

ment du haut en bas. — Quand le piston arrive au bas de sa course, la tige E amène le tiroir dans la position indiquée par la figure 283 : la vapeur passe alors de la boîte à vapeur dans le conduit *bB* et dans la partie inférieure du cylindre; la vapeur qui se trouvait au-dessus du piston peut s'échapper par le conduit *Aa* dans le tiroir, et de là, par le conduit *K*, dans l'atmosphère ou dans le condenseur; le piston se met donc en mouvement de bas en haut, et ainsi de suite.

Pour que la machine marche avec détente, il suffit de régler la marche ou les dimensions du tiroir, de manière que l'arrivée de la vapeur dans le cylindre soit interceptée, pendant la course du piston, avant que la communication de l'autre partie du cylindre avec le condenseur soit interrompue.

584. **Machines à basse pression, à moyenne pression, et à haute pression.** — Au point de vue de la valeur de la tension que possède la vapeur en arrivant de la chaudière, on distingue les machines en trois groupes :

1° Les machines à *basse pression*, dans lesquelles la tension de la vapeur ne dépasse guère une atmosphère et demie. — L'emploi du condenseur est particulièrement nécessaire dans ces machines, afin que la vapeur conserve une action suffisante sur le piston.

2° Les machines à *moyenne pression*, dans lesquelles la tension est de 3 à 5 atmosphères.

3° Les machines à *haute pression*, où la tension de la vapeur dépasse 5 atmosphères. — Dans les machines à haute pression, il y a généralement avantage à supprimer le condenseur : on perd une atmosphère comme force motrice, mais on évite la dépense de travail nécessaire pour renouveler incessamment l'eau du condenseur, dépense qui serait ici considérable.

585. **Cheval-vapeur.** — On exprime, en général, la puissance des machines, en indiquant leur *force en chevaux*. C'est là une expression toute conventionnelle, dont il faut connaître la signification.

On dit qu'une machine vaut un *cheval-vapeur*, lorsqu'elle est capable d'effectuer un travail de 75 kilogrammètres par seconde, c'est-à-dire d'élever, par seconde, 75 kilogrammes à 1 mètre de hauteur. Une machine vaut 2, 3 chevaux, lorsqu'elle est capable d'effectuer, par seconde, un travail de 2, 3 fois 75 kilogrammètres (*).

(*) La puissance d'une machine, en chevaux-vapeur, ne représente pas le nombre de chevaux qu'il faudrait employer pour remplacer la machine elle-même. — En effet, un cheval attelé à un manège, de manière que sa force de traction soit employée à imprimer un mouvement de rotation à un arbre, effectue, pendant les heures où il est attelé, un travail qui ne dépasse pas 42 kilogrammètres par seconde; pendant ce temps, sa puissance est donc à celle du cheval-vapeur dans un rapport qui est peu supérieur à $\frac{1}{2}$. Mais, si l'on tient compte du repos qu'il est indispensable de lui laisser prendre, et si on calcule son travail moyen en divisant son travail journalier par le nombre de secondes du jour tout entier, on trouve que sa

586. **Organes régulateurs du mouvement. — Volant et régulateur à boules.** — Le plus ordinairement, les résistances que doit vaincre une machine varient d'un instant à l'autre, et parfois d'une manière brusque : c'est ainsi, par exemple, qu'une machine à vapeur employée à faire fonctionner les diverses machines-outils d'un atelier éprouve des résistances variables, selon qu'on met en communication avec l'arbre de couche un nombre plus ou moins grand de ces outils, ou que chacun d'eux est appliqué à des matériaux plus ou moins résistants. — Pour diminuer les variations brusques de vitesse que pourrait ainsi éprouver la machine, on adapte, sur l'arbre de couche, un *volant*, c'est-à-dire une grande roue de fonte *L* (fig. 280 et 285), ayant une masse très considérable à sa circonférence, masse qui participe au mouvement de l'arbre de couche. On conçoit alors que, si la machine vient à rencontrer une résistance nouvelle, le mouvement ne peut se ralentir que progressivement, parce que la machine continue à être entraînée pendant quelque temps par le volant. — Inversement, si l'une des résistances que rencontrait la machine vient à être supprimée, le mouvement ne peut s'accélérer que d'une manière progressive, en raison de la masse du volant lui-même.

587. Cependant, si la machine continuait à n'éprouver, pendant un temps assez long, que des résistances assez faibles, son mouvement pourrait finir par devenir trop rapide : elle arriverait à *s'emporter*. Pour parer à cet inconvénient, on emploie le *régulateur à boules*, qui est représenté par la figure 284.

— Il se compose d'un système de deux sphères pesantes *P, P*, fixées à deux tiges métalliques articulées en *A* à l'extrémité de la tige verticale *B*. Le mouvement de rotation de l'arbre de la machine est transmis, par l'intermédiaire d'une courroie sans fin *tt* (fig. 285) et des roues d'angle *T*, à la tige *B* (fig. 284), en sorte que, pendant le mouvement, les boules tendent à s'écarter de cette tige, d'autant plus que la vitesse de rotation est plus grande : elles soulèvent alors, par l'intermédiaire des tiges articulées *AD, DC*, une baguette *CC* qui glisse librement le long de *B*; l'extrémité *G* du levier coudé *EFG* tire alors horizontalement

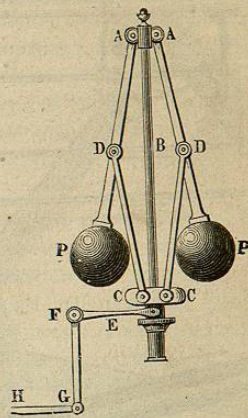
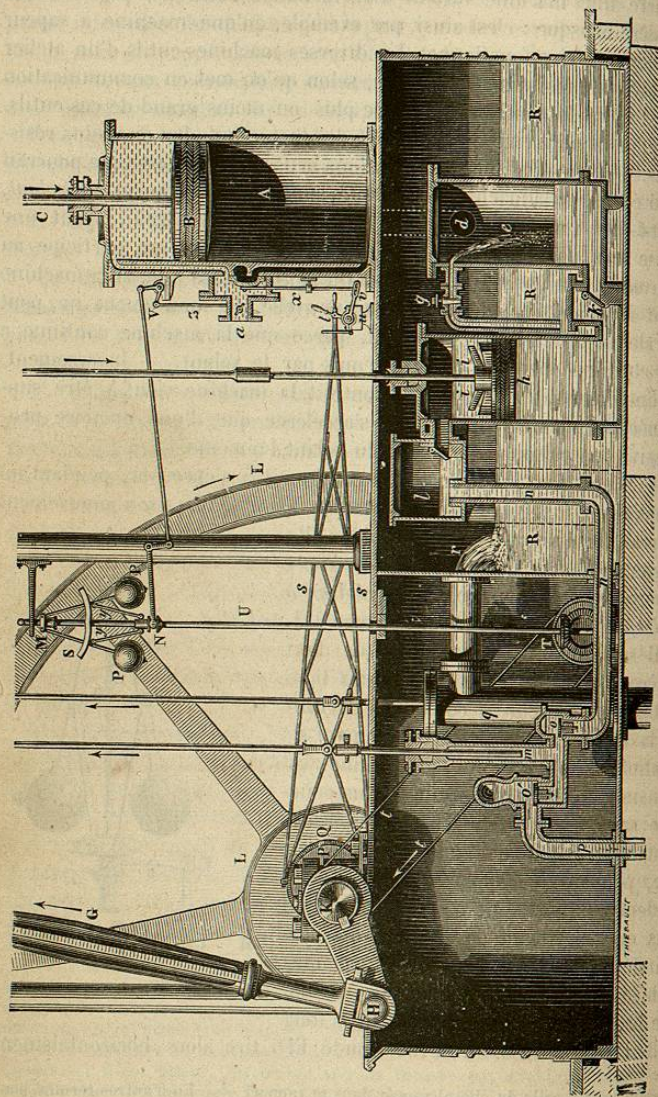


Fig. 284. — Régulateur à boules.

puissance est à celle du cheval-vapeur dans le rapport $\frac{1}{5,5}$. En d'autres termes, pour faire fonctionner, d'une manière continue, une machine ayant une puissance de 10 chevaux-vapeur, il faudrait employer 55 chevaux ordinaires, fonctionnant d'une manière alternative.

la tige GH, laquelle agit à son tour comme le montre la figure 285, et tend à fermer une valve *a* placée sur le tuyau d'arrivée de la vapeur



dans le cylindre. Le mouvement de la machine tend alors à se ralentir de lui-même. — Au contraire, si le mouvement de la machine devient

trop lent, le poids des boules les rapproche de la tige B, et la bague CC redescend; la valve *a* s'ouvrant davantage, l'arrivée de vapeur augmente, et le mouvement recommence à s'accélérer.

388. Pompes adjointes à la machine. — Dans la machine de Watt, on trouve un système de trois pompes destinées à entretenir une sorte de circulation de l'eau, indispensable à la marche régulière de la machine. Ce système de pompes devra : 1° amener continuellement une pluie d'eau froide dans la chambre à condensation (*pompe à eau froide*); 2° enlever de cette chambre l'eau qui s'y est échauffée par la condensation de la vapeur, et l'air que la diminution de pression a dégagé de l'eau (*pompe à air*); 5° prendre une partie de cette eau pour alimenter la chaudière à vapeur (*pompe d'alimentation*). — Ces trois pompes sont mises en mouvement par la machine elle-même : la figure 286 montre comment leurs tiges sont liées au balancier; la figure 285 représente la coupe des diverses capacités dans lesquelles elles mettent l'eau en mouvement.

La *pompe à eau froide* *q* (fig. 285) puise l'eau dans un puits ou dans un cours d'eau, et la verse en *r* dans un vaste réservoir RR, qui doit être toujours plein d'eau. Cette eau, environnant le condenseur *e*, contribue à le refroidir. En raison de la raréfaction produite dans le condenseur, par la condensation même, l'eau froide *y* arrive d'une manière continue par le robinet *g*.

La *pompe à air* *h* aspire l'eau chaude du condenseur, et l'air que cette eau a dégagé : l'eau aspirée franchit les soupapes *i, i* du piston, et est déversée dans un petit réservoir *l*.

La *pompe d'alimentation* *m* aspire une partie de cette eau chaude, par le conduit *nn* et la soupape *o*; elle la refoule ensuite, par la soupape *o* et le conduit *p*, jusque dans la chaudière, où elle sert à remplacer l'eau qui s'est convertie en vapeur (*).

389. Mouvement du tiroir. — Excentrique circulaire. — Voici comment la machine, une fois mise en mouvement, produit elle-même les déplacements du tiroir; dont il a été question plus haut (385).

La tige *x*, qui porte le tiroir (fig. 285), est articulée avec l'un des bras d'un petit levier coudé *vut*, dont l'autre bras s'articule en *t* avec le système de tiges *ss* : ce système se termine par un collier Q, qui presse légèrement sur le contour d'un disque circulaire P, fixé sur l'arbre de couche K. Mais le centre du disque P n'est pas sur l'axe de l'arbre de couche : il est, comme le montre la figure, en dehors de l'axe, et du côté opposé à la manivelle; de là, le nom d'*excentrique circulaire*, donné à la pièce P. Dès lors, pendant chaque rotation de l'arbre de couche, le collier entraîne les tiges *ss* et le point *t* successivement vers la droite

(*) On remplace le plus souvent aujourd'hui la pompe d'alimentation par l'*injecteur Giffard*, qui a été décrit plus haut (377).

et vers la gauche; ces mouvements, se transmettant à la tige x par le levier coudé tuv , ont pour effet de faire successivement descendre et monter le tiroir. — Comme à chaque tour complet de l'arbre K, correspond une allée et venue du piston, on voit que les rapports de position du piston et du tiroir, une fois établis convenablement, se conservent indéfiniment.

590. **Divers types de machines.** — Nous avons pris comme exemple la machine de Watt, dans laquelle la transmission du mouve-

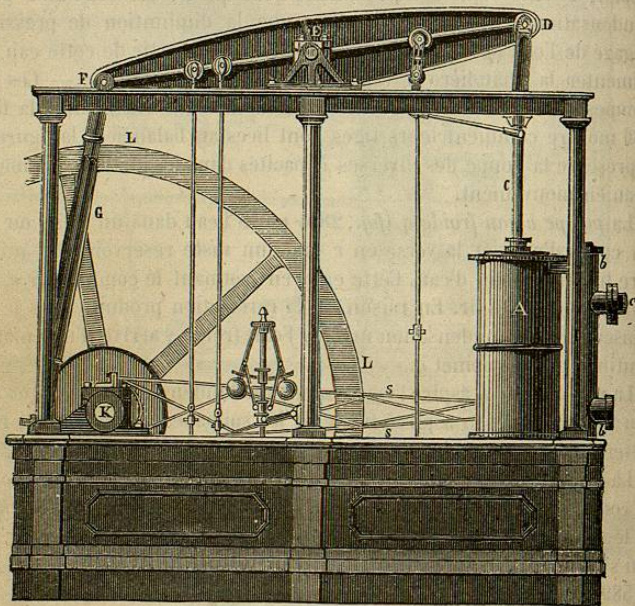


Fig. 286. — Machine de Watt.

ment du piston à l'arbre de couche se fait par l'intermédiaire d'un *balancier*, d'une *bielle* et d'une *manivelle* (fig. 286).

Cette machine, construite pour fonctionner à *basse pression*, est remarquable par la solidité de son installation et la régularité de sa marche. Il est rare qu'on doive recourir à des réparations, toujours fâcheuses à cause des chômages qu'elles entraînent. (*) — Mais les machines de ce type sont encombrantes, coûteuses, et consomment, à force égale, beaucoup plus de charbon que des machines plus simples.

(*) Les *machines Compound*, ou machines de Wolf, présentent une régularité plus grande encore. — Dans ces conditions, on emploie deux cylindres, placés l'un à côté de l'autre, et de diamètres très inégaux; les tiges des deux pistons sont articulées

On verra, dans la théorie mécanique de la chaleur (414), qu'il y a avantage, au point de vue économique, à employer des machines fonctionnant à haute température, et, par conséquent, à *moyenne pression* ou à *haute pression*. — En outre, la tendance actuelle de l'industrie est de diminuer le nombre des organes des machines, de manière à en rendre la construction moins délicate et l'installation moins encombrante.

On appelle *machines à action directe*, celles dans lesquelles, en supprimant le balancier, on articule directement la tige du piston avec la bielle, et quelquefois même avec la manivelle qui imprime la rotation à l'arbre de couche.

591. **Machine horizontale à action directe.** — La figure 287 représente une machine horizontale, à action directe, construite par M. Farcot. — Le cylindre AA est établi sur un bâti en fonte, coulé d'une seule pièce, qui repose sur un massif de maçonnerie auquel il est fixé par des boulons. La tête de la tige du piston, guidée dans son mouvement par les glissières B, B, s'articule avec l'une des extrémités de la bielle C, dont l'autre extrémité s'articule avec la manivelle D de l'arbre de couche. La figure montre l'excentrique E, qui commande le tiroir de distribution F. — Dans le condenseur cylindrique H, vient aboutir le tuyau d'échappement de la vapeur, à sa sortie du cylindre AA. — La pompe à air K est une pompe à double effet, surmontée d'une capacité L dans laquelle elle refoule l'eau chaude qu'elle puise dans le condenseur: cette eau est reprise par la pompe d'alimentation G (par un tuyau recourbé que l'on distingue sur la figure) et renvoyée par cette même pompe dans la chaudière. Les tiges des pistons de ces deux pompes sont en prolongement l'une de l'autre: elles sont manœuvrées simultanément par un balancier, qui reçoit son mouvement du piston de la machine.

Cette machine fonctionne à 5 atmosphères: l'admission de la vapeur n'a lieu, en général, que pendant $\frac{1}{15}$ de la course du piston: elle donne un rendement remarquable.

avec une même extrémité du balancier, de manière qu'elles montent ou descendent simultanément. Le petit cylindre est le seul qui reçoive la vapeur de la chaudière: quand la vapeur a agi, par exemple, sur la face *inférieure* du petit piston, de manière à contribuer au mouvement d'ascension, elle est amenée, par un conduit convenablement disposé, à la partie *supérieure* du gros cylindre, et pénètre progressivement dans ce cylindre pendant le mouvement de descente de son piston; elle agit donc sur le gros piston par une véritable détente, dont le travail s'ajoute à celui qu'elle avait déjà produit sur le petit piston. C'est seulement alors que la vapeur retourne au condenseur. — De même, la vapeur fournie par la chaudière, après avoir agi sur la face *supérieure* du petit piston pendant le mouvement de descente, passe ensuite, pendant le mouvement d'ascension, à la partie *inférieure* du gros cylindre, où elle produit par sa détente un nouveau travail.

Ces machines sont celles qui exigent le plus de précision dans l'ajustement; ce sont aussi les plus coûteuses. Mais elles offrent une régularité de marche qui se prête aux opérations industrielles les plus délicates. — Elles sont généralement construites pour fonctionner à *moyenne pression*.

592. **Locomobiles.** — Comme exemple de machines horizontales, on peut citer encore les *locomobiles*, qui sont des machines offrant l'avantage de pouvoir être transportées sur le lieu même où elles doivent effectuer temporairement un certain travail.

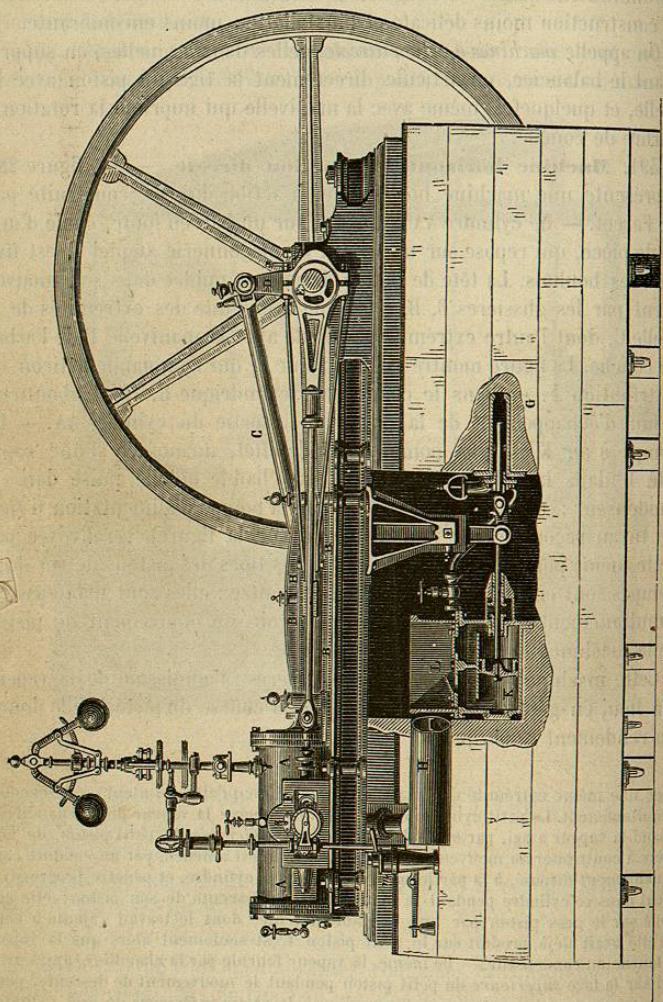


Fig. 287. — Machine horizontale à action directe.

Deux paires de roues portent à la fois la chaudière, avec son foyer et sa cheminée, et la machine avec son volant (fig. 288).

La chaudière est une chaudière tubulaire, comme celle des loco-

tives (379), avec cette différence que les tubes sont plus gros, plus courts, et moins nombreux : le foyer A est placé à l'arrière, la cheminée D à l'avant, en sorte que l'ensemble offre une ressemblance grossière avec une locomotive. — La machine, dont on voit le cylindre en H, est une machine horizontale, qui fonctionne à haute pression, et sans condenseur.

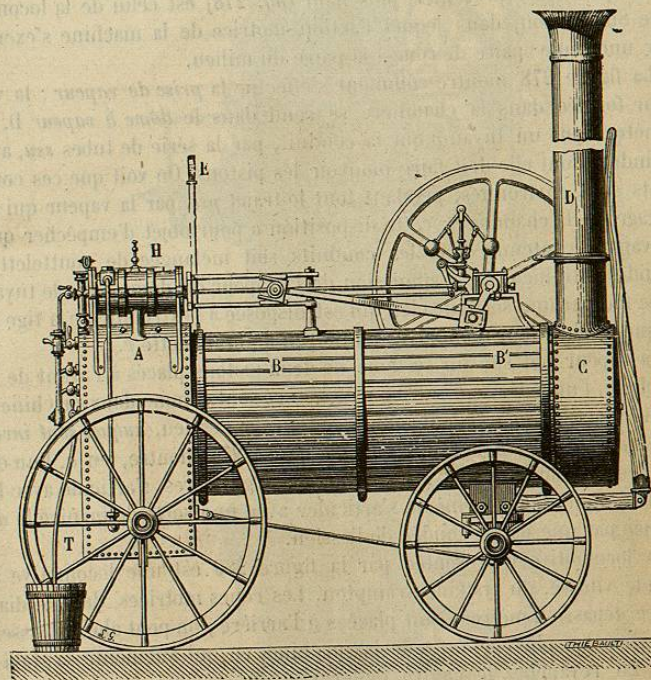


Fig. 288. — Locomobile.

Les locomobiles ont généralement une puissance de 4 à 6 chevaux : ce sont des machines de petites dimensions, que l'on réduit aux éléments essentiels, de manière à en diminuer le poids et à en faciliter la manœuvre (*).

La locomobile a été importée d'Amérique en Angleterre, où l'on en a fait immédiatement un grand usage. — Depuis quelques années, on en fait en France un emploi fréquent, soit dans l'agriculture, soit dans les petites industries.

(*) Les locomobiles de la force de 4 à 5 chevaux ont un poids qui atteint déjà 2000 kilogrammes.

595. Locomotives. — Dans les *locomotives*, l'action de la vapeur est employée à faire tourner une ou plusieurs paires de roues, qui contribuent à porter le châssis sur lequel est installée la machine. C'est l'adhérence de ces roues pour les rails qui détermine le mouvement de tout le système : on leur donne le nom de *roues motrices* pour les distinguer des autres, qui sont les *roues porteuses*. — Le système dont la coupe a été représentée plus haut (fig. 278) est celui de la locomotive Stephenson, dans lequel l'action motrice de la machine s'exerce sur une seule paire de roues, la paire du milieu.

La figure 278 montre comment s'effectue la *prise de vapeur* : la vapeur formée dans la chaudière se rend dans le *dôme à vapeur* D, et pénètre dans un tuyau *p* qui la conduit, par la série de tubes *ssu*, aux cylindres dont elle doit faire mouvoir les pistons. On voit que ces conduits sont environnés, pendant tout le trajet *ps*, par la vapeur qui se dégage de la chaudière : cette disposition a pour objet d'empêcher que la vapeur contenue dans les conduits soit mélangée de gouttelettes liquides entraînées. — L'admission de la vapeur du dôme dans le tuyau *ss* se fait par une sorte de clef, qui est disposée à l'extrémité de la tige *g*, et que le chauffeur manœuvre au moyen de la manette *r*.

La vapeur agit sur un système de deux pistons placés à l'avant de la machine, l'un à droite, l'autre à gauche : ce sont comme deux machines, dont les actions concordent pour faire tourner l'essieu, auquel sont *invariablement fixées les roues motrices*. La figure 278 montre, en *a*, l'un de ces deux pistons : la tige, guidée entre des glissières, s'articule avec la bielle *cc*, qui vient elle-même s'articuler avec une sorte de manivelle *d*, formée par une partie coudée de l'essieu.

La locomotive représentée par la figure 289 est une locomotive à grande vitesse, du système Crampton. Les roues motrices, dont le diamètre dépasse 2 mètres, sont placées à l'arrière ; on peut alors abaisser les pièces les plus pesantes de la machine, ce qui augmente sa stabilité. En revanche, le centre de gravité du système étant placé en avant des roues motrices, l'adhérence de celles-ci avec les rails est diminuée, et la puissance de traction est plus faible ; mais le but qu'on se propose est d'atteindre une grande vitesse, et ce résultat est réalisé par l'emploi de roues motrices d'un grand rayon, qui, pour chaque tour, parcourent sur le rail un chemin égal à leur circonférence, c'est-à-dire proportionnel au rayon lui-même. — Ces machines peuvent atteindre une vitesse de 80 à 100 kilomètres à l'heure, lorsqu'elles traînent un petit nombre de wagons de voyageurs.

Au contraire, pour remorquer des trains d'un poids considérable, on emploie des machines à marchandises, ou à petite vitesse, où tout est combiné pour obtenir une grande puissance de traction. — Les roues, qui sont toutes placées au-dessous de la chaudière, sont réunies les unes aux autres par des bielles d'accouplement : l'action de la vapeur s'exerce

ainsi sur toutes ces roues couplées, et leur adhérence avec les rails est encore augmentée par le poids de la machine, qui dépasse quelque-

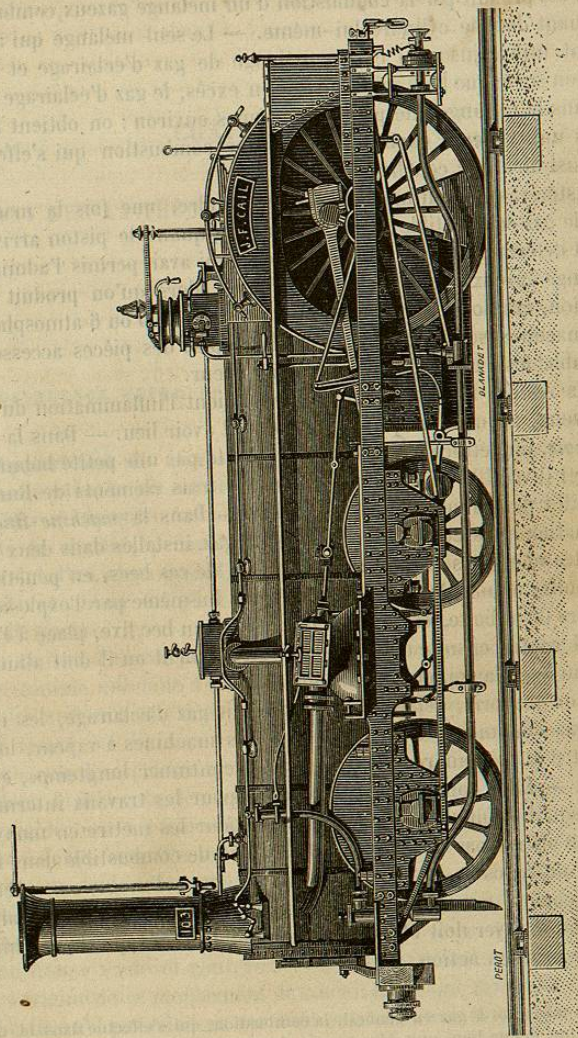


Fig. 289. — Locomotive à grande vitesse, du système Crampton.

fois 60 tonnes. — La vitesse de ces machines ne peut guère dépasser 30 kilomètres à l'heure ; mais elles peuvent remorquer jusqu'à 45 ou 50 wagons.

594. **Machines à gaz. — Machine Lenoir et machine Hugon.**

— On désigne sous le nom de *machines à gaz*, des machines où le mouvement est produit par la combustion d'un mélange gazeux, combustion s'effectuant dans le cylindre lui-même. — Le seul mélange qui ait été vraiment utilisé jusqu'ici est le mélange de gaz d'éclairage et d'air. On fait en sorte que l'air soit toujours en excès, le gaz d'éclairage n'entrant dans le mélange que pour 7 centièmes environ : on obtient alors, non pas une violente explosion, mais une combustion qui s'effectue, pour ainsi dire, par couches successives.

Le piston aspire lui-même dans le cylindre, une fois la machine lancée, le gaz combustible et l'air extérieur ; quand le piston arrive en un point déterminé de sa course, le tiroir, qui avait permis l'admission du mélange gazeux, ferme la lumière : c'est alors qu'on produit l'inflammation, qui donne naissance à une pression de 5 ou 6 atmosphères.

— Ces machines sont à double effet ; la plupart des pièces accessoires sont semblables à celles des machines à vapeur.

Il nous reste à indiquer comment on obtient l'inflammation du mélange gazeux, au moment précis où elle doit avoir lieu. — Dans la *machine Lenoir*, une étincelle électrique, produite par une petite bobine de Ruhmkorff (livre III), montée avec deux ou trois éléments de Bunsen (*ibid.*), jaillit dans l'intérieur du cylindre. — Dans la *machine Hugon*, l'inflammation est produite par des becs de gaz, installés dans deux petites cavités ménagées dans le tiroir. Chacun de ces becs, en pénétrant dans la boîte, allume le mélange et s'éteint lui-même par l'explosion ; il sort alors de la boîte, et vient se rallumer à un bec fixe, placé à l'extérieur ; il rentre ensuite dans la boîte, au moment où il doit allumer de nouveau le mélange, et ainsi de suite (*).

En raison du prix, relativement élevé, du gaz d'éclairage, les machines à gaz sont moins économiques que les machines à vapeur, lorsqu'il s'agit d'un travail régulier, devant se continuer longtemps, et à poste fixe. — Elles sont précieuses surtout pour les travaux intermittents, puisqu'il suffit de quelques minutes pour les mettre en mouvement, et qu'on n'a pas à supporter de dépense de combustible dans les intervalles de repos de la machine. Pour ce genre d'usage, on conçoit que, tout compte fait, elles puissent offrir un avantage considérable sur celles où le foyer doit être allumé longtemps avant que la machine puisse être mise en action.

(*) Dans les machines à gaz en général, la combustion, qui s'effectue dans le cylindre lui-même, donne lieu à un dégagement de chaleur considérable : aussi est-il nécessaire, pour éviter une trop grande élévation de température qui rendrait le graissage défectueux et détruirait les joints, de faire circuler constamment un courant d'eau froide autour du cylindre, dans une double enveloppe.

CHAPITRE XI

NOTIONS SUR LA THÉORIE MÉCANIQUE DE LA CHALEUR

I. — ÉQUIVALENCE ENTRE LE TRAVAIL MÉCANIQUE ET LA CHALEUR

595. **Apparition de chaleur, accompagnant la disparition d'une force vive de translation.** — Pour faire concevoir la relation générale qui existe entre les phénomènes du mouvement et les phénomènes de la chaleur, prenons d'abord un exemple particulièrement simple, celui d'un corps pesant, de masse m , tombant d'une hauteur h et venant rencontrer un plan horizontal, *parfaitement rigide*, comme un plan de marbre.

Si l'on choisit d'abord, pour cette expérience, un corps *parfaitement élastique*, comme une bille d'ivoire, on le voit remonter, suivant la verticale, à la hauteur même dont il était tombé, c'est-à-dire revenir à son point de départ, où il arrive avec une vitesse nulle. Envisageons séparément chacun de ces deux mouvements en sens contraire. — Dans le mouvement de descente, le corps a *acquis*, au moment où il rencontre le plan rigide, une certaine vitesse v , et par suite une certaine force vive $\frac{1}{2}mv^2$. Cette force vive est égale, comme nous l'avons vu (25), au travail moteur de la force qui le sollicite, c'est-à-dire de son poids p ; l'expression de ce travail est ph : c'est un travail *dépensé*. — Dans le mouvement d'ascension, le corps est d'abord renvoyé par le plan rigide, avec une vitesse égale et contraire à la vitesse primitive : il possède donc, à l'origine de ce mouvement de bas en haut, une force vive $\frac{1}{2}mv^2$, égale à celle qu'il possédait au moment de rencontrer ce plan (*). Or, il perd successivement toute cette force vive, en parcourant de bas en haut le même chemin h , puisque sa vitesse redevient nulle lorsqu'il arrive au

(*) L'expression de la force vive ne contenant que le *carré* de la vitesse, sa valeur est indépendante du signe de la vitesse elle-même.