

www.e-rara.ch

Sur la nature de l'acier

Gruner, M.L.

Paris, 1881

ETH-Bibliothek Zürich

Shelf Mark: Rar 4626

Persistent Link: <https://doi.org/10.3931/e-rara-20593>

www.e-rara.ch

Die Plattform e-rara.ch macht die in Schweizer Bibliotheken vorhandenen Drucke online verfügbar. Das Spektrum reicht von Büchern über Karten bis zu illustrierten Materialien - von den Anfängen des Buchdrucks bis ins 20. Jahrhundert.

e-rara.ch provides online access to rare books available in Swiss libraries. The holdings extend from books and maps to illustrated material - from the beginnings of printing to the 20th century.

e-rara.ch met en ligne des reproductions numériques d'imprimés conservés dans les bibliothèques de Suisse. L'éventail va des livres aux documents iconographiques en passant par les cartes - des débuts de l'imprimerie jusqu'au 20e siècle.

e-rara.ch mette a disposizione in rete le edizioni antiche conservate nelle biblioteche svizzere. La collezione comprende libri, carte geografiche e materiale illustrato che risalgono agli inizi della tipografia fino ad arrivare al XX secolo.

Nutzungsbedingungen Dieses Digitalisat kann kostenfrei heruntergeladen werden. Die Lizenzierungsart und die Nutzungsbedingungen sind individuell zu jedem Dokument in den Titelnformationen angegeben. Für weitere Informationen siehe auch [Link]

Terms of Use This digital copy can be downloaded free of charge. The type of licensing and the terms of use are indicated in the title information for each document individually. For further information please refer to the terms of use on [Link]

Conditions d'utilisation Ce document numérique peut être téléchargé gratuitement. Son statut juridique et ses conditions d'utilisation sont précisés dans sa notice détaillée. Pour de plus amples informations, voir [Link]

Condizioni di utilizzo Questo documento può essere scaricato gratuitamente. Il tipo di licenza e le condizioni di utilizzo sono indicate nella notizia bibliografica del singolo documento. Per ulteriori informazioni vedi anche [Link]

2

SUR
LA NATURE DE L'ACIER

LE PLUS CONVENABLE POUR LES RAILS

PAR

M. L. GRUNER

Extrait des ANNALES DES MINES, livraison de Juillet-Août 1881.



PARIS

DUNOD, EDITEUR

LIBRAIRE DES CORPS NATIONAUX DES PONTS ET CHAUSSÉES, DES MINES
ET DES TÉLÉGRAPHES

Quai des Augustins, n° 49

—
1881

PARIS. — IMPRIMERIE ARNOUS DE RIVIÈRE, RUE RACINE, 26.

SUR LA NATURE DE L'ACIER

LE PLUS CONVENABLE POUR LES RAILS

Par M. L. GRUNER.

L'acier fondu pour rails doit-il être dur ou doux, et la nature de l'acier est-elle, ou non, sans influence sur le profil du rail?

Une commission, nommée par M. le Ministre des travaux publics, fut récemment chargée de comparer, au point de vue de la durée et des frais, les deux types de rails usités en France par nos grandes compagnies de chemins de fer. Doit-on préférer le rail à patin, dit américain, ou le rail à double champignon? Cette question peut avoir son importance, et cependant il en est une autre qui me semble devoir la primer, c'est celle de la *nature* du métal. La nature de l'acier influe, en effet, sur la durée des rails plus que la forme. Celle-ci n'est pourtant pas indifférente, quoique les conclusions de la commission, dont je viens de parler, laissent la question à peu près indécise dans son rapport du 12 avril 1881 (*). Au point de vue des frais et de la durée, les deux types se vaudraient sensiblement. Il est vrai que la commission s'est bornée à comparer les deux types d'une façon *générale*, sans s'inquiéter des dimensions relatives des diverses parties, qui cependant semblent devoir exercer, comme la *nature* du métal, une certaine influence sur la durée des rails. C'est cette

(*) Ce rapport est inséré p. 5 et suiv. du t. II, des *Annales* pour 1881.

double question que je voudrais essayer de traiter en ce moment, moins, au reste, dans l'espoir de la résoudre définitivement, que pour attirer sur elle l'attention des ingénieurs chargés de l'établissement des voies ferrées, et celle des ingénieurs qui dirigent les forges. Je m'occuperai d'abord de la plus importante des deux, de la *nature* du métal.

Il ne s'agit pas, bien entendu, du choix à faire entre l'ancien *fer soudé* et le fer ou l'acier *fondus*. Le fer soudé est condamné depuis quinze à vingt ans ; mais il y a *acier* et *acier* ; il y a mille nuances entre l'acier le plus doux, et surtout le simple fer doux fondu, et l'acier le plus dur, préparé pour les filières, les crochets de tours, les coins de monnaies, etc.

On sait bien qu'il ne faut choisir ni l'un ni l'autre des deux extrêmes ; le premier, *trop mou*, céderait sous le poids des locomotives ; le second, *trop dur*, ou plutôt *trop aigre*, se briserait sous le choc des trains. Mais, même en laissant ces extrêmes, il y a encore place pour des aciers de natures très diverses ; dans quelle mesure faut-il se rapprocher, pour les rails, du fer doux ou de l'acier dur ? Telle est la question à résoudre.

Dans l'appendice au rapport précité (*), la question semblerait au fond déjà tranchée. On affirme, comme évident en soi, sans preuves ni discussion à l'appui, qu'au point de vue de la *durée*, les rails en acier *dur* sont préférables ; on ajoute seulement cette réserve, que les rails doux présentent moins de chances de rupture. Cependant, même en admettant la première partie de cette double affirmation, affirmation précisément contestée aujourd'hui aux États-Unis, il s'agirait encore de savoir à quelle limite de dureté il faut s'arrêter, pour éviter les *ruptures* d'une part, la *rapide usure* de l'autre. Or, à cet égard, même en

(*) *Annales des Mines*, 2^e vol. de 1881, p. 75.

France, on ne s'entend pas; car, d'après le rapport précité, la compagnie du Nord veut un acier dont la charge de rupture soit comprise entre 60 et 74 kilog. par millimètre carré, avec un allongement sur 100 millimètres de 20 à 10 p. 100, tandis que la compagnie du Midi exige de l'acier ne cédant que sous une charge de 79 à 83 kilog., avec 11 à 4 p. 100 d'allongement (*loc. cit.*, p. 75).

Si, de la France, nous nous tournons vers les autres pays du continent, l'Allemagne, l'Autriche, la Russie, etc., nous verrons que la tendance générale est de préférer, pour les rails, des aciers cédant sous des charges de moins de 60 kilog. Cette différence, entre la France et les autres pays, est déjà signalée par M. Deshayes, dans son bon travail sur le *classement* et l'*emploi* des aciers.

En Suède, en Autriche, en Allemagne, dit cet ingénieur, on se sert surtout, pour les rails, d'aciers doux ordinaires de sa *troisième* classe, caractérisés par des charges de rupture comprises entre 50 et 60 kilog., tandis qu'en France on a plutôt recours aux aciers de la *quatrième* classe, de 60 à 70 kilog.; la compagnie du Midi recherche même les aciers durs de la *cinquième* classe, qui ne cèdent que sous des charges de 70 à 80 kilog.

Cette différence de dureté ressort, au reste, de la comparaison des cahiers des charges, imposés par les diverses compagnies de chemins de fer aux maîtres de forges. Entrons à ce sujet dans quelques détails.

En Autriche, une commission, nommée par le gouvernement, s'occupe en ce moment même de la rédaction d'un cahier des charges uniforme, en vue de parer aux inconvénients résultant de la diversité actuelle. Cette diversité est, en effet, assez grande. Le chemin de l'État (*Staatsbahn*), principalement dirigé par des ingénieurs français, a adopté un cahier des charges peu différent de celui des compagnies de notre pays, tandis que les autres lignes ont plutôt

adopté les prescriptions allemandes. Elles apprécient la force du métal par traction directe, et exigent alors à la fois des limites de résistance et de contraction, ce qui permet d'apprécier, jusqu'à un certain point, le degré de fragilité (*aigreur* ou *manque de corps*) de l'acier, sans avoir recours aux épreuves par le *choc*, usitées en France, épreuves qui cependant sont plus sûres et plus simples, ainsi que j'ai cherché à le montrer, il y a dix ans déjà, dans ma note sur les propriétés mécaniques des aciers phosphorés (*Annales des mines*, 1870, tom. 17) (*).

En Autriche donc et en Allemagne, on exige en général que l'acier résiste au *minimum* à 55 kilog. de charge, et que la contraction de la section de rupture soit supérieure à 20 p. 100 ; il faut, de plus, que la somme des deux nombres atteigne pour le moins 85 ; c'est-à-dire 55 kilog. et 30 p. 100, par exemple ; ou 60 kilog. et 25 p. 100, etc.

Les lignes Élisabeth et François-Joseph descendent même à 50 kilog. de résistance, pourvu que la contraction soit alors de 35 p. 100.

En Allemagne aussi, dans ces derniers temps, plusieurs sociétés acceptent des rails de moins de 55 kilog. de résistance, pourvu que ce nombre fasse toujours avec la contraction une somme d'au moins 85, ou 90 dans certains cas.

On voit donc qu'en Allemagne et en Autriche on recherche surtout pour les rails les aciers doux ordinaires de la troisième classe de M. Deshayes.

La même conclusion ressort des épreuves au mouton, prescrites par quelques autres sociétés. Ainsi la *Süd-Bahn* de l'empire d'Autriche soumet ses rails à patin au choc d'une masse de 1.000 kilog., tombant d'une hauteur de

(*) Aux États-Unis l'ingénieur Sandberg, spécialement chargé de la réception des rails, a aussi recommandé tout récemment l'épreuve au mouton, comme la plus propre à éprouver la force de résistance des rails. *Railroad Gazette*, du 4 février 1881.)

15 pieds de Vienne (4^m,75), les appuis étant à 3 pieds (0^m,95) d'écartement. L'*Elisabeth-bahn* exige un poids de 500 kilog., tombant de 6^m,50, les supports étant placés à 1 mètre de distance, sur une chabotte en fonte de 10.000 kilog. Ainsi encore, le rail à patin de 33 kilog. de l'Est hongrois doit supporter le choc d'un mouton de 1.000 kilog., tombant de 4 mètres, avec écartement des appuis de 1^m,10; et le rail à double champignon de la Haute-Italie, de 35 kilog., un poids de 1.000 kilog. tombant de 10 mètres, les couteaux étant également à 1^m,10 l'un de l'autre.

Enfin aux États-Unis on impose en général, pour des rails pesant 60 livres par yard (30 kilog. le mètre), l'essai au mouton de 1.000 kilog., tombant de 20 pieds (6^m,10) de hauteur, les appuis étant à 3 pieds (0^m,915) d'intervalle.

En comparant ces conditions aux cahiers des charges français, on voit tout de suite combien les rails étrangers sont plus doux que les nôtres.

Les compagnies françaises se contentent d'un mouton de 500 kilog., les appuis étant placés à 1^m,10 d'écartement, sur une chabotte en fonte de 10.000 kilog., la hauteur de chute étant au maximum de 2^m,50 à 3 mètres (*). Voici en effet, d'après les derniers cahiers des charges, les hauteurs prescrites :

		kilog.	mètres.	
Compagnie P. L. M.	{ Rail à patin	de 32,50 . .	2,00	de hauteur.
	{ —	de 38,75 . .	2,50	—
Compagnie du Nord.	{ Rail à patin	de 37 . . .	2,50	—
	{ —	de 35 . . .	2,40	—
	{ —	de 30 . . .	2,25	—

(*) Il est vrai que les chocs sont parfois répétés sur le même rail en partant de 1^m,50 et en remontant le mouton successivement à 1^m,75, 2 mètres, 2^m,25, etc. C'est une condition de la compagnie du Midi.

	kilog.	mètres.	
Compagnie de l'Est.	Rail à patin de 36 . . .	2,40	} Ne casse pas en général avec une hauteur de 5 mètres.
	— de 30 . . .	2,25	
Compagnie de l'Ouest.	Rail à patin de 30 . . .	2,00	
	— à double champignon de 38,75 . .	2,00	
Compagnie d'Orléans.	Rail à double champignon de 38. . . .	1,50	
Compagnie du Midi.	Rail à double champignon de 37	1,75	} Le rail doit casser à 4 mètres de chute.

Ajoutons enfin :

Compagnie de la Staatsbahn en Autriche, 1879.	} Rail à patin de 30,5 sur des supports à 1 mètre d'intervalles	Au-dessus de 0° de température . . .	3,00
		Au-dessous de 0° . .	2,40

Les rails ainsi frappés ne doivent d'ailleurs pas présenter une flèche permanente dépassant un certain maximum en vue de la rigidité du métal.

Ainsi :

La compagnie P. L. M. fixe comme maximum	0 ^m ,006
La compagnie de l'Est	} pour le rail de 36 kilog . . . 0,012 pour le rail de 30 kilog . . . 0,013 à 0,015
La compagnie du Nord respectivement, selon les poids	
La compagnie de l'Ouest	} pour le rail à double champignon 0,008 pour le rail à patin 0,015

L'ensemble de ces conditions montre bien que l'acier des rails du Midi est plus dur que celui des autres lignes; que les rails de P. L. M. viennent ensuite; puis ceux des compagnies du Nord, de l'Est et de l'Ouest, qui, à leur tour, sont plus durs que les rails de la Staatsbahn et surtout que ceux de la plupart des autres lignes du continent européen.

Aux épreuves par le choc viennent souvent s'ajouter, en France, des essais propres à constater la rigidité du métal. Le rail, placé sur deux appuis, à 1^m, 10 d'intervalle, doit supporter pendant cinq minutes, 16, 17, 18 ou 20 tonnes, selon leur poids, sans conserver de flèche permanente, et ne pas se rompre sous une charge à peu près double, de 30, 35 et 40 tonnes. Ces conditions, presque identiques dans la plupart des cahiers des charges des compagnies françaises, prouvent également que l'acier de nos rails est relativement dur.

Aucune des compagnies françaises n'exige des essais de traction et encore moins une certaine teneur en carbone, ou une composition chimique déterminée, sauf pourtant la compagnie P. L. M. qui veut un minimum de 0,003 de carbone dans le lingot. Par contre, on demande en général que le métal *trempe*; et les compagnies de Lyon et du Midi exigent même que l'acier, ainsi trempé, puisse entamer la fonte blanche, ou au moins la fonte d'une nuance gris clair à grains serrés; nouvelle preuve de la dureté de l'acier des rails français.

Enfin les essais de traction opérés dans les usines, à titre de simples renseignements, conduisent au même résultat. Ainsi l'acier de la compagnie P. L. M. ne cède en moyenne qu'à des charges de 65 kilog., avec 14 p. 100 d'allongement sur des barrettes de 0^m, 100, ou 30 à 35 p. 100 de contraction, les extrêmes étant 55 et 80 kilog. avec 16 à 10 p. 100 d'allongement, ou 20 à 35 p. 100 de contraction. C'est le caractère de la quatrième classe de M. Deshayes. L'acier des rails du Midi ne rompt que sous les charges moyennes de 85 kilog. avec 10 à 12 p. 100 d'allongement ou 25 à 30 p. 100 de contraction, les extrêmes étant 70 et 115 kilog., avec des allongements de 14 à 6 p. 100, ce qui correspond aux aciers durs de la cinquième classe.

Si l'on appliquait à ces aciers les conditions imposées par les Sociétés allemandes et autrichiennes, on trouverait

que la somme des nombres représentant la résistance et la contraction serait en moyenne, pour la compagnie P. L. M., $65 + 30$, soit 95 et, pour celle du Midi, $80 + 25$ à 30, soit 105 à 110, chiffres qui montrent également que les rails de ces deux lignes sont plus durs et plus rigides que ceux des lignes allemandes et autrichiennes.

Si enfin on étudiait la nature chimique des aciers propres aux rails, on trouverait, d'une usine à l'autre, de très grandes différences, parce que l'on peut réaliser de diverses manières le même degré de résistance et de dureté; il suffit, par exemple, de faire varier en sens inverse le carbone et le manganèse, ou de diminuer la dose de carbone, lorsque croissent les proportions de silicium et de phosphore; ce qui prouve, pour le dire en passant, combien il serait peu rationnel, de la part d'un consommateur de rails, de vouloir prescrire une certaine formule chimique, ainsi que l'a tenté récemment, comme nous le verrons, l'une des sociétés les plus importantes des États-Unis.

En analysant les rails de la compagnie P. L. M., on trouve, pour la même résistance, et en général pour des propriétés mécaniques peu différentes :

	p. 100.		p. 100.	
Tantôt	{	C = 0,40 à 0,45 Mn = 0,60 à 0,50 Si = 0,30 à 0,35	et tantôt {	C = 0,60 à 0,70 Mn = 0,40 à 0,30 Si = 0,10 à 0,20

la proportion de phosphore étant, dans les deux cas, au-dessous de 0,10 p. 100 et celle du soufre également très faible. — D'autre part, les rails du Midi doivent retenir, pour 0,60 à 0,70 p. 100 de carbone, une proportion plus forte de manganèse et de silicium que ceux de la compagnie P. L. M., sinon ils ne casseraient pas sous le choc du mouton tombant de 4 mètres de hauteur; en sorte que cette bizarre condition, provenant de ce que l'on prend à tort l'*aigreur* ou la fragilité pour un signe de dureté, implique en réalité *une plus grande impureté* du métal. Si, en

effet, l'acier était simplement plus carburé que celui de la compagnie P. L. M., il serait alors non seulement plus dur, mais aussi plus résistant, et, par suite, le rail ne se romprait pas sous l'épreuve du choc de 4 mètres.

En résumé, de tout ce qui précède, il résulte positivement que les rails français, et surtout ceux des compagnies P. L. M. et du Midi, sont plus durs que la plupart de ceux des pays étrangers.

Il y a donc réellement sous ce rapport de très grandes divergences; aussi la question n'est-elle pas oiseuse de rechercher quel est au fond le degré de dureté qu'il convient d'adopter au point de vue de la *vie* des rails. On s'en est préoccupé aux États-Unis plus qu'en Europe, et voici les circonstances dans lesquelles la question fut soulevée.

A la suite de l'hiver 1876-1877, de nombreux rails de la *Pennsylvania Railroad C^y* furent trouvés brisés, ou fendus par écrasement (*crushed*). Le conseil d'administration de ladite ligne, désireux de connaître la cause des ruptures, chargea le D^r Dudley, ingénieur chimiste, de rechercher les propriétés mécaniques et la composition chimique des mauvais rails et de les comparer aux *bons* rails de la même ligne, les uns et les autres provenant de diverses usines anglaises et américaines.

Les résultats de ces études sont publiés dans deux rapports, insérés dans les transactions de l'*American Institute of mining engineers*. Le premier est du mois d'août 1878 (*); le second, le plus important des deux, du mois de février 1881. L'un et l'autre ont donné lieu à de fort intéressantes discussions, dans lesquelles les conclusions de M. Dudley furent vivement attaquées par les ingénieurs et directeurs des usines à rails. Mais aussi, il faut bien l'avouer, M. Dudley a prêté le flanc aux objections, en ne se contentant pas de signaler la nature physique et chimique des *bons* et des

(*) Le premier mémoire se trouve dans le tome XII des *Transactions*, p. 172.

mauvais rails, ainsi que les conséquences directes qui en découlent. Il a cru devoir, en outre, établir une sorte de formule chimique très étroite, en dehors de laquelle les rails seraient réputés *mauvais*. Aux épreuves mécaniques, il veut ajouter, dans le cahier des charges, une formule chimique, oubliant, comme je viens de le rappeler, que les mêmes propriétés physiques peuvent être réalisées par des formules chimiques fort différentes. Si l'on ne connaît pas encore, d'une façon assez complète, l'influence précise de tous les éléments sur la nature de l'acier pour pouvoir fixer, dès maintenant, les limites en dehors desquelles un rail devrait être rebuté, on sait du moins, que plusieurs voies conduisent au même but, que des formules chimiques différentes peuvent donner des rails également résistants. Une formule chimique *unique* est d'autant moins logique que le *mode* de fabrication, le *travail mécanique* auquel le métal est soumis, et même le *profil* adopté ont également une notable influence sur les qualités bonnes ou mauvaises du rail.

Ces réserves faites, les analyses de M. Dudley restent. C'est un travail sérieux, dont il convient de tenir grand compte, si l'on veut découvrir les causes réelles de la plus ou moins longue durée des rails. Examinons donc successivement les deux mémoires.

Dans le premier, destiné surtout à constater les causes de la *rupture*, totale ou partielle, des rails, on a déterminé la nature physique et chimique de vingt-cinq rails, choisis dans la voie, après un service plus ou moins long. Ce sont, d'une part, des rails totalement brisés, ou simplement fissurés par écrasement (*crushed*); de l'autre, des rails demeurés en bon état de service, ou tout au plus usés par frottement. On a analysé l'acier de ces vingt-cinq rails, en n'y dosant toutefois que le carbone, le manganèse, le phosphore et le silicium, admettant de la sorte (à mon avis, un peu à tort) que le soufre, le cuivre et d'autres éléments ne

devaient s'y trouver qu'en minimes proportions, parce que, sans cela, des *criques* se seraient produites lors du laminage, ce qui aurait fait rebuter les rails. Par ce motif M. Dudley a supposé que les rails éprouvés ne devaient pas contenir ces autres substances en doses nuisibles.

Parallèlement à l'étude chimique, le métal des rails fut soumis à des essais mécaniques de traction et de torsion, poussés successivement jusqu'à la limite de l'élasticité et usqu'à la rupture.

Or, en comparant les résultats fournis par les treize rails cassés, ou fissurés, aux douze restés en bon état, ou simplement usés par frottement, on trouve que les premiers sont formés d'acier moyennement dur, cédant à des charges supérieures à 52 ou 53 kilog. par millimètre carré et s'allongeant (sur 0^m,127) de moins de 20 p. 100; tandis que les douze rails non rompus sur la voie ont cédé sous des charges de 45 à 52 kilog., après allongement de plus de 21 p. 100. Les mauvais rails renferment, en général, plus de 1 p. 100 d'éléments étrangers, la moyenne étant :

Carbone	0,366	p. 100
Manganèse	0,521	—
Phosphore	0,132	—
Silicium	0,047	—
Total	<u>1,065</u>	—

soit 0,700 en dehors du carbone.

Les douze bons rails, au contraire, tiennent moins de 1 p. 100 d'éléments autres que le fer, et conduisent à la moyenne suivante :

Carbone	0,287	p. 100
Manganèse	0,369	—
Phosphore	0,077	—
Silicium	0,044	—
Total	<u>0,777</u>	—

soit 0,490 en dehors du carbone.

Il suit de là, ce qu'au reste on savait déjà, que les rails trop chargés d'éléments étrangers sont *aigres*, ou *cassants*, c'est-à-dire exposés à se briser sous le choc des roues d'un train, quoique la résistance statique et la dureté de l'acier soient plus grandes que dans les bons rails. A ce point de vue donc, on doit donner la préférence à l'acier pur et doux.

Jusque-là tout est bien, et si M. Dudley s'était contenté de cette conclusion générale, personne n'y aurait contredit, mais il est allé plus loin : il a conclu de ses analyses qu'un *bon rail* devait contenir :

Carbone	0,25 à 0,35 p. 100	
Manganèse.	0,40 à 0,50	—
Phosphore, au plus .	0,10	—
Silicium, au plus . .	0,04	—

Et cette formule fut dès lors imposée aux fabricants de rails, dans les cahiers des charges de la *Pennsylvania Railroad C^v*.

Dire qu'un rail ne saurait être bon en dehors de cette formule inflexible, c'est évidemment dépasser le but. On peut citer de nombreuses analyses de bons rails contenant en particulier plus de silicium et de manganèse, et même plus de phosphore, pourvu que le carbone soit alors en proportion moindre.

A cette formule, M. Dudley en ajoute une autre, qui consiste à mesurer la force de résistance des rails par ce qu'il appelle les *unités phosphoriques* (*phosphoric units*). Il suppose que le phosphore est par excellence l'élément qui *durcit* et *aigrit* le fer (*hardener and brittle-maker*). A chaque 0,01 p. 100 de phosphore contenu dans l'acier, il donne le nom d'*unité phosphorique*; puis il admet, un peu arbitrairement, et en tout cas sans preuves à l'appui, que 0,02 de silicium, 0,03 de carbone et 0,05 de manganèse doivent produire le même effet que 0,01 de phosphore;

en sorte que, pour avoir la somme totale des unités phosphoriques, il ajoute au nombre des centièmes p. 100 de phosphore, la moitié des centièmes de silicium, le tiers des centièmes de carbone et le cinquième des centièmes de manganèse. Ainsi l'on aurait, pour l'acier type du rail de la *Pennsylvania C^v*, d'après la formule ci-dessus citée, les nombres d'unités suivants :

Pour le phosphore.	10
— carbone $1/3$ (de 0,25 à 0,30).	8 à 10
— manganèse $1/5$ (de 0,30 à 0,40).	6 à 8
— silicium $1/2$ (de 0,04).	2
Total.	26 à 30

Et de là M. Dudley tire la prescription, tout au moins singulière, que les rails ne doivent pas accuser au delà de 31 unités phosphoriques! Je ne m'attarderai pas à combattre cette bizarre théorie; j'observerai seulement qu'en agissant ainsi, M. Dudley semble admettre, comme notre compagnie du Midi, que les éléments qui engendrent la *dureté* causent par cela même le défaut de la *fragilité*. Le carbone, l'élément *aciérant* par excellence, qui accroît la résistance et la dureté du fer, sans développer la fragilité lorsqu'il est *seul* uni au fer, se trouve ainsi relégué par M. Dudley, comme le phosphore, parmi ce qu'il appelle les impuretés de l'acier (*impurities*, p. 175 de son rapport). Je ne veux pas dire que le silicium et le manganèse, ajoutés au carbone en proportions un peu fortes, ne contribuent également à l'aigreur, mais on sait par les expériences de Mazek (*) et par les résultats de la pratique que, dans des proportions limitées, le manganèse a plutôt sur l'acier une influence utile, et que le silicium n'est pas aussi nuisible que M. Dudley semble le croire. Je me borne donc à

(*) Extraits du mémoire de Mazek publiés par M. Gauthier. *Bulletin de l'Industrie minière*, 2^e série, t. IV.

retenir, du premier mémoire de M. Dudley, ce résultat, déjà important, que les rails *cassants* de la Pennsylvania-ligne renferment, outre 0,366 p. 100 de carbone, 0,700 p. 100 d'éléments étrangers, parmi lesquels 0,132 p. 100 de phosphore, tandis que les *bons* rails contiennent, outre 0,287 p. 100 de carbone, seulement 0,490 p. 100 d'éléments étrangers, dont 0,077 p. 100 de phosphore; en sorte que la fragilité des premiers semble bien ici devoir être attribuée à la trop forte dose de phosphore, ou, en général, à la proportion trop élevée des éléments étrangers. J'ajoute que s'il est utile, et même *nécessaire*, au fabricant de rails de connaître la composition chimique des *mauvais* rails, il faut bien se garder de lui imposer une formule déterminée; on doit simplement exiger des garanties de solidité, c'est-à-dire de sérieuses épreuves mécaniques. Or les essais mécaniques, ci-dessus résumés, prouvent que les *bons* rails sont relativement *doux*, puisque la résistance est au-dessous de 52 kilog. et l'allongement supérieur à 21 p. 100; tandis que les rails *cassants* ont une ténacité supérieure à 53 kilog. avec un allongement inférieur à 20 p. 100.

Dans ce premier travail, M. Dudley n'avait pas à se préoccuper de l'*usure* des rails par frottement, mais seulement de leur fragilité relative. Cependant, en examinant les douze rails non cassés, il fut frappé de leur usure inégale, et surtout de ce fait que, contrairement aux principes admis, c'étaient plutôt les rails *doux*, peu carburés, qui avaient subi la *moindre usure*. Il fut ainsi amené à rechercher si d'autres ingénieurs n'auraient pas observé des faits analogues. Or, en effet, deux mémoires anglais de 1875 et 1876 contiennent des observations à l'appui des conclusions, en apparence paradoxales, que je viens de rappeler.

En 1875, M. J. T. Smith, directeur général du grand établissement connu sous le nom de *Barrow Hematite Steel Works*, dans le Cumberland, lut à la Société des in-

généralistes de Londres (*) un mémoire dans lequel il proposait de mesurer la dureté des rails à l'aide d'un appareil faisant connaître la charge qu'exige le percement au poinçon (*punshing*) de trous pareils à ceux des éclisses. L'âme des rails à percer avait $\frac{3}{4}$ de pouce (0^m,019) d'épaisseur et le diamètre des trous était de $\frac{7}{8}$ de pouce (0^m,022). M. Smith soumit à cet essai trente rails Bessemer, qui avaient servi huit ans sur la principale ligne du *Furness railway*, servant au transport des hématites du Cumberland. D'après la grandeur de la charge, nécessaire au perçage des trous, M. Smith divisa les rails en *doux* et *durs*. Pour percer les premiers, au nombre de vingt, il avait fallu des charges variant entre 46 $\frac{1}{4}$ et 52 $\frac{1}{2}$ tonnes; pour le percement des dix autres, 56 $\frac{3}{4}$ tonnes à 82 $\frac{1}{2}$ tonnes. La moyenne pour les rails *doux* est de 49 tonnes; celle pour les rails *durs*, de 64 $\frac{3}{4}$ tonnes. Dans les premiers, la proportion de carbone était comprise entre 0,0028 et 0,0032, soit une moyenne de 0,0030; dans les derniers, entre 0,0036 et 0,0057, ou une moyenne de 0,0044. Eh bien, en comparant le poids des rails usés à leur poids primitif, M. Smith a trouvé, « contrairement à ce que l'on aurait pu supposer *à priori* », que les rails *doux* étaient *moins usés* que les rails *durs*. Le second mémoire est de M. *Price Williams*, concernant l'entretien des chemins de fer (**). M. Williams a mesuré l'usure par la perte de hauteur de la tête des rails. Il a calculé le trafic par chaque seizième de pouce de perte, et il a trouvé ainsi, pour sept rails d'inégale dureté, placés côte à côte, qu'un trafic de 10.055.000 tonnes a produit, sur trois rails *durs*, la même usure de $\frac{1}{16}$ de pouce que 15.567.000 tonnes sur quatre rails *doux*.

Évidemment ces premières données ne suffisent pas

(*) *Proceedings of the Inst. of civil Engineers*, t. XLII, p. 60.

(**) *Proceedings of the Inst. of civil Engineers*, vol. XLVI, p. 147.

pour autoriser des conclusions générales de quelque valeur; mais ils doivent, du moins, attirer l'attention des ingénieurs sur la question. Et ce furent, en effet, ces premiers aperçus qui déterminèrent le conseil de la compagnie du *Pennsylvania-railroad* de charger aussi M. Dudley de l'étude spéciale de l'*usure* des rails. Le résultat de ce second travail fut communiqué à l'*American Institute of mining engineers*, dans sa séance du mois de février dernier, tenue à Philadelphie; et, dès maintenant, je puis dire que les conclusions de cet important travail confirment réellement les observations précédentes, c'est-à-dire que les rails *durs* s'usent, en effet, plus rapidement que les rails *doux*.

Voici la marche suivie dans le second travail. Sur la voie du *Pennsylvania-railroad* on a choisi 64 rails ayant la plupart à peu près dix années de service. Seize furent pris dans des parties droites en palier, 16 dans des courbes en palier, dont 8 du côté inférieur et 8 du côté supérieur des courbes; 16 autres rails furent pris dans des parties droites en pente et 16 enfin dans les parties courbes en pente, dont 8 aussi du côté inférieur et 8 du côté supérieur des courbes. Dans chacune des quatre, ou plutôt des six catégories, l'une des moitiés fut choisie parmi les rails *fortement* usés, l'autre moitié parmi les rails *peu* entamés. Tous d'ailleurs étaient de *bons* rails qui n'avaient subi ni fracture ni écrasement (*crushing*).

Dans la tête de chacun de ces 64 rails on découpa des barrettes pour les essais de *torsion*, de *cisaillement* et de *traction*, et dans l'âme des rails, d'autres barrettes, ayant l'épaisseur même du rail et 1 1/2 pouce de largeur, pour les essais de *flexion*. Les barrettes pour les essais de *traction*, les seuls dont je rapporterai ici les résultats, avaient 5 pouces (0^m,127) de longueur entre les têtes et 3/4 de pouce (0^m,019) de diamètre. Lors des essais, les charges étaient successivement augmentées de 2.000. liv. (907 kil.) par pouce carré, soit 1^k,405 par millimètre carré; et,

après chacune des charges partielles, on mesurait l'allongement au micromètre pour pouvoir fixer la limite d'élasticité.

On analysa l'acier de chacun des rails, comme dans le premier travail, en se bornant aussi, par les mêmes motifs, au dosage du carbone, du manganèse, du phosphore et du silicium. Pour pouvoir juger de l'usure des rails, le profil de chacun d'eux est figuré, dans le mémoire original, en grandeur naturelle avec le tracé ponctué du profil primitif. On peut constater ainsi que la déformation proprement dite est à peu près nulle, même dans le cas des rails les plus doux, et que la différence entre les deux profils provient bien uniquement de l'enlèvement du métal par frottement. L'usure elle-même a été déterminée en comparant le poids du yard courant des vieux rails à celui des rails neufs; mais comme le poids des rails sortant des forges n'est pas rigoureusement constant, et que celui des divers rails soumis aux études en question n'avait pas été déterminé lors de la pose, il a fallu y arriver indirectement. A cet effet, on a comparé l'aire du profil usé à l'aire du profil primitif, en se servant d'un planimètre intégrateur, et l'on a fixé directement la densité du métal de chaque rail, en pesant, à l'air et dans l'eau distillée, des sections normales d'un demi-pouce d'épaisseur de chacun de ces rails. On a pu arriver ainsi à la perte en métal par chaque yard courant des rails, et, en divisant ces chiffres par le nombre de millions de tonnes, représentant le trafic supporté par le rail, on trouve finalement la *mesure de l'usure*, c'est-à-dire la perte par million de tonnes. Pour un trafic de 40 à 50 millions de tonnes, la perte totale de poids par yard est généralement comprise entre 2 et 4 liv.; soit 1 à 2 kilog. par mètre courant; ce qui fait 20 à 40 grammes par mètre courant et par chaque million de tonnes de trafic. D'après les moyens employés pour déterminer les divers éléments de l'usure en question, M. Dudley estime,

à la suite d'une discussion raisonnée, l'erreur possible à moins de 1 1/2 p. 100, ce qui me paraît, en effet, plus que probable.

Le mémoire original contient, outre les profils en grandeur naturelle, ci-dessus mentionnés, une série de tableaux donnant, pour les 64 rails, les résultats individuels de toutes les épreuves auxquelles le métal fut soumis; un dernier tableau résume les moyennes des 12 catégories de rails, c'est-à-dire les moyennes de chacune des 6 catégories de rails *fortement* usés et celles des 6 catégories de rails *faiblement* usés, et finalement les deux moyennes générales des 32 rails *fortement* entamés et des 32 autres rails *faiblement usés*.

Au lieu de reproduire ces divers tableaux en mesures anglaises, je crois plus utile de me borner à un tableau résumé en mesures métriques.

Dans une première colonne je donne la perte de poids en grammes par mètre courant du rail et par chaque million de tonnes de trafic.

Les trois colonnes suivantes renferment les résultats des essais de traction, c'est-à-dire la résistance de rupture et la limite d'élasticité en kilogrammes par millimètre carré, ainsi que l'allongement d'une barrette de 127 millimètres au moment de la rupture. La cinquième colonne contient, en kilogrammes par millimètre carré, l'effort développé par le cisaillement, et la sixième en millimètres, ce que l'auteur appelle *detrusion* c'est-à-dire l'avancement de l'instrument tranchant au moment où la pièce est sur le point de céder, l'essai étant fait sur une barrette cylindrique de 5/8 de pouce de diamètre (0^m,016).

Je donne ces deux éléments, parce qu'ils permettent d'apprécier, jusqu'à un certain point la *dureté* du métal. La résistance au cisaillement est d'autant plus grande et la *detrusion*, d'autant plus faible que l'acier est plus dur. J'ai supprimé les colonnes relatives aux essais de

torsion et de flexion, moins importants que les précédents au point de vue de l'usure des rails. Dans les analyses chimiques, je supprime les *unités phosphoriques* de M. Dudley, et, à leur place, je donne les sommes des éléments étrangers; enfin, dans une dernière colonne, ces mêmes sommes moins le carbone. On peut juger ainsi du degré de *pureté* de l'acier, qui joue, comme nous le verrons, un rôle assez important dans la question de la durée des rails.

Enfin, j'ai réduit, dans le tableau ci-joint, les 12 catégories de rails à huit, en ne séparant pas les rails des courbes en palier de ceux des courbes en pente.

NOMBRE ET ORIGINE des rails.	PERTE de poids de 1 mètre courant de rails en grammes par million de tonnes de trafic.	ESSAIS de traction.		ESSAIS de cisaillement.		COMPOSITION CHIMIQUE DES ACIERS.						OBSERVATIONS.	
		Résis- tance par millim. en kilo- grammes R.	Limite d'élas- ticité par millim. carré en kilo- grammes L.	Allon- gement sur 127 millim. carré en cen- tièmes a.	Effort par millim. carré de section. kilog. 40,0	« Detru- sion » en millim.	Éléments par 100 de métal.						
							C	Mn	Ph	Si	Total		Total moins le carbone.
Moyennes de 8 rails peu usés, provenant de paliers et de lignes droites.	8,70	50,9	25,7	17,5	40,0	2,36	0,282	0,433	0,104	0,036	0,897	0,615	
Moyennes de 8 rails fortement usés, provenant de paliers et de lignes droites.	29,75	56,1	26,7	14,5	44,7	2,31	0,381	0,675	0,115	0,046	1,217	0,826	
Moyennes de 8 rails peu usés, provenant de voies en pente et lignes droites.	27,00	55,9	26,4	19,6	40,0	2,44	0,324	0,562	0,076	0,102	1,064	0,740	
Moyennes de 8 rails fortement usés, provenant de voies en pente et lignes droites.	43,05	57,4	23,7	15,6	43,2	2,03	0,379	0,669	0,095	0,031	1,195	0,816	
Moyennes de 8 rails peu usés, provenant de voies en courbes; rails inférieurs.	20,97	50,3	23,3	19,7	39,2	2,40	0,337	0,432	0,060	0,036	0,865	0,528	
Moyennes de 8 rails fortement usés, provenant de voies en courbes; rails inférieurs.	44,40	55,8	27,6	12,1	43,6	2,14	0,416	0,615	0,120	0,036	1,197	0,771	
Moyennes de 8 rails peu usés, provenant de voies en courbes; rails supérieurs.	44,60	54,0	25,7	11,7	42,5	2,29	0,391	0,516	0,066	0,046	1,019	0,628	L'acier de quelques rails présente un allonge- ment exceptionnelle- ment faible.
Moyennes de 8 rails fortement usés, provenant de voies en courbes; rails supérieurs.	88,65	56,4	27,1	14,7	43,3	2,24	0,366	0,630	0,092	0,034	1,162	0,776	
Moyennes générales des 32 rails peu usés.	25,30	52,8	25,3	17,1	41,4	2,37	0,334	0,491	0,077	0,060	0,962	0,628	
Moyennes générales des 32 rails fortement usés.	34,40	56,3	26,8	14,2	43,5	2,17	0,390	0,647	0,106	0,047	1,190	0,800	

Si maintenant on étudie, avec quelque attention, les chiffres du tableau ci-contre, on reconnaîtra que, dans toutes les catégories sans exception, ce sont les rails en acier pur et doux qui ont perdu le moins de métal par le fait du passage des trains. Si nous comparons, par exemple, les rails provenant de paliers et de lignes droites, nous verrons que l'usure des rails durs est plus que triple de celle des rails doux ; celle-ci est de 8^{sr},70, et celle des rails durs de 29^{sr},75. La dureté plus grande de ces derniers est accusée par une différence en plus de 5^k,2 sur la résistance de rupture, soit un dixième de celle du rail doux, un allongement moindre dans le rapport de $\frac{14,5}{17,5}$ et de 4^k,7 sur la résistance au cisaillement ; on constate, en outre, une limite d'élasticité plus élevée, une proportion de carbone de 0,581 contre 0,282 p. 100, et un total d'éléments étrangers autres que le carbone de 0,826 contre 0,615 p. 100.

L'usure absolue sur les pentes est plus forte qu'en palier, comme on devait s'y attendre.

Quant à la différence d'usure entre les deux sortes de rails provenant des pentes, on constate aussi la supériorité des rails doux, seulement la différence est ici moindre, mais aussi l'analyse et les essais mécaniques accusent un moindre écart entre les aciers doux et durs.

Les premiers contiennent 0,524 de carbone contre 0,579 et la somme des autres éléments étrangers est de 0,740 contre 0,816 p. 100.

La différence est de nouveau plus grande dans les courbes. L'usure des rails durs est double, et si l'on considère en particulier les rails de la ligne inférieure, on voit que l'usure croît notablement avec la dureté des rails ; les charges de rupture et de cisaillement des rails durs sont de 55^k,8 et 43^k,6, et celles des rails doux de 50^k,5 et 39^k,2 ; d'autre part les teneurs en carbone et en éléments étrangers, de 0,416 et 0,771 p. 100 contre 0,537 et 0,528.

Par contre, l'écart de dureté est nul dans les rails de la partie haute des courbes, du moins si on la mesure par la teneur en carbone; cependant l'anomalie est en partie compensée par les éléments étrangers, qui atteignent respectivement 0,776 et 0,628 p. 100. Il n'y aurait, au reste, rien d'extraordinaire que les rails supérieurs des courbes ne se comportassent pas comme les autres, puisque là, comme cela se voit par les profils des rails usés, c'est surtout le côté *latéral* intérieur de la table qui se trouve entamé, par le rebord du bandage, sous l'action de la force centrifuge.

Enfin lorsqu'on compare l'ensemble des 52 rails durs aux 52 rails doux, on voit que l'usure des premiers est presque exactement le double : 51^{er},40 contre 25^{er},30, et que la différence de dureté est marquée par un surcroît de résistance de 3^k,5 à la rupture et de 2^k,4 au cisaillement, par un écart d'allongement de 14,2 contre 17,1 p. 100, et, dans l'analyse chimique, par des teneurs en carbone et en éléments étrangers de 0,390 et 0,800 contre 0,554 et 0,628 p. 100. — Et ces différences seraient plus grandes si on laissait en dehors des moyennes générales les rails de la voie haute des courbes, soumis, comme je viens de le rap- peler, à une usure d'ordre spécial.

En présence de ces résultats, il me paraît difficile de ne pas en conclure l'inexactitude de la théorie admise jusqu'à ce jour : *que les rails s'usent d'autant moins qu'ils sont plus durs*. En tout cas, si l'on objectait que le nombre des rails examinés est trop restreint pour autoriser une conclusion aussi générale, je rappellerai que non seulement les deux mémoires de M. Dudley sur 25 et 64 rails ont donné des résultats concordants, mais encore que ces résultats s'accordent avec les observations antérieures, ci-dessus mentionnées, faites en Angleterre par les ingénieurs J. T. Smith et Price Williams. L'ancienne théorie ne saurait donc plus être admise à moins de preuves contraires très posi-

tives. En Amérique même, dans la discussion soulevée par les mémoires de M. Dudley, la conclusion *principale* semble avoir été admise par la plupart des ingénieurs présents au meeting de Philadelphie. Ce qui fut critiqué avec raison, par les fabricants de rails surtout, c'est la prétention de vouloir renfermer l'acier pour rails dans une formule chimique fort étroite, et de ne pas se contenter des simples épreuves mécaniques. M. Dudley termine, en effet, son mémoire par cette simple conclusion : qu'il serait très rationnel (*entirely philosophic*) de prescrire dans le cahier des charges, pour la composition chimique des rails, la moyenne des 32 *bons rails*, telle qu'elle figure au tableau ; que cependant on peut accorder par tolérance la formule plus générale du premier rapport, c'est-à-dire :

Carbone . .	0,25 à 0,35 p. 100, ou plutôt autant que possible	0,30
Manganèse.	0,40 à 0,50 — — —	0,35

Phosphore.	0,10
------------	------

Silicium . .	0,04
--------------	------

Soufre et cuivre sans prescriptions.

Avant d'aller plus loin, résumons les principales objections faites à M. Dudley par les ingénieurs américains.

M. *Ashbel Welch*, ingénieur de chemin de fer, pense que la dureté de l'acier doit croître avec la charge par essieu. Il estime que l'acier *trop doux* pourrait *céder* sous le poids, comme le ferait un rail en plomb. Cela est bien évident ; aussi M. Dudley ne proposa-t-il pas un acier extra-doux. Il faut un acier suffisamment rigide pour ne pas se déformer sous le poids. C'est une limite à déterminer, et un point sur lequel je reviendrai. M. Ashbel avoue d'ailleurs que, sur son chemin de fer, les rails en acier *doux*, fabriqués à Sheffield avec des fontes de Suède, se sont mieux comportés que deux lots de rails *plus durs* venant de France.

M. *Hunt*, ingénieur ou directeur de la forge de Troy, condamne la formule de M. Dudley. Il déclare que la plupart des rails fabriqués depuis dix-huit mois renferment au moins

0,35 p. 100 de carbone et près de 1 p. 100 de manganèse; que leur résistance à l'usure n'est à la vérité pas encore connue, mais que, en tout cas, les lingots durs sont moins bulleux et se laminent mieux que ceux en acier doux. Il cite des rails très résistants, fabriqués à Troy, qui renferment :

Carbone	0,40	p. 100
Manganèse.	0,85 à 0,95	—
Phosphore	0,08 à 0,085	—
Silicium	0,05 à 0,6	—

M. *Hunt* déclare, en terminant, avec beaucoup de raison, qu'aussi longtemps que les maîtres de forge ont à garantir la durée des rails, ils doivent être libres de fixer la nature chimique du métal.

M. *Sellers* estime aussi qu'on ne peut imposer à la fois une composition chimique et des essais mécaniques. Il faut l'un ou l'autre.

M. *Metcalf*, fabricant d'acier au creuset, déclare que le carbone est le véritable élément aciérant (*hardener*), et qu'il faut bien se garder de l'assimiler aux autres éléments étrangers de l'acier.

M. *Kent* fait une critique très vive du travail de M. *Dudley*. Ses conclusions ne seraient pas justifiées, l'analyse chimique étant incomplète et les causes, qui influent sur la durée des rails, par trop multiples. Il montre que la formule chimique est inadmissible lorsqu'on impose en même temps des essais mécaniques; il constate, entre autres, que sur les 64 rails analysés, 3 seulement, et non les 32 réputés bons, remplissent rigoureusement les conditions chimiques prescrites. Malgré cela, tout en critiquant la formule chimique de M. *Dudley*, il vérifie lui-même, et presque à son insu, la réalité des conclusions générales, c'est-à-dire l'usure plus forte des rails durs. Il a recherché, en effet, parmi les 64 rails de M. *Dudley*, les 18 plus

mauvais au point de vue de l'usure, ceux qu'il appelle *worst*, parce qu'ils ont perdu en moyenne 66^{es},30 par mètre courant et par million de tonnes.

Or la composition moyenne de l'acier de ces 18 rails est, d'après son propre relevé, de :

Carbone.	0,412	} soit, pour le poids des éléments étrangers en dehors du carbone : 0,826.
Manganèse	0,677	
Phosphore	0,109	
Silicium.	0,040	
Total.	1,268	

chiffres qui montrent bien que ces 18 rails sont à la fois plus durs et plus *impurs* que la moyenne des 32 *mauvais* rails.

Ces derniers renferment, en effet :

Carbone.	0,590
Manganèse	0,647
Phosphore	0,106
Silicium	0,047
soit un total de.	1,190
ou, en éléments étrangers, en sus du carbone	0,800

M. *Kent* pense, en résumé, que le travail de M. *Dudley* devrait être continué par le concours de plusieurs compagnies, et qu'il faudrait éprouver et analyser une centaine au moins de rails plus ou moins usés. C'est la meilleure preuve que, malgré sa critique un peu vive, il apprécie à sa juste valeur l'important travail de M. *Dudley*.

M. *Cloud*, ingénieur chargé des ateliers de réparation de la *Pennsylvania C^v*, estime que l'usuré peut être étudiée aussi bien, et peut-être mieux, sur les bandages des roues motrices que sur les rails. Or, au retour des bandages dans les ateliers, il a parfois constaté des différences de 1 à 2 pouces (2,5 à 3 centim.) dans les diamètres de deux bandages appartenant au même essieu, et c'est tou-

jours le bandage *dur qui est alors le plus usé*. Ces différences se rencontrent rarement, ajoute-t-il, parce qu'en général les fabricants de roues placent sur le même essieu des bandages d'égale dureté; mais il y a des exceptions, et c'est alors qu'on peut constater le fait de l'usure inégale qui a toujours lieu dans le sens ci-dessus indiqué.

M. J. Reese, de Philadelphie, insiste sur ce point, trop oublié en effet, que le carbone *seul* augmente la *ténacité* du fer en même temps que la dureté; que les autres éléments, en accroissant la dureté, développent la *fragilité*, ou l'*aigreur*; qu'il ne faut donc pas confondre le carbone avec les autres éléments. C'est l'excès de ces derniers qui faciliterait l'usure des rails.

M. Chanute, l'un des ingénieurs les plus distingués des railways américains, approuve les conclusions générales de M. Dudley; il est, dit-il, sur la *bonne voie*; il demande que le travail soit continué; que d'autres compagnies fassent aussi analyser les rails qui se sont le *mieux* et le *plus mal* comportés. Il s'élève seulement, comme les fabricants de rails, contre la prétention des compagnies de chemins de fer, de vouloir enseigner aux maîtres de forges l'art de fabriquer de bons rails. Elles doivent se contenter de contrôler les produits et de donner aux fabricants les renseignements les plus complets sur la nature chimique et physique des rails qui ont le mieux résisté au trafic.

En résumé, on le voit, personne n'a sérieusement critiqué la conclusion générale que *les rails doux s'usent moins que les rails durs*, mais tout le monde s'est élevé contre la prétention de vouloir formuler, dans un cahier des charges, la nature chimique de l'acier des rails. Il faut laisser à chacun son métier. Au fabricant de choisir les matières premières et le mode de fabrication, au consommateur de dire les propriétés mécaniques des rails, essieux et bandages qu'il considère comme bons; sauf à fixer peut-être, comme nous le verrons, une certaine pureté de métal. Cela dit,

revient la question, quel est le *degré de douceur* ou de *dureté* qui correspond au maximum de durée des rails? Comme je l'ai déjà dit, on ne peut songer à l'acier *extra-doux*, au *fer doux fondu*, au métal que l'on recherche pour les chaudières à vapeur, et les coques de navires. Il se déformerait sous la pression, il ne serait pas suffisamment rigide. Il faut un métal plus résistant et plus dur. S'il s'agissait d'acier *pur*, d'acier au *creuset*, *simplement carburé*, on pourrait, sans nul doute, adopter un métal relativement dur, parce qu'alors la dureté est alliée à la ténacité (*); mais comme il s'agit d'acier *commun*, plus ou moins souillé d'éléments étrangers, la dureté implique toujours un certain degré d'*aigreur*, ou de *fragilité*, qui non seulement favorise les *ruptures*, mais aussi, comme on vient de le voir, l'*usure* des rails. Au fond, ce n'est donc pas la dureté proprement dite qui est à craindre, mais bien celle qui est due aux *impuretés*. Plus un rail contient d'éléments étrangers, plus vite il s'use. Il faut donc que l'acier pour rails ne renferme, outre le carbone, que la proportion strictement nécessaire d'éléments étrangers pour lui donner une certaine dose de rigidité sans fragilité. Cette dose-limite varie avec celle du carbone. Plus l'acier renferme de carbone, moins il supporte d'éléments étrangers sans devenir fragile (*aigre*). C'est ce que Terre-Noire a prouvé pour le phosphore et M. Mazek pour le silicium; et c'est aussi ce que l'on constate pour le manganèse, quoique son influence délétère soit moins prononcée et qu'il puisse même jusqu'à un certain point, lorsqu'il y a peu de carbone, corriger les défauts provenant du phosphore et du silicium. Par suite, on ne saurait fixer un minimum

(*) Je rappellerai ici que si la dureté entraînait l'aigreur, il faudrait à tout jamais exclure les fils d'acier des câbles de mines. Or on sait qu'en Allemagne on préfère les câbles en acier aux câbles en fer, mais aussi on ne se sert pour ces câbles que d'*acier carburé pur fondu au creuset*.

invariable comme dose d'éléments étrangers. — Ce minimum pourra être plus élevé si la dose de carbone est faible, et devra être moindre lorsque la proportion de carbone sera forte. Enfin les doses relatives de manganèse, de phosphore et de silicium, doivent aussi influencer sur la durée des rails dans une mesure qu'il serait d'ailleurs impossible de fixer aujourd'hui.

Cela dit, il résulte pourtant des recherches de M. Dudley, qu'en tout cas, les aciers pour rails devraient être assez doux pour rompre par traction dès la charge de 50 kilog. au millimètre carré, l'allongement étant de 16 à 20 p. 100 sur 100 millimètres, et l'on voit que, dans ce cas, pour une teneur de 0,30 p. 100 de carbone et 0,10 p. 100 de phosphore, le total des éléments étrangers ne doit guère excéder 0,60 p. 100. Mais n'y aurait-il pas avantage à descendre plus bas encore, c'est-à-dire d'avoir recours à des rails plus doux et plus purs? Nul ne saurait le dire positivement dans l'état actuel de nos connaissances. Mais cela doit paraître assez probable, puisque aucun des rails à 50 kilog. de ténacité ne s'est déformé sous la charge des trains, et ne semble avoir manqué de rigidité. Seulement ces rails plus doux et plus purs seraient probablement plus coûteux; il faudrait des minerais tout à fait supérieurs, et la fabrication serait plus difficile. On peut donc, quant à présent, considérer cette limite comme peu éloignée de celle à laquelle il convient de se tenir dans la pratique. En tout cas, on voit que non seulement les rails français, dont la ténacité est le plus souvent comprise entre 60 et 70 kilog., mais même les rails allemands et autrichiens, dont la résistance à la rupture par traction paraît généralement comprise entre 55 kil. et 60 kil., sont plus durs que ceux qui résistent le mieux à l'usure, d'après les recherches de M. Dudley. En France surtout, il conviendrait d'adopter pour les rails un acier plus doux que celui que les compagnies de chemins de fer exigent jusqu'à pré-

sent des maîtres de forges. Ou si les directeurs de ces compagnies avaient encore quelques doutes sur le bien fondé des conclusions de M. Dudley, il vaudrait la peine qu'elles chargeassent, comme le fit la direction du *Pennsylvania Railroad*, des ingénieurs chimistes d'un travail analogue. Elles pourraient aussi demander aux forges de fabriquer une série de rails du même type, mais de résistance et de dureté croissantes, pour les placer en des points très fatigués de la voie, ce qui permettrait de trancher sûrement la question en peu d'années.

Mais pourquoi, contrairement aux théories admises jusqu'à ce jour, l'acier doux résiste-t-il mieux à l'usure que l'acier dur ?

M. Dudley observe que ni les rails, ni les jantes des roues ne sont parfaitement lisses, que les surfaces de contact peuvent être considérées comme pourvues de dents infiniment petites, grâce auxquelles les roues s'avancent à la façon d'une roue dentée le long d'une crémaillère. Or, plus l'acier est *dur*, ajoute M. Dudley, plus il est *cassant* ; donc les protubérances infiniment petites sont exposées à se briser d'autant plus facilement qu'elles sont plus dures ; de là l'usure. J'observerai de nouveau que, cela n'est vrai que pour l'acier *impur*, et non pour celui qui serait uniquement carburé. Il serait donc plus vrai de dire que les dents infiniment petites des surfaces rugueuses des rails doivent se briser d'autant plus facilement, et, par suite, s'user d'autant plus rapidement, que l'acier est plus *impur*. Ce peut être là, en effet, l'une des causes du meilleur service rendu par l'acier doux, mais ce n'est certainement pas la cause unique, ni même, je le crois du moins, la cause principale. Une cause d'usure plus énergique est la *rouille*, ou l'oxydation par l'air humide. Les rails se rouillent, et même la table, rendue brillante par le passage incessant des trains, plus que le reste. Cela peut paraître paradoxal, mais cela est. Les parties latérales des rails

se couvrent d'une croûte de rouille, qui bientôt est assez épaisse pour former une sorte d'enduit protecteur, tandis que la table est sans cesse *décapée* par le passage des trains, et rendue par là d'autant plus oxydable. La rouille proprement dite, c'est-à-dire le peroxyde hydraté, n'a pas le temps de se développer, mais le protoxyde, ou le sous-oxyde, ne s'en forme pas moins d'autant plus activement que la surface est mieux décapée. Cette pellicule oxydée est plus friable que le métal intact; donc l'oxydation favorise l'usure. Or cette oxydation est d'autant plus énergique que l'acier est plus *impur* et surtout plus *manganésifère*. Le manganèse, en effet, est plus oxydable que le fer, et l'on sait que les gueusets de fonte manganésifère (de *spiegel*) se couvrent plus rapidement d'une épaisse croûte d'un noir-brun foncé que les fontes ordinaires. Et, quant à l'impureté en général, les expériences de l'habile constructeur Adamson, de Manchester prouvent nettement que le fer et l'acier sont d'autant plus oxydables qu'ils sont plus impurs. Voici le résumé de ses expériences, faites en vue de constater la force de résistance des diverses sortes de fer et d'acier à l'action corrosive de l'eau de mer (*).

M. Adamson a plongé, dans de l'eau, acidulée par 1 p. 100 d'acide sulfurique concentré, une série de plaques de fer et d'acier de même poids et de même surface, préalablement dépouillées à la lime et à la meule sèche de tout oxyde adhérent. Ces plaques furent laissées dix-sept jours dans cette eau acidulée, mais repesées toutes les vingt-quatre heures pour constater les progrès de la corrosion. Eh bien, ces expériences prouvent que le métal est d'autant moins attaqué qu'il est plus pur; et quoique l'oxydation soit ici aidée par l'acide, il est pourtant évident que les conditions ne diffèrent guère de celles de l'air, où l'eau et l'acide carbonique doivent agir sur le fer à la façon de l'eau légèrement sulfurique.

(*) *Journal of the iron and steel Institute*, 1878, p. 398.

Je me contente de citer les résultats les plus saillants.

Le fer soudé ordinaire (*puddle*), tenant 1,20 p. 100 de matières étrangères, — celles-ci étant surtout composées de phosphore et de scories, — a perdu en 17 jours 79 p. 100 de son poids primitif.

La tôle de chaudière en bon fer soudé de la forge de

Tudhoë. 46,4 p. 100

La tôle en fer soudé supérieur (*best-best*) de la même

usine 34,7 —

L'acier Bessemer, *moyennement dur*, 1,3 p. 100. Il contenait :

Carbone.	0,330 p. 100	Phosphore.	0,075 p. 100
Manganèse	1,008 —	Soufre.	0,022 —
Silicium.	0,065 —	Total.	1,500 —

L'acier Bessemer *doux*, seulement 4,8 p. 100. Il contenait :

Carbone.	0,115 p. 100	Phosphore.	0,037 p. 100
Manganèse	0,504 —	Soufre.	0,028 —
Silicium.	0,055 —	Total.	0,739 —

Enfin le fer fondu pur, ne contenant que 0,040 de phosphore avec de simples traces de carbone, manganèse, silicium et soufre, a perdu moins encore que l'acier Bessemer doux.

L'influence des impuretés, et du manganèse en particulier, est ici évidente ; aussi M. Adamson en conclut-il qu'il faut préférer, pour les coques de navires, la tôle d'acier à la tôle de fer soudé ; et qu'en fait d'acier fondu, il faut choisir le métal le moins carburé et le moins manganésé. Or n'est-il pas évident que les rails aussi s'oxyderont d'autant moins qu'ils seront plus *purs*, c'est-à-dire plus doux, et ne doit-on pas en conclure que, si les rails doux *s'usent* moins que les rails durs ou plutôt *impurs*, cela tient à l'action corrosive plus énergique de l'air humide sur ces derniers ? Il faudrait surtout éviter une trop forte proportion de manganèse dans les rails, contrairement à ce qui se passe dans la plupart des forges depuis quelques années.

Le fait suivant, que je tiens de M. Talabot, prouve, en tout cas, l'action funeste de l'humidité.

Dans le long tunnel de la Nerthe, près de Marseille, où la voie est droite et horizontale, les rails en acier fondu ne durent que sept à huit ans, tandis qu'ils résistent le double de temps en dehors, au contact de l'air sec de la Provence. L'influence de la rouille n'est-elle pas ici évidente, et ne faudrait-il pas, sur ce point surtout, des rails en acier doux et pur ? Il est évident que, dans l'atmosphère confinée du tunnel, l'acide carbonique de la fumée doit être en partie absorbé par l'eau, qui devient ainsi plus corrosive.

Passons maintenant de la nature du métal à la *forme* du rail, ou plutôt voyons si la nature du métal ne devrait pas varier avec le profil adopté ?

L'acier se comporte autrement au laminage que le fer doux. Celui-ci n'est pas exposé à durcir lorsqu'on le lamine un peu froid, tandis que l'acier se trempe au contact même des cannelures, et durcit alors d'autant plus que la barre est plus mince. D'après cela, il est bien évident que les bords du patin sont plus exposés à durcir que la tête.

Les profils des rails Vignole furent étudiés primitivement en vue du fer doux. On a pensé avec raison qu'à poids égal il valait mieux renforcer la tête que le pied, de sorte que l'on a aminci les bords du patin jusqu'à 6 et 5 millimètres. Cette faible épaisseur offrait déjà une certaine difficulté lors du laminage des rails en fer soudé. Le bord refroidi se *criquait* facilement, mais le métal du moins n'était pas trempé. Il en est autrement pour l'acier. Lorsque les cannelures sont bien établies et que le métal est bon, il n'y a pas de criques, mais les bords du patin se trempent. Le métal est alors dans une tension moléculaire fort inégale, qui nuit à sa solidité; il se rapproche des larmes bataviques; un faible choc, et, en tout cas, la moindre entaille ou blessure du bord du patin, suffit, le plus souvent, pour qu'un coup de marteau, et même la

plus simple chute du rail, entraîne sa rupture immédiate. On reconnaît alors, par la couleur et la finesse du grain, que le métal est réellement trempé le long des bords minces du patin. Il faut donc ou rendre l'acier moins dur, ou renforcer les bords du patin. Il suit de là qu'un acier convenable pour les rails à double champignon peut être trop dur pour les rails à patin.

Au reste, par la nature même des choses, les difficultés croissent dès que l'acier est dur. Dans ce cas, en effet, le métal devient cassant à une température élevée; sa malléabilité diminue à mesure que sa dureté augmente; il faut donc chauffer le lingot, pour le laminage, à une température moindre, tandis que, d'autre part, il faut un plus grand nombre de passages pour arriver à la cannelure finale, ce qui est une nouvelle cause de refroidissement. Bref, lorsque l'acier est dur le travail est plus long, à moins que les cylindres ne marchent plus vite, et presque toujours le métal arrive refroidi à la dernière cannelure, et s'y trempe alors si la barre est mince. Ce défaut se manifeste d'une façon frappante dans les forges où, comme à Beaucaire, on fabrique tour à tour des rails Vignole et des rails à double champignon. Quoique l'acier des rails à patin de la Compagnie P. L. M. soit moins dur que celui des rails à double champignon de la compagnie du Midi, le nombre des barres, rompues lors de la pose par la simple manutention, et renvoyées à l'usine par ce fait, est huit à dix fois plus considérable pour les rails à patin que pour les rails à double champignon. Les premiers demanderaient donc, je le répète, un acier moins dur et un patin moins aminci sur les bords.

Il est un autre point qui favorise la fragilité des rails à patin et me paraît devoir réclamer une réforme immédiate. Pour pouvoir mieux adapter les éclisses, la plupart des compagnies françaises donnent au patin un profil à double pente. La partie voisine de l'âme fait un angle plus grand

avec l'horizontale que celle qui est voisine du bord aminci. La partie supérieure du pied présente ainsi de chaque côté de l'âme une sorte de sillon ou de *gouttière* longitudinale (voyez Pl. II, *fig.* 8). A cette gouttière correspond une diminution d'épaisseur par trop brusque et, par suite, une transition peu ménagée de la partie épaisse non trempée à celle qui a subi la trempe. C'est évidemment une cause de faiblesse et de rupture. Au lieu d'un angle rentrant formant la gouttière, il faudrait passer graduellement d'une pente à l'autre à l'aide d'une courbe, ou mieux encore, comme en Amérique, adopter un plan incliné unique, de façon à supprimer complètement la gouttière en question. Dans le profil de la *fig.* 8, il faudrait adopter la ligne droite *ab* au lieu de la ligne brisée *acb*.

Il faudrait, de plus, qu'en amont du congé qui relie la ligne *a b* au bord vertical, l'épaisseur du pied ne soit pas, dans les forts rails, pesant 32 à 38 kilog. le mètre courant, au-dessous de 8 à 10 millimètres. Enfin, le bord trop mince du pied présente un autre inconvénient qu'il importe de signaler. Le laminage d'une barre à profil inégal, comme les rails, exige que les cannelures soient calculées de façon à réduire, autant que possible *dans le même rapport*, les sections transversales de la tête, de l'âme et du pied, et cette proportionnalité est d'autant plus nécessaire que le métal est plus aciéreur, c'est-à-dire moins susceptible de refluer, au moment du laminage, d'une partie du profil vers l'autre. La nécessité du laminage exige donc que la largeur du pied soit progressivement diminuée. De la largeur primitive de 16 centimètres, par exemple, on doit arriver à la largeur finale de 10 centimètres. Le métal du bord se trouve ainsi refoulé vers le milieu. Tant que l'acier est encore mou, cela se fait sans difficulté; mais si, à cause de la dureté du métal, il faut laminer un peu froid, on verra les bords minces du pied se tremper lorsque le métal voisin de l'âme sera encore mou; alors le bord sera re-

foulé et comme enfoncé, sous forme de coin solide, dans la région centrale semi-fluide, et cet effet sera nécessairement plus prononcé dans le cas du profil *acb*. On peut très bien constater le fait en examinant la face inférieure du patin des rails. On voit souvent sous le rail deux légères nervures dans la partie correspondante à la gouttière, et lorsqu'on casse le rail on peut même observer, sur ce point, le passage assez brusque de la zone trempée à celle qui ne l'est pas. Il y a évidemment là une tension moléculaire très inégale qui explique les ruptures sous l'action de chocs un peu violents. On évitera certainement ce danger en renforçant le bord du patin, en supprimant le profil en gouttière, et surtout en n'imposant pas aux fabricants un acier trop dur.

Avant de finir, puisque j'en suis au profil des rails, je voudrais recommander aux compagnies françaises, à l'instar de ce que l'ingénieur A. Holley a fait récemment aux États-Unis (*), de se concerter entre elles pour adopter un petit nombre de types communs. Si les maîtres de forges n'avaient qu'un nombre restreint de types à laminier, toujours les mêmes, il est évident qu'ils pourraient les fournir meilleurs et à meilleur marché. M. Holley montre que les 119 (!) profils différents de rails à patins, usités en Amérique, pourraient très bien être remplacés par 10 à 12 dont les poids varieraient de 30 livres par yard jusqu'à 72 livres.

Au reste, il ne m'appartient pas d'entrer dans la critique de nos profils ; j'observerai seulement, avant de me résumer, qu'en Amérique on a été amené, par l'observation du profil, que prennent les têtes des vieux rails sous l'action du rebord saillant des bandages, à substituer aux têtes à parois latérales *verticales* (fig. 8) des têtes à parois *inclinées* (fig. 9). N'y aurait-il pas avantage à adopter un profil analogue en France? Je me borne à poser la question, et

(*) *Transactions of the Philadelphia meeting* de février 1881.

me hâte de résumer la discussion précédente au sujet de l'*usure* et de la *durée* des rails.

Il semble à peu près établi :

1° Que les rails en acier *doux*, offrant une résistance d'au plus 50 kilog. à la traction, s'usent moins et durent plus longtemps que les rails en acier dur usités en France ;

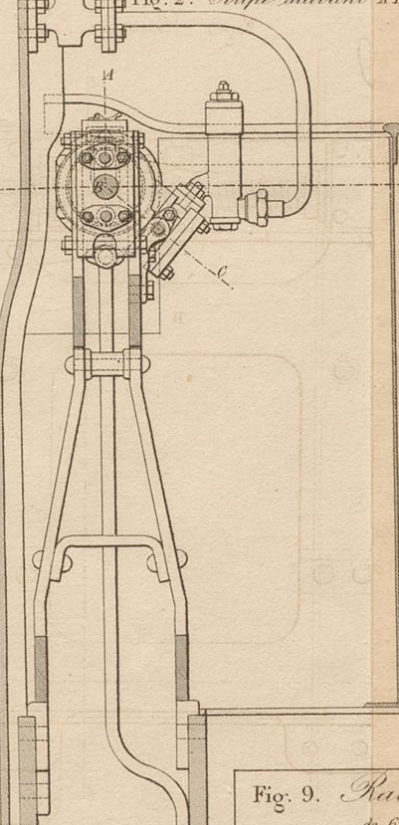
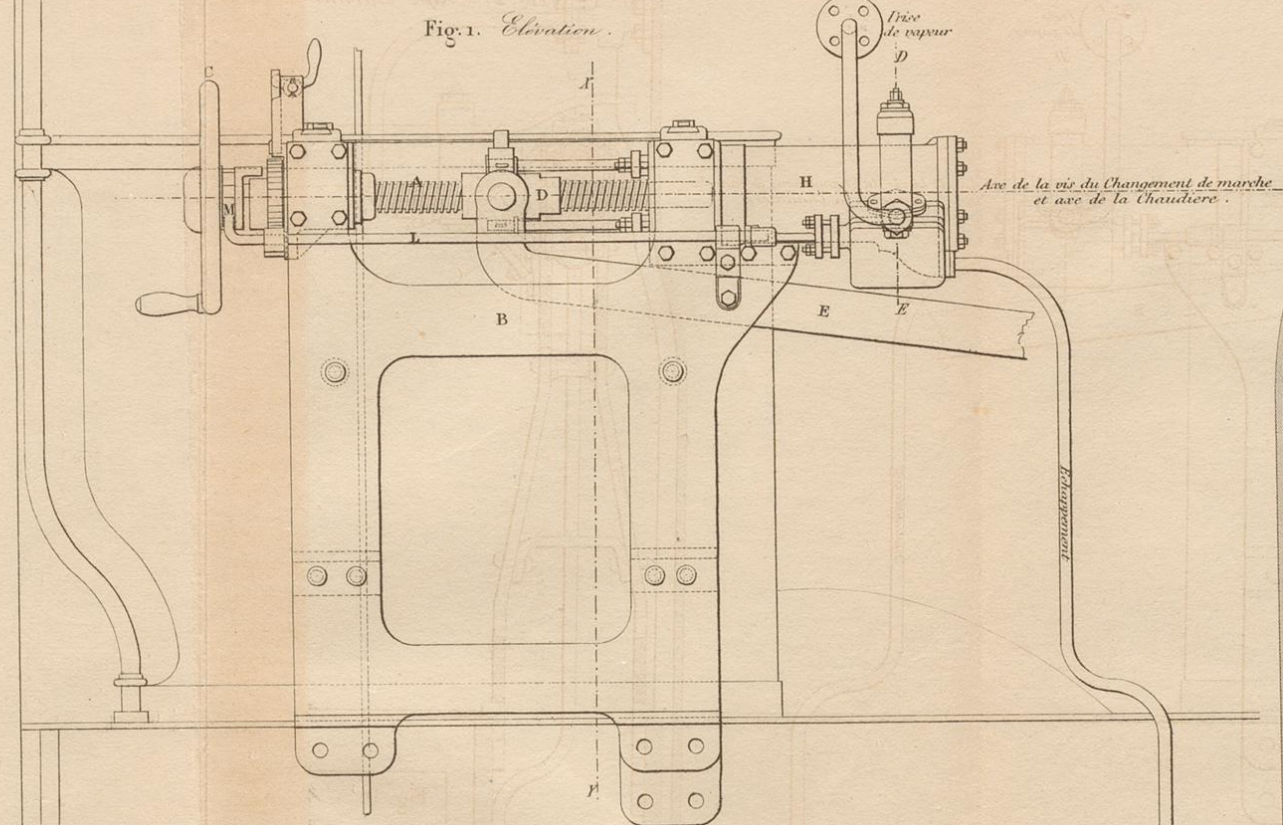
2° Que cette usure plus rapide des rails en acier *dur*, ou plutôt *impur*, est surtout due à l'oxydabilité plus grande du fer lorsqu'il est uni à des éléments tels que le manganèse, le silicium et le phosphore ; que sous ce rapport, comme sous tous les autres, il faut donner la préférence à l'acier pur ;

3° Que l'acier des rails à double champignon peut, sans inconvénient, être plus dur que celui des rails à patin, mais qu'il ne faut jamais imposer la singulière condition de la rupture sous une certaine hauteur de chute, condition qui implique une plus grande *impureté* de l'acier ;

4° Que, pour éviter la fragilité relative des rails Vignole, il faut que les bords du patin ne soient pas trop minces, pas au-dessous de 8 à 10 millimètres, et que la surface supérieure du patin n'offre pas une sorte de double gouttière longitudinale. Il faut éviter, en un mot, tout ce qui tend à favoriser la trempe des parties minces des rails lors du laminage ;

5° J'ajouterai qu'il serait à désirer que les compagnies de chemins de fer s'entendissent pour l'adoption d'un petit nombre de types communs, et que, si elles conservaient encore quelque doute sur le bien fondé des conclusions précédentes, elles chargeassent une commission d'ingénieurs et de chimistes de l'étude complète de toutes les causes qui peuvent influer sur la vie des rails, en invoquant au besoin le concours des forges dans la mesure ci-dessus signalée p. 31.

Appareil de Changement de Marche à bras, avec contre poids de vapeur, pour Machines Locomotives.



Ancien Appareil à bras.

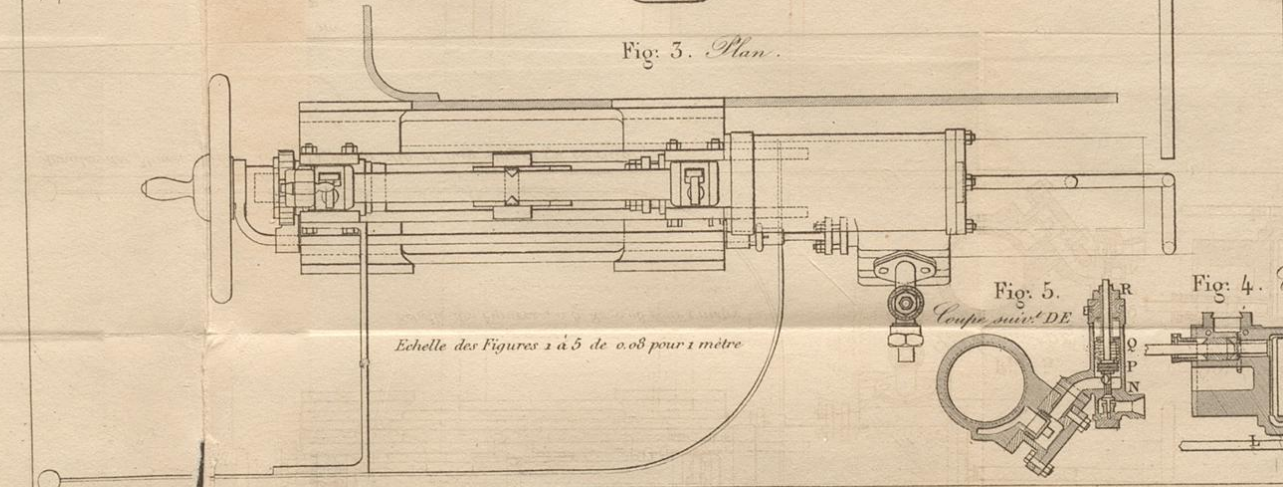
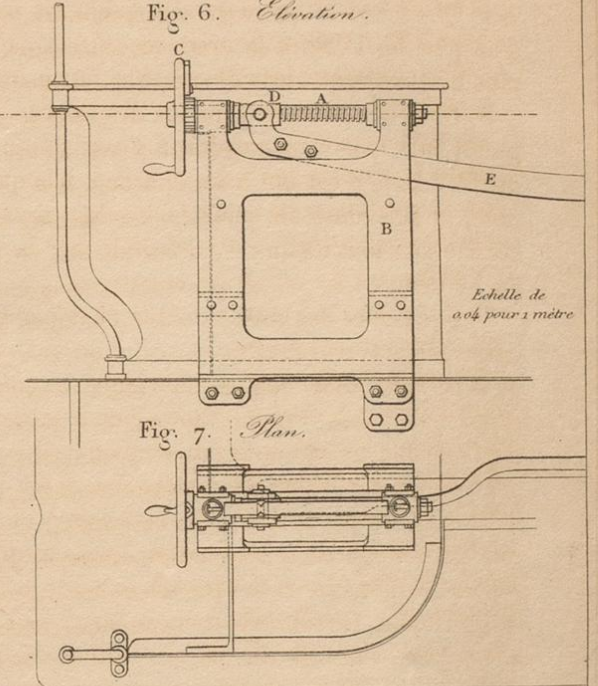


Fig. 9. Rail Américain. de 63 lbs par yard ou 32.5 par mètre c' e f = 8 mm

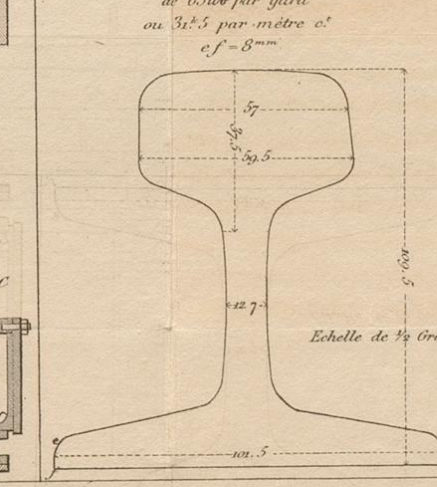
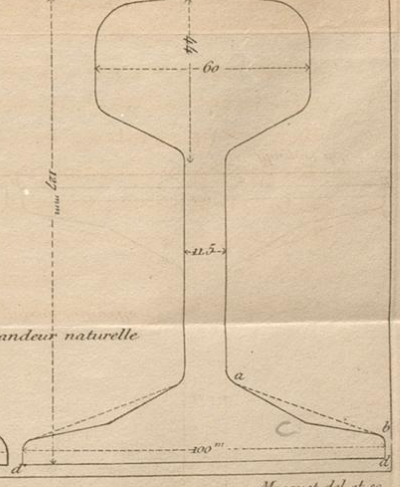


Fig. 8. Rail P.L.M.A. de 32.5 par mètre c' b d = 6 mm



Annales des Mines. Série. Tome XX. pages 165 et suiv. pages 171 et suiv.

Macquet del et sc.