service télégraphique dans l'intérieur des grandes villes s'effectue non pas à l'aide de l'électricité, mais à l'aide de l'air comprimé. Les dépêches, au lieu

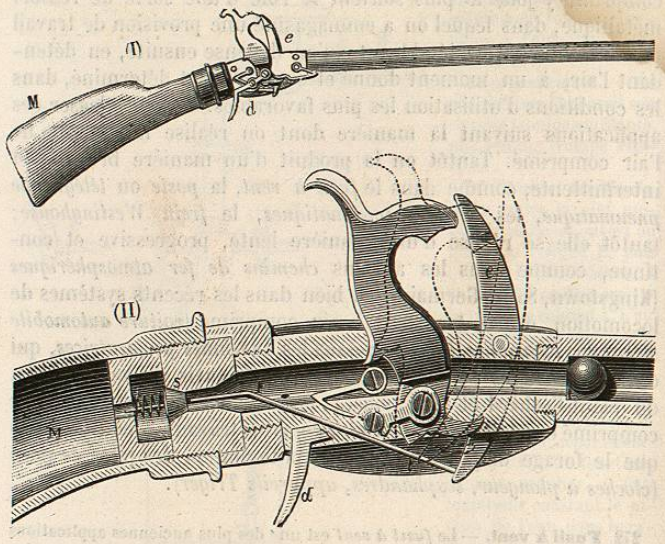

Fig. 299.

d'être expédiées séparément, sont empilées par groupes de 30 à 40 dans des boîtes en tôle recouvertes de cuir. On expédie en même temps 10 de ces boîtes, formant, avec un piston, une sorte de *train*, du poids de 4 kilogrammes. (La figure 300 représente le piston et une boîte à dépêches ouverte.) Ce train cir-

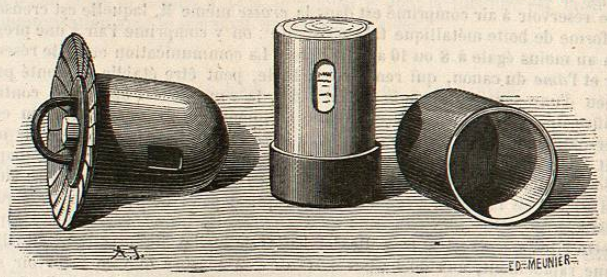

Fig. 300.

cule, non pas sur une voie ferrée, mais dans un *tube* en fonte, de 0m,065 de diamètre, et de un à deux kilomètres de longueur, qui relie les deux stations par une voie souterraine. De la station de départ il est *poussé* par un réservoir

à air comprimé, en même temps qu'il est *aspiré*, de la station d'arrivée, par

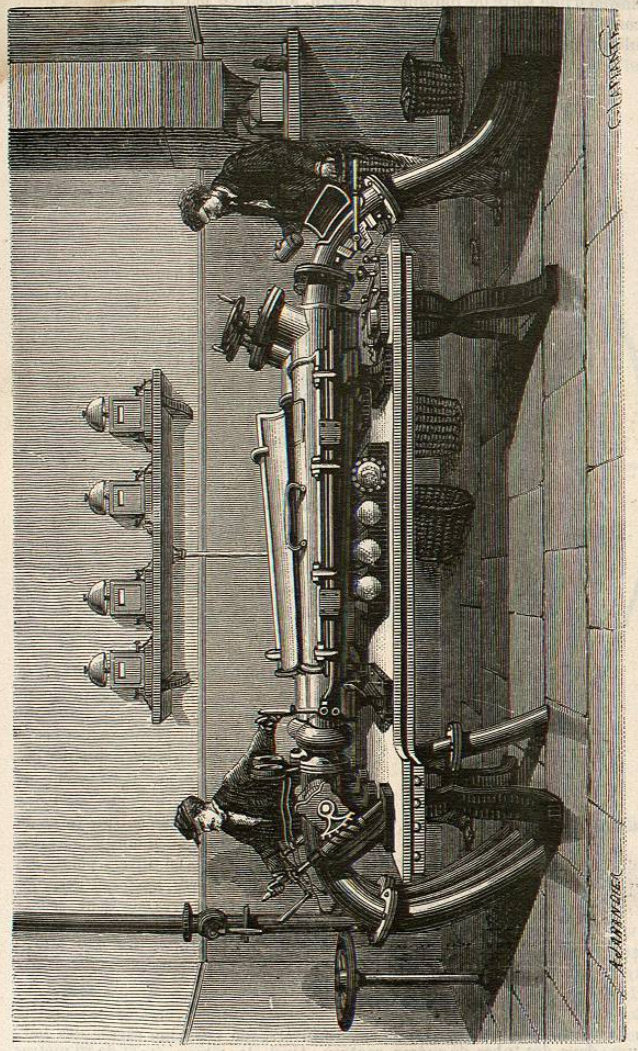

Fig. 301.

un réservoir à air raréfié. La différence des pressions exercées sur les deux faces du train ne dépasse pas trois quarts d'atmosphère, et cette poussée suffit

pour lui communiquer une vitesse moyenne de 1 kilomètre par minute. La compression et la raréfaction de l'air s'opéraient très simplement, au début, au moyen d'une sorte de fontaine de Héron, alimentée par les eaux de la ville. La complication du service actuel oblige d'employer, outre cette machine hydraulique, des pompes aspirantes et foulantes, mues à la vapeur.

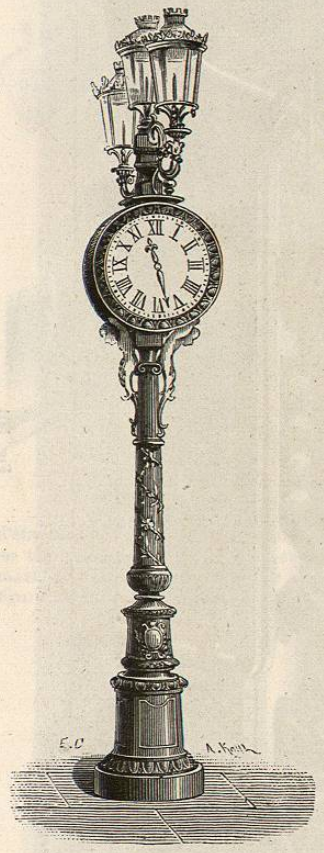

Fig. 302.

La première communication de ce genre fut établie entre les deux stations du Grand-Hôtel et de la Bourse, distantes de 1100 mètres. La figure 301 représente (en perspective) l'installation primitive d'un bureau. Chacune des extrémités du tube pneumatique se terminait par deux chambres à air qui servaient l'une à introduire, l'autre à extraire le train (réduit à une seule boîte, à l'origine). Chaque chambre pouvait être mise en communication tour à tour avec l'air comprimé et avec l'air raréfié (ou bien, au début, avec l'air libre de l'atmosphère).

Ce système de télégraphie a pris de rapides développements. Dès 1873, outre la station centrale, installée rue de Grenelle, à proximité de l'Administration centrale des Télégraphes, il y avait dix-sept stations de quartier. Aujourd'hui, toute la ville et la banlieue sont desservies par un réseau complet de tubes pneumatiques; mais la distance entre deux stations consécutives reste limitée à 2 kilomètres environ, à cause de la diminution rapide, qui résulte de la distance, dans la tension de l'air comprimé [1].

274. **Horloges pneumatiques.** — Une application, moins importante mais aussi curieuse, de l'air comprimé, c'est la distribution simultanée de l'heure dans tous les quartiers d'une ville. Depuis 1880, un réseau distributeur de l'heure est installé à Paris : il donne l'heure d'une horloge centrale (avec un léger retard, plus ou moins accusé suivant la distance) en divers points des places et boulevards, ainsi que dans des maisons particulières, où sont installées des horloges secondaires, dites *horloges pneumatiques* (fig. 302), reliées à l'horloge principale.

1. La vitesse des trains varie en raison inverse de la racine carrée des longueurs, dans des tubes de même section. Ainsi, la vitesse étant de 20 mètres par seconde dans un tube de 1000 mètres (sous la pression de 1 atmosphère) ne sera plus que de 6 mètres environ dans un tube de 10 kilomètres, de 4m,50 dans un tube de 20 kilomètres.

Le système complet comporte donc : 1° une usine centrale, qui comprend les machines de compression, les réservoirs à air comprimé, l'horloge *normale* ou *directrice* et le mécanisme *distributeur*; 2° les horloges *secondaires* ou *réceptrices*, disséminées dans les divers quartiers; 3° enfin la canalisation, qui propage, du centre à la périphérie, l'action de l'air comprimé.

L'*horloge-type* est une horloge ordinaire, munie, en outre, d'un excentrique qui, à l'instant précis où l'aiguille marque *chaque minute*, produit un effet de

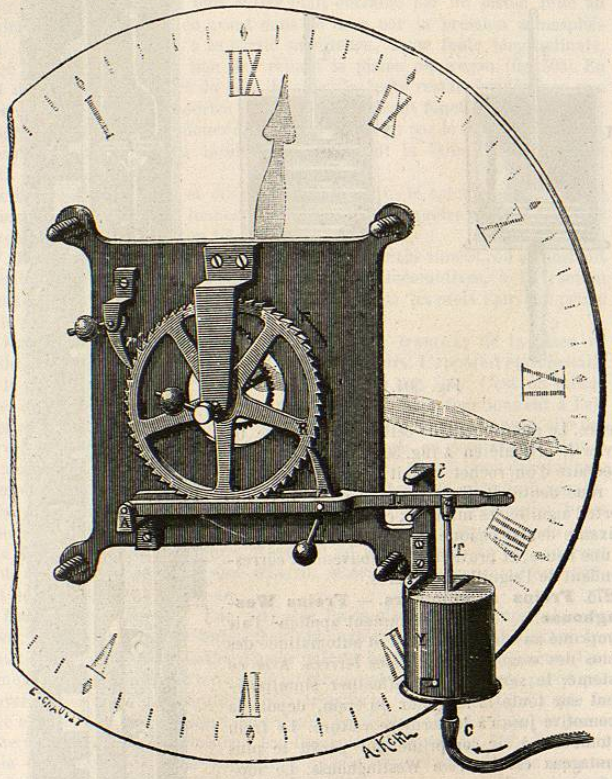

Fig. 303.

déclenchement, lequel met en jeu le mécanisme de distribution. Celui-ci consiste en une sorte de *boîte à tiroir* (analogue à celle des machines à vapeur), qui met, au moment voulu, la canalisation en communication avec de grands cylindres, dits *réservoirs à haute pression*, dans lesquels on maintient l'air comprimé à une pression constante de plusieurs atmosphères. L'air qui est lancé, à chaque minute, dans la canalisation, n'a d'ailleurs qu'un excédent de pression de sept dixièmes d'atmosphère; cela suffit pour faire jouer le mécanisme des horloges réceptrices.

Celles-ci ne sont pas de vraies horloges; ce sont des cadrans, munis de deux aiguilles, qui s'avancent par un mécanisme tout particulier (fig. 303). Le flux d'air comprimé arrive par un tuyau C dans un petit soufflet S (fig. 304), renfermé dans un tambour métallique Y. A l'état de repos, le soufflet est replié sur lui-même (fig. 304, I); le flux d'air vient le gonfler à chaque minute (fig. 304, II) et pousser en même temps une tige T qui est fixée à sa base supé-

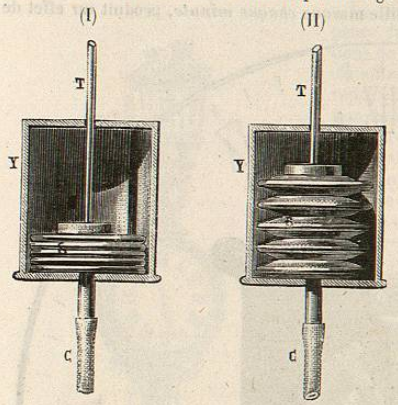

Fig. 304.

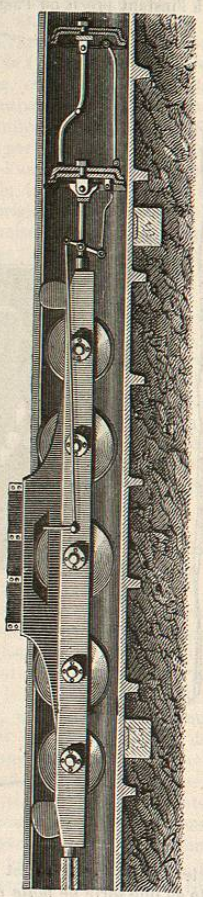

Fig. 305.

rieure. Le mouvement de cette tige T soulève un levier *l*, articulé en A (fig. 303), qui, par l'intermédiaire d'un rochet *r*, fait avancer d'une dent la roue dentée R. C'est l'axe de cette roue qui porte l'aiguille des minutes; comme la roue porte soixante dents, chaque tour complet correspond à une heure, et provoque un mouvement correspondant de l'aiguille des heures.

275. **Freins automoteurs. — Freins Westinghouse.** — On a récemment appliqué l'air comprimé au serrage continu et automatique des freins des wagons sur les voies ferrées. Avec ce système, le serrage peut s'effectuer simultanément sur toute la longueur du train, depuis la locomotive jusqu'à la dernière voiture. Le frein automoteur à air comprimé qui paraît le plus avantageux est le frein Westinghouse. Le mécanisme en est très ingénieux. L'air comprimé est lancé, à un moment donné, sur des pistons, qui arrêtent en quelques secondes un train lancé à toute vitesse.

276. **Chemins de fer atmosphériques.** — C'est plutôt une application de l'air raréfié que de l'air comprimé; et elle n'a plus qu'un intérêt historique, car elle est tombée en désuétude [1]; mais elle a

1. Ce mode de traction était beaucoup plus coûteux que l'emploi des locomotives à vapeur.

peut-être préparé l'invention de la poste pneumatique, car elle est fondée sur le même principe.

Le chemin de fer atmosphérique le plus connu est celui qui a fonctionné en France, pendant quelque temps, sur la pente rapide (0m,033 par mètre) de la ligne du Pecq à Saint-Germain [1]. Au milieu de la voie ferrée était fixé un tube pneumatique, de 63 centimètres de diamètre, où l'on faisait le vide, en avant du train, à l'aide de machines pneumatiques, mues à la vapeur, à la station de Saint-Germain. Le train tout entier était entraîné par un piston relié au premier wagon et poussé en avant dans le tube par la pression atmosphérique. Le tube était muni, à sa partie supérieure, d'une fente longitudinale, par où passait la lame ou tige fixe reliant le piston au wagon (fig. 305). En avant du piston, c'est-à-dire du côté du vide, la fente restait fermée par une bande de cuir, garnie de courtes lames de tôle, faisant fonction de soupape [2]; une série de galets, de grandeurs décroissantes, portés par le châssis du piston, soulevaient cette soupape à mesure que s'avançait la lame de jonction du piston.

Les dimensions du tube et des machines avaient été calculées de manière à donner à un train de 54 tonnes une vitesse de 1 kilomètre par minute, avec un excès de pression d'environ 1/3 d'atmosphère.

277. **Moteurs à air comprimé.** — Dans ces dernières années, on a construit de véritables moteurs pouvant servir, comme des locomotives, à la traction des matériaux et au transport des voyageurs, dans lesquels l'air comprimé joue le même rôle que la vapeur d'eau.

1° *Voiture automobile Mekarski.* — En 1875, le tramway de la place de l'Étoile à Courbevoie était traîné par un de ces moteurs. L'appareil était installé sous le châssis même de la voiture, entre les roues (fig. 306). C'est un mécanisme analogue à celui des locomotives à vapeur, mais fonctionnant à l'air comprimé. Au lieu de chaudière à vapeur, la voiture emportait avec elle des réservoirs cylindriques, très résistants, dans lesquels on comprimait l'air à 25 atmosphères, à l'aide de pompes installées, à poste fixe, à l'une des stations. Ce qui constituait la nouveauté du système de M. Mekarski, c'était un *régulateur de pression*, à l'aide duquel l'air comprimé, sortant des réservoirs à une pression décroissante, entrait dans le mécanisme moteur à une pression constante. De plus, pour éviter le refroidissement dû à la détente du gaz, on avait soin de faire passer l'air comprimé dans un réservoir d'eau surchauffée à 150° avant de l'utiliser dans le moteur.

2° *Locomotive Ribourt.* — Une véritable locomotive à air comprimé, avec tender, et entraînant un véritable train de matériaux, a été utilisée dans les travaux du tunnel du Saint-Gothard, pour enlever les débris du percement. (Une locomotive à vapeur ordinaire n'aurait pu être employée dans ce cas, parce que le foyer eût élevé la température, déjà trop forte, du tunnel, tandis que la fumée et la vapeur d'eau eussent contribué à en vicier l'air.) Ce type de locomotive à air comprimé fut construit par l'ingénieur Ribourt (fig. 307). Elle était munie d'un réservoir à air comprimé, qu'elle emportait avec elle comme une chaudière à vapeur, et l'air s'en échappait à une pression déterminée et constante, obtenue à l'aide d'un *régulateur de pression* spécial.

278. **Machines perforatrices.** — L'air comprimé a joué un rôle encore plus important dans les grands travaux de percement du Saint-Gothard, ainsi que dans les travaux antérieurs du mont Cenis. On ne pouvait songer à employer dans ces circonstances les procédés ordinaires, c'est-à-dire la vapeur et la

1. Le premier construit (1848) fut celui de Kingstown à Dalkey, en Irlande, sur un parcours de 3 kilomètres.
2. Voir les détails de cette application, ainsi que de toutes les autres, dans le *Monde physique* de Guillemin (tome Ier).

poudre, pour forer les trous de mine, car les gaz provenant de la combustion de la houille ou de l'explosion de la poudre eussent contribué à vicier l'air confiné des galeries souterraines et à le rendre complètement irrespirable. On construisit donc pour cet usage, d'après une idée de MM. D. Colladon et de Caligny,

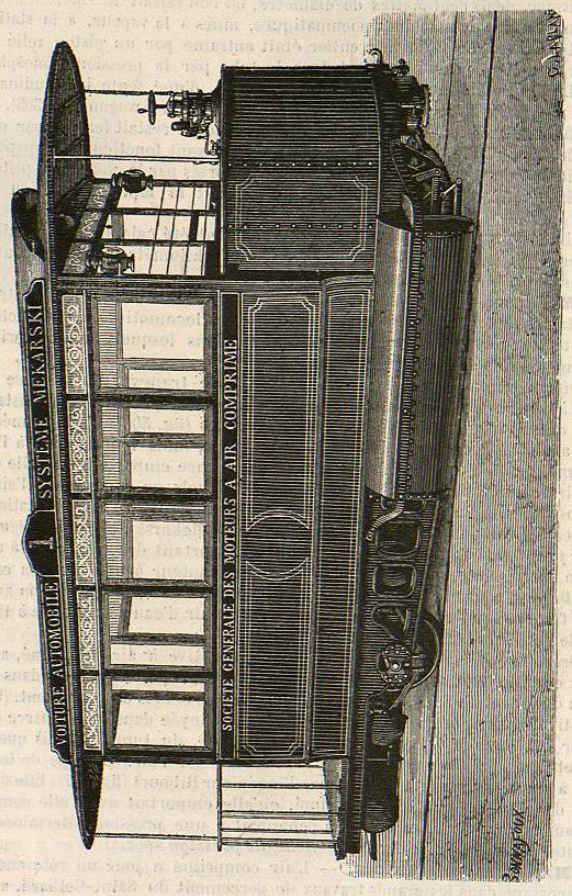

Fig. 306.

des machines spéciales à percer, dites *machines perforatrices*, actionnées à l'aide d'air comprimé.

1° *Percement du mont Cenis.* — Les premières machines perforatrices, celles du mont Cenis (fig. 308), se composaient d'une dizaine de forets, en forme de *fleurets*, installés sur un même affût, mobile sur des rails; un second chariot, qui était attelé à l'affût, portait des réservoirs à eau et à air comprimé. Chaque fleuret était animé de trois mouvements simultanés, indispensables à la nature

du travail à exécuter : 1° un mouvement de va-et-vient longitudinal, produisant des chocs répétés sur la roche; 2° un mouvement tournant helicoïdal, analogue à celui d'une vrille, produisant la pénétration; 3° un mouvement de progression, parallèle à l'axe de l'outil et proportionnel à la rapidité du percement.

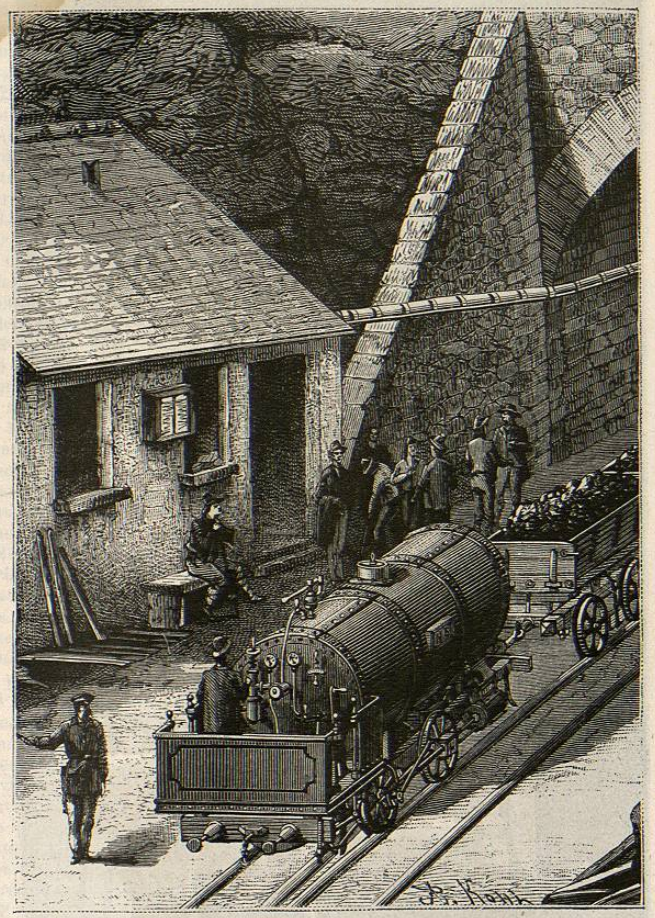

Fig. 307.

Ce triple mouvement était communiqué aux forêts par l'air comprimé : le premier, par l'intermédiaire d'un piston, dont le mouvement était réglé par le jeu d'un tiroir; les deux autres par l'intermédiaire d'une petite machine spéciale, disposée latéralement.

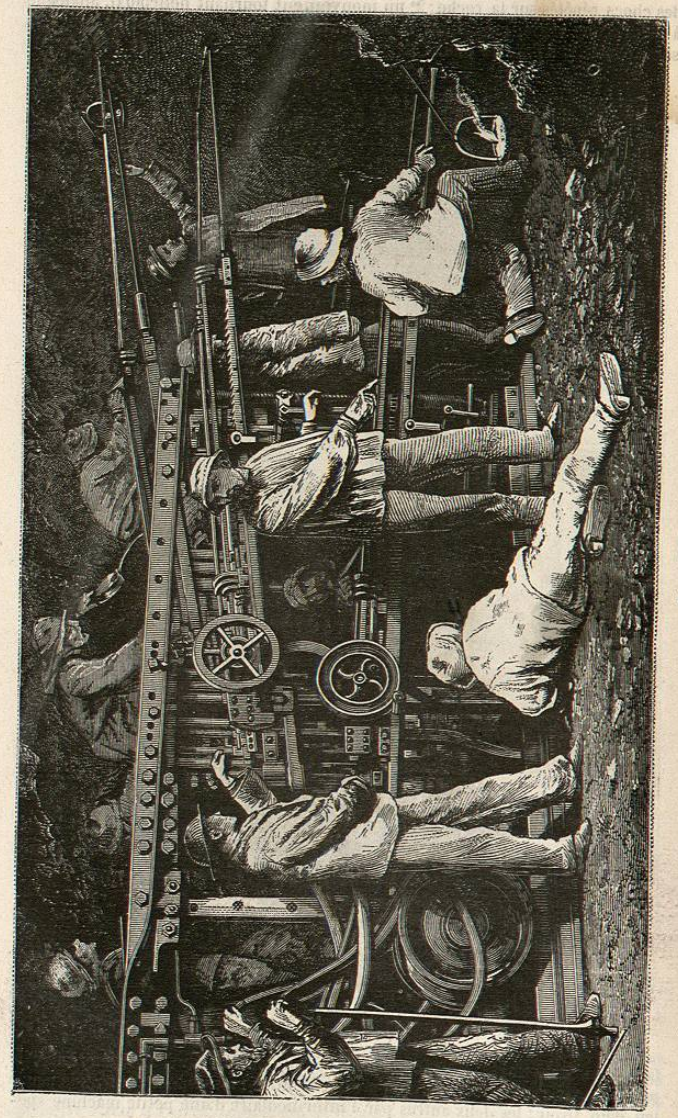

Fig. 308.

Quant à la compression de l'air, elle était obtenue à l'aide de machines de compression spéciales, dites *compresseurs*, qui empruntaient la force motrice nécessaire aux chutes d'eau du voisinage[1], en sorte que *la montagne était percée à l'aide de la force motrice de ses propres torrents.* Il y avait douze compresseurs, qui comprimaient en moyenne par vingt-quatre heures 116 500 mètres cubes d'air, enlevés à l'atmosphère extérieure. La pression fournie aux machines était de 7 atmosphères; l'excédent d'air comprimé était lancé dans les galeries pour en entretenir l'aérage dans de bonnes conditions hygiéniques.

2° *Percement du Saint-Gothard.* — Après le mont Cenis, le massif du Saint-Gothard a été percé du nord au sud, entre les villages de Göschenen (Suisse) et d'Airolo (Italie), d'un tunnel à deux voies, plus long que le précédent. Les difficultés étaient plus grandes qu'au mont Cenis, parce que la masse de roches à extraire était plus considérable et les couches à traverser généralement plus dures à percer. Aussi se servit-on de machines et de procédés perfectionnés.

La force motrice, empruntée aux torrents de la montagne, était distribuée par des turbines à de nouvelles machines de compression, construites par M. Colladon; l'air comprimé venait animer de nouvelles machines perforatrices, dont le travail était accéléré par l'emploi opportun de la dynamite Enfin, le déblaiement du tunnel et le transport des débris de roche furent considérablement facilités par l'emploi des locomotives Ribourt à air comprimé.

3° *Percement du tunnel de l'Arlberg.* — Ces procédés et ces machines ont été encore une fois perfectionnés à l'occasion du percement tout récent[2] d'un troisième tunnel de montagne : c'est le tunnel du col de l'Arlberg, qui traverse le massif du Vorarlberg, et ouvre une communication directe entre la Suisse et le Tyrol. On peut se rendre compte des progrès successivement accomplis dans ce genre d'applications de l'air comprimé en comparant les durées successives de ces gigantesques travaux. Le percement du mont Cenis (12 230 m.) avait duré 14 années; celui du Saint-Gothard (14 912 m.) n'avait duré que 9 ans et demi; enfin celui de l'Arlberg (10 240 m.) a été achevé en moins de 3 ans et demi.

279. Travaux sous-marins : cloche à plongeur, scaphandre, appareil Triger. — C'est encore l'emploi de l'air comprimé qui a permis d'effectuer, avec une facilité relative et une sécurité presque absolue, les travaux sous l'eau des fleuves et des mers : soit de simples recherches, telles que la pêche des éponges, des huîtres perlières ou des épaves de naufrages; soit de grands travaux d'ingénieur, tels que le forage des puits de mines ou le fonçage des piles de ponts.

1° *Cloche à plongeur.* — L'origine et le premier modèle de ces appareils est l'ancienne *cloche à plongeur* (dont la figure 309 représente un modèle perfectionné). C'était une vaste boîte ou cloche à air, ouverte par le bas et hermétiquement close d'autre part, qu'on descendait sous l'eau avec l'outillage et les ouvriers, jusqu'à ce qu'elle reposât sur le fond, à la place où devait se faire le travail. Comme elle contenait, au moment de l'immersion, une masse limitée d'air sous la pression atmosphérique, elle était envahie par l'eau, par suite de l'excès de pression, et cette provision d'air, confinée à la partie supérieure, devenait rapidement irrespirable. Cet inconvénient limitait beaucoup la durée du travail et l'utilité de l'appareil.

2° *Appareil Triger.* — Un premier progrès consista à envoyer de l'air de l'extérieur dans la cloche, afin d'y renouveler l'atmosphère viciée. Un perfec-

1. C'était le ruisseau du Melezet, à la station italienne de Bardonnèche, et la rivière de l'Arc, à la station française de Modane.
2. L'inauguration de ce tunnel a eu lieu le 20 septembre 1884.

tionnement plus grand encore fut réalisé par l'ingénieur Triger[1]. Il eut l'idée d'envoyer de l'air *comprimé*, lequel non seulement alimente d'air respirable les ouvriers, mais leur permet de travailler presque à pied sec, en expulsant l'eau tout autour d'eux dans l'appareil.

C'est à l'aide d'un appareil Triger qu'ont été édifiées les quatre piles du pont de Kehl, et, plus récemment, celles du pont gigantesque de Saint-Louis sur le Mississippi. Chacune de ces piles est fondée sur trois ou quatre caissons rectangulaires en tôle, aux parois solidement boulonnées et renforcées de poutres et contreforts en fer, qu'on a remplis de béton après les avoir enfoncés, dans le lit du fleuve, jusqu'à la profondeur voulue. La figure 310 représente l'un des

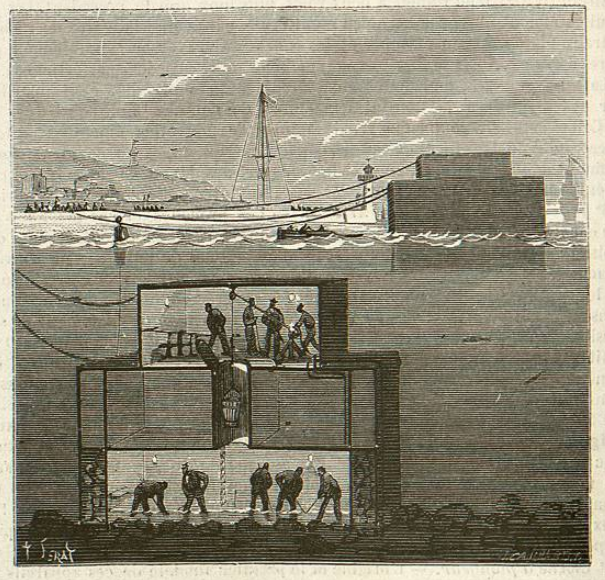

Fig. 309.

chantiers de fondation du pont de Kehl. On y voit l'un des caissons, déjà descendu au-dessous du lit du fleuve, et à l'intérieur de ce caisson les ouvriers qui travaillent aux déblais.

L'enfoncement du caisson s'opère de la manière suivante : Le caisson n'a pas de plancher et il est complètement ouvert par le bas; son plafond n'est percé que de trois ouvertures circulaires, qu'on a surmontées de trois cheminées en tôle. La cheminée centrale descend jusqu'au-dessous de la base inférieure du caisson, et pénètre, comme un coin, dans le lit du fleuve, avant les parois du caisson. Les deux cheminées latérales communiquent simplement, d'une part, avec l'intérieur du caisson, et d'autre part avec les machines de compression. Elles sont munies de chambres à air, par où les ouvriers peuvent s'introduire pour descendre ensuite dans le fond du caisson. On descend cette sorte de

1. En 1841.

cloche à plongeur jusqu'à ce que la base ouverte touche le fond. L'eau y pénètre tout d'abord par la cheminée centrale et par l'espace annulaire, et s'y élève jusqu'à un plan horizontal, qui est le niveau même du fleuve. Mais si l'on fait arriver l'air comprimé par les cheminées latérales, l'eau sera refoulée peu à peu hors du caisson, et s'échappera par les fissures des bords intérieurs, laissant le lit du fleuve presque à sec, dans tout le compartiment annu-

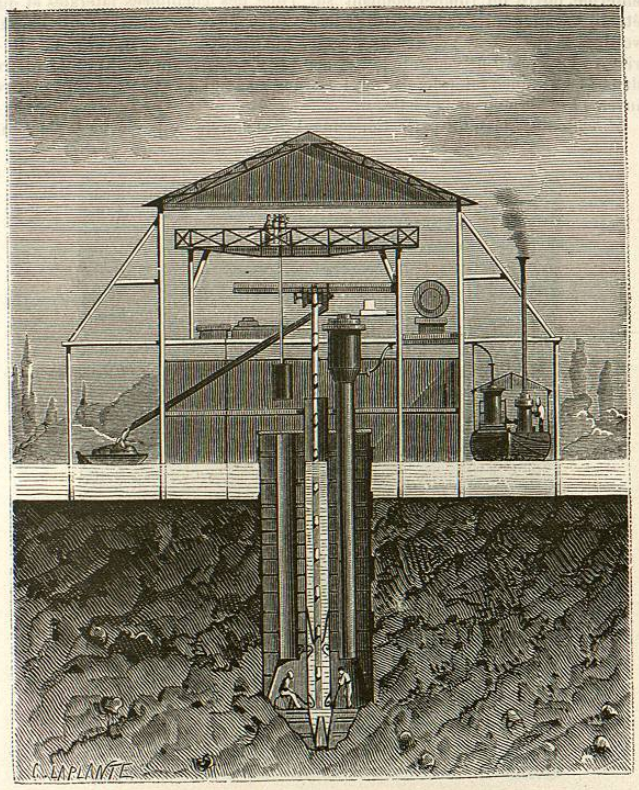

Fig. 310.

laire qui entoure la cheminée centrale. Celle-ci restera seule pleine d'eau : c'est par là que les ouvriers, descendus par les cheminées latérales, et travaillant à sec, sous la protection d'une pression de 2 ou 3 atmosphères, feront remonter, à l'aide d'une drague ou noria, les déblais de leurs fouilles et de la fondation. En même temps que les ouvriers creusent le sol, la maçonnerie est construite sur le plafond du caisson, et l'enfonce par son poids dans le trou qui s'ouvre au-dessous d'elle. Quand l'enfoncement est suffisant, les ou-

vriers remontent, remplissent le caisson et bouchent les trous des cheminées avec du béton : la fondation est alors terminée.

Remarque. — Le passage de la pression extérieure à la pression intérieure, qui est deux ou trois fois plus forte, ne serait pas sans danger pour la santé des ouvriers s'il se faisait brusquement. Aussi l'entrée ne se fait-elle pas directement de l'air extérieur dans le caisson, pas plus que la sortie. L'ouvrier pénètre d'abord dans une chambre latérale, qui est à la pression extérieure; il s'y enferme, ouvre un robinet donnant sur l'une des cheminées latérales et qui établit la communication et l'égalité de pression entre les deux compartiments voisins. Il peut alors pousser une porte, qui s'ouvre de l'extérieur à l'intérieur, et qui était précédemment fermée par l'excès de pression, et il pénètre dans la cheminée latérale, par où il descend au fond du caisson. La manœuvre inverse s'effectue pour la sortie.

3° *Scaphandre.* — Un perfectionnement plus simple de la cloche à plongeur

Fig. 311.

est le scaphandre [1], appareil journellement employé par les plongeurs, soit dans nos ports pour les travaux sous-marins, soit dans les mers de l'Archipel pour la pêche des éponges. Il se compose (fig. 311) d'une sorte de casque, qui peut s'emboîter solidement sur les épaules du plongeur, et qui est en communica-

1. De σκάφη, bateau, et ἀνήρ, ἀνδρός, homme.

tion permanente avec une boîte à air, posée sur son dos comme un sac de soldat ; un tuyau, que le plongeur entraîne avec lui, amène dans le réservoir de l'air comprimé (à une pression égale à celle qui s'exerce au fond de l'eau). L'air qui a été respiré peut s'échapper par des ouvertures convenablement disposées. Le plongeur peut voir et se conduire par d'autres ouvertures, hermétiquement fermées avec des glaces et protégées par des grilles. Une corde, attachée à sa ceinture, permet de le remonter à volonté, sur un signal convenu.