

BULLETIN

DE L'ASSOCIATION DU

CONGRÈS INTERNATIONAL DES CHEMINS DE FER

[625 .145.1 & 625 .145.2]

FORME, MATIÈRE ET RÉSISTANCE DES RAILS ⁽¹⁾,

Par A. FLAMACHE,

INGÉNIEUR EN CHEF,
 INSPECTEUR DE DIRECTION AUX CHEMINS DE FER DE L'ÉTAT BELGE,
 CHARGÉ DU COURS DE CHEMINS DE FER A L'UNIVERSITÉ DE GAND.

Fig. 1 p. 200.

(Bulletin de l'Union amicale et d'agrément des Ingénieurs des chemins de fer de l'État belge.)

MES CHERS CAMARADES,

Une des institutions les plus utiles de notre association est cette conférence mensuelle qu'elle demande à l'un ou à l'autre d'entre nous, le chargeant de donner à ses collègues, en peu de temps et sans effort, le résultat de sa pratique et de ses études pendant de longues années.

Ce que nous allons vous dire est rédigé dans cet esprit et beaucoup de nos auditeurs n'apprendront rien de bien nouveau en écoutant le résumé concis que nous allons faire. Mais il sera consciencieux, pensons-nous, et à ce titre a droit à toute votre indulgence.

Chacun de nous sait que les nombreux systèmes de voie qui ont été proposés se ramènent à deux types de rails : les rails pouvant être supportés de distance en dis-

tauce, comme le rail à double bourrelet et le rail Vignoles, et les rails devant être supportés sur toute leur longueur, tels que le rail Brunel, et le rail Barlow qui a servi de base aux nombreux types de voie en deux ou trois pièces dites « à longrines ».

Ces deux derniers types sont peu employés sur les grandes lignes et disparaîtront de plus en plus, car ils ne sont pas susceptibles de recevoir une circulation un peu brutale; leur entretoisement se réduit le plus souvent à une pièce d'écartement de section réduite qui, sous l'action de forces latérales parfois considérables qu'un train rapide impose à la voie, se courbent vers le haut, parfois vers le bas, produisant dans le premier cas un surécartement de la jauge, dans le second, un rétrécissement avec une

(1) Conférence donnée à la réunion de novembre 1912 de l'Union amicale de science et d'agrément des ingénieurs des chemins de fer de l'État belge.

irrégularité qui inquiète le machiniste, car elle donne à son moteur des mouvements anormaux prononcés qu'il est bien placé pour apprécier et craindre.

Si, de distance en distance, on interpose des réunions plus efficaces, comme la traverse de joint de la voie Hilff, c'est pis encore, car la voie prend alors une forme sinusoïdale parfaite, la courbure des entretoises se faisant systématiquement et alternativement dans un sens puis dans l'autre. Si, par malheur, le mouvement rythmé que prend la machine sur une voie ainsi courbée a une période semblable à celle d'un autre mouvement qui lui soit propre, celui-ci s'accroît au point que le machiniste doit au plus vite changer son allure.

Il serait fort irrationnel d'ailleurs de chercher à donner aux voies sur longrines un entretoisement plus énergique, car alors il suffirait d'un peu de matière ajoutée aux entretoises pour en faire des traverses. En outre, on aurait supprimé un des rares avantages des voies longitudinales assez notable pour les voies en pavage : la possibilité de bourrer la voie sans démolir la surface qui sépare les deux rails.

D'autres défauts sont venus s'ajouter à celui-ci, mais il est parfaitement suffisant pour justifier l'abandon général des voies sur longrines.

La lutte s'établit donc entre le rail à double bourrelet et le rail Vignoles posés sur traverses. Nous savons tous que le premier est employé sur toutes les grandes lignes de l'Angleterre où la vitesse est grande et le nombre de trains considérable. Il possède, en effet, trois avantages sérieux dans ce cas :

1° Le rail à double bourrelet enchâssé dans son vaste coussinet à large base est pratiquement irrenversable et les essieux les plus chargés peuvent le choquer sans

qu'il bronche. La voie de Stephenson est donc la plus solide;

2° Le coussinet étant fixé à l'avance sur la traverse à l'aide d'un gabarit qui figure les deux rails, ceux-ci se placent d'eux-mêmes dans la position correspondante à la jauge exacte.

D'ailleurs, le rail à double bourrelet de par sa forme plus symétrique est notablement moins déformé que le Vignoles pendant le refroidissement qui suit le laminage.

La voie de Stephenson est donc la plus précise;

3° Enfin, il est possible de remplacer en quelques instants un rail sans rien ôter, même momentanément, de la résistance de la voie. Cette propriété extrêmement précieuse, à l'époque des rails en fer là où ceux-ci dureraient peu, a perdu beaucoup de sa valeur sans doute, mais est loin d'être négligeable.

La voie peut, en effet, être entretenue et même renouvelée quasi sous les trains mêmes, sans leur imposer le fléau du ralentissement pour cause de réfection, car le rail, une fois substitué, chaque traverse se remplace à part et très facilement.

Cet avantage, sans être transcendant, est donc appréciable pour les lignes très parcourues. Ainsi il nous est revenu que, sur la ligne d'Anvers, on ne peut travailler sérieusement à la voie Vignoles que pendant trois intervalles par jour, de cinquante à cinquante-cinq minutes chacun.

On voit combien il serait utile d'y posséder une voie à coussinet.

On doit donc admirer le génie de Stephenson qui, du premier coup, inventa le type de voie qui s'est justifié par la suite, pour les lignes de son pays.

Par contre la voie Vignoles bien constituée est 10 p. c. moins chère que la voie à double bourrelet équivalente et cela seul justifie la faveur que lui accordent

les réseaux secondaires. Mais cet avantage diminue vite quand l'importance de la ligne augmente et nous croyons que la voie de 57 kilogrammes que l'État belge a adoptée récemment coûte autant que les meilleures voies anglaises sans leur être comparables comme résistance et précision.

Mais sur les réseaux complexes comme celui de l'État belge, qui comprennent seulement 20 à 25 p. c. de lignes fatiguées, le rail à double bourrelet serait peu avantageux, car son réemploi est fort difficile. La traverse en sapin se prête mal au resabotage, au chevillage, au trénaillage et à toutes ces opérations réparatrices qui transforment une vieille traverse de Bruxelles-Ostende en un excellent support pour Termonde-Alost.

De plus, le coin, supportable comme attache quand on le resserre toutes les semaines, devient bien ennuyeux pour les lignes économiques abandonnées quasi à elles-mêmes surtout si elles sont à simple voie, car le coin n'agit que dans un sens.

Malgré donc la supériorité de la voie anglaise, elle se justifierait mal sur un réseau comme celui de l'État belge.

D'autre part, il serait peu rationnel de donner aux grandes lignes un type de rail différent de celui des petites. Celles-ci, dans un réseau bien exploité, doivent vivre exclusivement, comme voie et comme matériel roulant, des reliefs des grandes lignes.

Nous avons signalé, il y a quelques années, une solution mixte qui consisterait à placer dans un coussinet en fonte un rail Vignoles à patin un peu réduit et à le placer ainsi sur les grandes lignes où il aurait, à peu de chose près, les propriétés du double bourrelet.

Quand il ne serait plus digne d'y figurer, non plus que son support, on enlèverait le coussinet, on lui substituerait une large selle et on attacherait le rail

Vignoles avec des tire-fond placés au patin. Les anciens trous seraient simplement bouchés.

Jusqu'ici cette idée mixte n'a pas encore été appliquée.

Mais la question d'attache écartée, le rail à double bourrelet et le rail Vignoles sont, au point de vue de leur forme et de leur matière, à peu près dans les mêmes conditions.

Le rail, comme nous dirons maintenant sans plus parler de sa forme, est, au fond, un double T, trapu, car sa base est à peu près la moitié de sa hauteur et celle-ci n'est pas grande, relativement au poids.

À part certains profils trop élancés et en dehors des normes, il y a, entre tous les rails de divers poids, une certaine similitude, si bien que l'on peut à peu près prévoir le moment d'inertie et le module de flexion d'un profil par la simple connaissance de son poids.

C'est donc celui-ci qui forme la base de l'appréciation de la résistance de la voie, car tout, y compris les supports et les attaches, est à l'avenant.

Ce poids n'a pas cessé d'augmenter. De 15 kilogrammes qu'il était à l'origine, il a monté à 57 kilogrammes, record mondial actuellement possédé par la Belgique.

Cette augmentation est justifiée par celle de la charge des essieux et de la vitesse des trains et celles-ci ayant crû dans de fortes proportions depuis trente ans, particulièrement en Belgique, l'histoire des rails belges sera excessivement suggestif.

Il montre combien il faut peu compter sur une longue durée pour amortir lentement le prix des choses chères. Dans la technique des voies ferrées plus que dans toute autre industrie, il faut prévoir des changements incessants.

La Belgique possédait avant 1880 le

rail en fer de 38 kilogrammes, mais, l'acier s'y substituait rapidement. On avait conservé le même profil, ce qui semblait une folie économique, car le Nord français employait alors sur ses plus grandes lignes le rail d'acier de 30 kilogrammes, et, à la première session du Congrès des chemins de fer, en 1885, l'opinion prédominante était qu'il avait raison de profiter de la résistance double du métal et de son peu d'usure.

L'acier coûtait d'ailleurs encore assez cher pour qu'on pût se livrer à des calculs en vue d'obtenir des formules très précises d'amortissement ; mais l'acier diminuant rapidement de prix, elles devinrent bientôt sans utilité.

Cinq à six années plus tard, Belpaire, à la suite d'une campagne en faveur du rail lourd, menée par Sandberg, le spécialiste bien connu, faisait essayer le rail de 52 kilogrammes qui fut appliqué aux grandes lignes, les années suivantes, par 150 kilomètres à la fois.

C'était ce que les artilleurs appellent un « coup au delà », car la charge des essieux à cette époque ne justifiait pas plus de 40 à 42 kilogrammes. Mais, grâce à cette ampleur de vue de l'éminent ingénieur, l'État belge a pu conserver pendant longtemps, son rail de 52 kilogrammes dans les conditions les plus difficiles de son réseau et il serait encore suffisant à l'heure qu'il est.

Ce n'est qu'aujourd'hui, vingt-cinq ans après, que recommence l'augmentation, le rail allant à 57 kilogrammes, poids énorme non justifié sans doute, si l'on se place devant les nécessités strictes du moment présent, mais dont nous croyons qu'on se félicitera plus tard.

Nous ne parlons pas des attaches ni de l'éclissage de ce type de voie sur lesquels nous avons dû formuler jadis de sévères critiques, mais, somme toute, ce sont des parties secondaires comme

prix et leur remplacement ne sera pas grave.

D'ailleurs, la résistance de l'attache et de l'éclissage et même les dimensions des traverses ont augmenté avec le poids du rail et c'est surtout à la meilleure constitution des deux premiers éléments que sont dus les bons résultats obtenus par les rails lourds.

Nous avons fait instituer il y a quelque vingt ans sur la ligne de la Vesdre, dans une courbe difficile, un essai comparatif de l'attache ordinaire du rail de 38 kilogrammes et d'une attache renforcée avec la même traverse. Au bout de cinq ans, la voie nouvelle était meilleure que sa voisine renouvelée depuis trois ans seulement.

Avons-nous besoin de dire que le railleur du rail lourd vient aussi à la rescousse de l'attache et, par suite, de la durée de la traverse en diffusant les efforts sur un plus grand nombre de supports ?

Sur la première section posée en rails de 52 kilogrammes sur la ligne entre Bruxelles et Anvers, les traverses en bois de chêne, après avoir supporté huit ans de pose et plus de 200,000 trains, étaient à peine fatiguées.

Le logement du tire-fond dans le bois montrait au sciage un véritable écrou de bronze et l'arrachement violent aurait encore demandé 2,000 à 3,000 kilogrammes.

Il n'y a aucun doute. Les exploitations soucieuses de leurs intérêts, et dont le service financier n'est pas trop tendu, doivent mettre du rail lourd.

Nous ne vous apprendrons rien en disant qu'il doit être en acier. Le métal coulé a détrôné définitivement le fer de la superstructure de la voie.

Nous avons connu le rail en fer, en fer puddlé et soudé qui se détachait si facilement en lamelles que l'outillage du garde-route comportait un ciseau à froid

pour les couper dans l'espoir d'empêcher leur propagation.

La durée du rail était minime partout où le frein fonctionnait; sur les plans inclinés de Liège (30 millimètres par mètre) on renouvelait les rails toutes les six semaines dans la voie descendante.

La durée du rail d'acier au contraire est considérable. D'après nos relevés, en palier ou pente moindre de 8 millimètres, un rail d'acier de qualité convenable perd 500 à 600 grammes de métal par 100,000 trains et par mètre courant, ce qui cadre assez bien avec le chiffre de 25 à 50 grammes par million de tonnes donné par Dudley et le millimètre de hauteur par 110,000 trains trouvé par Couëard.

Un rail de fort profil pouvant perdre 15 millimètres d'épaisseur, on voit qu'il ne doit pas être mis au rebut total avant un million et demi de trains, ce qui correspond à soixante ans d'exercice sur les lignes les plus chargées de Belgique.

Si l'on en juge par le passé, les rails actuels seront depuis longtemps dans les voies de garage quand ils auront atteint cet âge.

Il est vrai de dire que sur les pentes plus raides que 8 millimètres, l'usure s'accroît rapidement et sur la ligne du Luxembourg, où la pente atteint 16 millimètres et parfois 18, l'usure est trois et demie à quatre fois plus rapide qu'en palier.

On serait fort tenté donc de choisir pour ces lignes accidentées un profil bien garni du haut, un *bull-headed* dont la durée serait ainsi majorée. Cette proposition a souvent été formulée, mais on a toujours reculé, avec raison selon nous, devant les complications qui en seraient résultées.

Il est préférable de fournir un seul type de rail avec beaucoup de matière au bourrelet, puis, quand celui-ci est

devenu plus réduit, de déposer la voie et de la faire servir aux lignes de faible inclinaison.

Sous ce rapport, le réseau de l'État belge est bien placé pour utiliser ses invalides de grandes lignes, car il possède dans les Flandres de nombreuses lignes presque plates et à circulation modérée.

Par contre, il ne faut pas trop compter sur la résistance plus forte du métal pour diminuer les épaisseurs à l'extrême limite. Les rails au patin mince, à l'âme peu robuste, sont exposés non seulement à des ruptures intempestives à la moindre paille et plus sûrement à l'usure encore par l'oxydation quand ils sont placés dans des ballasts médiocres. Voyez le rail de 40 kilogrammes de l'État belge destiné aux lignes secondaires. Le patin est épais et massif pour résister à l'action corrodante des sulfates de fer provenant de l'oxydation des sulfures de la cendrée employée comme ballast.

Est-ce économique et ne vaudrait-il pas mieux employer le meilleur ballast avec tous ses avantages? La question est difficile et son examen nous entraînerait trop loin.

Tous les avantages de l'acier sont certains; il ne coûte pas plus cher que le fer. Le seul défaut qu'il avait de moins bien permettre de tirer parti de ses mitrilles disparaît même aujourd'hui par suite du développement incessant de l'acier coulé.

Mais il faut de *bon acier*. Quel est le bon acier à rails? Les spécialistes font sur cette question des études profondes, des analyses, des métallographies, des essais, dont s'inquiètent fort peu les fabricants en général, tout en ayant l'air de les accepter avec le plus grand respect.

C'est que la fabrication des rails n'a pas seulement un côté: celui du client,

mais aussi un autre : celui du fabricant.

Celui-ci emploie les minerais, les charbons, les hauts fourneaux qui lui donnent les meilleurs résultats financiers dans le lieu où il opère. C'est son droit et même son devoir.

Vouloir lui faire changer tout cela pour plaire au client est fort difficile et, en tout cas, fort coûteux pour celui-ci.

La première question dont doit se préoccuper l'exploitant est donc beaucoup moins la nature du meilleur acier à rail que la nature de celui que fabriquent les usines qui seront ses fournisseurs.

Ne perdons jamais de vue que toute exigence de notre part est payée par nous et largement.

D'ailleurs, malgré les progrès immenses accomplis dans les théories métallurgiques au cours des dernières années, nous sommes encore fort loin de pouvoir prévoir le rôle d'un élément étranger introduit dans l'acier à rail.

Nous ne voulons pas dire du mal de l'acier à rail au manganèse ni au silicium, mais nous croyons qu'on s'illusionne un peu quant au résultat final qu'on en obtiendra.

D'ailleurs, avons-nous avantage à payer plus cher un métal plus résistant à l'usure; c'est un point à débattre et pas du tout facile à solutionner.

Tout au plus pouvons-nous prescrire un métal plus ou moins « dur » sans trop nous préoccuper des métalloïdes qui donneront cette dureté sauf s'ils sont nuisibles pour d'autres qualités que nous recherchons.

Et encore, même sur ce point si simple qui ne concerne quasi exclusivement que l'élément primordial de l'acier, le carbone, les opinions sont extrêmement partagées.

Jadis, Dudley démontra par des expériences mémorables, conduites très rationnellement, que l'acier doux donnant

50 à 55 kilogrammes à la rupture et un fort allongement, avait donné le plus de résistance à l'usure sur le « Pennsylvania Railroad ». Mais, l'année suivante, Michel établissait avec une rigueur équivalente que ce n'était qu'entre 70 et 85 kilogrammes de résistance à la rupture que se trouvaient les aciers convenables, au point de vue de l'usure des rails, sur le Paris-Lyon-Méditerranée.

Qui croire? Les deux!

Selon les circonstances, l'une ou l'autre des modalités de l'acier, dure ou douce, peut donner des résultats analogues et les deux expérimentateurs étaient de bonne foi.

Rien que la différence extrême des climats sous lesquels opéraient Dudley et Michel rendaient leurs résultats sans comparaison possible.

De nos jours cependant, la technique s'est un peu précisée et on peut admettre que l'acier à rail doit donner 65 à 75 kilogrammes à la rupture, sauf peut-être en pays très froid où la limite peut être un peu descendue. Tant au point de vue de l'usure qu'à celui de la sollicitation à la flexion et au choc, il y a avantage à ne pas choisir de l'acier trop doux.

Ainsi ont disparu des voies ces aciers malléables que les roues refoulaient vers l'extérieur du rail, en bourrelets parfois de 1 centimètre de saillie.

Mais avec le métal sec la rupture du rail par le choc est à craindre et toujours désastreuse.

A cette éventualité fâcheuse il faut opposer l'exigence d'un allongement suffisant à la rupture.

La résistance vive à la rupture, c'est-à-dire à un travail, dépend, en effet, de deux éléments : la résistance par millimètre carré de surface, l'allongement que peut subir le métal avant de se rompre, et l'on conçoit très bien que le produit de l'un par l'autre doive donner

une idée assez juste de l'aptitude du métal à résister au choc.

A l'acier à 50 kilogrammes on peut demander 30 p. c. d'allongement, ce qui donne à la résistance vive une valeur proportionnelle à 1,500. A l'acier à 70 kilogrammes on ne peut demander que 13 p. c., soit 910 seulement.

Il paraît n'y avoir pas de doute que l'acier doux est plus sûr quant à la rupture définitive au choc, mais combien plus déformable ! Sa limite d'élasticité est bien plus basse.

Il suffit évidemment d'éviter la rupture sans aller inutilement au delà comme résistance vive au détriment de la résistance à la flexion.

Le métal à rail, il ne faut pas se le dissimuler, doit toujours baisser en qualité et devenir de plus en plus aigre.

Nous avons connu les premiers rails en acier fabriqués notamment par Krupp dans de petits creusets. Ce métal, proche parent du métal à canon, était excellent pour tout usage, mais coûtait 500 francs la tonne.

Puis le métal Bessemer venant d'une fonte choisie et purifiée par sa seconde fusion ; puis le métal Bessemer fabriqué directement en soufflant dans la fonte sortant toute vive du haut fourneau, mais émanant de minerais choisis sans phosphore et purifiée par des ajoutes intelligentes.

Puis l'acier Thomas où le phosphore, l'ennemi mortel, est admis dans la mêlée et emprisonné à jamais dans une gangue que la terre arable reçoit comme engrais.

Puis l'acier Martin, où l'on voit les plus innommables ribblons, fondus, réduits, modifiés par une savante chimie donnant un superbe produit.

Puis l'acier électrique, puis d'autres encore, que savons-nous ; mais toujours le rail a diminué de qualité et d'autant plus vite que le pays producteur était plus neuf

et exigeait une production plus fiévreuse.

Mais, néanmoins, le rail actuel est encore fort bon en ayant soin cependant d'avoir pour lui quelques égards. Ne pas le poinçonner brutalement, mais le percer lentement ; y faire le moins d'ouvertures possible d'ailleurs, des trous d'éclisse à peine. L'inventeur de l'attache d'arrêt qui se fixe directement au patin sans boulon transversal nous a rendu un réel service.

Pour s'assurer de cette qualité, les exploitants emploient les moyens les plus variés, plus ou moins efficaces et les plus disparates, depuis la victime résignée d'un trust puissant qui lui impose à haut prix l'acier le plus médiocre jusqu'à certaines compagnies qui fabriquent elles-mêmes leurs rails, système qui réduit les réclamations au minimum, c'est certain, mais aussi fournit fort cher une qualité donnée, car l'aciérie ainsi constituée sera toujours, même pour un grand réseau, une petite aciérie qui ne dispose ni des hommes, ni de l'expérience des choses, ni de l'organisation d'une grande, ni de ses moyens financiers.

Il est fort à craindre cependant que ce coûteux système soit le seul refuge des exploitants. La puissance grandissante des syndicats et des trusts, leur extension mondiale livrent le consommateur, pieds et poings liés, au fournisseur.

Dans certains pays d'Europe, où la concurrence métallurgique est cependant grande, on commence à sentir l'influence néfaste de cette coalition des intérêts. Déjà le refus de certaines conditions de réception, telles que l'essai à la fragilité, le refus de fournir des profils que le syndicat vous a réservés, enfin les petites tracasseries avant-coureuses des grandes devraient avertir de l'imminence du danger.

Mais en attendant qu'il ressorte à l'évi-

dence pour tous, il faut se plier à la situation présente en tâchant d'obtenir des fabricants le meilleur métal possible.

Peu pratiques sont les systèmes de réception qui imposent aux aciéries particulières la fabrication tout entière ou simplement la composition finale du produit. Les ingénieurs des chemins de fer, même leurs chimistes, peuvent, sans déchoir, retarder un peu en métallurgie. Aussi que de prescriptions bizarres et désuètes dans les cahiers des charges de cette espèce et que de difficultés dans les analyses chimiques d'objets, somme toute, peu homogènes!

L'exploitant ne peut vraisemblablement exiger que des essais physiques, et les meilleurs sont encore ceux qui déterminent la résistance à la rupture et l'allongement pour cent.

On ne peut compter beaucoup sur la striction qui donne souvent, il est vrai, à l'œil habile, des notions exactes, mais qui, parfois aussi, cause des mécomptes absolus; c'est un phénomène instable qu'il ne faut pas soumettre à l'épreuve de la mesure.

Un autre système consiste à soumettre le rail à des épreuves analogues aux sollicitations qu'il aura à subir en réalité, mais plus sévères.

C'est avec raison que le praticien considère ce genre d'essai comme celui qui lui donne le plus de garantie.

Il est de fait qu'un rail qui, comme nos gros rails modernes, supporte, placé sur une enclume rigide, le choc d'un mouton de 1,000 kilogrammes tombant de 6 mètres, paraît à l'abri de la rupture par choc. S'il n'a pas fléchi de $\frac{1}{100}$ de millimètre sous une charge de 30,000 kilogrammes quand il doit en supporter le tiers, on peut admettre qu'il n'y a pas de danger à le placer dans la voie.

Nous aurons à revenir tout à l'heure sur l'épreuve à la flexion.

A ces épreuves principales on peut en joindre d'autres secondaires ou des prescriptions supplémentaires. La trempe légère exigée par la plupart des aciers à rail est une garantie que la dureté est bien due au carbone.

L'interdiction du phosphore n'est pas vexatoire.

Viennent s'y joindre l'obligation d'affranchir la barre de tout ce qu'il faut pour éliminer les bouts de lingot, le haut et le bas où s'accumulent naturellement les impuretés et les retassures, l'obligation de laminier chaud, le minimum de poids du lingot, le minimum de passes au laminoir et d'autres aussi recueillies dans des cahiers des charges surannés et rajeunis par des gens parfois peu connaisseurs.

A notre avis, à part les épreuves au choc et à la flexion et les essais de traction et d'allongement, la trempe et l'affranchissement de la barre, toute autre prescription est inutile ou vexatoire; et prenons garde à cette dernière qualité, car c'est nous qui la payerons très cher si nous l'imposons.

Voici ce qui nous est arrivé pour la garantie d'usure il y a quelques années.

La trouvant illusoire, nous voulûmes la renforcer et faire fournir des rails *réellement* résistants à l'usure. Avec un bel ensemble, les aciéries refusèrent les conditions du cahier des charges cependant peu draconiennes. « Nous acceptons la garantie d'usure actuelle, disaient-elles, parce qu'elle est illusoire. Du jour où nous sommes exposées à devoir remplacer des rails qui ont été acceptés, placés et abandonnés à eux-mêmes, nous préférons y renoncer. Frappez, brisez, pliez nos rails, mais ne les acceptez pas provisoirement. Nous ne voulons pas de ce provisoire qui pourrait nous conduire fort loin. » Et ces industriels avaient raison.

Cette anecdote est, au fond, le récit de ce qui se passera toujours quand on exigera du fabricant des choses qu'il ne peut raisonnablement demander. A moins que ce ne soit qu'une question d'argent, car alors, en bon industriel, le fabricant de rails les fera payer fort cher par le client.

Quant aux aciers au silicium, au manganèse, au chrome, voire même au nickel et au vanadium, même excellents, Dieu nous en préserve ! Ils sont tout au plus bons pour les pièces d'automobile que les gens du monde paient volontiers très cher, uniquement parce qu'on leur fait l'énumération de choses dont ils n'ont jamais entendu parler.

Que ferions-nous des voies de 1835 si un inventeur de l'époque les avait rendues immortelles ? Nous les aurions mises depuis longtemps au ribblon toutes neuves, si elles étaient restées neuves.

Le rail moderne en acier, ordinaire, si aigre qu'il soit parfois, est encore une fort bonne pièce et quiconque a vu passer sur ce rail une formidable machine à 30 mètres par seconde ne peut que lui faire des éloges.

Voilà un bien long préambule, chers camarades, avant d'entrer dans le vif de la question, mais voyez combien il en a réduit l'ampleur :

Sauf des cas spéciaux, de tous les systèmes de voie il n'en reste que deux pour les grandes lignes : le double bourrelet et le Vignoles, posés sur traverses, nous dirions même sur traverses en bois si nous avions le temps de vous parler des traverses métalliques et de les reléguer dans les voies coloniales.

Reste à voir ce que nous allons en faire et quel sera l'essieu que nous pourrons lui donner à supporter.

Car il existe là un duel analogue à celui de la cuirasse et du canon pour les

dreadnoughts, c'est celui du rail et de l'essieu.

La machine moderne semble cependant avoir atteint si pas son poids au moins son volume maximum, mais ce poids n'augmentera plus beaucoup sans que la longueur ne suive la même marche.

L'essieu de 20 tonnes n'est plus rare et nous pensons même qu'on atteindra 22 tonnes pour les essieux moteurs.

Le rail de nos voies est-il adéquat à ces charges ?

Nous pourrions vous répondre « oui » tout de suite, puisque sur nos rails de 45 à 50 kilogrammes circulent à grande vitesse des locomotives ayant cette charge par essieu, et que, somme toute, les accidents par rupture de rail sont très rares, en Europe tout au moins.

Mais il y a quand même un certain intérêt à tâcher de se rendre compte de ce qui se passe quand le rail fléchit sous la charge et principalement sous la charge à grande vitesse.

Certains auteurs : Winckler, Zimmermann, Ast et d'autres, ont cherché dans la théorie de la flexion une réponse à ce problème. Ils supposent en général que la traverse s'enfonce dans le ballast en fonction du poids qu'elle supporte. Ils admettent que le joint n'a pas d'éclisses, ce qui se rapproche plus de la réalité que la supposition que le joint se comporte comme le rail plein.

Un simple calcul un peu laborieux, mais sans difficulté, leur donne alors la forme définitive du rail et le moment qu'il supporte. Ils verront alors que le moment est toujours maximum sur les essieux, du moins à faible vitesse, et la flèche aussi.

En introduisant le coefficient d'enfoncement donné par l'expérience, on trouve des résultats qui se rapprochent assez bien de la déformation effective du rail, pour une charge statique.

Cependant l'hypothèse de base est fautive, car toutes les traverses ne sont pas également bourrées et leur enfoncement varie du simple au quadruple et peut-être plus.

Jadis nous avons fait quelques calculs de ce genre, et à la suite des résultats expérimentaux indicateurs, nous sommes arrivés à cette constatation intéressante, que cette variation de l'enfoncement n'avait pas grande influence sur le résultat final.

La locomotive pesant sur le rail, celui-ci prenait, à peu de chose près, la forme qu'il aurait prise s'il avait été pressé sur un support élastique homogène et continu et la traverse suivait docilement, prenant alors dans la charge générale une part de réaction d'autant plus grande qu'elle était mieux bourrée et que le rail la pressait davantage.

En fait donc, la disposition des traverses et leur état de bourrage n'avait guère d'importance. Bien mieux encore, on pouvait négliger leur nombre pour peu qu'il ne fût pas trop petit. On trouvait, en effet, que le moment fléchissant M_n , au droit de l'essieu, avait une valeur comprise entre $\frac{PL}{6}$ et $\frac{3}{4} \cdot \frac{PL}{6}$; P étant la charge de la roue et L le demi-espacement des essieux et cela quels que fussent le nombre de traverses et leur enfoncement dans le ballast au passage de l'essieu (1).

Nous voici loin des recherches de Winckler qui considérait le rail comme une poutre continue reposant sur des appuis isolés élastiques.

La conclusion ci-dessus, qui paraît fort singulière à première vue, provient d'un

phénomène que vous vérifierez vous-mêmes tout à l'heure sur les diagrammes de déformation du rail que nous vous montrerons. La flèche proprement dite du rail, sa déformation due au moment fléchissant est beaucoup moindre que l'enfoncement total de la voie. Autrement dit les traverses et le ballast sont d'excellents ressorts.

Il en résulte que la répartition des réactions ou des appuis qui n'a d'influence que sur la forme du moment fléchissant, c'est-à-dire sur la plus petite partie de l'enfoncement de la voie, celle due à la déformation élastique du rail, ne modifie guère l'ensemble de cette chute verticale. Comme nous le disions tantôt, chaque traverse suit docilement et prend une part de la réaction générale en fonction de son état de bourrage. La répartition se fait donc sur une grande longueur du rail.

Si donc nous considérons le rail fléchi par de nombreuses forces et soutenu par des appuis rapprochés, le lieu polygonal des moments fléchissants diffère assez peu de la courbe continue que l'on obtiendrait entre deux forces sollicitantes en supposant que les appuis soient en nombre infini et uniformément résistants.

Cette seule constatation rendait précieuses les expériences de flexion réelle.

Ce fut en 1880 que nous eûmes l'idée, nouvelle alors, de recueillir sur un diagramme tournant les mouvements de la voie au passage des trains rapides. L'appareil, fort simple, n'avait d'autres prétentions que de donner des diagrammes sommaires d'ingénieur.

Il donna d'ailleurs beaucoup plus. Grâce à l'éminent Belpaire et au concours dévoué de notre collègue Huberti, de nombreuses recherches furent faites, et les résultats principaux sont consignés dans une note qui fut présentée par lui

(1) Voir *Bulletin du Congrès des chemins de fer*, n° 10, octobre 1903, p. 905.

(Note de la Rédaction.)

à la session de Milan du Congrès des chemins de fer en 1887 (1).

Entretiens, d'ailleurs, Coüard (2) avait, en France, procédé de son côté à des expériences et, depuis lors, des ingénieurs autrichiens et russes ont fait de belles recherches à l'aide d'inscripteurs électriques et même photographiques, mais la complication des appareils et leur difficulté d'installation semblent avoir restreint le nombre d'essais effectués.

D'ailleurs, disons-le tout de suite, au point de vue de la détermination de la sollicitation du rail, les résultats de l'expérience sont plutôt décevants au premier abord.

On reconnaît, en effet (3), plusieurs phénomènes constants mais assez inattendus dans leur apparition :

1° L'appareil donnant à la fois les flèches au droit d'une traverse et au milieu d'une travée, on reconnaît que les deux diagrammes sont pratiquement identiques, ce qui frappe de suspicion toutes les théories où la résistance individuelle de ces appuis entre dans le calcul.

Nous avons expliqué ce phénomène tout à l'heure;

2° A faible vitesse la déformation ne diffère guère de la déformation statique, mais elle s'accroît rapidement pour s'approcher du double de cette déformation vers 80 kilomètres à l'heure. A partir de cette limite, il y a une faible tendance à la diminution.

(1) Voir *Bulletin du Congrès des chemins de fer*, n° 12, décembre 1888, p. 1105.

(2) Voir *Bulletin du Congrès des chemins de fer*, n° 3, mars 1892, p. 459.

(3) Les diagrammes sont reproduits p. 909 et suivantes du *Bulletin du Congrès des chemins de fer*, n° 10, octobre 1903.

(Note de la Rédaction.)

On serait tenté, sur cette constatation isolée, de conclure, comme certains Américains téméraires, qu'à vitesse excessive le rail n'est plus fléchi du tout;

3° Malheureusement, les plus grandes flexions sont produites par les wagons à frein à main, notamment par les tenders, et ces à-coups ont une influence croissante avec la vitesse;

4° A part sous certains wagons à bogies, la voie reste descendue sur toute la longueur du train, ce qui montre que l'influence d'un essieu se fait sentir sur une longueur de 6 à 7 mètres, c'est-à-dire sur huit à neuf traverses.

Nous voyons là le motif pour lequel la flèche additionnelle entre deux traverses espacées de 0.8 mètre n'est pas bien grande par rapport à celle produite entre deux essieux par l'ensemble des traverses qu'ils comprennent entre eux;

5° Nous ne parlons que pour mémoire des phénomènes de soulèvements de la voie en avant et en arrière du train, soulèvements que fait prévoir la théorie et qui n'ont pas d'importance;

6° Enfin, nous appelons votre attention sur la forme constante de la déformation. Malgré la brutalité du phénomène, on y reconnaît une série de véritables harmoniques que nous négligeâmes à l'origine des essais, les prenant pour des phénomènes parasites dus à des chocs, à des actions irrégulières.

En fait, il n'en était rien, mais ce ne fut que beaucoup plus tard qu'ayant soumis la question à un examen théorique, nous découvrîmes la formule de ces déformations et fûmes très étonné de les retrouver, conformes à la théorie, dans les tracés grossiers, mais très nets, fournis par l'appareil.

En fait, il y avait identité physique entre la vibration d'un rail puissant attaqué brutalement par une *Pacific* de

100 tonnes, lancée à toute vitesse, et celle de la corde de soie d'un instrument, effleurée par une main légère.

Quelle est donc la puissance du calcul qui permet de rapprocher deux phénomènes aussi disparates?

A ce propos, qu'il nous soit permis de faire ici une petite digression en faveur de la méthode théorique.

Nous sommes grand partisan de la méthode expérimentale, mais chaque fois que nous l'avons employée, comme dans le cas présent, avant de savoir exactement ce que nous voulions lui faire donner, nous avons passé à côté des résultats les plus importants sans les voir tout de suite.

Le jeune ingénieur est assez tenté, devant les méthodes approximatives et parfois grossières qu'on lui enseigne dans les écoles, à considérer sa profession comme une carrière, scientifique sans doute, mais approximativement scientifique.

C'est là un grand tort. Si un pareil esprit est tolérable et même justifié pour les ingénieurs d'industrie à qui on demande tout de suite des résultats tangibles au point de vue financier, il est des plus fâcheux pour les ingénieurs chargés de faire avancer la science technique dont les premiers appliquent les résultats. Ils doivent faire de la science de l'ingénieur et non de l'art de l'ingénieur.

Nous disons donc aux jeunes : Faites de la théorie; si peu justifiée qu'elle paraisse, elle aura toujours comme résultat de vous faire apprécier plus sainement et plus complètement les expériences que vous aurez l'occasion de faire. Surtout, faites de la science théorique exacte et réservez l'approximation pour l'instant du calcul numérique.

Mais quittons au plus vite un domaine où nous ne pouvons résister d'entrer

quand nous en côtoyons la frontière, et revenons à notre sujet.

Le calcul permet de voir que la flexion simple ne produit pas de ces harmoniques que nous vous avons montrées. Elles n'apparaissent d'ailleurs qu'à grande vitesse sur les diagrammes.

Ne seraient-elles pas dues à des vibrations causées dans le rail par l'application brusque de la charge?

C'est, en effet, ce qui arrive. La forme vibrante du rail quand il est soumis à une action quelconque qui le déplace de sa position d'équilibre, est bien celle donnée par les diagrammes.

Elle est formée de sinusoïdes élémentaires de la forme :

$$y = u \cos(\alpha t + \beta),$$

β est la phase, sans importance, u l'amplitude dont nous dirons un mot.

Quant à α , c'est un nombre qui obéit à la relation

$$\frac{\mu \alpha^2 - k}{\varepsilon} = \frac{m^4}{L^4},$$

μ étant la masse de l'unité de longueur de la voie, k le coefficient d'enfoncement de la voie et ε le moment d'inertie du rail, L l'espacement des essieux. Quant à m , c'est un nombre variable qui répond à la condition curieuse :

$$\cos m \cos hm = 1.$$

Les premières valeurs de m sont assez exactement :

$$m = \frac{3\pi}{2},$$

$$m = \frac{5\pi}{2},$$

$$m = \frac{7\pi}{2};$$

c'est-à-dire que les longueurs mises en

vibration dans les harmoniques sont proportionnelles aux nombres impairs successifs.

L'examen des diagrammes montre qu'il en est bien ainsi et très nettement.

Quant à l'amplitude, elle reste indéterminée dans cette méthode, car il suffit, comme vous le savez, que le rythme des chocs coïncide avec celui de la vibration pour que l'amplitude puisse atteindre des valeurs aussi considérables qu'on peut l'imaginer.

Aussi pouvions-nous conclure il y a une dizaine d'années :

Les lois de la flexion des pièces sollicitées par des charges ne sont pas applicables au rail parcouru par des trains rapides.

Le rail est plutôt une pièce soumise à des déformations élastiques violentes provenant de chocs qui provoquent des vibrations rythmées dans les parties libres de la voie comprises entre deux essieux consécutifs, au droit desquels le rail est comme encastré.

Et nous ajoutons : le calcul nous paraît impuissant à résoudre cette dernière partie de la question. Peut-être à l'aide d'expériences nombreuses pourra-t-on trouver l'amplitude réelle de ces vibrations et en conclure la fatigue qu'elles imposent au métal.

Mais pour être instructives, ces expériences doivent être répétées dans des circonstances très variables de charge, de construction, de bourrage, d'âge de pose, etc., et nous nous sommes demandé, instruit par ce qui nous était arrivé, si l'on ne pouvait pas les faire rentrer tout d'abord dans une formule dont elles ne détermineraient que les paramètres.

En effet, l'amplitude des déformations se montre toujours limitée et nous nous sommes proposé, laissant de côté la par-

tie due aux chocs, de mettre en évidence la partie due à la mise en charge brusque à l'arrivée soudaine du véhicule. Ces deux actions se ressemblent d'ailleurs beaucoup; mais tandis que la première est rebelle au calcul, l'autre est soumise au rythme de la vitesse.

Il nous paraît donc possible de faire entrer celle-ci dans la formule de vibration du rail et de rapprocher plus encore les résultats théoriques des tracés expérimentaux.

Espérant qu'un de nos jeunes collègues, bon mathématicien, examinera la question de son côté, nous allons exposer en quelques mots la marche que l'on peut suivre :

L'équation du mouvement du rail vibrant, si on néglige l'inertie de rotation due à la flexion, a la forme :

$$\varepsilon \frac{d^2y}{dx^2} + \mu \frac{d^2y}{dt^2} + ky = \varphi(t),$$

ε , μ et k ayant la signification ci-devant, et $\varphi(t)$ étant une fonction supposée d'abord continue, suivant laquelle varie, avec le temps, la charge unitaire qui agit sur la section considérée.

Or, cette variation dans le temps est la même que celle suivant l'abscisse, multipliée par la vitesse, c'est-à-dire que l'on a :

$$\frac{d\varphi}{dt} = v \frac{d\varphi}{dx}$$

$$\frac{d^2y}{dt^2} = v^2 \frac{d^2y}{dx^2}$$

L'équation différentielle ci-dessus devient donc intégrable directement, soit en x soit en t , et l'on peut obtenir la forme théorique du rail déformé.

Mais, en réalité, $\varphi(t)$ n'est pas une

fonction continue. Ce sont des forces isolées, ou à peu près, qui passent en chaque point du rail.

Pour passer de l'hypothèse première (continuité) à la réalité (discontinuité), il faut donner à $\varphi(t)$ une forme qui peut être arbitraire, mais devant contenir un paramètre qui, en croissant indéfiniment vers ∞ ou décroissant vers 0, donne à la fonction φ , à la limite, la valeur d'une force isolée.

Le plus rationnel est de supposer que la force isolée est répartie sur une certaine longueur λ à droite et à gauche, sur le rail, ce qui est vrai en fait, à admettre que cette répartition est égale; ce qui fausse à peine les résultats.

L'état de sollicitation est alors parfaitement défini, en admettant toujours que la répartition sur les traverses (supposées en nombre infini et très élastiques) est parfaitement égale (fig. 1)

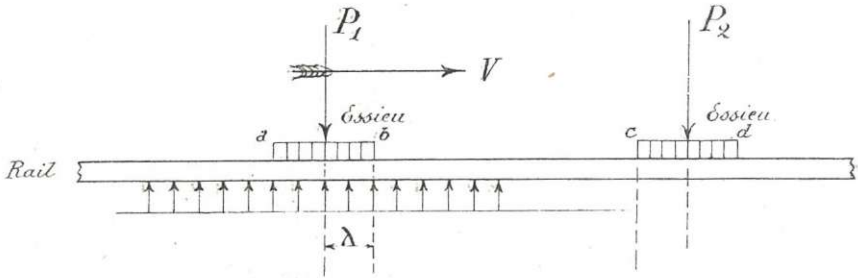


Fig. 1.

Les deux essieux P_1 et P_2 se déplaçant sur le rail avec la vitesse V , celui-ci subira donc le passage tantôt d'une partie telle que bc où il n'y aura pas de charge, tantôt une partie ab où il y aura une charge.

Le raccord entre les deux tronçons se fera par les procédés ordinaires en égalant, au point commun, les ordonnées, les inclinaisons des tangentes et les rayons de courbure.

Ensuite, dans les formules obtenues, on fera diminuer λ pour se rapprocher de la sollicitation par forces isolées.

On obtiendra ainsi la forme du rail et sa sollicitation et par suite les tensions qu'il subit, et il ne faudra pas perdre de vue pour fixer leurs limites acceptables qu'elles sont fréquemment répétées et même un peu renversées par le soulèvement du rail dont nous avons parlé.

Que trouvera-t-on ainsi? Nous ne le savons pas encore. Mais nous croyons bien que le théoricien sera plus exigeant que le praticien. Voici, en effet, un calcul approximatif de la tension du rail de 52 kilogrammes de l'Etat belge pour une charge statique de 10,000 kilogrammes avec un écartement d'essieux de 2.40 mètres. Son module de flexion étant de 232,000 millimètres cubes, il subira au repos une tension de 8.7 kilogrammes par millimètre carré.

Si l'on réfléchit que cette tension peut être doublée par la mise en charge brusque et subir encore, par les chocs des roues irrégulières, des augmentations intempestives, on reconnaît que la sécurité, sans être de tout repos, est en somme assez bonne.

Le moment est arrivé de conclure. Nous ne sommes pas partisan des ex-

posés purs et simples de l'opinion des autres, fussent-ils même des autorités. L'exposé des faits tout seuls est encore moins instructif. Nous estimons que celui à qui de longues études, jointes à ce « flair » spécial que donne une pratique continue, ont permis de s'assimiler un sujet complètement, doit dire nettement ce qu'il en pense, sans prétention d'ailleurs à la vérité absolue.

C'est donc « notre » opinion que nous allons vous énoncer.

Dans l'état actuel de la métallurgie, on peut exiger pour le rail un métal résis-

tant à 60 kilogrammes au moins à la rupture, et de préférence davantage, avec 13 p. c. d'allongement.

Quant au poids du rail, on peut le fixer par la formule fort simple :

Par mètre courant, il faut, en kilogrammes, deux fois la charge de l'essieu en tonnes plus 12 kilogrammes.

C'est par cet aphorisme linéaire que nous terminerons, chers camarades, la causerie que vous avez eu la patience d'écouter.