur un nouveau plan présentant une inclinaison différant de celle du premier, et de cette manière on pouvait déterminer la résistance pour autant de vitesses différentes que de plans diversement inclinés. Cette méthode est fort simple théoriquement, mais il est rare qu'on puisse en faire l'application, à cause de la difficulté qu'on éprouve à rencontrer sur un même point des plans d'une grande longueur, diversement inclinés.

Enfin, pour déterminer isolément le frottement sur les fusées, on a fait reposer les deux fusées d'un même essieu dans des coussinets établis sur deux chevalets. Sur l'essieu, on a monté une poulie et enroulé sur cette poulie une corde portant à une extrémité libre un poids exactement connu. L'expérience avait deux périodes. Dès que le poids cessait d'être retenu, il se mettait en mouvement et faisait tourner l'essieu avec une vitesse qui allait en croissant jusqu'à l'instant où la corde était entièrement déroulée. A ce moment, la corde se détachait spontanément de la poulie, et l'essieu continuait à tourner jusqu'à ce que le frottement de ses fusées eût complètement détruit sa puissance vive. Un compteur adapté à l'appareil donnait exactement le nombre de tours faits par l'essieu.

Expériences de M. Wood. — M. Wood, l'un des premiers qui aient essayé de déterminer la résistance des waggons, a employé d'abord le dynamomètre à ressorts; mais, ayant bientôt reconnu l'imperfection de cet instrument, il a cherché la résistance en mesurant l'espace parcouru par le waggon descendant sur un plan incliné. Il a trouvé de cette manière, pour la résistance totale de waggons se mouvant en ligne droite et en plaine, à des vitesses de 16 kilomètres par heure, de 4 à 5 millièmes du poids. Cette résistance, en réalité, n'est pas une fraction exacte de ce poids, car le frottement de glissement sur l'essieu n'est proportionnel qu'au poids P du waggon et de sa charge, moins les roues et les essieux, et la résistance de l'air est indépendante de ce poids; mais, aux vitesses auxquelles M. Wood a opéré, la résistance de l'air est peu sensible, et on ne commet qu'une erreur négligeable dans la pratique

en admettant que la résistance totale est une fraction du poids total.

Pour déterminer isolément la résistance au pourtour des roues, M. Wood a supprimé la caisse et lancé sur des plans inclinés des essieux isolés qu'il chargeait plus ou moins, au moyen de rondelles de plomb emmanchées sur ces essieux. Il supprimait ainsi le frottement sur les fusées; il rendait insensible la résistance de l'air, et obtenait comme expression de la résistance totale celle de la résistance au pourtour des roues.

Il a trouvé ainsi que *la résistance au pourtour de roues de 0^m,90 de diamètre était à peu près 0,001 du poids total.*

En employant la méthode décrite ci-dessus pour déterminer directement la résistance sur les fusées, il a trouvé *que le coefficient du frottement sur les fusées était, dans un état moyen des fusées, de 0,05, et, dans des circonstances exceptionnelles, avec un graissage continu parfait, de 0,017.*

En sorte que, le rapport du diamètre d des fusées à celui D des roues étant le même que dans les anciens waggons, soit environ $50/1000$, on aura pour la résistance sur la fusée :

$$f. P \frac{d}{D} = \text{environ } 0,0025 P.$$

Avec le rapport du diamètre des fusées actuelles au diamètre des roues, rapport = $\frac{7,5}{1000}$, on trouve pour cette résistance

$$f. P. \frac{d}{D} = 0,00375 P.$$

M. Wood a reconnu aussi que, pour que le frottement restât invariable avec la surface du coussinet, il fallait que la surface du coussinet fût telle, que la pression par centimètre carré ne dépassât pas 7 kilogrammes. Cette pression étant plus grande, la graisse était écrasée et les surfaces frottantes changeaient de nature.

En partant des expériences précitées faites par M. Wood pour déterminer séparément le frottement sur la fusée et le frottement au pourtour des roues, on trouve pour la résistance totale due au frottement dans les anciens waggons :

$$0,0025 P + 0,001 (P + p) \text{ ou environ } 0,0035 (P + p).$$

Et pour la même résistance dans les nouveaux waggons :

$$0,00375 P + 0,001 (P + p).$$

Soit environ :

$$0,00475 (P + p).$$

M. Wood a enfin trouvé, par des expériences directes, que la résistance totale dans les anciens waggons, à de petites vitesses, auxquelles la résistance de l'air était peu sensible, était de trois à quatre millièmes du poids total.

Expériences sur les frottements, par M. de Pambour. — M. de Pambour a trouvé, pour la somme des frottements dans des waggons à peu près semblables avec des roues de 0^m,915 et des fusées de 0^m,045 de diamètre, et déduction faite de la résistance de l'air, le rapport $\frac{1}{373}$ du poids brut, soit

$$0,0026 (P + p),$$

valeur sensiblement inférieure à celle indiquée par M. Wood, ce qui tient à un mode de construction supérieur du waggon et à un meilleur graissage. Ses expériences ont été faites en 1854, sur le chemin de Liverpool à Manchester.

Expériences sur la résistance de l'air, par M. de Pambour. — Nous emprunterons encore à la seconde édition du *Traité des machines locomotives*, par M. de Pambour, la valeur du coefficient θ , celle de ε , et l'indication de la marche à suivre pour calculer la surface A.

La résistance étant exprimée en kilogrammes, la surface A en mètres carrés et la vitesse en kilomètres par heure, le coefficient θ est égal à. 0,004825

La valeur de ε pour un corps isolé, très-mince, est. 1,45

Pour un cube. 1,17

Pour un prisme, dont la longueur est égale à trois fois le côté de la surface antérieure. 1,10

Pour un convoi de 5 waggons. 1,07

— de 25 waggons. 1,04

— de 15 waggons. 1,05

Quant à la surface A, elle se compose de plusieurs éléments qui influent à des degrés différents sur l'intensité de la résistance, dont nous nous occupons. On peut déterminer directement la surface antérieure du waggon, qui se compose de celle du chargement et de celle du waggon lui-même. Mais les rais des roues tournent rapidement, et éprouvent par cela même une certaine résistance; de plus, les roues, essieux, boîtes à graisse et ressorts d'arrière sont suffisamment séparés des pièces qui les précèdent pour qu'on ne puisse les considérer comme complètement protégés contre le choc de l'air.

La vitesse de rotation des divers éléments superficiels des roues varie avec la distance de ces éléments à l'essieu; vers la jante, cette vitesse est presque égale à celle du waggon; près de l'essieu elle est très-faible.

En ramenant leur surface totale à celle qui, mue à la circonférence de la roue, éprouverait de la part de l'air une résistance équivalente, M. de Pambour a trouvé que chaque roue de 1^m,00 de diamètre présente à cet égard une surface de 0^{m.2},4162, soit 0^{m.2},42. En y ajoutant donc la surface directe offerte par le bandage de la roue, par les boîtes, essieux et ressorts, le même auteur est arrivé à ce résultat, que chaque paire de roues montée équivaut à une surface de 0^{m.2},65.

Mais, dans un train, toutes ces pièces sont masquées par celles qui les précèdent et sont espacées par un intervalle sensiblement égal au côté de leur carré; il convient donc de réduire aux deux tiers, soit 0^m,45, la surface directe opposée au choc de l'air par chaque paire de roues, non compris la première.

Pour un waggon isolé, il faudra adopter pour surface directe choquée par l'air la surface antérieure de sa caisse, de son châssis et de son chargement, à laquelle il faudra ajouter 0^{m.2},65 + 0^{m.2},45 = 1^{m.2},08 pour ses roues, essieux, boîtes et ressorts.

Le coefficient ε variera avec la longueur du waggon employé. On peut admettre que cette longueur est égale à deux fois la racine carrée de la surface antérieure; on devra donc, dans les formules précédentes, faire $\varepsilon = 1,45$.

Quand les waggon sont réunis en trains, on devra compter une

surface additionnelle de $0^{m.2},43$ par paire de roues ajoutée. Mais, quoique très-rapprochés, les waggons ne sont cependant pas en contact, et chacun d'eux éprouve, sur sa surface antérieure, une résistance que M. de Pambour a trouvée égale à celle que produirait une augmentation de $0^{m.2},0929$, soit $0^{m.2},10$, de la surface antérieure du premier waggon.

M. de Pambour donne enfin la formule suivante, pour un train de quinze waggons, dans laquelle la vitesse est exprimée en kilomètres par heure, et la surface du train, comme nous venons de l'indiquer, en mètres carrés :

$$Q = 0,0050 \ 64AV^2.$$

Expériences sur la résistance totale, de MM. Gouin et Lechatelier. — *Pour la résistance totale, MM. Gouin et Lechatelier, en se servant du dynamomètre Morin, ont trouvé avec des waggons se rapprochant beaucoup des waggons actuels, mais dans lesquels cependant les fusées étaient de plus petit diamètre :*

A de petites vitesses (de 25 à 40 kilomètres par heure), de 3 à $4 \frac{1}{2}$ millièmes du poids total.

A des vitesses modérées (40 à 60 kilomètres par heure), de $4 \frac{1}{2}$ à 8 $\frac{1}{2}$ millièmes.

On peut supposer qu'à de grandes vitesses (80 à 90 kilomètres par heure) elle atteindrait 12 à 15 millièmes.

Les expériences de MM. Gouin et Lechatelier ont eu lieu sur le chemin de Versailles (rive droite). Faites au moyen de l'indicateur de Watt, elles avaient pour but principal la détermination de toutes les circonstances de l'emploi de la vapeur dans les machines locomotives¹; elles leur ont fourni le moyen de déterminer d'une manière fort exacte la résistance des convois, machine comprise.

Les diagrammes tracés par l'instrument donnaient rigoureusement la valeur du travail exercé par la vapeur sur les pistons; il était donc facile d'en déduire l'effort de traction moyen.

A la suite de ces expériences, les mêmes ingénieurs ont déter-

¹ Nous en donnons plus loin un résumé en rendant compte de l'effet des machines locomotives.

miné sur la même ligne et avec le dynamomètre la résistance des trains remorqués, machine non comprise.

Résumé fait par les auteurs du Guide du mécanicien constructeur. — MM. Lechatelier, Flachat, Petiet et Polonceau ont résumé ces expériences dans le tableau suivant, que nous extrayons de leur *Guide du mécanicien constructeur et conducteur de locomotives*, ainsi que les conclusions qui le suivent.

OBJET des EXPÉRIENCES	NOMBRE des expériences.	VITESSES moyennes en kilomètres à l'heure.	NOMBRE moyen de wagons remorqués.	POIDS du convoi en tonnes.	RÉSISTANCE par tonne en kilogrammes la gravité déduite.	MODE de DÉTERMINATION.
Machine et tender (seuls).	2	kil 28,4	"	tonn. 26,0	kil. 11,63	Indicateur.
Convoi brut (machine et tender compris).	37	42,7	6,86	60,3	10,31	Indicateur.
Train remorqué (ma- chine et tender non compris).	3 5 3	38,38 49,17 56,37	8,0 8,0 5,3	41,0 41,0 22,0	4,06 6,56 8,13	Dynamomètre inter- calé entre le tender et la première voi- ture; temps calme.
Moyenne. . .	11	48,0	7,3	37,7	6,31	

« Il est à regretter que ces expériences n'aient pu être combinées de manière à donner simultanément les diagrammes de l'indicateur et du dynamomètre, ce qui aurait permis de constater quelle était la fraction totale du travail moteur absorbé par le frottement de la machine comme véhicule, par le frottement de son mécanisme, par le frottement additionnel résultant du travail de la vapeur, et enfin par la résistance de l'air qu'elle divise en avant du train. On peut

admettre pour la résistance brute, à la vitesse de 45 kilomètres à l'heure, d'un convoi brut de 60 tonnes. 10^k,50

« Pour celle du train remorqué (34 tonnes). 6,25

« Il reste donc, pour la résistance totale due à la machine et au tender $10^k,5 \times 60 - 34 \times 6^k,25 = 417^k,5$, ou par tonne du poids de l'appareil moteur. 16^k,00

« Si l'on suppose que les frottements et la résistance de la machine, considérée comme véhicule sans son mécanisme, soient égaux à ceux des waggons, la résistance totale produite par le jeu des organes de la machine est égale, pour chaque tonne *du convoi brut*, à. 4^k,25

« Pour chaque tonne de l'appareil moteur (machine et tender), à. 9^k,75

« Si l'on applique à la détermination de ces résultats les données obtenues sur le chemin d'Orléans pour les machines marchant à vide¹, qui établissent que le frottement d'une machine et de son tender isolés, à la vitesse de 50 kilomètres à l'heure, est de 8 kilogrammes par tonne, on peut en conclure approximativement que cette même résistance, à la vitesse de 45 kilomètres à l'heure, sera égale à 12 kilogrammes, de telle sorte que, sur la résistance de 16 kilogrammes *par tonne du poids de l'appareil moteur*, il resterait pour la part additionnelle due à l'action de la vapeur. 4^k,00

« On peut donc, en groupant ces divers résultats, décomposer comme suit la résistance totale que le convoi de 60 tonnes que nous avons pris pour exemple éprouve dans son mouvement, à la vitesse de 45 kilomètres à l'heure. »

1° *Résistance du convoi brut, par tonne.*

Résistance due au mouvement des véhicules.	6 ^k ,25
— due aux frottements du mécanisme de la machine sans charge.	2,50
— due aux frottements du mécanisme produits par la pression de la vapeur.	1,75
TOTAL.	<u>10^k,50</u>

¹ Expériences faites sur la machine *Mulhouse*, en 1844, par une commission nom-

2° Résistance de l'appareil moteur, par tonne.

Résistance due au mouvement du véhicule.	6 ^k ,25
— due au frottement du mécanisme sans charge.	5,75
— due à la pression de la vapeur.	4,00
TOTAL.	16 ^k ,00

Expériences de M. Gooch. — Des expériences entreprises dans le but de déterminer les résistances des trains ont été faites par M. Gooch, sur le chemin à large voie du Great-Western. Ces expériences, annexées à la déposition de M. Gooch devant la commission du parlement anglais chargée de l'enquête sur les avantages respectifs de la voie large et de la voie étroite (1848), sont résumées de la manière suivante dans le *Guide du mécanicien* :

« Elles ont été faites au moyen de l'indicateur Watt, placé sur le cylindre de la machine *Great-Britain*, et d'un dynamomètre à ressorts construit avec beaucoup de soin et placé à l'arrière du tender sur un waggon disposé à cet effet. Les expériences ont été faites sur une partie du chemin parfaitement droite et horizontale, et située au niveau du sol. Le train remorqué se composait de voitures à six roues de première et de deuxième classe, lestées et pesant chacune en totalité 10 tonnes; le waggon du dynamomètre pesait également 10 tonnes et présentait la même section que les autres. Nous rapporterons le résultat de plusieurs séries d'expériences, desquelles M. Gooch a cru pouvoir conclure que les résistances ainsi observées, sur le Great-Western, sont d'environ 20 pour 100 inférieures à celles que l'expérience permet d'admettre pour les chemins de fer à voie étroite. Nous avons calculé, en assimilant la machine et le tender à des véhicules ordinaires, et en déduisant la part de résistance comme véhicule établie dans cette hypothèse, la résistance due aux frottements du mécanisme et à la pression de la vapeur sur les pistons; nous l'avons comparée : 1° au poids de la machine et du tender; 2° au poids du convoi brut; 3° à la résistance totale

mée par M. le ministre des travaux publics; sur la rampe de 0^m,008 par mètre du chemin de Paris à Orléans, à Étampes, les machines à voyageurs revaient librement sans l'action de la vapeur, par un temps calme, en prenant une vitesse de 50 kilomètres à l'heure.

mesurée par l'indicateur. Les différents résultats, observés et calculés, sont compris dans le tableau suivant :

VITESSES MOYENNES EN KILOMÈTRES à l'heure.	RÉSISTANCE PAR TONNE			RÉSISTANCE ADDITIONNELLE DUE AU MÉCANISME et à la pression de la vapeur		
	du convoi brut (machine et tender compris) par l'indicateur.	du train remorqué par le dynamomètre.	de la machine et du tender.	par tonne du convoi brut	par tonne du poids de la machine et du tender.	Rapport de la résistance additionnelle à la résistance totale.
<i>Train remorqué, 100 tonnes. — Convoi brut 150 tonnes.</i>						
kil.	kil.	kil.	kil.	kil.	kil.	kil.
21,1	4,10	3,43	3,51	0,67	2,00	0,16
32,1	5,11	3,87	7,49	1,24	3,72	0,24
72,4	10,46	7,26	13,96	3,20	9,60	0,30
91,7	12,42	9,94	19,17	2,48	7,44	0,20
92,2	»	10,77	»	»	»	»
98,1	»	10,07	»	»	»	»
<i>Train remorqué, 80 tonnes.</i>						
84,6	»	9,42	»	»	»	»
<i>Train remorqué, 50 tonnes. — Convoi brut, 100 tonnes.</i>						
35,5	6,86	4,31	8,75	2,54	5,08	0,37
69,8	9,07	6,65	11,37	2,42	4,84	0,27
39,3	13,84	10,21	17,58	3,63	7,26	0,26
<i>Rapport moyen de la résistance additionnelle à la résistance totale.</i>						0,25

Expériences faites par M. Polonceau. — Après avoir indiqué sommairement les résultats d'expériences faites déjà anciennement par MM. Vood, de Pambour, Gooch, Gouin et Lechatelier, dans le but de déterminer la résistance à la traction sur les chemins de fer, nous donnerons une série d'expériences plus récentes faites dans le même but par MM. Polonceau, Poirée, Garella, Bochet et Kinnear Clark.

Nous extrayons des notes précieuses laissées par M. Polonceau, enlevé tout récemment à la science par une mort prématurée, tout ce qui concerne le travail de cet éminent ingénieur. M. de Bonne-

foy, ancien élève de l'École centrale, ingénieur du chemin d'Orléans, nous a prêté un utile concours en complétant les notes que M. Polonceau nous avait laissées sur ses expériences. Nous saisissons cette occasion de l'en remercier.

Dès l'année 1855, M. Polonceau fut frappé de l'importance qu'il y aurait à déterminer d'une manière fixe, au point de vue de la traction, l'influence des rampes ainsi que celle des courbes à petit rayon, dans un moment surtout où la tendance des ingénieurs chargés de l'exécution d'embranchements nouveaux se traduisait par une augmentation considérable des difficultés qu'apportent ces deux causes à la marche des trains sur les chemins de fer.

Il entreprit alors une série d'expériences qui, continuées pendant les années 1857, 1858 et 1859, ne furent interrompues que par la mort de l'ingénieur qui les dirigeait.

Déjà, cependant, il avait pu réunir des documents assez complets pour en tirer un grand nombre de données utiles.

La résistance par tonne en palier et en alignement, et l'augmentation de cette résistance dans les rampes de profils variés et dans les courbes de différents rayons, avaient été l'objet des premières études; il y avait ajouté des comparaisons intéressantes entre les résistances dues aux matériels de différente construction, entre celles que présente le graissage à la graisse et le graissage à l'huile; il avait examiné avec le même soin l'influence, sous ce rapport, de la dimension des roues, de l'état de la voie sèche ou de la voie humide, enfin de la traction du matériel vide ou chargé.

Les expériences ont été faites dans des conditions qu'il importe de faire sommairement connaître.

Mode d'expérimentation. — L'appareil employé pour obtenir le travail est un dynamomètre Morin, placé dans un waggon attelé d'une part au tender et de l'autre au premier waggon du train.

Les espaces parcourus sont pointés de kilomètre en kilomètre et les temps de 30 en 30 secondes.

De la somme des surfaces évaluées de 100 en 100 mètres, on déduit l'effort moyen entre chaque poteau kilométrique, en supposant au train une vitesse uniforme entre deux poteaux consécutifs.

Chaque élément de travail est le produit de cet effort moyen par

le chemin parcouru pendant la durée de cet effort, et la somme de tous ces éléments constitue le travail développé pendant le trajet.

Pour les comparaisons de matériel, afin d'opérer dans les mêmes conditions atmosphériques et à la même vitesse, on attelle au même train les deux parties que l'on veut comparer, en plaçant en tête de chacune d'elles un waggon portant un appareil dynamométrique. Du travail total accusé par l'appareil de tête on retranche le travail accusé par l'appareil du milieu, et on a les résultats de comparaison des deux éléments considérés.

Dans le calcul des courbes on ne tient pas compte :

1° Du travail résultant des efforts accusés au démarrage pendant le premier kilomètre;

2° Du travail résultant de fractions de courbes obtenues dans les parcours de quelques kilomètres, le régulateur étant fermé, le train ne marchant plus qu'en vertu de la vitesse acquise.

La vitesse, pendant chacune des expériences, a été maintenue sensiblement constante; les variations inévitables étant comprises entre des limites très-restreintes, l'on a pu corriger l'expression du travail ou des efforts obtenus au moyen de cette formule : la charge remorquée et le chemin parcouru restant les mêmes, le travail est inversement proportionnel au temps employé pour parcourir ce chemin.

Ces bases étant posées, différents voyages ont été entrepris sur des lignes de profil varié.

Influence de la pente et de la courbure sur la résistance. —

Des trains composés de trente-cinq waggons à marchandises présentant un tonnage brut de 316,939 kilogrammes, conduits à une vitesse réglementaire de 25 kilomètres à l'heure, d'autres formés aussi de trente-cinq waggons à marchandises pesant ensemble 317 tonnes, mais n'ayant qu'une vitesse de 15 kilomètres à l'heure, enfin des trains mixtes marchant à une vitesse de 35 kilomètres à l'heure et composés de quinze voitures présentant un tonnage de 165,830 kilogrammes, ont fourni les éléments des conclusions suivantes, qui sont l'expression d'environ deux mille essais, puisqu'à chaque kilomètre parcouru correspond une courbe calculée.

L'examen de ce tableau conduit à reconnaître que le matériel du chemin de fer d'Orléans, graissé à la graisse en été, exige par tonne brute remorquée à une vitesse de 25 kilomètres à l'heure :

- 1° Un effort en palier et en alignement de. 5^k,20
 2° Par millimètre de rampe jusqu'à 16 millimètres, une augmentation d'effort de. 0^k,90
 3° En courbe et par 100 mètres de diminution dans le rayon compris entre 1,500 et 500 mètres une augmentation d'effort de. 0^k,05

Au delà de 1,500 mètres de rayon, l'augmentation d'effort dû à la courbe devient sensiblement nulle.

M. Polonceau avait commencé des expériences dans le but de déterminer l'influence de la vitesse sur les résistances. Elles sont trop incomplètes pour que nous en publiions les résultats. Il est fort à regretter que toutes les expériences précédentes aient été faites à une vitesse unique de 25 kilomètres par heure.

Les expériences comparatives faites de 1857 à 1859 pour diminuer le rapport entre l'effort nécessaire à la traction d'un même poids dans des conditions variées, en ce qui concerne la construction du matériel, la nature du graissage, etc., l'ont été également à une vitesse constante de 20 à 25 kilomètres par heure; elles se trouvent résumées dans les notes et conclusions qui vont suivre.

Comparaison de la résistance des waggons du Nord et d'Orléans. — M. Polonceau a comparé d'abord la résistance des waggons à dix tonnes du chemin de fer du Nord, montés sur essieux à fusées de 172/80, roues de 0^m,920 de diamètre, avec les waggons à huit tonnes du chemin de fer d'Orléans, à fusées de 155 sur 80 millimètres, roues de un mètre (matériel graissé à la graisse).

Le train était composé de quinze waggons d'Orléans et quinze waggons du Nord; la vitesse de la marche a été de 25 kilomètres à l'heure.

Le rapport entre le tirage moyen :

Par tonne brute remorquée pour les waggons d'Orléans = 3,59 }
 — — — — — du Nord = 3,29 } étant de 1,091

Donc : 1 tonne brute remorquée waggons du Nord = 1,091,
tonne brute remorquée waggons d'Orléans.

Or les waggons du Nord pèsent :

$$\begin{array}{r} \text{Tare moyenne} = 4,207 \text{ kil.} \\ \text{Poids utile} = 10,000 \\ \hline \text{Total. . . } 14,207^k \text{ ou } 14^i,207 \end{array}$$

Et les waggons d'Orléans pèsent :

$$\begin{array}{r} \text{Tare moyenne} = 4,802 \text{ kil.} \\ \text{Poids utile} = 8,000 \\ \hline \text{Total. . . } 12,802^k \text{ ou } 12^i,802. \end{array}$$

L'effort total pour un waggon du Nord sera :

$$1 \times 14^i,207 = 14^k,207.$$

L'effort total pour un waggon d'Orléans sera :

$$1,091 \times 12^i,802 = 13,967^k.$$

D'où l'on peut conclure : que le rapport entre le tirage moyen

$$\begin{array}{r} \text{Pour remorquer un waggon d'Orléans étant de } 13^k,967 \\ \text{— — — — — du Nord étant de } 14^k,207 = 0,98, \end{array}$$

55 waggons d'Orléans chargés à huit tonnes correspondent, comme traction, à $55 \times 0,98$ waggons du Nord chargés à dix tonnes ou à 54 waggons 50.

Influence du graissage. — M. Polonceau a cherché ensuite à apprécier l'influence du graissage à l'huile ou à la graisse sur la résistance.

Deux trains composés, le premier de trente-cinq waggons graissés à la graisse et le second de quarante-deux waggons graissés à l'huile, ont été lancés à la même vitesse de 25 kilomètres à l'heure dans des conditions atmosphériques analogues, et l'on a trouvé, pour l'effort moyen des trente-cinq waggons graissés à la graisse : 1,355 kilos, soit $4^k,20$ par tonne brute remorquée, et pour l'effort moyen des quarante-deux waggons graissés à l'huile : 1,176 kilos, soit $5^k,01$ par tonne, et l'on peut conclure : que trente-cinq wag-

été faites sur une voie sèche et sur une voie mouillée, à la vitesse de 25 kilomètres par heure avec des trains de trente-cinq à quarante waggons, M. Polonceau a trouvé que l'avantage de la voie mouillée sur la voie sèche est de 665 kilogrammètres, soit 9 chevaux.

Nombre de chevaux moyen employé pour le remorquage du train :

Sur la voie sèche. . .	87,5	} rapport, 1,41.
Sur la voie mouillée. . .	78,6	

Soit trente-cinq waggons sur la voie sèche pour trente-neuf sur la voie mouillée.

Influence de la charge. -- La résistance au tirage est plus grande pour une tonne de waggons vides que pour une tonne de waggons pleins : cela tient à ce que, si la résistance due aux frottements est proportionnelle à la charge, celle de l'air et certaines résistances accidentelles restent les mêmes, que le waggon soit plein ou vide.

Deux trains ont été faits le même jour, l'un composé de trente-cinq waggons chargés, l'autre de soixante waggons vides. Tous ces véhicules étaient montés sur essieux à fusées de 150/72 et graissés à la graisse. La vitesse a varié de 22 à 23 kilomètres à l'heure.

Le rapport du travail ramené à 25 kilomètres égale :

Pour les soixante waggons vides. . .	10,861 ^k	} = 1,005.
Pour les trente-cinq waggons chargés. . .	10,798 ^k	

Donc, trente-cinq waggons chargés correspondent à soixante waggons vides.

D'où il résulte que :

Si 3,92 est l'effort de traction par tonne brute remorquée du matériel chargé, et 5,45 l'effort par tonne de matériel vide,

Si un waggon vide pèse : tare ou poids mort, 5,000 kilos,

Le même waggon chargé pèsera :

Tare ou poids mort.	5,000 ^k	} 15,000 ^k .
Marchandises ou poids utile.	8,000 ^k	

L'effort sera pour le waggon vide :

$$5 \times 5,45 = 27^k, 25;$$

Et, pour le waggon chargé, l'effort sera :

$$15 \times 5,92 = 50^k,96.$$

Et $50,96 - 27,25 = 23,71$ sera l'effort total pour remorquer les huit tonnes (poids utile).

$$\text{Par tonne utile, } \frac{23,71}{8} = 2,96.$$

Donc 1 tonne utile : x tonne tare :: $2,96 : 5,45$, d'où $x = \frac{5,45}{2,96} = 1,84$.

C'est-à-dire que, si 1 est l'effort nécessaire pour remorquer une tonne utile ou marchandises, 1,84 sera l'effort nécessaire pour remorquer une tonne poids mort du train ou matériel vide.

Expériences de M. J. Poirée sur le frottement. — *D'après des expériences faites, en 1852, par M. Poirée, ingénieur au chemin de Lyon, si la résistance de l'air augmente avec la vitesse, celle due au frottement de glissement décroît avec elle.*

De ces expériences, faites sur des waggons à frein dans lesquels le frein était serré de manière à les convertir en véritables traîneaux, M. Poirée a tiré les conclusions suivantes :

« La résistance au glissement des waggons à frein est proportionnelle au poids des waggons. Elle peut varier, suivant l'état des rails, du simple au double, soit environ, pour les petites vitesses, de 0,44 à 0,25 du poids remorqué.

« La résistance au glissement des waggons à frein diminue à mesure que la vitesse de marche augmente. Dans les limites de poids et de vitesse usuelles, la diminution de résistance, résultant de l'augmentation de la vitesse, est à peu près indépendante du poids des waggons et de l'état des rails; elle peut être représentée par la fonction suivante de la vitesse :

$$25v - 0,35v^2;$$

et, par suite, la résistance des waggons à frein serait donnée par la formule

$$f = kP - 25v + 0,35v^2.$$

P étant le poids du waggon;

k étant un coefficient constant, variable seulement avec l'état des rails. On peut employer approximativement :

$k = 0,15$ pour des rails humides.

$k = 0,30$ pour des rails très-secs.

Les formules ne devant d'ailleurs être appliquées que pour des vitesses comprises entre 5 et 22 mètres par seconde. »

M. Poirée ajoute que la diminution de frottement indiquée par la formule n'est qu'un minimum, car, dit-il, en raison de la discontinuité de la voie, le traîneau éprouve à chaque joint des rails des chocs d'autant plus vifs que la vitesse est plus grande, et ces chocs doivent amener des pertes de force et augmenter le tirage indiqué par les expériences.

Expériences de MM. Bochet et Garella. — MM. Bochet et Garella, ingénieurs des mines, ont, en 1856, confirmé par de nouvelles expériences les résultats obtenus par M. J. Poirée, et, en rapportant ces résultats, ils ont établi la formule suivante :

$$f = \frac{Pk}{1 + av}$$

dans laquelle P représente la pression totale qui s'exerce sur les surfaces frottantes.

k est un coefficient dont la valeur dépend et dépend uniquement de l'état des rails, et qui est de :

0^m,30 quand les rails sont à leur maximum de sécheresse,

0^m,25 quand les rails sont bien secs,

0^m,20 quand les rails sont assez secs,

0^m,14 quand les rails sont mouillés; le coefficient est susceptible de passer par toutes les valeurs intermédiaires.

v représente la vitesse du glissement.

a est un coefficient dont la valeur est différente suivant le mode et les conditions du glissement, et semblerait même varier un peu en même temps avec k et augmenter sensiblement à mesure que k diminue; néanmoins, dans la pratique, on peut, en conservant une approximation bien suffisante, prendre a , quelle que soit d'ailleurs la valeur de k égal à :

0^m,05 quand les roues glissent directement sur les rails.

De nouvelles expériences faites en 1856 par M. J. Poirée en enrayant au moyen du frein Cochot, dont les sabots sont en fer et glissent eux-mêmes sur les rails, ont donné pour a $0^m,07$ au lieu de $0^m,03$.

La surface de glissement avec ces sabots étant plus grande que dans le cas du frottement direct des roues et l'intensité de la pression par unité de surface augmentant, on se demande naturellement si on ne doit pas induire de ce résultat que l'étendue des surfaces frottantes a une certaine influence sur le frottement et que par conséquent la loi admise jusqu'à ce jour de l'égalité du frottement, quelle que soit la surface, n'est pas entièrement exacte, surtout pour les grandes vitesses. Les faits cependant, dit M. Bochet dans une note qu'il a publiée sur les expériences faites par lui en commun avec M. Garella, tout en autorisant le doute, ne sont pas assez concluants pour le résoudre, et la question réclame et mérite assurément une étude spéciale. M. Poirée, d'ailleurs, ne donne la formule que ses expériences l'ont conduit à établir comme susceptible d'application qu'entre certaines limites de vitesse, et ne donne la diminution de frottement indiquée par cette formule que comme minimum.

Nous partageons l'opinion de M. Bochet, et nous faisons des vœux pour qu'il puisse faire prochainement cette étude, comme il l'espère.

Expériences de M. Kinnear Clark. — M. Clark a fait aussi une série d'expériences pour déterminer la résistance à la traction.

Ces expériences, faites sur une voie que l'auteur lui-même déclare avoir été défectueuse, sur des courbes dont M. Clark n'indique pas exactement le rayon et sous l'influence de vents plus ou moins violents, de l'intensité desquels il ne donne aucune mesure, nous paraissent peu concluantes.

Nous croyons toutefois devoir reproduire sommairement les conséquences qu'il en déduit.

La résistance déterminée dans des conditions semblables de pente, de courbure et d'agitation de l'air, a été de 40 p. 100 plus élevée sur la voie étroite ($1^m,50$) des chemins qui ont servi aux expériences de M. Clark que sur la voie large ($2^m,20$) du chemin

de Bristol à Exeter, où M. Daniel Gooch a opéré. Cette différence ne paraît pas tenir essentiellement à la largeur de la voie. Elle provient surtout de l'imperfection des chemins à voie étroite, de la grandeur des surfaces exposées à l'action de l'air, grandeur qui est supérieure dans le cas des voies étroites, et de la petitesse du diamètre des roues, dont l'influence sur une voie imparfaite est très-sensible.

D'autres expériences, faites sur des portions de voie du Calédonian-railway, où la voie, au lieu d'être droite ou à peu près comme dans le cas précédent, présentait une courbe d'un rayon inférieur à 4 mille anglais (4,608 mètres) de rayon pour chaque parcours de 2 milles et demi (4,000 mètres environ), ont conduit à admettre que ce degré de courbure, aux vitesses moyennes des trains, avait pour conséquence un accroissement de 20 p. 100 de la résistance.

Enfin la résistance était encore augmentée de 50 p. 100 sur la voie étroite et de 10 p. 100 seulement sur la voie large pour le vent soufflant latéralement avec une grande force.

Comparant entre eux les résultats des expériences faites sur le chemin de Bristol à Exeter par M. Gooch sur une voie excellente, avec un matériel en bon état d'entretien, la voie étant rectiligne, par un beau temps, sur des rails propres et secs, le vent soufflant latéralement et étant d'une intensité moyenne, M. Clark en déduit les règles suivantes, dont les résultats sont consignés dans le tableau des pages 654 et 655 :

1° Pour déterminer la résistance de la machine, du tender et du train, à une vitesse donnée sur la voie large ;

2° Pour déterminer la résistance du train seulement, à une vitesse donnée.

Dans le premier cas, faites le carré de la vitesse en milles par heure. — Divisez par 171 et ajoutez 8 au quotient : vous obtiendrez la résistance du train, machine et tender compris, en livres par tonne.

Dans le second cas, faites le carré de la vitesse en milles par heure. — Divisez par 240 et ajoutez 6 au quotient : vous aurez la résistance du train seul en livres par tonne.

INDIQUANT LA RÉSISTANCE PAR TONNE DE 1,000 KILOGRAMMES DE MACHINE,
ET SUR DES PENTES

PENTES ASCENDANTES.	VITESSES EN KILOMÈTRES A L'HEURE.												
	16	24	32	40	48	56	64	72	80	88	96	104	112
1 ^{re} PARTIE. — CONDITIONS : { La route bien établie et en bon état. — en ligne droite. Le vent soufflant de côté et étant de force moyenne. La machine, le tender et le train en bon état.													
RÉSISTANCE TOTALE EN KILOGRAMMES PAR TONNE.													
0 = 0,0	5 81	4 12	4 55	4 90	5 84	6 65	7 66	8 77	10 01	11 53	12 85	14 48	16 21
$\frac{1}{20}$ = 0,0500	55 16	55 60	54 05	54 95	55 58	56 26	57 15	58 48	59 81	61 15	62 46	64 24	66 01
$\frac{1}{25}$ = 0,0400	45 40	45 86	44 50	44 74	45 65	46 52	47 40	42 29	49 62	50 95	52 72	54 05	55 82
$\frac{1}{50}$ = 0,0550	56 77	57 21	57 66	58 10	58 98	59 87	40 76	41 64	42 97	44 50	46 07	47 40	49 17
$\frac{1}{40}$ = 0,0250	28 55	28 80	29 24	50 12	50 57	51 45	52 54	55 67	55 00	56 55	57 66	59 45	41 20
$\frac{1}{50}$ = 0,0200	25 48	24 02	24 57	24 81	25 69	26 58	27 47	28 55	29 68	51 01	52 78	54 11	55 88
$\frac{1}{60}$ = 0,0170	20 58	20 92	21 26	21 71	22 15	23 04	24 57	25 25	26 58	27 91	29 24	51 01	52 78
$\frac{1}{70}$ = 0,0140	17 72	18 16	18 61	19 49	19 94	20 82	21 71	25 04	24 57	25 69	27 02	28 80	50 57
$\frac{1}{80}$ = 0,0120	15 95	16 59	16 85	17 72	18 16	19 05	19 94	21 26	22 59	25 92	25 25	27 02	28 80
$\frac{1}{90}$ = 0,0110	14 62	15 06	14 08	16 59	16 85	17 72	18 61	19 94	21 26	22 59	25 92	25 69	27 47
$\frac{1}{100}$ = 0,0100	15 75	14 18	14 62	15 06	15 95	16 59	17 72	18 61	19 94	21 26	22 59	24 57	26 14
$\frac{1}{110}$ = 0,0090	12 85	15 29	15 75	14 18	14 62	15 51	16 85	17 72	19 05	20 58	21 71	25 48	25 25
$\frac{1}{120}$ = 0,0080	11 96	12 40	12 85	15 29	14 18	15 06	15 95	16 85	18 16	19 49	21 26	22 59	24 57
$\frac{1}{150}$ = 0,0075	11 52	11 96	12 40	12 85	15 29	14 18	15 06	16 59	17 72	19 05	20 58	22 15	25 92
$\frac{1}{140}$ = 0,0070	11 08	11 52	11 96	12 40	12 85	15 75	14 62	15 95	17 28	18 61	19 94	21 71	25 04
$\frac{1}{150}$ = 0,0065	10 65	11 75	11 52	11 96	12 40	15 29	14 18	15 51	16 85	18 16	19 49	21 26	25 59
$\frac{1}{160}$ = 0,0060	10 19	10 65	11 08	11 52	11 96	12 85	15 75	15 06	16 59	17 72	19 05	20 82	22 15
$\frac{1}{180}$ = 0,0055	9 75	10 19	10 65	11 08	11 52	11 96	15 29	14 62	15 95	17 28	18 61	20 58	21 71
$\frac{1}{200}$ = 0,0050	8 86	9 50	9 75	10 19	11 08	11 52	12 85	15 75	15 06	16 59	17 72	19 49	21 26
$\frac{1}{250}$ = 0,0040	7 97	8 42	8 86	9 50	10 19	10 65	11 52	12 85	14 18	15 51	16 85	18 61	20 58
$\frac{1}{500}$ = 0,0055	7 09	7 55	7 97	8 42	9 50	10 19	11 08	11 96	15 29	14 62	15 95	17 72	19 49
$\frac{1}{550}$ = 0,0051	6 65	7 09	7 55	7 97	8 86	9 75	10 65	11 52	12 85	14 18	15 51	17 28	19 05
$\frac{1}{400}$ = 0,0025	6 20	6 65	7 09	7 55	8 42	9 50	10 19	11 08	12 40	15 75	15 06	16 85	18 61
$\frac{1}{500}$ = 0,0020	5 76	6 20	6 65	7 09	7 97	8 86	9 75	10 65	11 96	15 29	14 62	16 59	18 16
$\frac{1}{600}$ = 0,0016	5 52	5 76	6 20	6 65	7 55	8 42	9 50	10 19	11 52	12 85	14 18	15 95	17 72
$\frac{1}{800}$ = 0,0012	4 87	5 52	5 76	6 20	7 09	7 97	8 86	9 75	11 08	12 40	14 18	15 51	17 28
$\frac{1}{1000}$ = 0,0010	4 87	5 09	5 52	6 20	6 65	7 55	8 42	9 75	11 08	12 40	15 29	15 51	17 28
0 = 0,0	5 81	4 12	4 56	4 90	5 84	6 65	7 66	8 77	10 01	11 53	12 85	14 48	16 21

SYNOPTIQUE

DE TENDER ET DE TRAIN, A DIFFÉRENTES VITESSES UNIFORMES
ASCENDANTES VARIÉES.

II^e PARTIE. — CONDITIONS :
 { La route bien établie et en bon état.
 Des courbes nombreuses de moins de 1,600^m de rayon.
 Vent violent debout et de côté.
 La machine, le tender et le train en bon état.

VITESSES EN KILOMÈTRES A L'HEURE.

16	24	32	40	48	56	64	72	80	88	96	104	112
----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	-----	-----

RÉSISTANCE TOTALE EN KILOGRAMMES PAR TONNE.

5 76	6 20	6 87	7 73	8 86	9 97	11 32	13 29	15 06	17 06	19 27	21 74	24 57
33 58	35 82	36 70	37 59	38 48	39 81	41 45	42 91	44 68	46 89	49 11	51 55	54 98
43 65	46 07	46 32	47 40	48 75	49 62	51 59	53 16	54 95	56 70	58 92	61 58	64 24
58 98	59 45	59 87	40 76	42 09	42 97	44 74	46 32	42 29	50 06	52 27	54 95	57 59
50 57	51 01	51 45	52 34	53 67	54 35	56 35	58 10	59 87	41 64	45 86	46 32	49 17
25 69	26 14	26 58	27 47	28 80	29 68	31 45	33 25	35 00	36 77	38 98	41 64	44 50
22 15	22 59	23 48	24 37	25 25	26 58	27 91	29 68	31 45	33 67	35 88	38 10	40 76
19 94	20 58	20 82	21 71	23 04	23 92	25 61	27 47	29 24	31 01	33 25	35 88	38 54
18 16	18 61	19 05	19 94	21 26	22 15	23 92	25 69	27 47	29 24	31 45	34 11	36 77
16 85	17 18	17 72	18 61	19 94	20 82	22 59	24 37	26 14	27 91	30 12	32 78	35 44
15 31	15 95	16 85	17 72	18 61	19 94	21 26	23 04	24 81	27 02	29 24	31 45	34 11
14 62	15 06	15 95	16 85	17 72	19 05	20 58	22 15	23 92	26 14	28 35	30 57	33 25
14 18	14 62	15 06	15 95	17 18	18 16	19 94	21 71	23 48	25 25	27 47	30 12	32 78
15 29	15 73	14 62	15 31	16 59	17 71	19 05	20 82	22 59	24 81	27 02	29 24	31 90
12 85	13 29	13 75	14 62	15 95	16 85	18 61	20 58	22 15	25 92	26 14	28 80	31 45
12 40	12 85	12 29	14 18	15 31	16 59	18 16	19 94	21 71	25 48	25 69	28 35	31 01
11 96	12 40	12 85	15 75	15 06	15 95	17 72	19 49	21 26	25 04	25 25	27 91	30 57
11 32	11 96	12 40	15 29	14 62	15 31	17 18	19 05	20 82	22 59	24 81	27 47	30 12
10 65	11 08	11 96	12 85	13 75	15 06	16 59	18 16	19 94	22 15	24 37	26 58	29 24
9 75	10 19	11 08	11 96	12 85	14 18	15 31	17 18	19 05	21 26	23 48	25 69	28 55
8 86	9 50	10 19	11 08	11 96	13 29	14 62	16 59	18 16	20 58	22 59	24 81	27 47
8 42	8 86	9 75	10 65	11 32	12 85	14 18	15 95	17 71	19 94	22 15	24 37	27 02
7 97	8 42	9 50	10 19	11 08	12 40	13 75	15 31	17 18	19 49	21 71	25 92	28 58
7 55	7 97	8 86	9 75	10 65	11 96	13 29	15 07	16 85	19 05	21 26	23 48	26 14
7 55	7 97	8 42	9 50	10 65	11 32	13 29	15 07	16 85	18 61	20 82	23 48	26 14
7 09	7 55	7 97	8 86	10 19	11 08	12 85	14 62	16 59	18 16	20 58	23 04	25 69
6 65	7 09	7 97	8 86	9 75	11 08	12 40	14 18	15 95	18 16	20 58	22 59	25 25
5 76	6 20	6 87	7 75	8 86	9 97	11 32	13 29	15 06	17 06	19 27	21 74	24 57

PENTES
ASCENDANTES.

0	= 0,0
$\frac{1}{20}$	= 0,0500
$\frac{1}{25}$	= 0,0400
$\frac{1}{30}$	= 0,0333
$\frac{1}{40}$	= 0,0250
$\frac{1}{50}$	= 0,0200
$\frac{1}{60}$	= 0,0167
$\frac{1}{70}$	= 0,0143
$\frac{1}{80}$	= 0,0125
$\frac{1}{90}$	= 0,0111
$\frac{1}{100}$	= 0,0100
$\frac{1}{110}$	= 0,0091
$\frac{1}{120}$	= 0,0083
$\frac{1}{130}$	= 0,0077
$\frac{1}{140}$	= 0,0071
$\frac{1}{150}$	= 0,0067
$\frac{1}{160}$	= 0,0063
$\frac{1}{180}$	= 0,0056
$\frac{1}{200}$	= 0,0050
$\frac{1}{250}$	= 0,0040
$\frac{1}{300}$	= 0,0033
$\frac{1}{350}$	= 0,0029
$\frac{1}{400}$	= 0,0025
$\frac{1}{500}$	= 0,0020
$\frac{1}{600}$	= 0,0017
$\frac{1}{800}$	= 0,0013
$\frac{1}{1000}$	= 0,0010
0	= 0,0

Ces règles peuvent s'appliquer à la résistance sur la voie étroite, en la supposant dans les mêmes conditions de construction, d'entretien et de courbure que la voie large.

C'est à l'aide de ces règles, en se fondant sur les chiffres fournis plus haut comme mesure de l'influence de la courbure et du vent, et admettant la parité entre la voie étroite et la voie large, que M. Clark a dressé le tableau (pages 654 et 655) des résistances par tonne dans différents cas de pente et de courbure, la résistance de la machine et du tender comprise.

M. Clark fait observer qu'à l'aide des règles posées on pourrait facilement dresser un tableau de la résistance du train seulement, mais que, le train étant toujours remorqué par une machine et un tender, cela ne serait pas d'une grande utilité.

SUBSTITUTION DE LA VALEUR DES COEFFICIENTS DANS L'ÉQUATION GÉNÉRALE
DU TRAVAIL.

Valeurs des coefficients. — Rapprochant entre elles les différentes expériences précédentes, on en déduit les valeurs suivantes pour les coefficients qui entrent dans les termes représentant les résistances dues au frottement sur l'essieu, au pourtour des roues en plaine et en ligne droite, et la résistance de l'air. Quant au coefficient f''' , il est resté jusqu'à présent indéterminé ; mais il y a lieu de croire que cette partie de la résistance est considérable.

La formule générale pour la substitution de la valeur des coefficients deviendrait alors la suivante :

$$T = 0,035 \frac{d}{D} P + 0,001 (P + p) + 0,005064AV^2 \pm$$

$$\pm (P + p) \operatorname{tang} \alpha + 0,16 \frac{\sqrt{a^2 + b^2}}{\rho} (P + p) +$$

$$+ f''' \frac{P + p}{g} \frac{1}{\rho} V^2 \frac{\sqrt{2Rh + h^2}}{R}$$

Nous avons adopté pour f''' le chiffre 0,16 en prenant la valeur moyenne du coefficient du frottement de glissement entre deux surfaces métalliques polies, déterminé par Coulomb et Morin.

Peut-être y aura-t-il lieu de modifier sensiblement ce terme de l'équation lorsque les résultats avancés par MM. J. Poirée, Bochet et Garella auront été confirmés.

Discussion de la formule. — On tire de la discussion de cette formule les conclusions suivantes, qui présentent un très-grand intérêt :

On diminue la résistance en diminuant le diamètre des fusées et en augmentant celui des roues.

Toutefois il résulte des expériences de M. Wood, précitées, qu'en diminuant outre mesure le diamètre des fusées on change la nature des surfaces frottantes, de telle façon que le travail augmente au lieu de diminuer.

En général, les waggons actuels ont des roues de 0^m,90 à 1 mètre. Avec des roues trop grandes on élèverait les caisses de voitures outre mesure au-dessus des rails, à moins de complications dans le mode de construction des véhicules. L'accroissement du diamètre des roues aurait aussi pour inconvénient d'en augmenter le poids, ce qui donnerait lieu à une augmentation de résistance très-faible sur les parties peu inclinées, mais assez sensible sur les fortes pentes.

Tous les termes qui composent le second membre de l'équation étant, à l'exception de celui qui représente la résistance de l'air, proportionnels au poids du waggon ou au moins au poids de la caisse, *il est avantageux de rendre le matériel roulant aussi léger que le permettent la prudence et l'économie de l'entretien.*

Nous avons vu que, dans ces derniers temps, on avait considérablement réduit le poids mort des waggons à marchandises, mais que les exigences du public avaient forcé à augmenter celui des voitures à voyageurs.

Deux résistances, celle de l'air et la résistance occasionnée par le frottement, dans les courbes, du bourrelet des roues contre la face latérale du rail, étant proportionnelles au carré de la vitesse, *on réduit considérablement la résistance totale, et, par suite, les frais de traction, en diminuant la vitesse. On tire ainsi meilleur parti des machines à de petites vitesses qu'à de grandes. C'est pourquoi les trains de marchandises pour lesquels une grande vitesse*

n'est pas absolument nécessaire, comme pour les trains de voyageurs, doivent marcher à la plus petite vitesse compatible avec le service.

Les deux derniers termes de la formule montrent que :

Le passage dans les courbes donne lieu à une augmentation de résistance par unité de distance parcourue d'autant plus sensible que le rayon est plus petit.

On voit de plus que :

Dans tout changement de direction du tracé le travail résistant total, propre au parcours de la partie courbe qui raccorde les deux alignements droits, est indépendant du rayon de courbure; mais la grandeur de celui-ci n'est pas pour cela tout à fait indifférente dans l'appréciation de la dépense finale de traction, puisque toute réduction du rayon ou du développement de la courbe correspond à un allongement du parcours total ou à un petit surcroît de travail sur l'alignement droit.

En augmentant le rayon des courbes à grands frais on a donc bien moins pour objet de diminuer le travail sur les alignements que de réduire le travail résistant par unité de distance parcourue en courbe, de façon qu'il ne dépasse pas certaines limites dans les circonstances accidentelles les plus défavorables, limites au-dessus desquelles les machines éprouveraient une fatigue et une usure excessives.

C'est ainsi que dans le tracé des routes on diminue au moyen de circuits la résistance par unité de distance parcourue. Il faut seulement remarquer que, dans ce dernier cas, le travail total augmente, tandis que, dans le premier, il diminue.

Nous avons vu que les résistances qui naissent au passage des courbes et dont on se rend compte par l'analyse qui précède sont considérablement diminuées dans la pratique par deux dispositions particulières du matériel dont une longue expérience a consacré l'efficacité et l'importance, la forme conique des jantes de roues et l'inclinaison transversale de la voie.

L'inclinaison transversale de la voie donne lieu à une inclinaison semblable du waggon; celui-ci tend dès lors à se rapprocher du centre de la courbe, et l'effet de la force centrifuge se trouve dé-

fruit en tout ou en partie. On peut la détruire en totalité pour une vitesse déterminée si l'on donne au rail extérieur, au-dessus du rail intérieur, dans chaque courbe, une surélévation telle, que les composantes de la gravité et de la force centrifuge opposées suivant la direction de l'inclinaison transversale de la voie soient exactement égales.

La surélévation se calcule alors de la manière suivante : soit α l'angle qui formait avec l'horizon une droite mn (fig. 652) nor-



Fig. 652.

male à la voie et coupant les axes des deux files de rails de la courbe extérieure et de la courbe intérieure. Soit P le poids du waggon, $P \sin \alpha$ sera la composante de P et elle mesurera la force centripète. Soit F la force centrifuge dans le plan horizontal, la composante opposée à la force centripète sera $P \cos \alpha$. Pour que l'équilibre existe on devra écrire :

$$P \sin \alpha = F \cos \alpha;$$

$$\text{D'où : } \frac{\sin \alpha}{\cos \alpha} = \tan \alpha = \frac{F}{P}.$$

Si l'on désigne par x la surélévation et par a la demi-largeur de la voie, on a aussi :

$$\tan \alpha = \frac{x}{2a};$$

$$\text{D'où : } \frac{x}{2a} = \frac{F}{P}.$$

Mais, si v est la vitesse en mètres par seconde, g la gravité et ρ le rayon moyen de la courbe,

$$F = \frac{Pv^2}{g\rho} = \frac{Pv^2}{9,8088\rho};$$

$$\text{D'où : } \frac{x}{2a} = \frac{v^2}{9,8088\rho}$$

$$x = \frac{2a v^2}{9,8088\rho}.$$

V désignant la vitesse en kilomètres par heure,

$$V = 5,600v;$$

$$V^2 = 12,960v^2;$$

$$v^2 = \frac{V^2}{12,960};$$

$$\text{D'où : } x = \frac{2aV^2}{9,8088 \times 12,960} = \frac{aV^2}{65,561024}.$$

Pour obtenir cette surélévation, on doit augmenter la pente de l'alignement qui précède la courbe de 1 millimètre par mètre, de manière que la file extérieure de rails de la courbe soit surélevée de la quantité totale dès l'origine de cette courbe.

L'effet de cette surélévation à des vitesses moindres que celle à laquelle elle aura été appliquée tendra à rejeter les véhicules sur le rail intérieur et à y reporter ainsi une portion de l'inconvénient de la courbure de la voie; mais le danger de déraillement sera du moins écarté et la conicité des roues y remédiera d'ailleurs dans une certaine mesure.

Il ne faut donc pas craindre, dans le double intérêt de la facilité et de la sécurité de la circulation, de baser l'inclinaison transversale de la voie sur la plus grande des vitesses avec lesquelles les trains de voyageurs pourront avoir à parcourir chaque courbe.

La rigidité du plan commun des roues de chaque véhicule résultant du parallélisme des essieux nécessite d'ailleurs entre les boudins ou mentonnets des roues et les bords intérieurs des rails un jeu ou excès de largeur de la voie proportionné à l'écartement des essieux extrêmes et d'autant plus grand que le rayon des courbes du tracé est plus petit.

Formule de M. Harding. — M. Harding a proposé une formule pour calculer les résistances des convois remorqués, machine non comprise, sur les chemins à voie étroite. Les résultats qu'elle donne sont un peu trop forts pour les faibles vitesses, mais conviennent bien aux grandes vitesses de 60 à 100 kilomètres, les trains pesant de 20 à 100 tonnes.

R étant la résistance totale par tonne exprimée en kilogrammes;
V la vitesse en kilomètres par heure;

N la plus grande section transversale du train;

T le poids du train exprimé en tonnes;

i l'inclinaison maxima du chemin;

Cette formule est :

$$R = 2^k,72 + 0,094 V + 0,00484 \frac{NV^2}{T} + 1000 i.$$

Le terme $2^k,72$ est le coefficient de frottement des véhicules.

Le second terme exprime la résistance due aux chocs et vibrations qui résultent du passage sur les joints des rails et des mouvements irréguliers du train. Le troisième terme représente la résistance de l'air.

Formule de M. Redtenbacher. — M. Redtenbacher, le célèbre professeur de mécanique à l'École polytechnique de Carlsruhe, reproche à M. Harding de ne pas avoir égard dans sa formule à la longueur du train comme augmentant la résistance de l'air, et en donne une autre qui a l'avantage de tenir compte d'un plus grand nombre de circonstances influant sur la résistance; nous ne croyons pas toutefois devoir la reproduire, attendu que les termes qui expriment la résistance propre des machines renferment des coefficients empruntés au *Traité* de M. Pambourg, et que ces coefficients ont été obtenus en opérant sur des machines aujourd'hui abandonnées.

DÉTERMINATION DES RÉSISTANCES ACCIDENTELLES.

Nous n'avons jusqu'à présent traité que des résistances normales opposées à l'action du moteur, en supposant l'atmosphère parfaitement calme. Mais les chiffres que nous avons donnés sont singulièrement modifiés par les résistances accidentelles que peut développer l'action des vents en face, en queue ou sur le côté du train, et qu'il était bon d'apprécier. MM. Lardner et Morin ont fait, dans ce but, des expériences dont les tableaux suivants indiquent les résultats.

Le docteur Lardner a cherché à se rendre compte de l'effet des vents en lançant des waggons sur des plans diversement inclinés,

et en déterminant leur vitesse quand elle est devenue uniforme. Voici quelques-unes de ses observations.

DÉSIGNATION DES VENTS.	PENTE.	RÉSISTANCE.	VITESSE UNIFORME en kilomètres par heure.
Calme parfait.	0,004	0,004 (P+p)	30
»	0,011	0,011 (P+p)	54
Vent arrière.	0,010	0,010 (P+p)	54
»	0,003	0,003 (P+p)	30
»	0,005	0,005 (P+p)	38
Vent de bout.	0,010	0,010 (P+p)	45
Vent de côté.	0,005	0,005 (P+p)	27

En 1840, M. Morin a mesuré directement, à l'aide d'un dynamomètre à ressort, la résistance d'un convoi de cinq waggons, pesant ensemble 27^t,6, remorqués à la vitesse de 18 à 25 kilomètres à l'heure. Ces expériences ont été faites sur le chemin de Saint-Germain, dont le tracé et le profil sont très-peu accidentés. Voici les résultats de ces expériences.

DÉSIGNATION DES VENTS.	RÉSISTANCE TOTALE par tonne.	NOMBRE des EXPÉRIENCES.	VITESSES MOYENNES en kil. à l'heure.
Vent arrière.	5 ^k ,05	12	18 à 25 ^k
Vent de bout.	8 ^k ,20	10	id.
Vent arrière.	3 ^k ,98		
Vent oblique opposé au mouvement, ayant une vitesse d'environ trois mètres par seconde.	5 ^k ,52	4	40
	10 ^k ,25		

On remarque, à l'inspection de ces tableaux, que le vent de bout

c'est-à-dire le vent soufflant en sens contraire de la marche du convoi, n'agissant que sur une petite surface, produit bien moins d'effet que le vent soufflant latéralement. Il est à regretter que M. Lardner n'ait pas, comme M. Morin, indiqué la vitesse du vent dans ses expériences.

Nous terminerons ce chapitre par un tableau comparatif des résistances à différentes vitesses sur les chemins de fer, les routes ordinaires et les canaux.

COMPARAISON DE LA RÉSISTANCE SUR LES DIFFÉRENTES VOIES
DE COMMUNICATION.

Routes ordinaires en bon état.	$\frac{1}{39} = 0,025$
Routes en bois.	$\frac{1}{70} = 0,014$
Chemins de fer (vitesse modérée, 32 kilomètres par heure)..	$\frac{1}{200} = 0,005$
— (grande vitesse, 48 kilomètres par heure).	$\frac{1}{100} = 0,010$
Canaux, grande section avec bateaux ordinaires, très-faible vitesse.	$\frac{1}{1000} = 0,001$
— vitesse double.	$\frac{1}{250} = 0,004$
— vitesse quadruple.	$\frac{1}{62} = 0,016$
Canaux petite section avec bateaux ordinaires, faible vitesse.	$\frac{1}{600} = 0,0017$
— vitesse double.	$\frac{1}{150} = 0,0066$
— vitesse quadruple.	$\frac{1}{37} = 0,027$

Nous avons supposé que le transport s'opérait, sur les canaux, avec les bateaux ordinaires, et que la résistance y croissait comme le carré de la vitesse¹. Lorsqu'on se sert des bateaux effilés, semblables aux pirogues des Indiens, bateaux qui sont en usage sur certains canaux d'Écosse, la résistance au delà d'une vitesse de 3 mètres par seconde continue à croître, mais en suivant une progression indéterminée, moins rapide que celle du carré. Ces ba-

¹ Sur les canaux à petite section, quand les bateaux ont une certaine largeur, la résistance croît comme le cube de la vitesse.

teaux ne sont employés que pour le transport des voyageurs, et, bien qu'ils n'éprouvent pas à de grandes vitesses la même résistance que les bateaux ordinaires, ils n'en ont pas moins à surmonter une résistance encore énorme, comparée à celle opposée au moteur aux mêmes vitesses sur les chemins de fer.

Il semblerait, d'après les chiffres donnés dans le tableau, que le transport des marchandises encombrantes, qui n'exige généralement pas une grande vitesse, devrait s'opérer plus avantageusement par les canaux que par les chemins de fer. Cela serait vrai si l'on se servait du même moteur sur l'une et sur l'autre espèce de voies de communication; mais il ne faut pas oublier que tous les essais tentés jusqu'à ce jour pour employer la vapeur à la traction sur les canaux ont été infructueux. C'est ce qui rend la traction souvent moins coûteuse sur les chemins de fer, même à de petites vitesses, bien que l'effort de traction y soit beaucoup plus grand; toutefois ce résultat n'est atteint qu'à la condition de tirer le meilleur parti possible de la machine à vapeur, en lui faisant traîner des convois complets ou à peu près.
