

LA MACHINE LOCOMOTIVE

CHAPITRE PREMIER

GÉNÉRALITÉS

1. Origine de la puissance des locomotives. — Nous voyons dans la locomotive une forme à la fois simple, complète et imposante de la machine à vapeur. Comme pour toute machine à vapeur, la source de sa puissance est dans la *chaleur* que dégage le combustible : la vapeur d'eau n'est qu'un intermédiaire, qui reçoit cette chaleur et la change en travail. Nous sommes souvent témoins de la transformation du travail en chaleur : plus que tout autre, le mécanicien connaît ce phénomène et le voit sans plaisir, car une boîte qui *chauffe* n'est pas un incident agréable du voyage ; mais nous ne pouvons effectuer directement la transformation inverse : on aurait beau chauffer les boîtes, on n'arriverait pas à faire tourner les essieux. Il faut communiquer la chaleur à un intermédiaire, qui dans la locomotive est la vapeur d'eau. Certains moteurs utilisent comme intermédiaire d'autres fluides, notamment l'air.

Si, comme le dit la fable antique, c'est Prométhée qui a donné aux hommes le feu qu'il avait dérobé au ciel, nous devons l'honorer avant tout autre dans la longue liste des inventeurs de génie, trop souvent oubliés, qui nous ont donné tant d'outils et tant de machines utiles.

2. Forces. — Pour toute étude, on a besoin de connaître le sens de certains mots et de le connaître avec précision. Sans cette connaissance, facile à acquérir, on ne comprend pas bien ce qu'on entend ou ce qu'on lit. C'est ainsi qu'il nous faut savoir ce qu'on appelle *force*.

Une force est une action capable de mettre un corps en mouvement, ou de modifier le mouvement d'un corps.

Celle dont nous connaissons le mieux les effets est la *pesanteur*, qui nous donne l'unité de mesure des forces ; en suspendant à un fil

un poids d'un kilogramme (fig. 1), on soumet ce fil à une force d'un kilogramme (par abréviation kg ; voir § 26). La pesanteur agit *verticalement*, soit en tirant le fil dans l'exemple que nous venons de

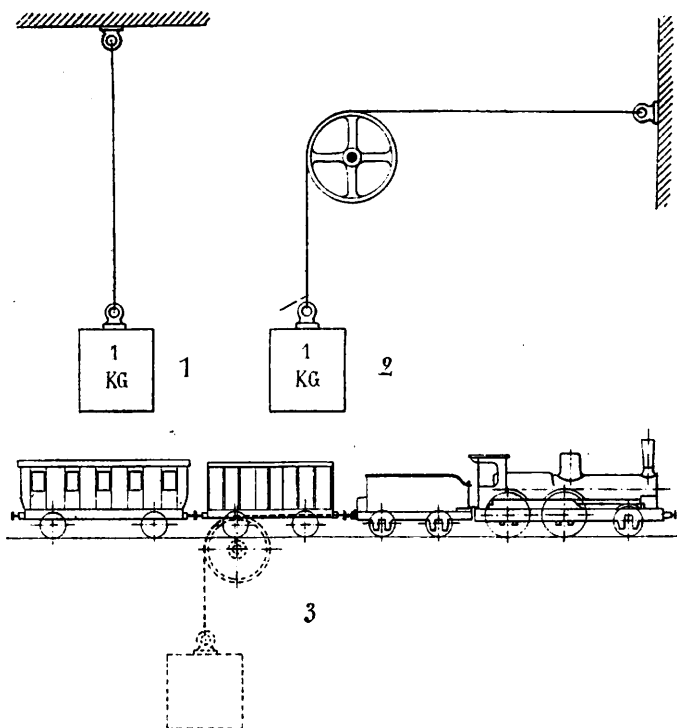


Fig. 1. Force verticale. — Fig. 2. Force horizontale. — Fig. 3. Force de traction de la locomotive.

choisir, soit en exerçant une pression, comme lorsqu'on pose un poids dans le plateau d'une balance ; mais les forces peuvent avoir une direction différente. Faisons passer sur une poulie de renvoi le fil auquel nous avons suspendu un kilogramme (fig. 2) ; nous pourrons ramener ce fil à la direction horizontale ; il sera tendu par une force *horizontale* d'un kilogramme.

Lorsqu'un train est attelé au crochet d'arrière d'un tender, il faut que la locomotive développe une certaine force pour tirer le train ; cette force, qui, en palier, est horizontale, s'évalue en kilogrammes ; on en aura une idée nette en supposant le train remplacé par une

masse suspendue à un câble, qui passerait sur une poulie de renvoi et viendrait s'attacher au tender (fig. 3) : la force de traction sera précisément le poids en kilogrammes de la masse ainsi suspendue. du moins dans la marche à vitesse uniforme.

3. Dynamomètre. — Il ne serait guère pratique de remplacer ainsi un train par un poids suspendu au bout d'une corde, lorsqu'on veut mesurer l'effort de traction d'une locomotive ; les *ressorts* nous donnent un moyen commode d'effectuer cette mesure. Prenons un grand ressort à lames et suspendons-y des poids connus, en nombre crois-

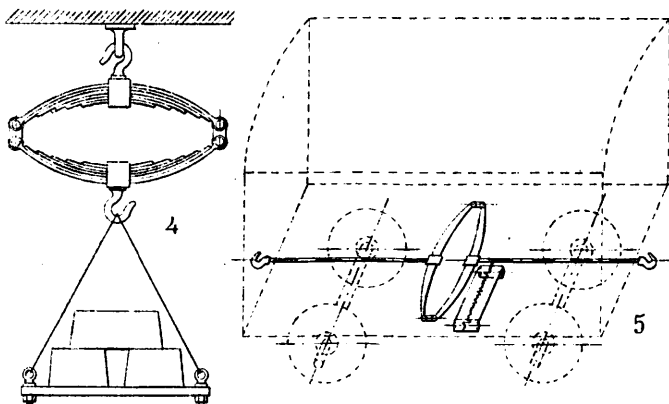


Fig. 4. Tare du ressort de dynamomètre. — Fig. 5. Wagon dynamomètre.

sant (fig. 4) : il fléchira d'une quantité déterminée pour chaque valeur des poids ; on mesure ces flexions ; c'est ce qu'on appelle *tarer* le ressort. Plaçons maintenant ce ressort dans un *wagon-dynamomètre* (fig. 5) et faisons tirer la locomotive à la place des poids suspendus : le ressort va fléchir encore ; observons cette flexion : on sait combien il fallait de kilogrammes pour la produire ; on sait donc quelle est, en kilogrammes, la force de traction de la locomotive.

Un crayon est fixé à une tige, qui fait corps avec le milieu du ressort, et en trace la flexion sur une bande de papier qui se déroule ; le déplacement du papier est perpendiculaire à la direction du mouvement du train. On peut ainsi conserver la trace de l'effort de traction à chaque instant du trajet.

4. Définition du travail. — Une force produit un *travail* quand elle déplace le corps qu'elle tire (ou qu'elle pousse). Si le déplacement a lieu suivant la direction de la force, on mesure le travail en multipliant la force (nombre de kilogrammes) par le chemin parcouru

(nombre de mètres). Si on élève un poids d'un kilogramme à un mètre (par abréviation m) de hauteur, on fait un travail dit de un *kilogrammètre* : 100 kg élevés à 5 m font 500 kilogrammètres (par abréviation kg m). Si la force de traction, sur le crochet d'arrière d'un tender, est de 1 000 kg pendant qu'on parcourt 10 kilomètres (ou 10 000 m), le travail est $1\,000 \times 10\,000$, c'est-à-dire 10 millions de kg m. Un mécanicien qui fait dans son année 60 000 km avec des trains un peu durs développe derrière lui un nombre respectable de kilogrammètres.

5. Puissance des machines. — L'indication du *travail* d'une machine ne donnerait qu'une idée bien vague du service qu'elle fait, si on ne disait en outre combien de *temps* il lui faut pour produire ce travail.

On appelle *puissance* d'une machine le *travail* qu'elle fait en une *seconde*. Ainsi notre locomotive, qui exerce un effort de traction de 1 000 kilogrammes, si elle fait 72 kilomètres à l'heure ou 20 mètres par seconde, développera 20 000 kilogrammètres ($1\,000 \times 20$) par seconde, c'est-à-dire aura une puissance de 20 000 kilogrammètres. Avec une vitesse moitié moindre, 10 mètres par seconde, et un effort de traction double, 2 000 kilogrammes, on retrouve la même puissance de 20 000 kilogrammètres ($2\,000 \times 10$).

Pour éviter l'emploi de trop grands nombres, au lieu de compter en kilogrammètres par seconde, on appelle *cheval-vapeur* la puissance de 75 kg m, et on donne les puissances en chevaux-vapeur. Un cheval-vapeur élève 75 kilogrammes à un mètre de hauteur en une seconde : 10 chevaux-vapeur seront 750 kg m par seconde ; 100 chevaux, 7 500 kg m par seconde. En résumé, on obtient la puissance en chevaux en divisant par 75 le nombre de kilogrammètres développés pendant une seconde : 20 000 kilogrammètres donnent 266 chevaux et deux tiers, environ 267.

L'expression de cheval-vapeur vient de ce que l'on considère cette puissance comme étant à peu près celle d'un vigoureux cheval.

6. Résistance des trains. — Pour mettre un train en mouvement et le maintenir en vitesse, la locomotive doit vaincre plusieurs résistances. Supposons d'abord que le train ait atteint sa vitesse, qu'il s'agit d'entretenir uniforme sur un palier et en alignement droit ; il faut pour cela surmonter la *résistance au roulement*, qui provient de la flexion de la voie sous le poids des roues et de ses inégalités, ainsi que de la déformation des roues mêmes ; le *frottement des fusées* des essieux contre les coussinets ; la *résistance de l'air*. Ce sont des forces directement opposées à l'effort de traction de la machine ; leur grandeur peut varier beaucoup, et il est difficile de les mesurer séparément. On les rapporte d'habitude, en bloc, au poids du train : si elles sont de 5 kilogrammes par tonne, l'effort de traction néces-

saire pour entretenir en vitesse uniforme un train pesant 200 tonnes sera de 200×5 ou 1 000 kilogrammes.

La *résistance au roulement* est souvent estimée à 1 kg par tonne.

Le *frottement des fusées* cause une résistance fort variable suivant la nature et la dimension des coussinets, suivant la charge qu'ils supportent, suivant le graissage. Pour que l'huile pénètre bien entre le coussinet et la fusée, il faut que la charge qui les presse l'un contre l'autre ne soit pas trop forte, ou, pour supporter une charge déterminée, il faut que la surface de portée soit assez grande. Pour augmenter la surface de portée, on peut agrandir le *rayon* ou la *longueur* de la fusée. L'allongement de la fusée ne peut être qu'avantageux ; mais en agrandissant le rayon, on allonge le chemin parcouru contre le coussinet, pour un tour de roue, par chaque point de la fusée : à égalité de frottement, on augmente le *travail* de ce frottement pour un même parcours du train, travail qui est en définitive demandé à la locomotive. Toutefois, pour que la fusée soit solide, pour qu'elle ne rompe pas ou ne fléchisse pas sensiblement, on ne peut la faire très mince et très longue.

Pendant les gelées, après un long stationnement, les huiles de graissage sont solidifiées ; au départ, la résistance due au frottement des fusées est considérable. Une fois en marche, les boîtes s'échauffent par le frottement, et cette résistance diminue : elle reste néanmoins souvent plus forte en hiver qu'en été. On peut réduire cet inconvénient en employant, pendant l'hiver, des huiles de qualités spéciales, suffisamment fluides à basse température. On trouve encore des wagons où l'on se sert de graisse au lieu d'huile ; ils sont un peu plus durs à trainer. Sur le matériel de nos chemins de fer, on peut compter pour la résistance due au frottement des fusées 1 à 2 kilogrammes par tonne.

La résistance de l'air est la plus variable : peu importante, négligeable même pour les trains à marche lente, elle augmente rapidement avec la vitesse et devient considérable quand la marche est très rapide. La vitesse du train n'est pas seule en jeu : celle d'un vent contraire s'y ajoute pour augmenter la force opposée à la marche, tandis que le vent arrière la diminue. C'est surtout le vent de côté, quand il est un peu fort, qui est une gêne sérieuse, en poussant transversalement les wagons, et faisant frotter les boudins des bandages contre le rail. Le vent est quelquefois assez violent pour renverser des wagons : cela est arrivé plus d'une fois.

On estime en moyenne la résistance totale des trains, d'ailleurs fort variable, à 3 kg par tonne pour la vitesse de 20 kilomètres à l'heure, à 5 kg pour celle de 40 kilomètres et à 7 kg pour celle de 70 kilomètres.

La locomotive est encore plus exposée à l'action de l'air que le reste du train. Les autres forces résistantes y sont aussi proportionnellement plus fortes, vu son poids considérable, la disposition des

essieux, l'effet des bielles. On compte souvent, pour une tonne du poids de la locomotive, sur un effort double de ce qu'il faut pour une tonne du train. Le tender, s'il est bien entretenu, est à peu près assimilable sous ce rapport au reste du train.

D'autres causes s'ajoutent aux précédentes. C'est d'abord l'influence des *rampes*. Ces rampes sont définies par l'élévation en millimètres par mètre de parcours. Un train sur une rampe est un corps posé sur un *plan incliné* ; la mécanique élémentaire nous apprend quelle force est capable d'y maintenir le corps, et la règle est bien simple : autant de kilogrammes par tonne que la rampe compte de millimètres par mètre : pour un train de 300 tonnes (locomotive comprise), la résistance due à la pesanteur sur une rampe de 6 millimètres sera de 6×300 ou 1 800 kilogrammes.

Parcourue en sens contraire, la *rampe* est une *pente*, et la même force (1 800 kg dans notre exemple) vient en déduction des autres résistances, qu'elle dépasse dès que la pente est un peu forte : le train roule spontanément et souvent même sa vitesse doit être modérée. Certaines pentes mettent clairement en évidence la variation de résistance avec la vitesse : sur une pente de 5 millimètres, un train de marchandises roule sans vapeur ; il faut même parfois en serrer les freins, tandis que pour soutenir la vitesse des express on doit y dépenser beaucoup de vapeur. Et cependant les wagons à marchandises du premier train offriront généralement, à même vitesse, une plus grande résistance que les voitures du second.

Les courbes viennent encore ajouter une résistance à la marche des trains, résistance d'autant plus grande que leur rayon est moindre et que les trains sont plus longs. On estime qu'en moyenne, avec notre matériel, une courbe de 300 mètres de rayon équivaut, pour un train de 30 à 40 wagons, à une rampe de 3 millimètres, c'est-à-dire crée une résistance de 3 kilogrammes par tonne. Une courbe de 200 mètres vaudrait une rampe de 5 millimètres, et une de 150 mètres une rampe de 6,5 millimètres.

Certaines dispositions des locomotives et des véhicules remorqués réduisent cet effet des courbes. L'une des plus simples est le *graisissage des boudins* sur les roues d'avant de la locomotive, qui a été parfois appliqué avec succès pour les lignes sinueuses. Une mèche alimentée par un godet, ou bien l'extrémité d'un tube en bois rempli de graisse solide, frotte contre le boudin : il est facile de toujours tenir en bon état cet appareil simple. On voit parfois des machines qui en sont munies, mais sans aucun résultat, parce qu'on n'y met pas d'huile ou qu'elle n'arrive pas aux boudins : il n'est pas étonnant que ceux qui se servent de ces machines déclarent que l'appareil graisseur n'a aucun effet. Autant dire qu'une lanterne éteinte n'éclaire pas.

Toute la force de la locomotive n'est pas employée à surmonter les diverses résistances que nous venons d'énumérer : l'*augmentation de la vitesse* du train consomme du travail moteur. Par contre,

lorsqu'on laisse un train se ralentir, il restitue le travail ainsi consommé, et la machine n'a plus qu'un effort de traction réduit à développer. Bien souvent toutefois ce travail, au lieu d'être restitué, est détruit par l'application des freins.

La mécanique donne un moyen facile de calculer le travail moteur nécessaire pour imprimer à un train de poids total connu (locomotive comprise) une vitesse déterminée, en partant du repos. Si on laisse tomber librement un poids de 1 kilogramme, il prendra des vitesses croissantes avec la hauteur de chute : ces vitesses, exprimées en mètres par seconde, seront les suivantes après les parcours indiqués :

Nombre de mètres parcourus dans la chute depuis le départ.	Vitesse acquise, en mètres par seconde.
5 mètres	9 ^m ,9
10 —	14 ,0
15 —	17 ,1
20 —	19 ,8
25 —	22 ,1
30 —	24 ,3
40 —	28

Or la chute de 1 kilogramme sur une hauteur de 5, 10, 15. 40 mètres produit un travail de 5, 10, 15. 40 kilogrammètres. Si, au lieu de 1 kilogramme, le poids qui tombe est de 1 000, 2 000, 100 000 kilogrammes, le travail sera 1 000, 2 000, 100 000 fois plus fort.

De même, quand un train, partant du repos, a acquis une vitesse de 9^m,9 — de 14 mètres — de 17^m,1 — de 19^m,8. . . . de 28 mètres par seconde, il a fallu lui fournir, pour chaque kilogramme de son poids, le nombre correspondant (sur le tableau) de kilogrammètres. Ce travail, nécessaire pour produire l'accélération de la masse du train et de sa machine, s'ajoute à celui qui est consommé, pendant ce temps, par les diverses résistances.

7. Pression atmosphérique. — Les machines à vapeur mettent en jeu certaines *forces* qu'on appelle *pressions* des fluides. L'air dans lequel nous vivons exerce une pression, qu'on peut montrer clairement à l'aide d'expériences avec une pompe à air ou *machine pneumatique*. Prenons un cylindre vertical fermé en bas, ouvert en haut, avec un piston ; si nous enlevons tout l'air sous le piston, il portera la pression de l'atmosphère, qui est le poids d'une colonne d'air montant jusqu'à la limite (inconnue) de la couche gazeuse qui entoure la terre : pour empêcher le piston de descendre sous l'action de ce poids ou de cette pression, il faudra le maintenir, par exemple au moyen d'une corde passant sur une poulie et portant des poids en métal (fig. 6) : si le piston a une surface d'un décimètre carré ou de 100 cen-

timètres carrés (en abrégé cm^2 ; le diamètre est alors de 113 millimètres), le poids nécessaire pour le maintenir sera de 100 kg environ, c'est-à-dire de 1 kg par cm^2 . Cette *pression* est une *force* tout à fait comparable au *poids* d'un morceau de métal; mais ce qu'il y a de spécial dans la pression de l'air, c'est qu'elle s'exerce également dans

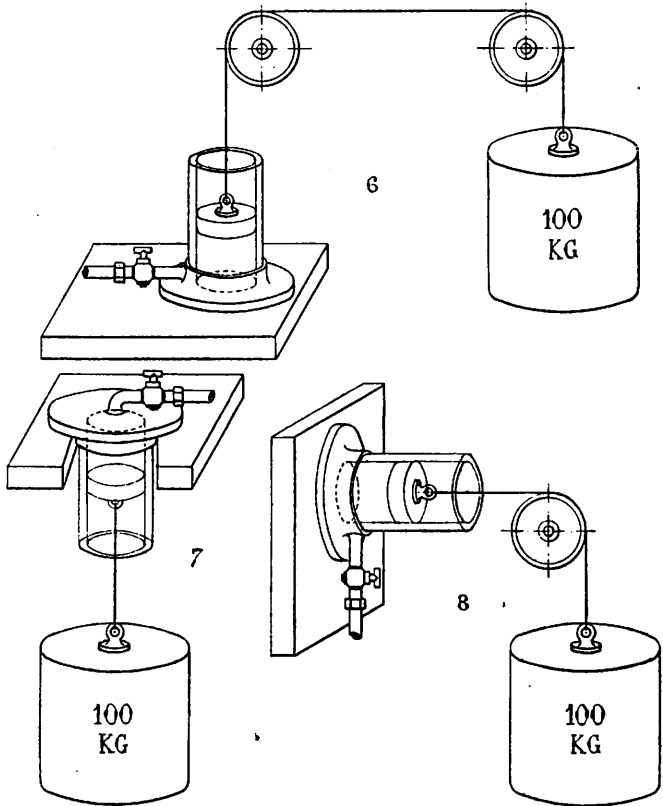


Fig. 6. Pression atmosphérique verticale de haut en bas. — Fig. 7. Pression atmosphérique verticale de bas en haut. — Fig. 8. Pression atmosphérique horizontale.

tous les sens, tandis que le poids du métal agit toujours de haut en bas : l'air est parfaitement *élastique* et transmet de tous côtés les efforts qu'il reçoit. Dans notre expérience, si nous retournons notre cylindre (fig. 7), et si nous pompions l'air, cette fois *au-dessus* du pis-

ton, la pression de l'air s'exercera de bas en haut : elle aura la même valeur d'à peu près 100 kg. Il en est de même si le cylindre est horizontal (fig. 8).

Lorsqu'on ne pompe pas l'air avec la machine pneumatique, comme il s'insinue dans tous les vides que laissent les corps solides (et liquides), il vient exercer partout sa pression : le piston de notre appareil d'expériences est également pressé sur ses deux faces, et les deux pressions égales se font équilibre. C'est pour cette raison que nous ne sentons pas sur notre corps la pression de l'atmosphère qui nous entoure.

Les liquides transmettent aussi les pressions dans tous les sens ; un nageur qui plonge à une profondeur de plusieurs mètres n'est pas écrasé par le poids énorme de l'eau qui le surmonte, pas plus que nous ne sommes écrasés par celui de l'atmosphère, parce que la pression se transmet sur toute la surface et dans tout l'intérieur de son corps. La *presse hydraulique* (voir § 19) est une utile application de la transmission des pressions par l'eau.

8. Pression de la vapeur. — En chauffant l'eau suffisamment, on la transforme en *vapeur* : on la fait passer de l'état liquide à l'état de gaz ou de fluide semblable à l'air. Si l'eau qu'on chauffe est enfermée dans une chaudière, la vapeur ainsi formée ne peut se dissiper au dehors et y prend une certaine *pression*. Montons sur la partie supérieure de notre chaudière un piston dans un cylindre ouvert aux deux bouts, communiquant en dessous avec la chaudière et en dessus avec l'air extérieur (fig. 9). Supposons aussi qu'on ait chassé tout l'air de l'intérieur de la chaudière, en laissant la vapeur se dégager au dehors pendant quelque temps.

Le dessus de notre piston est soumis à la pression de l'atmosphère, que nous savons être d'environ 1 kg sur chaque cm^2 , et le dessous à la pression de la vapeur dans la chaudière. S'il ne monte ni ne descend, sans être chargé d'aucun poids métallique, c'est que la pression de la vapeur est en réalité égale à celle de l'atmosphère, c'est-à-dire aussi de 1 kg sur chaque cm^2 . En chauffant suffisamment notre chaudière, nous pourrions rendre plus forte la pression de la vapeur ; par exemple, si la surface de notre piston est toujours de 100 cm^2 , nous pourrions élever la pression de telle sorte que le piston soulève, en plus de l'atmosphère, un poids métallique de 100 kg ou de 1 kg par cm^2 : la pression de la vapeur sera alors doublée ; elle atteindra 2 kg par cm^2 . Nous pourrions encore élever davantage la pression : notre piston soulèvera 500 kg, 1000 kg en plus de l'atmosphère (fig. 10), c'est-à-dire soulèvera en réalité 600, 1 100 kg ; la pression de la vapeur sera alors de 6, de 11 kg sur chaque cm^2 .

Nous avons ainsi, à l'extérieur de la chaudière, une pression de 1 kg par cm^2 , et à l'intérieur, une pression d'un certain nombre de kg par cm^2 . Comme ce n'est que la différence de ces deux pressions qui peut faire rompre la chaudière, l'habitude est venue de ne pas

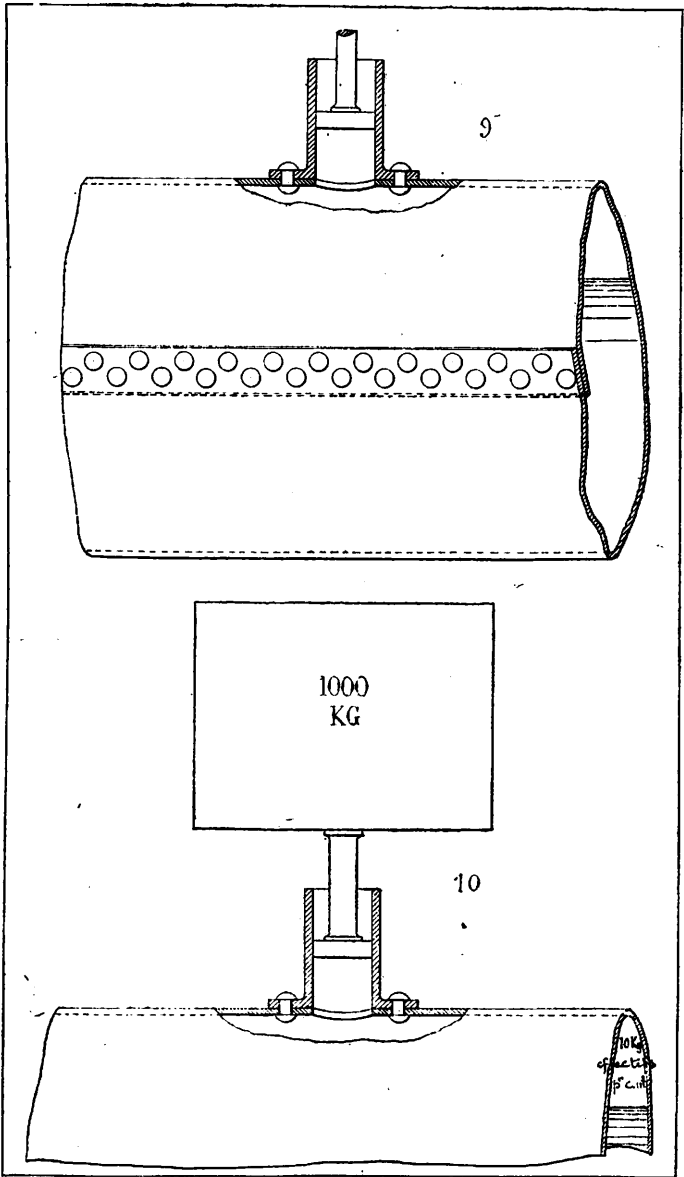


Fig. 9. Pression de la vapeur égale à celle de l'atmosphère.
 Fig. 10. Pression de la vapeur supérieure à celle de l'atmosphère.

compter la *pression absolue* ou totale de la vapeur, qui est, dans nos exemples, successivement de 1, 2, 6, 11 kg par cm^2 , mais de tenir compte de la *pression effective*, ou de la pression absolue diminuée de la pression extérieure de l'air : cette pression effective est mesurée par les poids métalliques posés sur notre piston.

9. **Manomètre.** — Le manomètre, qui est monté sur les chaudières, indique cette *pression effective* que la vapeur exerce sur chaque centimètre carré. C'est un tube creux courbé et élastique, se déformant

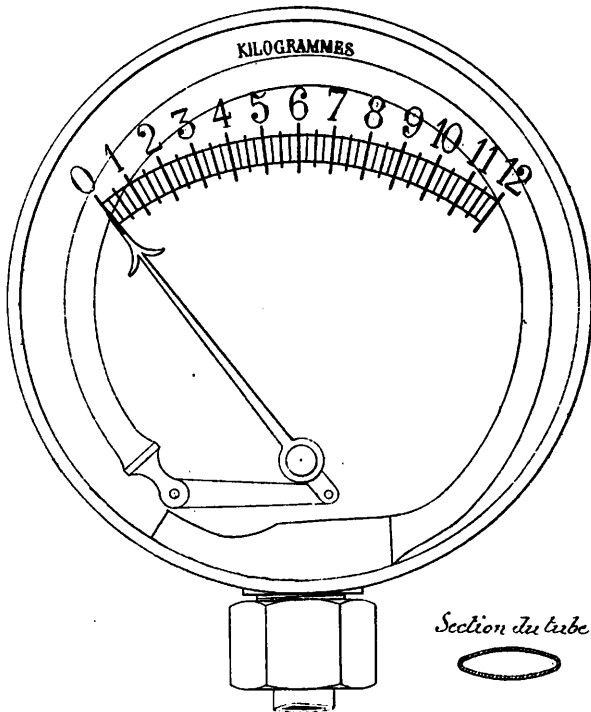


Fig. 11. — Manomètre.

plus ou moins sous la pression qui s'exerce à l'intérieur. L'extrémité mobile de ce tube commande une aiguille qui se déplace le long d'un cadran gradué (fig. 11).

La vapeur de la chaudière ne pénètre pas habituellement dans le tube du manomètre, dont la chaleur pourrait fausser les indications :

mais le tuyau de communication avec la chaudière se remplit d'eau qui transmet la pression.

Quand la chaudière est froide, l'aiguille du manomètre indique le zéro, ce qui veut dire que la pression à l'intérieur de la chaudière ne dépasse pas la pression de l'atmosphère à l'extérieur. S'il règne alors dans la chaudière une pression égale à celle de l'atmosphère, bien qu'elle ne contienne pas de vapeur, c'est parce que l'air y pénètre pendant le refroidissement, quand la vapeur se condense : l'air peut entrer en soulevant le tiroir du régulateur.

Quelquefois, en laissant refroidir un récipient de vapeur bien clos, où l'air ne peut pas s'insinuer, le vide se fait (comme avec une pompe à air) par suite de la condensation de la vapeur, et la pression atmosphérique extérieure risque d'aplatir le récipient, qui peut être capable de résister seulement à la pression intérieure de la vapeur, mais non à une pression extérieure.

Sans manomètre, on serait embarrassé pour conduire une chaudière à vapeur : on n'aurait d'ailleurs pas le droit de s'en passer, car l'article 7 du décret du 30 avril 1880, relatif aux appareils à vapeur, est ainsi conçu :

Toute chaudière est munie d'un manomètre en bon état, placé en vue du chauffeur et gradué de manière à indiquer en kilogrammes la pression effective de la vapeur dans la chaudière.

Une marque très apparente indique, sur l'échelle du manomètre, la limite que la pression effective ne doit point dépasser.

La chaudière est munie d'un ajutage terminé par une bride de quatre centimètres (0^m,04) de diamètre et cinq millimètres (0^m,005) d'épaisseur, disposée pour recevoir le manomètre vérificateur.

Les manomètres peuvent se dérégler avec le temps : on les vérifie en montant sur la chaudière un *manomètre étalon* construit avec soin et toujours en parfait état. Le mécanicien voit d'ailleurs si l'aiguille du manomètre marque bien la pression supérieure limite, indiquée par une flèche sur le cadran, au moment où les soupapes se lèvent, ce qui doit avoir lieu quand manomètre et soupapes sont en bon ordre. On doit signaler, pour le faire réparer, tout manomètre dont l'aiguille donne, à ce moment, une indication erronée d'un quart de kilogramme en plus ou en moins.

Il peut arriver que l'aiguille du manomètre ne retombe pas exactement au zéro quand toute pression effective cesse dans la chaudière : cela n'a pas grande importance, si l'indication de l'aiguille coïncide bien avec celles des soupapes à la pression supérieure.

10. Température de la vapeur. — Supposons qu'on fixe sur une chaudière un tube, fermé au bout, ouvert à l'extérieur et pénétrant dans la vapeur : en y faisant entrer un thermomètre (fig. 12), on pourra mesurer la température de la vapeur : cette expérience indique

toujours la même température pour une même pression. Il n'y a d'exception à cette règle que lorsqu'on chauffe la vapeur *sans eau*, dans des appareils spéciaux, dits *surchauffeurs* ; mais ces appareils n'existent pas sur la locomotive. En lisant la pression au manomètre, on peut donc dire quelle est la température que marquerait le thermomètre dans la vapeur.

A la pression moyenne de l'atmosphère vers le niveau de la mer, la température est de 100° : c'est celle de l'eau qui bout dans un vase ouvert.

A la pression effective de 5 kg par cm^2 , la vapeur a une température

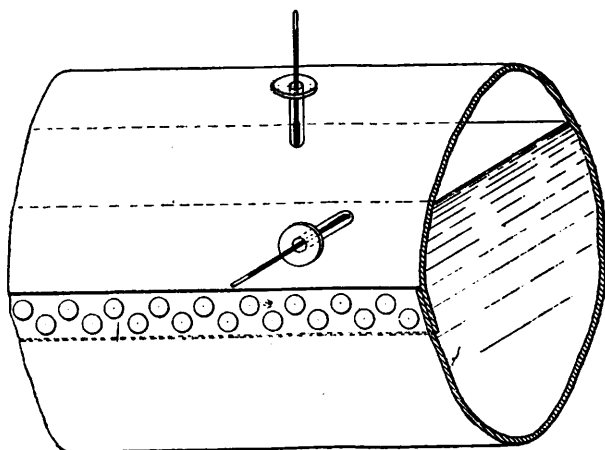


Fig. 12. — Mesure de la température de la vapeur et de l'eau.

de 158° . Cette température est de 183° à la pression effective de 10 kg, de 191° à celle de 12 kg, et de 200° à celle de 15 kg, pression effective adoptée pour les chaudières des locomotives compound du chemin de fer de Lyon.

La température de l'eau est la même que celle de la vapeur, au moins dans sa partie supérieure. Il peut arriver qu'au débouché du tuyau d'alimentation ou au fond de la chaudière l'eau reste quelque temps plus froide que la vapeur, mais elle n'est jamais plus chaude.

11. Combustion. — Pour comprendre comment on brûle la houille et les autres combustibles, quelques notions de *chimie* sont indispensables. La *combustion*, qui produit la chaleur, est une *combinaison chimique* des corps combustibles avec l'*oxygène* qui existe dans l'air. L'air est formé du *mélange* de deux gaz, l'*oxygène* et l'*azote* : 100 litres d'air contiennent 21 litres d'oxygène et 79 litres d'azote : le premier

de ces gaz forme donc à peu près le cinquième du volume total. En poids, un kilogramme d'air contient 230 grammes d'oxygène et 770 grammes d'azote. Dans la combustion, l'azote ne joue aucun rôle direct : il atténue seulement l'action très vive de l'oxygène pur, qui produit la combustion avec une rapidité extrême. On peut comparer l'azote mêlé avec l'oxygène à l'eau mise dans le vin.

Les éléments combustibles qui existent dans la houille, ainsi que dans les autres substances que nous employons pour le chauffage, sont le *carbone* et l'*hydrogène*. Le corps qu'on appelle graphite, plombagine ou mine de plomb, est du carbone à peu près pur ; le diamant est du carbone pur cristallisé. L'hydrogène est un gaz ; dans la houille il est combiné au carbone, et il forme des *carbures d'hydrogène*, qui se dégagent par la distillation et donnent le *gaz d'éclairage*. D'autres carbures d'hydrogène, liquides, constituent le *pétrole*.

La houille renferme en outre des matières solides non combustibles, qui restent après la combustion et forment les *cendres*.

En se combinant avec l'oxygène, dans l'acte de la combustion, le carbone peut former deux gaz différents, l'*oxyde de carbone* et l'*acide carbonique*. 6 grammes de carbone et 8 grammes d'oxygène donnent 14 grammes d'oxyde de carbone, qui est un gaz encore combustible ; 8 autres grammes d'oxygène avec 14 grammes d'oxyde de carbone (ou 16 grammes d'oxygène et 6 grammes de carbone) forment 22 grammes d'acide carbonique, qui est encore un gaz, mais n'est plus combustible.

Ainsi le carbone peut brûler en deux fois, donnant d'abord l'oxyde de carbone, qui produit à son tour l'acide carbonique. Les deux combustions se font ou séparément, ou simultanément en produisant du premier jet l'acide carbonique. Dans tous les cas, le carbone n'est complètement utilisé que s'il est transformé en acide carbonique ; tout dégagement d'oxyde de carbone non brûlé constitue une perte importante : en effet, la transformation du carbone en oxyde de carbone ne dégage que les 3 dixièmes de la chaleur qu'il peut donner, et les 7 autres dixièmes sont produits par la combustion de l'oxyde de carbone.

C'est un fait capital qu'il ne faut jamais oublier quand on brûle de la houille : laisser s'échapper de l'oxyde de carbone, c'est jeter les 7 dixièmes du carbone !

Pour que l'oxyde de carbone se transforme en acide carbonique, il faut qu'il rencontre une quantité suffisante d'oxygène, c'est-à-dire d'air qui le renferme ; il faut encore, pour que l'oxyde de carbone brûle, qu'il soit à une température assez élevée : à froid ou peu chauffés, l'oxyde de carbone et l'oxygène ne se combinent pas.

L'*hydrogène*, en s'unissant à l'oxygène, forme de la *vapeur d'eau* : 1 gramme d'hydrogène et 8 grammes d'oxygène donnent 9 grammes d'eau, en dégageant plus de quatre fois la quantité de chaleur produite par un gramme de carbone transformé en acide carbonique.

Si la quantité d'air est insuffisante, il peut arriver que les carbures d'hydrogène, dégagés par la houille, s'échappent sans être brûlés : c'est une perte qui s'ajoute à celle de l'oxyde de carbone.

Les chimistes savent déterminer dans chaque cas la quantité d'oxygène nécessaire pour brûler complètement un kilogramme d'un combustible donné. De la quantité d'oxygène on déduit facilement le poids d'air nécessaire, ou son volume. On trouve ainsi, pour la plupart des houilles, un chiffre voisin de $11^{\text{kg}},5$ à $11^{\text{kg}},8$ d'air par kilogramme de combustible (supposé débarrassé entièrement des cendres). C'est à peu près 9 mètres cubes d'air pris à la température et à la pression ordinaires dans notre pays.

Si la quantité d'air fourni pour la combustion est moindre, on peut être sûr qu'une partie du combustible se perdra en gaz non brûlés. Si elle est plus grande, l'excès d'air se chauffera dans le foyer et sortira avec les gaz de la combustion par la cheminée : les gaz ainsi rejetés étant encore chauds, il en résulte une certaine perte de chaleur. Mais comme on ne peut pas doser exactement le volume d'air qui traverse un foyer, comme aussi il n'y a pas mélange parfait, en tous les points, de l'air et des éléments combustibles, il vaut toujours mieux pécher par excès d'air que par défaut.

12. Quantité d'eau que peut vaporiser un kilogramme de combustible. — Les différents combustibles, en brûlant, ne pourront pas tous transformer en vapeur la même quantité d'eau : pour les comparer entre eux, il faut connaître la quantité que chacun est capable de vaporiser.

Brûlons complètement (ce qu'on peut faire dans des expériences de laboratoire) un kilogramme de charbon absolument pur, sans aucunes cendres, sans matières gazeuses, ce que les chimistes appellent du *carbone* ; employons toute la chaleur produite, sans en rien perdre, à chauffer de l'eau, prise à la température de 15° , et à la transformer en vapeur à la pression effective de 10 kg par cm^2 , nous trouverons qu'on peut ainsi produire $12^{\text{kg}},5$ de vapeur.

Nous venons de dire que la plupart des houilles contiennent, outre le *carbone*, des éléments volatils combustibles ; un kilogramme de houille, dépourvue de cendres, renfermant 150 grammes de ces éléments volatils, pourra transformer en vapeur, à la pression effective de 10 kg par cm^2 , environ 14 kilogrammes ou 14 litres d'eau prise à 15° .

On ne vaporise jamais dans une locomotive une aussi grande quantité d'eau par chaque kilogramme de houille, pour plusieurs motifs : d'abord, il y a des cendres, qui forment souvent le dixième du poids total ; cela veut dire qu'alors un kilogramme de houille renferme 100 grammes de matières solides inertes, et seulement 900 grammes de véritable combustible. Puis la combustion n'est pas parfaite, et par suite ne produit pas toute la chaleur que pourrait donner le

combustible ; en outre, le courant gazeux, qui arrive dans la boîte à fumée et qui est rejeté au dehors par la cheminée, est encore chaud ; il emporte de la chaleur, qui aurait été transmise à l'eau dans nos expériences de laboratoire. Enfin, la chaudière perd de la chaleur en échauffant l'air qui l'entoure.

Pour ces diverses causes, nous serons déjà contents si, avec un kilogramme de houille ordinaire, contenant 100 grammes de cendres et 135 grammes de matières volatiles, qui pourrait, dans une expérience de laboratoire, transformer 12^{kg},6 d'eau à 15° en vapeur à la pression de 10 kg par cm², nous obtenons 8 kilogrammes de vapeur dans la chaudière de locomotive.

Pour que l'eau se transforme en vapeur, sous une certaine pression, il faut d'abord qu'elle soit échauffée jusqu'à la température de la vapeur à cette pression, ce qui consomme de la chaleur, produite par la combustion d'un certain poids de houille ; ensuite, il faut encore de la chaleur, c'est-à-dire il faut continuer à brûler du charbon, pour changer l'eau en vapeur, bien que la température, indiquée par le thermomètre, ne varie pas pendant cette transformation. En se changeant en vapeur, l'eau absorbe ou emmagasine de la chaleur.

Reprenons notre exemple de 14 kilogrammes d'eau, pris à 15° et transformés en vapeur à la pression effective de 10 kilogrammes par centimètre carré, à l'aide d'un kilogramme de houille exempte de cendres, dans une expérience de laboratoire ; l'eau sera enfermée dans une chaudière, et à cette pression la température de vaporisation est de 183° ; pour chauffer l'eau de 15 à 183°, il faudra brûler 260 grammes de houille, c'est-à-dire un peu plus du quart ; puis, pour transformer en vapeur à la température de 183° ce kilogramme d'eau amené à la même température de 183°, il faudra brûler le reste de notre houille, 740 grammes.

On doit retenir que, dans les conditions les plus fréquentes, un peu plus du quart du combustible brûlé dans la locomotive sert à chauffer l'eau et près des trois quarts transforme l'eau chaude en vapeur, sans en modifier la température.

Quelquefois la vapeur produite dans la locomotive entraîne des gouttelettes d'eau non transformées en vapeur ; on dit que la chaudière *prime*. La quantité d'eau qui sort de la chaudière est alors augmentée, et on peut croire que le kilogramme de combustible est mieux utilisé, puisqu'il semble fournir des kilogrammes de vapeur en plus grand nombre ; mais tous ces kilogrammes ne sont pas de la vapeur, une partie est encore à l'état d'eau : il y a tromperie sur la qualité de la marchandise fournie par la chaudière.

13. Adhérence des locomotives. — Les pistons d'une locomotive font tourner les *roues motrices* : pour que la locomotive avance, il faut que les roues *roulent* et ne glissent pas sur le rail ou ne *patinent* pas. C'est le *frottement* qui empêche le patinage. Quand un objet, même

avec une face bien dressée, repose sur une table plane, par exemple un *tiroir* de locomotive sur un *marbre* d'atelier, il faut le pousser avec une certaine force pour le déplacer : cette force dépend du poids de l'objet, puis de la nature et de l'état des surfaces en contact : c'est, pour chaque sorte de surface, une fraction déterminée du poids. Ce pourra être le cinquième du poids de notre tiroir, s'il n'est pas graissé, soit 2 kilogrammes, s'il en pèse 10. En service, le tiroir frotte sur la table des lumières : nous calculons, au paragraphe 109, le frottement considérable, bien que réduit par le graissement, qui se produit alors, par suite de la forte pression qui appuie le tiroir sur la table.

Si nous posons sur le marbre une rondelle cylindrique, nous pourrions, soit la faire rouler, soit la faire glisser comme le tiroir, en la poussant de manière qu'elle ne tourne pas : il faudra pour cela surmonter un frottement comme pour faire glisser un corps plat, tandis qu'un très faible effort suffit pour produire le roulement.

De même, pour qu'une roue de locomotive patine au lieu de rouler sur le rail, il faut qu'elle surmonte un frottement, c'est-à-dire une résistance qui agit au point où elle repose sur le rail et dont la direction suit le rail.

Si les rails et les roues motrices sont munis de dents engrenant les unes dans les autres, ainsi qu'on le voit sur les chemins de fer à crémaillère, et comme l'avait fait Blenkinsop en 1814, la rotation des roues fait nécessairement avancer la locomotive, et l'effort exercé par les dents des roues sur celles du rail est précisément égal à l'effort de traction *total*, qui entraîne le train et la locomotive elle-même.

On peut se figurer une roue et un rail ordinaires comme munis de dents microscopiques : ce sont ces petites dents qui donnent à la locomotive un appui pour exercer son effort de traction ; il en résulte une poussée égale à l'effort de traction total, dirigée dans le sens du rail.

Cette poussée ne peut dépasser la valeur qui produirait le glissement de la roue, valeur limite qui est une fraction du poids appuyant la roue sur le rail ; cette fraction est variable selon l'état des surfaces.

Tant que l'effort de traction produit par la locomotive est moindre que cette limite, les roues tournent sans glisser ; dès que l'effort dépasse cette limite, soit qu'il devienne trop fort, soit que la limite s'abaisse, les roues patinent.

Cet effort limite peut être le cinquième du poids des roues motrices sur le rail, dit *poids adhérent*, et même davantage, lorsque le rail est bien sec ; le poids adhérent d'une machine Crampton étant de 14 000 kilogrammes, l'effort de traction pourrait atteindre, dans ce cas, le cinquième de 14 000, ou 2 800 kilogrammes, sans produire le patinage.

L'humidité rend le rail un peu gras et réduit beaucoup l'effort capable de produire le patinage : cet effort ne sera plus que le

dixième, le quinzième du poids adhérent, c'est-à-dire, dans l'exemple choisi, 1 400 kilogrammes, 900 kilogrammes; notre machine Crampton ne pourra plus exercer un effort supérieur à ces derniers chiffres.

Quand les rails sont bien lavés par une pluie abondante, on retrouve une adhérence presque aussi grande que lorsqu'ils sont secs.

Diverses causes, outre l'humidité, peuvent réduire beaucoup l'adhérence, les feuilles mortes, l'huile sur les rails ou sur les roues, les sauterelles écrasées, les mélasses coulant le long de la voie pendant le transport.

En résumé, les conditions variables de l'adhérence imposent à l'effort de traction une limite, également variable, indépendante de la puissance motrice que peut donner la vapeur.

Lorsque cette limite est atteinte, les roues patinent; la puissance motrice étant plus grande que la résistance qui lui est opposée, le mécanisme se met aussitôt à tourner plus vite, et risque d'atteindre en peu d'instant des vitesses capables de le briser ou de le fausser, si le mécanicien ne ferme à temps le régulateur. Il semble même que souvent, dès que le patinage a commencé, la résistance qui s'oppose au glissement de la roue sur le rail se réduise aussitôt, ce qui augmente le risque d'une vitesse excessive de rotation.

14. Accouplement. — D'après les lois du frottement, la limite de l'effort de traction imposée par l'adhérence est, à chaque instant, *proportionnelle au poids adhérent*: si ce poids adhérent est de 10, 11, 12, 13, 14, 15 tonnes et si la limite d'adhérence est le sixième de ce poids, l'effort de traction ne pourra pas dépasser 1 660, 1 730, 2 000, 2 160, 2 330, 2 500 kilogrammes. Il y a intérêt évident à augmenter cette limite, mais les voies ne supporteraient pas un accroissement indéfini du poids sur un train de roues: on ne dépasse guère le chiffre de 16 à 17 tonnes. L'effort de traction se trouve ainsi limité bien bas dans les locomotives à *essieux indépendants*.

L'*accouplement* de deux ou plusieurs trains de roues permet de relever beaucoup cette limite, en les obligeant à rouler ou à patiner ensemble. Le *poids adhérent* se trouve ainsi doublé, triplé; il peut comprendre le poids total de la locomotive et même celui des approvisionnements, dans les machines-tenders.

15. Sablières. — En répandant un peu de sable sur les rails, on augmente l'adhérence, et on peut ainsi combattre les influences qui la réduisent. Le sable, contenu dans une *sablière*, est amené par des tuyaux en avant des roues motrices: il tombe spontanément quand on démasque un orifice au fond de la sablière (fig. 13), ou bien il est versé dans les tuyaux par un distributeur en hélice qu'on fait tourner à la main (fig. 14).

Dans les sablières de la compagnie de Lyon (fig. 14 *bis*), un petit

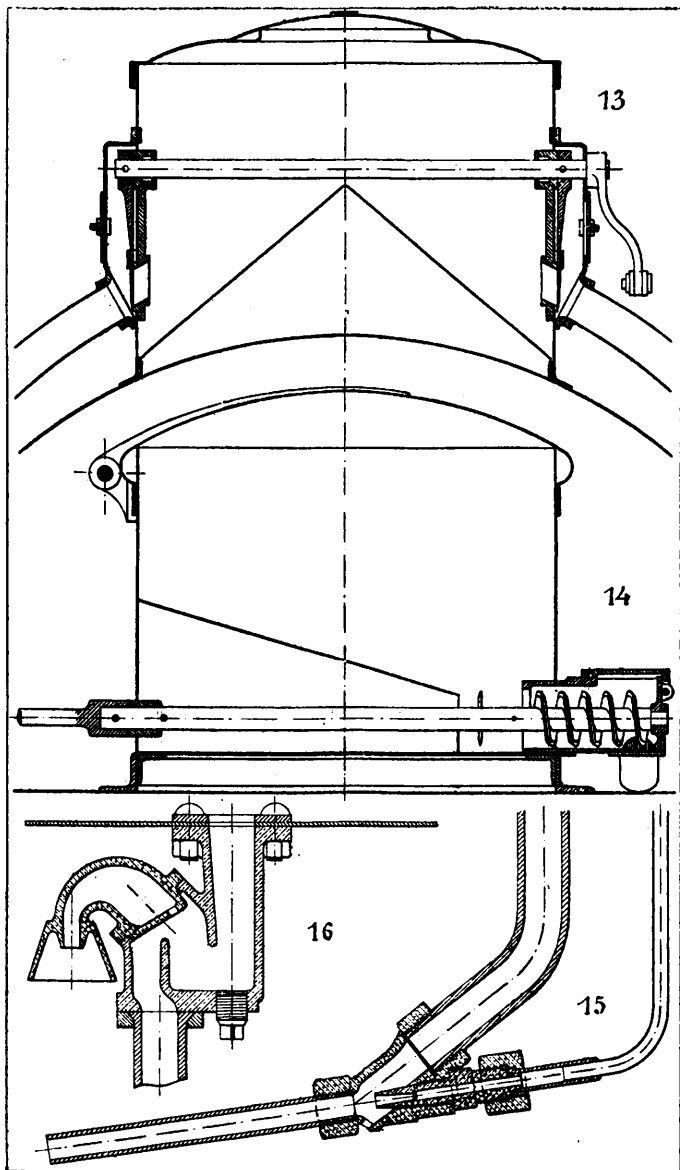


Fig. 13. Sablière à valves. — Fig. 14. Sablière à distributeur hélicoïdal. — Fig. 15. Appareil Gresham, éjecteur. — Fig. 16. Appareil Gresham, boîte d'aspiration.

disque percé de deux trous peut tourner sur le fond horizontal de la boîte, de manière à démasquer l'ouverture de l'un ou l'autre des tuyaux qui aboutissent en avant et en arrière de la roue : la tige transversale, qu'on voit sur le dessin, transmet le mouvement d'un côté à l'autre de la boîte.

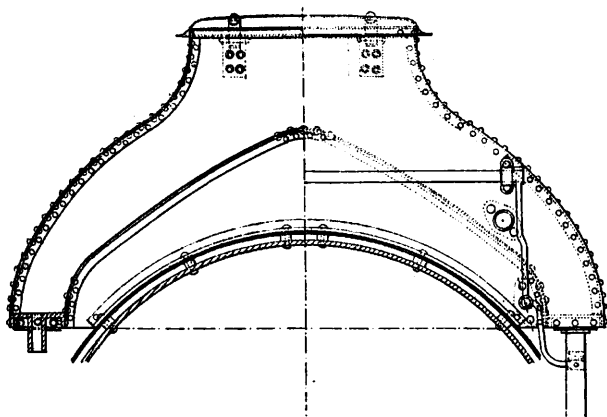


Fig. 14 bis. — Sablière de la compagnie de Paris à Lyon et à la Méditerranée.

Ces sablières simples ne sont pas très satisfaisantes : le sable tombe inégalement et forme des paquets qui, bien qu'écrasés par les roues motrices, gênent le roulement des roues suivantes et augmentent la résistance du train : la manœuvre à la main du distributeur améliore toutefois l'appareil sous ce rapport ; puis le sable tombe à quelque distance en avant des roues motrices, de sorte qu'il n'agit pas au premier instant d'un démarrage, et le vent peut l'emporter ; enfin la dépense de sable est assez forte, de sorte qu'on risque de vider les sablières, avant d'arriver au terme d'une étape, si les patinages sont fréquents.

Dans l'appareil Gresham, un petit *déjecteur* à vapeur (fig. 15) est installé en avant de la roue motrice : le jet de vapeur, en s'échappant par la tuyère centrale, aspire l'air par le tuyau qui aboutit à une boîte montée sous la sablière (fig. 16). Cette boîte est percée d'un trou pour l'entrée de l'air et le sable y descend par son poids. Quand le jet de vapeur fonctionne, l'air entraîne le sable, qui est violemment projeté entre la roue et le rail.

Une faible quantité de sable suffit pour rétablir l'adhérence : l'excès nuisible de consommation est évité grâce à l'appareil Gresham, et le sable est projeté sans retard à l'endroit même où il est utile.

Quelques précautions sont nécessaires pour que cet appareil fonctionne bien. Le sable doit être bien sec et assez fin : à cet effet, on lui fait traverser un crible dont les mailles sont larges de deux millimètres au plus ; puis il est desséché au soleil ou sur le feu. Le robinet qui fournit la vapeur aux éjecteurs doit être étanche et disposé pour que l'eau qu'il peut laisser fuir ne s'écoule pas par ces éjecteurs.

Les deux jets d'un appareil Gresham peuvent débiter ensemble 2 à 3 kilogrammes ou environ un litre de sable en une minute.

Lorsque plusieurs roues sont accouplées, le sable n'agit pas, bien entendu, sur celles qui sont en avant du tuyau de la sablière ; avec la sablière Gresham, du moins, il ne semble guère pouvoir agir beaucoup sur celles qui suivent la roue atteinte par le jet.

Beaucoup de locomotives, même des machines-tenders, n'ont de tuyaux à sable que pour la marche avant, ce qui rend la marche arrière plus difficile. Lorsque cette marche est fréquente, comme pour les machines de gare, l'addition de tuyaux donnant du sable à l'arrière des roues motrices est fort utile.

On doit éviter de projeter du sable dans les aiguilles, ce qui pourrait en gêner la manœuvre : avec l'appareil Gresham, cet inconvénient n'est guère à craindre.

Pour produire un arrêt rapide, le sable est encore utile, surtout si le rail est gras : il prévient le calage des roues et augmente ainsi la résistance des freins (voir chapitre VII) ; toutefois, avec la sablière Gresham, il ne reste pas de sable sur la voie, de sorte qu'elle ne paraît pas pouvoir agir sur les roues du tender et du train.

16. Lavage des rails. — Nous avons vu que sur un rail entièrement mouillé l'adhérence était à peu près aussi bonne que sur un rail sec : il suffirait donc de laver à grande eau un rail gras pour qu'il cessât d'être glissant. C'est ce qu'on fait sur certaines lignes à fortes rampes, où la grande consommation de sable exigeait un déblaiement fréquent des tunnels et augmentait l'usure des rails et des bandages. Des tuyaux placés vers l'avant de la locomotive envoient sur les rails de l'eau prise au tender et lancée par un jet de vapeur.

17. Effort de traction de la locomotive. — Nous venons d'examiner comment les conditions d'adhérence imposent une limite, fort variable, à la force de traction d'une locomotive ; l'étude de la distribution et du mécanisme, que nous ferons au chapitre III, nous montrera comment la force de traction est produite par la vapeur, dans chaque cas, et ne dépasse pas une certaine valeur ; mais nous pouvons donner ici quelques indications générales sur ce point capital.

Il faut éviter toute confusion entre les deux limites de l'effort de traction ; si l'effort que peut produire la vapeur dépasse celui que l'adhérence permet d'utiliser à certains moments, il est toujours

facile de réduire l'action motrice de la vapeur ; on peut aussi améliorer l'adhérence à l'aide du sable ou autrement ; elle s'améliore d'elle-même certains jours et en certaines saisons. Mais si c'est l'effort moteur de la vapeur qui est trop faible, si grande que soit l'adhérence, il n'y aura pas de remède, et on ne pourra dépasser cet effort.

En d'autres termes, on peut généralement arriver à se tirer d'affaire, non sans peine, il est vrai, quand l'adhérence est insuffisante, mais on ne peut pas remédier à la faiblesse du moteur.

Lorsqu'on construit des machines puissantes en réduisant autant que possible le poids des pièces, il arrive souvent que l'adhérence est faible comparée à la puissance : c'est pourquoi on a quelquefois alourdi les machines à dessein et sans autre motif. Sur des lignes de plaines où les locomotives à marchandises remorquent des trains pesant 700, 800 tonnes, et même davantage, l'addition de quelques tonnes à la machine n'est guère sensible, si on la compare à la charge totale. Mais sur les lignes de montagnes, à rampes de 30, 40 millimètres par mètre, le poids qu'on peut traîner n'est pas considérable : si ce poids descend à 80 ou 100 tonnes, quelques tonnes de plus à la machine, qui réduisent d'autant la charge utile du train, ne sont pas indifférentes : il faut y regarder à deux fois avant d'alourdir exprès les locomotives, pour améliorer leur adhérence. Il convient alors de rendre adhérent, autant que possible, tout le poids nécessaire pour le moteur, notamment en supprimant les tenders séparés.

Comment calcule-t-on l'effort de traction qui est ordinairement indiqué sur le tableau des dimensions des locomotives ? Supposons que la vapeur soit à la plus forte pression que doit supporter la chaudière et qu'elle pousse le piston pendant sa course entière, sans aucune détente, l'autre face communiquant constamment avec l'échappement. On obtiendrait ainsi le plus grand travail possible par coup de piston. Ce travail (voir la définition au § 4) est égal à la force qui pousse le piston multipliée par sa course ; si le diamètre du piston est de 45 centimètres, la surface, qu'on calcule en multipliant le carré du rayon, ou le quart du carré du diamètre, par 3,14, sera de 1 590 centimètres carrés ; avec une chaudière timbrée à 10 kg, la pression effective de la vapeur sera de 10 kg par cm^2 et de $10 \times 1\,590$ ou 15 900 kilogrammes sur le piston. Si la course est de 600 millimètres ou 0^m,6, le travail sera $15\,900 \times 0,6$ ou de 9 550 kilogrammètres ; pour un tour de roue, comme il y a deux cylindres et que chaque piston y fait une excursion aller et retour, le travail moteur sera quatre fois plus grand.

D'autre part, le travail exercé par la locomotive pour un tour de roue est égal à l'effort de traction appliqué entre la roue et le rail, multiplié par le chemin parcouru pendant que cette roue fait un tour : ce chemin est égal à la *circonférence* de la roue (voir § 21) ; le diamètre de la roue étant de 1^m,400, la circonférence est de 4^m,400.

Si des frottements et autres résistances ne causaient aucune perte

de travail dans la transmission des pistons aux roues motrices, le travail de l'effort de traction pendant un tour de roue serait égal à celui de la vapeur sur les pistons, à 4 fois 9 550 ou 38 200 kilogrammètres dans notre exemple. Ce travail connu est le produit de l'effort de traction cherché par la longueur parcourue, 4^m,400 : l'effort de traction est donc 38 200 divisé par 4,400 ou 8 700 kilogrammes environ.

$$4 p \frac{3,14}{4} d^2 l$$

C'est ce qu'exprime la formule algébrique $\frac{4 p \frac{3,14}{4} d^2 l}{3,14 D}$ qui se réduit à $\frac{p d^2 l}{D}$, où v est la pression effective de la vapeur par centimètre carré, d le diamètre du cylindre en centimètres, $\frac{3,14}{4} d^2$ sa surface, l la course du piston, en mètres, à compter quatre fois pour un tour de roues, D le diamètre des roues motrices, en mètres, et $3,14 D$ leur circonférence.

En réalité, on ne peut développer un si grand effort de traction, parce que la vapeur n'agit jamais à pleine pression pendant toute la course du piston, et parce que les frottements sont inévitables. On estime qu'avec les dispositions usuelles des locomotives, on ne peut recueillir qu'environ les deux tiers, ou 0,65, du travail que nous avons calculé : c'est ce qu'indique la formule $0,65 \frac{p d^2 l}{D}$. Cette réduction

est assez largement calculée, et il arrive souvent que les locomotives puissent réellement développer un effort supérieur.

Cette traction est celle qu'exercent les roues motrices; elle sert non seulement à tirer le train, mais encore à faire avancer la locomotive elle-même : l'effort sur le crochet de traction d'arrière, qu'enregistre le dynamomètre, est donc moindre.

Enfin l'action motrice des pistons sur les roues n'est pas constante pendant un tour, ce qui ne trouble pas l'égalité du travail que nous avons exprimée. Mais de la variation de l'action motrice peut résulter le patinage pour certaines positions des pistons.

L'effort de traction, calculé comme nous venons de le dire, ne peut être développé par la locomotive pendant longtemps, à moins qu'elle ne marche fort lentement, car la production de la chaudière ne serait pas suffisante pour fournir toute la vapeur nécessaire, qui est fort mal utilisée quand elle ne se détend pas dans les cylindres.

Pour tirer bon parti des machines, il importe de leur faire toujours remorquer des charges aussi grandes que possible : ces charges dépendent, pour une machine donnée, de la vitesse de marche, des rampes et des courbes, enfin de l'état atmosphérique : le vent, le froid modifient les résistances du train. C'est en définitive la vaporisation de la chaudière qui impose à la charge une limite; cependant, à faible vitesse, les conditions d'adhérence peuvent quelquefois obliger à la réduire; cette réduction est même parfois nécessaire pour ne pas

surmener les attelages des trains, qui ne peuvent supporter avec sécurité qu'un effort limité à un certain nombre de kilogrammes.

Sur une section de ligne, les déclivités sont, en général, variables d'une extrémité à l'autre. Lorsque les rampes ne sont pas très longues, l'élan du train permet de les franchir plus facilement. Les courbes causent une résistance qu'on peut assimiler à celle d'une rampe d'un certain nombre de millimètres par mètre. Quant à l'effet, très variable, des conditions atmosphériques, on en tient compte, d'une manière générale, en fixant des charges différentes pour l'hiver et pour l'été, et par des réductions temporaires ou exceptionnelles.

Sur les chemins de fer de Paris à Lyon et à la Méditerranée, on a calculé, pour chaque section, une *rampe fictive* qui représente l'effet des déclivités réelles et des courbes : la section est supposée présenter cette rampe fictive, en alignement droit, sur toute sa longueur. Comme les trains les plus rapides peuvent le mieux franchir par élan certaines rampes, il en résulte que la rampe fictive a une moindre valeur pour ces trains. Elle est, bien entendu, différente pour chaque sens du parcours dans la section.

Nous donnons, comme exemple, les rampes fictives pour les trois sections de la ligne de Paris à Tonnerre.

Les rampes sont indiquées en millimètres et fractions de millimètre par mètre. Les vitesses sont les vitesses moyennes de marche dans la section (voir § 23).

	RAMPES FICTIVES CORRESPONDANT AUX VITESSES EN KILOMÈTRES A L'HEURE			
	20	30	40	50 à 90
Paris à Montereau	3	2,7	2,4	2,25
Montereau à Laroche . . .	2,5	2,3	2,1	2
Laroche à Tonnerre	2,75	2,55	2,35	2,25
Tonnerre à Laroche	3	2,7	2,4	2,25
Laroche à Montereau . . .	2	1,6	1,2	0,8 à 0,5
Montereau à Paris	1	0,8	0,6	0,5

Des tableaux donnent, pour chaque série de machine, les charges qu'elles doivent remorquer, aux diverses vitesses, sur les diverses rampes fictives. Les charges des trains sont calculées en tonnes, aussi exactement qu'on le peut.

18. Centre de gravité. — Nous aurons à parler du *centre de gravité*

d'une locomotive, ou de la partie suspendue d'une locomotive : il faut savoir exactement ce que cette expression désigne. Suspendons à un fil un corps pesant et marquons à l'intérieur ou à l'extérieur de ce corps, suivant sa forme, la direction de ce fil, par exemple en y perçant un trou de très petit diamètre ou en fixant une tige mince à l'extérieur (fig. 17 et 18) ; suspendons le même corps par un autre point et marquons de même sur le corps la direction du fil. La mécanique démontre et l'expérience fait voir que les deux directions ainsi déterminées se coupent en un point qui est le même quelle que soit la place d'attache du fil : c'est ce point qu'on nomme *centre de gravité* du corps. Sur la figure 17, le centre de gravité est à l'intérieur du corps ; il peut aussi bien être à l'extérieur (fig. 18).

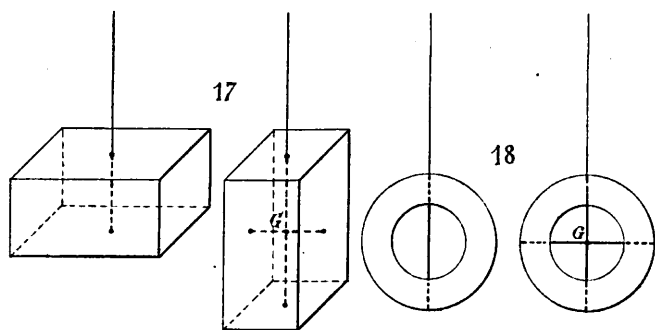


Fig. 17. — Détermination du centre de gravité, à l'intérieur d'un corps.

Fig. 18. — Détermination du centre de gravité, à l'extérieur d'un corps.

La considération du centre de gravité permet de simplifier certains problèmes, en supposant le corps pesant remplacé par un seul point, où serait concentrée sa masse entière, et qui par suite aurait le même poids.

Pour tourner les locomotives, on emploie fréquemment des ponts à *pivot*, disposés de manière que tout le poids de la machine avec son tender puisse porter sur le pivot, sans que les *galets* qui existent aux extrémités du pont appuient sur leur *chemin de roulement* circulaire : ces galets ne servent alors qu'à supporter le poids de la machine pendant qu'elle entre sur le pont ou qu'elle en sort. Pour que la machine à tourner soit ainsi placée, il faut que le *centre de gravité* de l'ensemble formé par la locomotive et le tender se trouve juste au-dessus du pivot : le virage est alors facile et deux hommes peuvent l'effectuer rapidement. Il n'est pas besoin d'ailleurs de connaître d'avance la position du centre de gravité sur la machine : comme le pont peut s'incliner légèrement suivant sa longueur, la machine est bien placée

quand les galets ne touchent leur chemin de roulement ni d'un côté ni de l'autre.

Pour qu'on puisse amener une machine dans cette position, il est en général nécessaire que le pont soit un peu plus long que ne l'exigerait l'espacement des roues extrêmes de la locomotive avec son tender : si on ne dispose pas de cet excès de longueur, on déplacera le centre de gravité en modifiant la quantité d'eau que contient le tender au moment du virage.

19. Presse hydraulique. — Par sa simplicité et sa puissance, la *presse hydraulique* est un engin des plus remarquables ; il met en évidence l'égale transmission dans tous les sens de la pression par les fluides. La machine à vapeur nous montre cette transmission par un fluide gazeux et *compressible*, dont le volume change quand la pression change. Dans la presse hydraulique, la pression est transmise par un liquide, dont le volume ne change pas sensiblement quand la pression augmente. Il ne faut pas croire cependant que l'eau soit absolument *incompressible* : sous l'énorme pression qu'elle subit dans les grandes profondeurs de l'océan, pression qui atteint mille fois celle d'une chaudière de locomotive, elle se contracte quelque peu ; la hauteur d'une colonne d'eau de 9 000 mètres se réduit de 190 mètres par l'effet de cette compression.

Dans la presse hydraulique, un petit piston reçoit l'action d'une force : si ce petit piston a une section de 5 centimètres carrés et qu'on lui applique une force de 500 kilogrammes, qui se transmet à l'eau, l'eau est soumise à une pression de 100 kilogrammes par centimètre carré. Cette pression s'exerce sous un grand piston, dont la section est par exemple de 500 centimètres carrés : ce piston sera poussé par une force de 500×100 ou de 50 000 kilogrammes. Mais il faut remarquer que si la force est amplifiée, la course du piston est diminuée : avec les chiffres indiqués, la force étant multipliée par 100, le chemin parcouru par le grand piston sera le centième du parcours du petit : il se déplacera de 1 millimètre quand le petit piston s'enfoncera de 100 millimètres.

Comme le petit piston joue dans un corps de pompe muni de soupapes d'aspiration et de refoulement, on peut en renouveler plusieurs fois la course et pousser progressivement le grand piston.

Ces pistons sont des *plongeurs*, traversant des *garnitures* formées le plus souvent d'un *cuir embouti*, dont la pression colle les bords contre le corps de pompe d'une part et contre le piston d'autre part.

Le *vérin hydraulique* est une petite presse portative. Certains vérins de ce genre sont construits avec d'assez grandes dimensions et fixes.

20. Angles. — Un angle est la figure formée par deux lignes droites, qu'on appelle *côtés* de l'angle et qui se terminent au point où elles se

rencontrent, dit *sommet* de l'angle. En plaçant au sommet le centre d'un cercle de rayon choisi une fois pour toutes, égal à un mètre par exemple, l'*arc* de ce cercle compris entre les côtés mesure l'angle. La circonférence entière est partagée en 360 *degrés* (360°) ; chaque degré se subdivise en 60 *minutes* (60') et chaque minute en 60 *secondes* (60"). L'*angle droit* est mesuré par l'arc de 90° , qui est le quart de la circonférence ; l'*angle aigu* est plus petit que l'angle droit, l'*angle obtus* est plus grand.

Ces mesures sont anciennes et compliquées, et les expressions de minutes et secondes peuvent donner lieu à des confusions. En créant le système métrique, on avait établi une division décimale du cercle : le quart de cercle, au lieu de correspondre à 90° , comprenait 100 *grades*, divisés chacun en 100 parties, subdivisées elles-mêmes en 100 autres. La carte de France dite d'état-major a même été établie avec des méridiens tracés dans ce système.

Il est bien fâcheux qu'il ne se soit pas généralisé, d'autant plus que les mesures surannées dont on fait usage allongent inutilement les calculs astronomiques, déjà fort longs : on estime que des calculs qui demanderaient cinq jours avec une division décimale en prennent six.

21. Cercle. — Le *rayon* d'un cercle est la distance du *centre* à la *circonférence* ; le *diamètre* est le double du rayon. La longueur développée de la circonférence est égale, approximativement, à celle du diamètre multipliée par 3,14 ; la surface du cercle est égale, encore par approximation, au carré du rayon multiplié par ce même nombre 3,14, ou au carré du diamètre divisé par 1,273. Le *carré* d'un nombre est le produit de ce nombre par le même nombre.

22. Gabarit de chargement. — Tout véhicule d'un chemin de fer doit passer librement dans le *gabarit de chargement*, qui n'est pas le même pour toutes les lignes. Nous donnons figure 19 celui des chemins de fer de l'Est, et figure 19 *bis* celui des chemins de fer de Paris à Lyon et à la Méditerranée. Sur cette dernière figure, le trait plein représente le gabarit usuel de chargement des wagons ; mais les véhicules peuvent s'inscrire dans le profil déterminé par le trait mixte. Les tracés en dessous de la ligne AB figurent le gabarit limite pour les constructions fixes. Le tracé le plus saillant entre les rails est le contour des chariots transbordeurs sans fosse.

La cote *a*, marquée 50 millimètres, ne s'applique qu'aux voies munies de contre-rails ; elle est en général portée à 70 millimètres et alors la cote *b* devient 655 millimètres.

Il faut remarquer que la flexion des ressorts et le jeu des roues sur les rails déplacent les véhicules : malgré ces déplacements ils ne doivent jamais sortir du gabarit. Un véhicule chargé peut s'inscrire dans le gabarit et ne plus y rester après le déchargement.

En outre, dans les courbes, les extrémités et le milieu des longs véhicules prennent, par rapport à la voie, un déplacement transversal de plusieurs centimètres.

23. Vitesse des trains. — La vitesse des trains s'exprime en kilomètres à l'heure ; dans le sens étroit des mots, cette manière de comp-

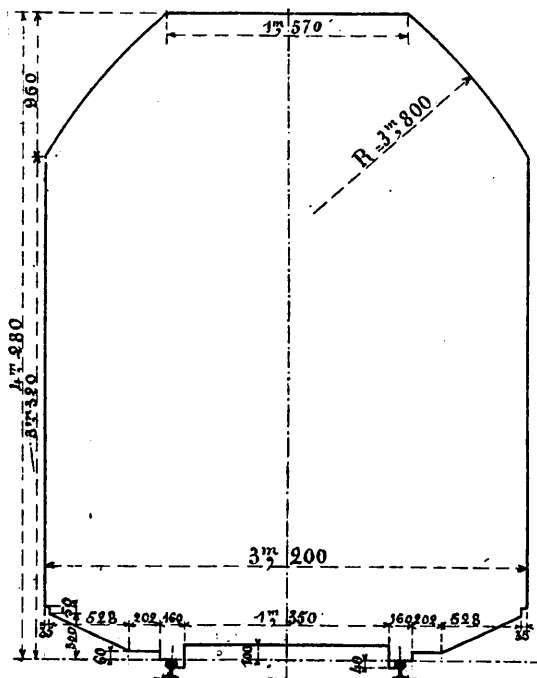


Fig. 19. — Gabarit de chargement de la compagnie de l'Est.

ter supposerait pendant une heure une marche uniforme, bien rarement réalisée. Si l'on veut déduire de la vitesse en kilomètres à l'heure le parcours en mètres par seconde, on peut multiplier par 1 000 le nombre des kilomètres, ce qui donne le nombre de mètres, puis diviser le produit par 3 600, nombre de secondes en une heure ; plus simplement, il suffit de multiplier par 10 et de diviser par 36, ce qui revient au même. Par exemple, à la vitesse de 90 kilomètres à l'heure, on parcourt 900 divisé par 36, c'est-à-dire 25 mètres à la seconde.

On appelle *vitesse commerciale* d'un train la vitesse uniforme qui lui permettrait d'accomplir son parcours dans le temps même qu'il

emploi, arrêts compris. La division non décimale de l'heure, en 60 minutes, en complique un peu le calcul : on comptera combien de minutes s'écoulent depuis le départ jusqu'à l'arrivée, puis on divisera le nombre des kilomètres parcourus par celui des minutes ; on aura

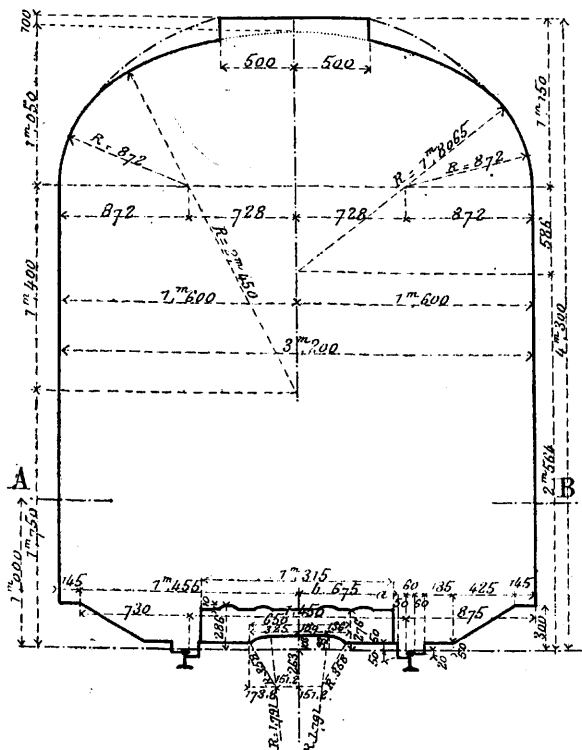


Fig. 19 bis. — Gabarit de chargement de la compagnie de Lyon.

ainsi le parcours par minute; en le multipliant par 60, on aura le parcours moyen par heure ou la vitesse commerciale en kilomètres à l'heure. On obtient un peu plus simplement le même résultat en multipliant d'abord par 60 le nombre de kilomètres, puis en divisant le produit par le nombre des minutes. Par exemple, si un train part de Belfort à 11 h. 27 pour arriver à Paris à 6 h. 16, il parcourt 443 kilomètres en 409 minutes : la vitesse commerciale est de 443×60 ou 26 580 divisé par 409, c'est-à-dire de 65 kilomètres à l'heure. On calcule de même la *vitesse commerciale* d'une station à la suivante, pour un trajet sans arrêt.

On appelle *vitesse moyenne de marche*, d'une station à la suivante, la vitesse uniforme qui permettrait de faire effectivement le trajet dans le même temps, en tenant compte du temps perdu pour démarrage, arrêt et ralentissements. Si on donne deux heures ou 120 minutes pour un trajet de 130 kilomètres entre deux arrêts, la vitesse commerciale sera de 65 kilomètres à l'heure ; si les temps perdus pour les causes indiquées sont de 7 minutes, on calculera la vitesse pour le parcours en 113 minutes seulement, ce qui donne une vitesse moyenne de marche de 69 kilomètres à l'heure.

Enfin, comme en réalité la vitesse n'est pas uniforme sur tout le trajet, la *vitesse effective de marche* dépasse à certains moments la vitesse moyenne pour se tenir en dessous à d'autres.

Pour obtenir des vitesses commerciales élevées, il faut non seulement une bonne vitesse moyenne de marche, mais encore peu de pertes de temps en démarrages, ralentissements et arrêts. Ce sont surtout les grandes lignes anglaises qui réalisent le plus généralement ces conditions favorables. On refuse souvent en Angleterre le nom d'*express* aux trains dont la vitesse commerciale est inférieure à 64 kilomètres (40 milles) à l'heure.

Sur les lignes chargées, la différence des vitesses moyennes des divers trains complique l'exploitation. Parfois, en accélérant un peu la marche des trains de marchandises et en leur faisant faire de longs parcours sans arrêt, on peut leur donner une vitesse moyenne égale à celle des trains de voyageurs à fréquents arrêts, et leur éviter de longs stationnements dans les garages. C'est pour ce motif que la compagnie anglaise du Lancashire and Yorkshire railway a muni ses locomotives à marchandises de l'appareil à embarquer l'eau en route, décrit au paragraphe 153.

Sur quelques lignes à très grand trafic, on ajoute des voies supplémentaires, qui servent à la circulation des trains de marchandises, souvent sur une grande longueur : c'est ainsi que plusieurs des chemins de fer qui rayonnent autour de Londres ont quatre voies sur plus de cent kilomètres. Aux États-Unis, la ligne d'Albany à Buffalo a quatre voies sur une longueur de près de 500 kilomètres.

D'autres fois, et c'est ce qu'on commence souvent par faire avant de poser partout les quatre voies, on se contente d'installer, aux endroits où elle n'exige pas de grands travaux, une voie supplémentaire, sur laquelle les trains de marchandises continuent tranquillement leur trajet pendant que les trains de voyageurs les dépassent.

Quelle est la plus grande vitesse qu'aient atteinte les locomotives ? Il est difficile de répondre avec précision à cette question ; mais les machines stables, sur une bonne voie, ont parfois marché avec une très grande rapidité. Dans des essais effectués par la compagnie de Lyon à la suite de l'exposition universelle de 1889, plusieurs machines ont facilement donné des vitesses de 130 à 140 kilomètres à l'heure ; une Crampton de la compagnie de l'Est a même atteint 144 kilomètres,

40 mètres à la seconde, et il semble que ce chiffre eût pu facilement être dépassé. On a récemment annoncé des vitesses supérieures en Angleterre et aux États-Unis.

Quand on connaît la longueur des rails d'une voie, on peut assez facilement, à l'aide d'une montre à secondes, déterminer la vitesse d'un train dans lequel on se trouve, sans regarder les poteaux kilométriques, ce qui permet de mesurer la vitesse la nuit aussi bien que le jour. Il suffit de compter les joints des rails, qu'on sent au passage : c'est comme si l'on comptait des poteaux de bornage distants de la longueur des rails.

S'il y avait un joint tous les mètres, on en franchirait autant en 3 secondes, 6 qu'on franchit de kilomètres en 3 600 secondes ou en une heure : s'il y a un joint tous les 8 mètres, par exemple, il faut compter les passages pendant une durée huit fois plus longue, c'est-à-dire pendant $3,6 \times 8$ ou 28 secondes, 8 (à peu près 29 secondes) ; le nombre des joints donne justement la vitesse en kilomètres à l'heure.

24. Indicateurs de vitesse. — On munit quelquefois les locomotives d'*indicateurs* qui en font connaître la vitesse ; un grand nombre d'appareils différents ont été étudiés ou construits à cet effet. Les indicateurs de vitesse sont commandés par une des roues de la locomotive, et doivent être réglés suivant le diamètre de cette roue, que l'usure et le retournage des bandages réduisent. Les uns font seulement connaître au mécanicien, à chaque instant, la vitesse de la machine, au moyen d'une aiguille qui se déplace sur un cadran, ou par l'élévation d'un liquide dans un tube de verre ; d'autres inscrivent cette vitesse sur une bande de papier que déroule un mouvement d'horlogerie ; enfin une troisième classe d'appareils donne à la fois une indication au mécanicien et une inscription permanente. Les locomotives à grande vitesse du chemin de Lyon sont munies d'un *chronotachymètre* (fig. 19 *ter*) et d'un indicateur Stroudley : le premier de ces appareils inscrit la vitesse sur une bande de papier ; le second est une petite pompe centrifuge qui refoule un liquide dans un tube gradué, placé en vue du mécanicien. Le mouvement de commande est pris sur la bielle d'accouplement, dont tous les points décrivent des cercles égaux. Le liquide est une dissolution dans l'eau de chlorure de magnésium, qui ne gèle pas facilement.

Le dépouillement des bandes que donnent les indicateurs est un travail fort long : si le nombre de ces appareils devenait considérable, il faudrait sans doute ne faire ce dépouillement que dans certains cas. D'ailleurs, malgré les avantages de ces appareils, malgré la commodité, pour un mécanicien, de toujours connaître exactement sa vitesse, les applications doivent en rester limitées : certaines circonstances spéciales en justifient l'emploi. Pour bien fonctionner, ils doivent être soigneusement construits, et leur prix est fort élevé ; l'entretien en est coûteux. Grâce aux améliorations

incessantes des voies et du matériel des chemins de fer, grâce à l'emploi de freins puissants, de signaux perfectionnés, on peut, le plus souvent, se passer d'indicateurs.

Nous n'avons pas parlé d'une quatrième classe d'*indicateurs*, qui

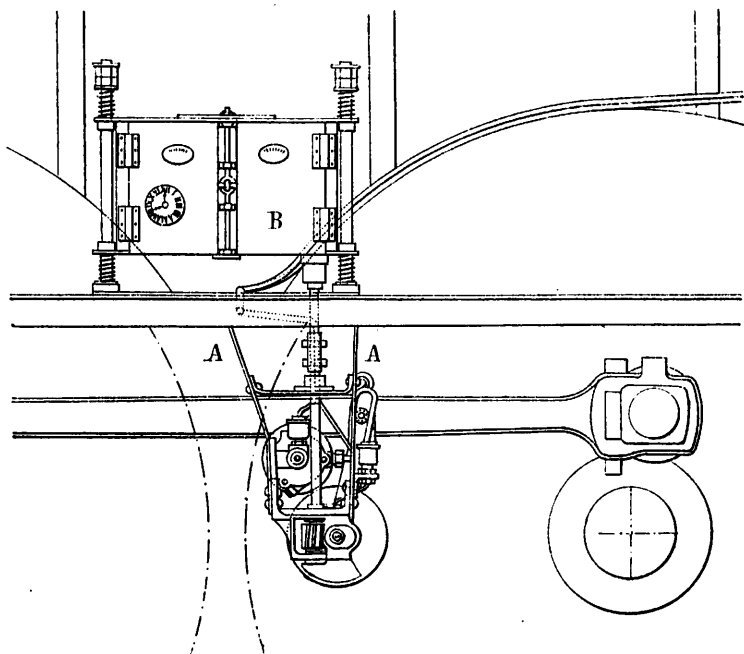


Fig. 19 ter. — Chronotachymètre de la compagnie de Paris à Lyon et à la Méditerranée.

sont installés à demeure en certains points spéciaux et y contrôlent la vitesse de passage des trains. L'abus de ces appareils est un sérieux obstacle à la marche rapide et ponctuelle des grands express.

25. Heures. — En chaque point de la terre, on distingue l'*heure vraie*, qu'on lit sur un cadran solaire, et qui n'a pas d'usage, et l'*heure moyenne locale*, qui est donnée par une horloge bien réglée. Sur tous les points d'un même *méridien*, c'est-à-dire en marchant exactement du nord au sud, on trouve la même heure locale; mais elle varie d'un méridien à l'autre, de 4 minutes par chaque *degré de longitude* ou d'une heure par 15 degrés (15°). Comme les chemins de fer et les

télégraphes ne s'accoutument guère de cette variation, on a adopté pour chaque pays une heure unique. La loi du 14 mars 1891 prescrit, pour la France et l'Algérie, celle de Paris; toutefois, sur nos chemins de fer, les horloges intérieures des gares, qui règlent la marche des trains, retardent de 5 minutes sur l'heure de Paris.

Ce système suffit tant qu'on ne sort pas d'un même pays; mais le passage d'une contrée dans une autre n'est pas trop commode, vu les additions ou soustractions de nombres compliqués de minutes. Et puis, comment faire quand un pays a une grande étendue de l'est à l'ouest, comme les États-Unis d'Amérique? Une heure unique ne peut y convenir, car le midi s'écarterait par trop du milieu du jour.

Pour échapper à ces difficultés, on a imaginé de diviser la terre en une série de zones, comprises chacune entre deux méridiens distants de 15°, et de prendre dans chaque zone l'heure du méridien moyen, placé à 7 degrés et demi des deux méridiens extrêmes. D'une zone à la voisine l'heure est différente, mais la différence est exactement d'une heure, ce qui rend les calculs très faciles et permet de lire sans peine les horaires des trains internationaux.

Il est commode que, dans un même pays et dans certaines régions, on ait, autant que possible, la même heure; aussi a-t-on un peu triché sur les limites qui séparent une zone de la voisine: on a choisi les frontières politiques ou administratives voisines du méridien qui devrait faire la séparation.

Dans ce système, il fallait choisir un *méridien initial*, qui donne en quelque sorte l'heure à tous les autres: le choix s'est fixé sur le *méridien de Greenwich*, près de Londres. L'heure de Greenwich retarde de 9 minutes 21 secondes sur celle de Paris: quand il est midi à Paris, il est 11 h. 50 m. 39 s. à Greenwich. La différence entre l'heure de Greenwich et celle qui règle effectivement nos chemins de fer est réduite à 4 minutes environ, par le retard des horloges intérieures des gares en France.

Il est fâcheux que la France, qu'on avait toujours vue prendre l'initiative quand il s'agissait d'unifier les mesures, ait refusé de s'associer à cette réforme si commode des heures, déjà adoptée dans un grand nombre de pays. L'Angleterre et l'Écosse, la Belgique, la Hollande, se règlent sur l'heure même de Greenwich, qu'on appelle *heure de l'Europe occidentale*; en ajoutant une unité au chiffre des heures, on a l'*heure de l'Europe centrale*, usitée en Suède, en Alsace-Lorraine, dans toute l'Allemagne (depuis le 1^{er} avril 1893), en Autriche, en Hongrie, en Serbie, en Italie (depuis le 1^{er} novembre 1893), en Danemark (depuis le 1^{er} janvier 1894); ajoutons encore une unité, nous aurons l'*heure de l'Europe orientale*, qui sert en Roumanie, en Bulgarie, en Turquie. Dans l'est de la Russie, les chemins de fer sont réglés sur l'heure de Saint-Petersbourg, qui se trouve être, à une minute près, celle de l'Europe orientale. Enfin, la Suisse a décidé l'adoption de l'heure de l'Europe centrale, à partir du 1^{er} juin 1894.

Les États-Unis d'Amérique sont partagés en quatre grandes zones de l'est à l'ouest, où l'on emploie successivement l'heure de l'*Est*, celles du *Centre*, des *Montagnes* et du *Pacifique* ; c'est celle de Greenwich moins 5, 6, 7 et 8 unités au chiffre des heures. Quand il est midi à Greenwich, on compte 7 heures du matin à New-York.

Parmi les autres États qui ont adopté ce système, citons encore le Japon, où l'on compte 9 heures du soir quand il est midi à Greenwich.

Une autre réforme, qui améliore beaucoup les horaires des chemins de fer, consiste à compter les heures par jour de 0 à 24 et non plus par deux périodes de 12.

26. Système métrique. — Nous ferons connaître, en rappelant les principales mesures du système métrique, les abréviations adoptées par le comité international des poids et mesures pour les désigner.

Le *mètre* est à peu près la dix millionième partie du quart du méridien terrestre, de l'équateur au pôle : mais avec la grande précision de certains instruments de mesure aujourd'hui usités, même dans la construction des machines, cette définition n'est pas assez exacte, et la vraie longueur du mètre est celle des *étalons* en platine établis par le comité international des poids et mesures. On compte par :

Kilomètres ou km.
Mètres ou m.
Décimètres ou dm.
Centimètres ou cm.
Millimètres ou mm.

Les mesures de *superficie* sont les *carrés* ayant pour côtés les mesures de longueur ; c'est ainsi qu'on compte en :

Kilomètres carrés ou km².
Mètres carrés ou m².
Décimètres carrés ou dm².
Centimètres carrés ou cm².
Millimètres carrés ou mm².

L'*are* est un carré de 10 m de côté, et renferme 100 m² ; l'*hectare* est 100 ares ou 10 000 m².

Les mesures de *volume* sont les *cubes* ayant pour côtés les mesures de longueur :

Mètre cube ou m³.
Décimètre cube ou dm³.
Centimètre cube ou cm³.
Millimètre cube ou mm³.

Le *litre* est un autre nom du dm³.

Enfin, on rapporte les poids au poids de la *masse* du *kilogramme*.

La masse du kilogramme devait être celle d'un décimètre cube d'eau parfaitement pure, à la température de 4°. De même que celle du mètre, cette définition n'est pas rigoureusement exacte et la véritable unité est la masse des étalons du comité international. Le poids d'un corps varie légèrement suivant l'endroit de la terre où il est placé; mais, dans tous les usages courants, cette variation du poids est insensible.

1 000 kilogrammes s'appellent une tonne ou t.

100 kilogrammes s'appellent un quintal ou q.

1 kilogramme s'écrit kg.

Le millième du kilogramme est le gramme ou g.

Nous faisons fréquemment usage de ces abréviations.
