

COURS ÉLÉMENTAIRE
DE
PHYSIQUE

PAR H. GOSSIN

Professeur au Prytanée impérial militaire de La Flèche

OUVRAGE RÉDIGÉ CONFORMÉMENT
aux programmes officiels de 1866
POUR L'ENSEIGNEMENT SECONDAIRE SPÉCIAL
(DEUXIÈME ANNÉE)

DEUXIÈME ÉDITION

PARIS
LIBRAIRIE DE L. HACHETTE ET C^{ie}
BOULEVARD SAINT-GERMAIN, n° 77

1868

8 AItA 947

H3
egos
1

416 106 445 000 14



8 A4A 947

ÉLÉMENTS
DE
PHYSIQUE

ÉLÉMENTS
DE
PHYSIQUE

PAR H. GOSSIN

ANCIEN ÉLÈVE DE L'ÉCOLE NORMALE, AGRÉGÉ DE L'UNIVERSITÉ, PROFESSEUR
AU PRYATANÉE IMPÉRIAL MILITAIRE DE LA FLÈCHE

OUVRAGE RÉDIGÉ CONFORMÉMENT
aux programmes officiels de 1867
POUR L'ENSEIGNEMENT SECONDAIRE SPÉCIAL
(DEUXIÈME ANNÉE)

DEUXIÈME ÉDITION

PARIS
LIBRAIRIE DE L. HACHETTE ET C^{ie}
BOULEVARD SAINT-GERMAIN, N^o 77

1868

Kurt-Vogel-Stiftung



12 G 8846

**Institut für Geschichte der Naturwissenschaften
der Universität München**

Inv.-Nr. V 721
Dok.Nr. 6184

EXTRAITS DES PROGRAMMES OFFICIELS

DE

L'ENSEIGNEMENT SECONDAIRE SPÉCIAL.

ÉLÉMENTS DE PHYSIQUE.

(DEUXIÈME ANNÉE.)

PROPRIÉTÉS GÉNÉRALES DES CORPS.

Étendue (2). — Appareils de mesure. — Comparateur (4). — Vernier (7). — Vis micrométrique (10). — Machine à diviser (12).

Compressibilité (13) et élasticité (14). — Lois de l'allongement d'un fil tiré (16). — Coefficient de rupture des divers métaux (18). — Ténacité (18). — Ductilité (19). — Malléabilité (21). — Trempe (25). — Recuit (24). — Écrouissage (23). — Application des notions précédentes à l'étude de la résistance des matériaux (27).

L'eau et les liquides sont compressibles et élastiques (29). — Piézomètre (30). — Table des compressibilités des liquides (32).

PESANTEUR.

Mesure des poids. — Balance (35). — Conditions de sensibilité (38). — Méthode des doubles pesées (44). — Exécuter et faire exécuter des pesées de précision (45).

Des liquides pesants. — Les liquides comprimés sur leur surface réagissent contre les parois des vases qui les contiennent (47). — Leur pression se transmet également dans tous les sens (49).

Pressions exercées par les liquides en vertu de la pesanteur (51). — Grandeur de ces pressions (54). — Vérification expérimentale.

Presse hydraulique de Pascal (57). — Perfectionnement de cette machine (59). — Sa puissance. — Applications (60).

Équilibre des liquides pesants superposés (61).

Vases communicants (63). — Cas de deux liquides de densités différentes (64).

Comment, par des canaux souterrains, on peut faire arriver l'eau des étangs dans des réservoirs placés au loin à la même hauteur (67). — Canaux souterrains de Versailles (68).

Origine de l'eau des rivières, des sources et des puits forés (69). — Température de l'eau des puits artésiens (71). — Applications diverses (65), (66). — Sources jaillissantes (72).

Principe d'Archimède (75). — Équilibre des corps flottants (77). — Exemples très-simples pour donner une idée des conditions de la stabilité des corps flottants (78). — Applications (80), (82). — Régulateur à eau (81).

Densité des solides et des liquides (84). — Méthode fondée sur le principe d'Archimède (86), (92). — Méthode du flacon (89), (93). — Aréomètres de Nicholson et de Fahrenheit (91), (94). — Aréomètre de Baumé (96). (97). — Alcoomètre centésimal (98). — Tables (100). — Utilité des instruments (95).

Pesanteur de l'air et des gaz. — *Élasticité.* — Baromètre (106). — Sa construction (109). — Grandeur de la pression atmosphérique sur 1 centimètre carré (108). — Usages du baromètre (116), (117), (118).

Machine pneumatique (134). — Double épuisement (141), (144). — Application à l'industrie (145), (146), (147), (148), (149).

Loi de Mariotte (125). — Manomètres (121), (131).

Siphon (152). — Emploi du siphon pour obtenir un écoulement continu ou intermittent de liquide (154), (155), (156). — Vase de Mariotte (158). — Lampes (160). — Gazomètre (161).

Théorème de Torricelli sur la vitesse d'écoulement des liquides (162).

CHALEUR.

Construction détaillée du thermomètre (172). — Points fixes (173), (174). — Graduation (173). — Calibrage des tubes (177). — Déplacement du zéro (179). — Diverses échelles (181).

Chaleur rayonnante. — Expérience de Rumford (183). — Mi-roirs ardents (189). — Réflexion apparente du froid (191). — Notions sur les pouvoirs émissif, absorbant et réflecteur (195), (196), (197).

Étude élémentaire de la dilatation des solides, des liquides et des gaz (198), (207). — Donner une idée des méthodes employées (206), (210). — Applications diverses (218), (219), (220).

Fusion et solidification (226), (229).

Vapeurs saturées et non saturées (238) (239). — Comment on mesure la tension maximum de la vapeur à diverses températures (procédé élémentaire) (242). — Table des forces élastiques de la vapeur d'eau (244).

Notions très-simples sur les machines à vapeur (245), (246), (247), (248), (249).

Mélange des gaz et des vapeurs (250).

Densité des vapeurs (251).

Hygrométrie. — Degré d'humidité de l'air (254). — Méthode chimique (255). — Hygromètre (256), (259), (260).

Brouillards (261). — Nuages (262). — Pluie (265). — Neige (267). — Verglas (268). — Rosée (269).

Calorimétrie. — Notions sur la mesure des quantités de chaleur (274). — Sous le même poids, les corps exigent des quantités différentes de chaleur pour élever leur température d'un même nombre de degrés (274). — Chaleurs spécifiques (277). — Calorie (275). — Mélanges de corps inégalement chauds (eau et fer, eau et mercure, fer et mercure) (278).

Mêler de la glace et de l'eau assez chaude pour la tondre complètement (279). — Déduire de cette expérience la notion de chaleur latente de fusion (279). — Constance de la température de fusion (280). — Glacières (281). — Mélanges réfrigérants (282). — Lenteur de la fusion de la neige (283). — Comment on peut hâter, dans certains cas, la fusion (283). — Lenteur de la formation de la glace (284).

Expériences sur la chaleur latente de volatilisation (286). — Nombre relatif à la vapeur d'eau (286). — Constance de la température pendant la transformation du liquide en vapeur (287). —

Froid produit par l'évaporation (288). — Expérience de Leslie (289). — Applications diverses (290), (291), (293). — Appareil Carré (292).

Chauffage par circulation de l'eau et de l'air (306), (307), (308), (309). — Tirage des cheminées (295). — Poêles et fourneaux (304). — Utilité des cheminées, non-seulement pour produire de la chaleur, mais aussi pour aérer (296), (300). — Courants d'air ascendant et descendant des cheminées sans feu (302). — Comment on peut les utiliser (302). — Ventilation des dortoirs, des classes, des études, des ateliers (311), (312), (313), (314). — Aérage des mines (315).

ÉLECTRICITÉ.

Premières notions sur la pile voltaïque (317). — Courants électriques (320). — Expériences d'Oersted (325). — Galvanomètre.

Production de courants électriques dans les actions chimiques (319). — Piles à courant constant (331). — Couple de Daniell (332); — de Bunsen (333).

Electrochimie (336). — Décomposition des corps par le courant électrique (336). — Argenture (343). — Dorure (344). — Galvanoplastie (346). — Applications diverses (345). — Planches gravées (347).

Découverte d'Ampère (348). — Action réciproque des courants rectilignes : 1° quand ils sont parallèles (351); 2° quand ils forment un angle (352). — Solénoïdes (359). — Leurs propriétés (360). — Action des aimants sur les courants (355). — Action de la terre (357). — Déclinaison et inclinaison (360).

Aimantation par les courants électriques (362). — Electroaimants (363). — Diamagnétisme (364), (365), (366).

Notions sur les télégraphes électriques (367).

COURS ÉLÉMENTAIRE DE PHYSIQUE

LIVRE I^{ER}

PROPRIÉTÉS GÉNÉRALES DE LA MATIÈRE.

CHAPITRE I^{ER}

MESURE DE L'ÉTENDUE.

1. Tous les corps jouissent d'une manière plus ou moins parfaite d'une série de propriétés que l'on appelle les *propriétés générales de la matière*. Ce sont : *l'étendue, l'impenétrabilité, la divisibilité, la porosité, la dilatabilité, la compressibilité, l'élasticité, la mobilité et l'inertie*. Les deux premières sont dites les *propriétés essentielles de la matière*, parce qu'il n'est pas de corps qui ne les possède toutes deux.

2. **Étendue.** — L'étendue est la propriété que possède chaque corps d'occuper une certaine portion de l'espace que l'on appelle son volume. La mesure de cette portion de l'espace se ramène toujours à l'évaluation de longueurs, car la géométrie permet ensuite d'en conclure la grandeur

des surfaces et des volumes; ces mesures nécessitent le choix d'une unité et l'emploi de certains appareils.

3. **Mètre.** — L'unité de longueur est le *mètre* : c'est la dix-millionième partie du quart du méridien terrestre. Les mesures s'effectuent au moyen de règles sur lesquelles sont tracées des divisions égales soit au mètre, soit à ses multiples, soit à ses sous-multiples. Quand on veut avoir des mètres d'une longueur rigoureusement exacte, on peut employer deux moyens : ou bien armer les bouts de matières dures, qui font partie de la longueur du mètre, mais empêchent l'usure des extrémités; ou bien prendre une règle plus grande que le mètre et sur laquelle on marque deux traits distants de cette longueur. On a ainsi les *mètres à bouts* et les *mètres à traits*. Sur une arête de la règle (fig. 1) sont tracées des divisions en

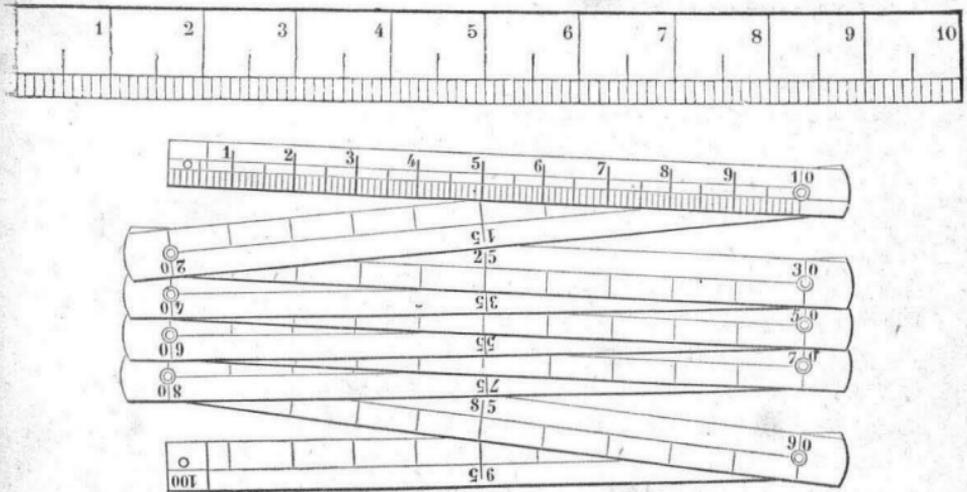


Fig. 1. Mètre.

décimètres, centimètres, et même quelquefois en millimètres.

4. **Comparateur.** — Il est important de pouvoir s'assurer si les mètres ont bien la longueur convenable; pour cela on les

compare à un *étalon*, c'est-à-dire à un mètre rigoureusement exact, qui ne sert qu'à ces vérifications. L'étalon principal se trouve à Paris, au Conservatoire des arts et métiers. Un instrument dit *comparateur*, que l'on doit à Fortin, sert à effectuer la vérification et à reconnaître quelle est la valeur de la petite différence qui peut exister. Il y a des comparateurs pour les mètres à bouts et pour les mètres à traits; nous décrirons seulement l'un des pre-

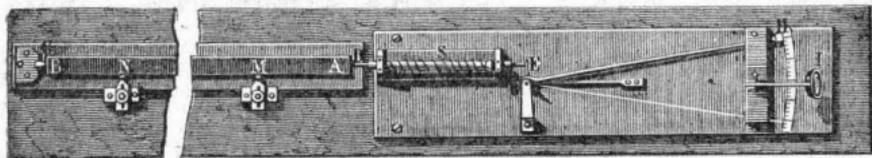


Fig. 2. Comparateur

miers. L'appareil (fig. 2) consiste en une table en fer, à l'une des extrémités de laquelle est un talon vertical C ayant la forme d'un prisme triangulaire, et contre lequel on applique l'extrémité B de l'un des mètres BA. Un châssis glisse sur la table et peut y être fixé par des vis de pression; on l'amène près de l'extrémité du mètre, et alors une petite tige métallique s'appuie d'une part en D sur le mètre, d'autre part en E sur la petite branche EG d'un levier coudé; un ressort appuyé sur la grande branche GH du levier assure les contacts; le point H parcourt un arc gradué en demi-millimètres. Si le mètre et l'étalon sont de même longueur, en les substituant l'un à l'autre, le grand bras de levier doit dans les deux cas correspondre à la même division de l'arc gradué, sinon on pourra évaluer facilement la différence. Supposons en effet que l'écart accusé par H soit de 16 divisions et que le bras GH soit 20 fois aussi grand que le bras BC; la différence de longueur des deux mètres sera la vingtième partie de 16 demi-millimètres, c'est-à-dire $0^{\text{mm}},4$.

5. **Mesure des longueurs.** — Pour mesurer une longueur, l'on applique sur elle l'arête divisée du mètre, de façon

que le zéro de la division coïncide avec l'une des extrémités de cette longueur; on note à quelle division correspond l'autre extrémité; cette division exprime la longueur cherchée. Si la longueur à mesurer est plus grande qu'un mètre, il est bon d'avoir deux règles divisées que l'on place successivement bout à bout jusqu'à ce que l'on dépasse la seconde extrémité de la longueur à mesurer; on estime ainsi le nombre de mètres contenus dans cette longueur, et en outre la fraction qu'il faut encore ajouter.

6. Généralement la seconde extrémité de la longueur à mesurer tombe entre deux divisions du mètre; on a ainsi deux limites entre lesquelles est comprise la longueur cherchée. L'approximation du résultat sera d'autant plus grande que les divisions seront plus petites, et l'erreur commise est inférieure à la valeur d'une des divisions de la règle.

7. **Vernier.** — Pour avoir une approximation plus grande, l'on fait usage du *nonius* ou *vernier*, ce dernier nom étant celui de l'inventeur de l'instrument ¹. Supposons que, le long de l'arête divisée du mètre, l'on fasse mouvoir une petite règle additionnelle sur laquelle on prenne une longueur égale à 9 millimètres, en admettant le mètre divisé en millimètres; puis concevons qu'on divise cette longueur en dix parties égales, chacune d'elles valant $\frac{9}{10}$ de millimètre; l'on aura le vernier. Supposons

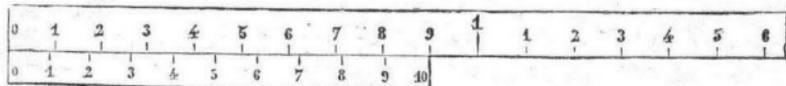


Fig. 3. Vernier droit.

que, comme dans la figure (fig. 3), l'on fasse coïncider le zéro du vernier et celui du mètre; la distance entre l'extrémité de la première division du vernier et l'extrémité de

1. Vernier (Pierre), né en 1580 à Ornans, directeur général des monnaies au comté de Bourgogne, mort en 1637.

la première division du mètre est la différence entre un millimètre et $\frac{9}{10}$ de millimètre, c'est-à-dire $\frac{1}{10}$ de millimètre; les deuxièmes divisions auront leurs extrémités distantes de $\frac{2}{10}$ de millimètre, les troisièmes de $\frac{3}{10}$ de millimètre, et ainsi de suite. Cela posé, pour opérer une mesure, l'on adapte la grandeur à mesurer le long de l'échelle, puis on fait coïncider le zéro du vernier avec l'extrémité de cette longueur. Supposons que cette extrémité tombe entre la division 45 et la division 46 de

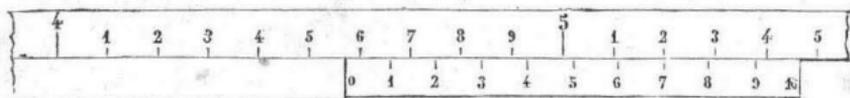


Fig. 4. Usage du vernier.

l'échelle (fig. 4); on a ainsi deux limites qui comprennent la longueur à mesurer, et cette longueur est 45 millimètres augmentés d'une certaine fraction que le vernier est destiné à estimer. Le vernier étant amené dans la position indiquée, on cherche quelle est celle de ses divisions qui coïncide avec une division de la règle. Soit la division 7, il en résultera que la division précédente de la règle et la division 6 du vernier seront distantes de $\frac{1}{10}$ de millimètre, la division 5 du vernier sera distante de la division correspondante de la règle de $\frac{2}{10}$ de millimètre; en continuant ce raisonnement, on voit que la division 45 du mètre et le zéro du vernier sont distants de $\frac{7}{10}$ de millimètre; mais cette distance est en même temps la longueur de la fraction qu'il faut ajouter à 45, elle est de $\frac{7}{10}$ de millimètre, c'est-à-dire qu'elle est exprimée par un nombre de dixièmes de millimètre égal au rang de la division du vernier qui est en coïncidence. On ne trouve pas toujours une division du vernier qui coïncide exactement avec une division de l'échelle: on a alors l'approximation la plus grande possible en prenant la division la plus voisine de la coïncidence. On peut encore donner d'autres dimensions au vernier, par exemple une longueur de 49 millimètres; on le divise alors en 50 parties, ce qui

permet d'évaluer les cinquantièmes de millimètre. On applique aussi le vernier à la mesure des arcs de cercle.

Exercice. — Les divisions d'un cercle gradué ont une valeur de $10'$; sur ces divisions se meut un vernier ayant la longueur de 39 divisions et partagé en 40 parties égales. Quelles sont les fractions de degré que ce vernier permet d'apprécier?

8. **Compas d'épaisseur.** — On ne peut pas toujours appliquer la règle divisée sur la longueur à mesurer. Supposons, par exemple, que l'on veuille connaître le diamètre d'un cylindre ou d'une sphère, ou de tout autre corps à face courbe; il faudra avoir recours à un intermédiaire entre le mesureur et la longueur à mesurer, par exemple au *compas d'épaisseur* (fig. 5). C'est un compas formé de deux branches courbées, mobiles autour d'une charnière; on donne à ces branches un écart tel que les deux pointes, A et A', touchent à la fois les deux points dont on mesure la distance; on reporte ensuite les pointes du compas sur une règle divisée, et l'on mesure leur écartement. Si le compas est formé de deux parties identiques, l'écart BB' est le même que AA'.

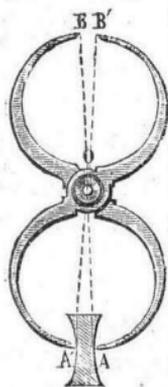


Fig. 5. Compas d'épaisseur.

9. **Pied à bec.** — Pour mesurer les épaisseurs, il est encore fort commode de faire usage du *pied à bec* ou *compas à verge*. C'est une règle métallique divisée AA' (fig. 6); à l'une des extrémités est un arrêt saillant TBD; une autre saillie B'D' est portée par le curseur à vernier C. Les deux saillies BD et B'D' ont leurs faces parfaitement parallèles. Quand elles s'appuient l'une sur l'autre, le zéro du vernier et celui de la règle coïncident. D'après cela, le déplacement de la saillie B'D' est donné par le déplacement du zéro du vernier. Cet instrument peut servir à mesurer le diamètre d'une sphère ou d'un cylindre, ou toute autre épaisseur. Pour l'appliquer à la mesure du diamètre

d'un fil métallique, on coupe ce fil par fragments, on place sur la règle dix, par exemple, de ces fragments côte à côte, et on peut mesurer ainsi une quantité égale à dix fois le diamètre cherché. C'est d'une sorte de pied à bec que les cordonniers font usage pour mesurer la longueur du pied.

10. **Vis micrométrique.** — Le vernier est lui-même insuffisant pour évaluer les grandeurs fort petites. Dans certains cas, l'on peut évaluer les centièmes et les millièmes de millimètre à l'aide de la *vis micrométrique*. C'est une vis dont le pas est très-petit et dont le filet ad'ailleurs une régularité aussi parfaite que possible ; de plus, la tête de la vis est divisée. Deux modes d'application de cette vis en feront bien comprendre l'usage.

11. **Sphéromètre.** — Le *sphéromètre* (fig. 7) est une vis micrométrique V, à

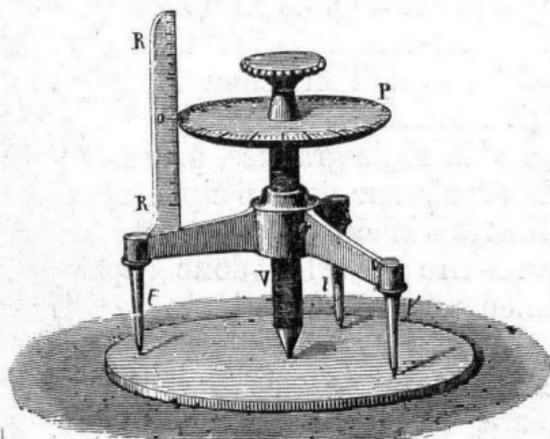


Fig. 7. Sphéromètre.

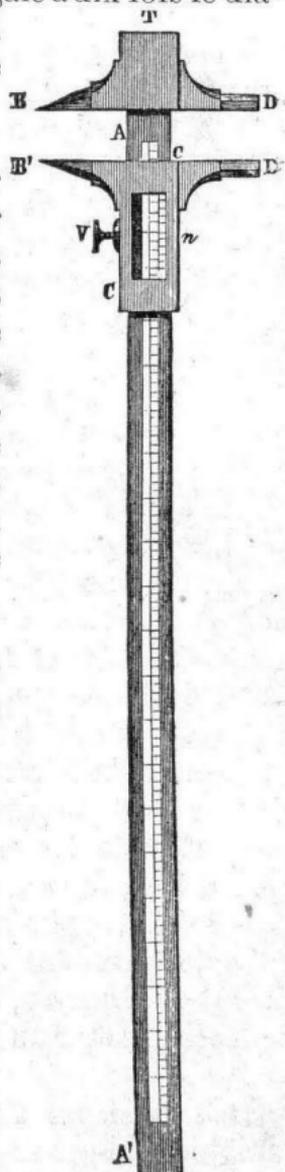


Fig. 6. Pied à bec.

pointe mousse, dont la tête P est divisée en 500 parties égales, et qui se meut dans un écrou en bronze supporté

par un trépied d'acier aussi à pointes mousses. Ce trépied repose sur un plan en verre douci. L'un des jambages porte une règle RR en laiton, verticale et divisée en demi-millimètres. Le pas de la vis, c'est-à-dire la quantité dont la pointe s'abaisse pour un tour complet, est aussi un demi-millimètre. Quand la face supérieure de la tête de la vis affleure une des divisions de la règle verticale, c'est la division zéro de cette tête qui se trouve en face de la règle. Voyons comment, avec cet appareil, on peut mesurer l'épaisseur d'une plaque à faces parallèles. On commence par amener la pointe de la vis au contact du plan de verre douci; on constate qu'alors la tête P est en face du zéro de RR, et que le zéro de sa division est en regard de cette règle. On relève la vis, on glisse sous elle la plaque que l'on considère et qui doit être assez petite pour que l'on puisse l'introduire entre les pieds de l'instrument. On abaisse la vis jusqu'à ce que sa pointe touche la plaque; on est averti du contact par la nature du bruit que fait l'instrument en déplaçant un peu le trépied. Il arrive alors, par exemple, que la tête P arrive entre la division 25 et la division 26 de la tige RR; l'épaisseur de la plaque est donc comprise entre 12,5 millimètres et 13 millimètres; mais si de plus on note que la division de la tête P qui se trouve en regard de la tige RR est la 218^e par exemple, et que l'on remarque qu'en relevant cette vis on fait successivement défiler les divisions 1, 2, 3, etc., devant la règle graduée, on en conclut qu'il faut, pour avoir l'épaisseur de la plaque, ajouter à 12^{mm},5 deux cent dix-huit fois la cinq-centième partie d'un demi-millimètre, c'est-à-dire 0^{mm},218; donc l'épaisseur cherchée est, à un millième de millimètre près, 12^{mm},718.

12. Machine à diviser. — Dans le sphéromètre, la vis micrométrique se déplace, et l'écrou reste fixe; c'est l'inverse dans la machine à diviser.

L'une des formes diverses données à cet appareil est la suivante (fig. 8). Une vis micrométrique tourne entre

deux coussinets fixes sans pouvoir avancer. Un écrou dont le pas est identique à celui de la vis se déplace le long de celle-ci sans tourner sur lui-même; il entraîne dans son mouvement un chariot C reposant sur l'écrou et guidé dans son mouvement par deux rails parallèles, tels que AA. Au chariot est fixé un tracelet T, burin ou diamant suivant les cas. La pièce en forme de triangle qui supporte le tracelet tourne autour de la base d'un rectangle articulé lui-même en K; de sorte qu'en tirant le tracelet pour l'éloigner du chariot, l'on tend à mettre le triangle et le rectangle dans un même plan; un ressort

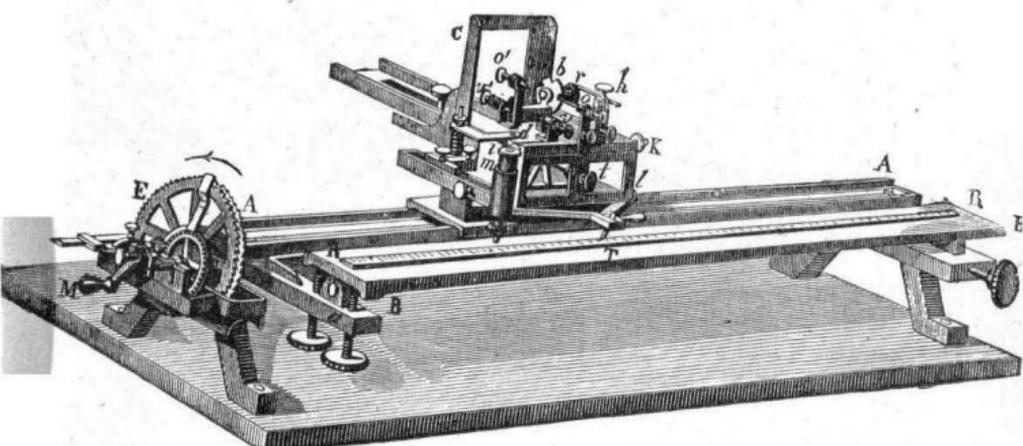


Fig. 8. Machine à diviser.

attaché en *t* ramène d'ailleurs l'appareil en place quand on l'abandonne à lui-même, et si en même temps l'on appuie la pointe du butoir sur la règle à diviser R, une division est tracée. Il faut que ce trait ne puisse écarter T que d'une certaine quantité en dehors de sa position de repos; un butoir O venant frapper contre un appui *b* arrête l'écartement. Ce butoir est d'ailleurs à une distance réglée d'avance; de plus il a la forme d'une roue échan-crée qui tourne sur elle-même quand on écarte le tracelet, de sorte que dans certains cas le butoir vient frapper dans une échancre, ce qui produit un écart plus grand, une division plus longue. Ainsi s'obtiennent les accrois-

sements de longueur des divisions de 5 en 5 et de 10 en 10. Le chariot porte encore un microscope *m*. L'objet à diviser *R*, tige, règle ou tube de verre, est fixé parallèlement à la vis sur un banc de fonte *BB*.

La tête de la vis *E* porte des divisions qui défilent devant l'index ; soit 400 le nombre de ces divisions, et $\frac{1}{2}$ millimètre le pas de la vis ; à chaque division de la tête qui passe devant l'index, l'écrou et par suite le burin avance de la 400^e partie d'un demi-millimètre, ou d'un huit-centième de millimètre. Supposons que les divisions que l'on veut tracer doivent être distantes de 1^{mm},25 ; après avoir tracé le premier trait, on fera tourner la vis jusqu'à ce que, après avoir fait deux tours entiers, il y ait encore eu 100 divisions de la tête qui aient passé devant le repère ; on tracera le second trait, et l'on continuera de même. Dans des machines plus perfectionnées, un butoir que l'on place d'avance arrête le mouvement quand la vis a tourné de la quantité voulue.

CHAPITRE II

COMPRESSIBILITÉ ET ÉLASTICITÉ DES CORPS SOLIDES

13. **Compressibilité.** — La *compressibilité* est la propriété que possèdent les corps de se réduire à un moindre volume quand on les comprime. Les corps solides sont compressibles. Les architectes savent très-bien que les pierres qui forment la base des édifices se compriment sous le poids qu'elles supportent; c'est ce que l'on appelle le *tassement*. Quand on enleva les étais qui soutenaient le pont de Neuilly, ce pont s'abassa de plusieurs centimètres, un phénomène analogue accompagne toujours le décaissement des ponts. On peut citer aussi le raccourcissement notable, et auquel il a fallu remédier, des piliers qui supportent le dôme du Panthéon. Les métaux diminuent de volume quand on les comprime; si l'on frappe une médaille, non-seulement l'effet de la pression est de changer le relief, mais encore de diminuer le volume. Les tissus, le cuir, le bois, sont très-compressibles, ce qui tient à ce qu'ils sont très-poreux. Quand ces corps sont trempés dans l'eau, leurs pores se remplissent de liquide, et si l'on vient alors à les soumettre à la presse, le liquide qu'ils contenaient s'échappe, indiquant ainsi un rapprochement des molécules.

14. **Élasticité.** — Lorsqu'un corps a été déformé par compression, ou autrement, il peut revenir à sa forme primitive, si l'action à laquelle il a été soumis ne dépasse pas une certaine limite. C'est cette propriété que l'on

appelle *élasticité*. Si on laisse tomber une bille d'ivoire sur un plan de marbre enduit d'une très-légère couche d'huile et qu'on saisisse la bille au moment où elle rebondit, on voit qu'elle porte une tache d'huile assez large et on trouve sur le marbre une surface d'égale étendue dont l'huile a été enlevée; que s'est-il passé? La bille s'est déformée, par suite de sa compressibilité, elle est devenue plane dans sa partie inférieure, le contact a eu lieu, non par un point, mais par une surface d'une certaine étendue, puis la bille a rebondi et repris sa forme en vertu de son élasticité.

15. Le fait de l'élasticité peut encore être mis en évidence avec un cercle d'acier (fig. 9) que l'on pose ver-

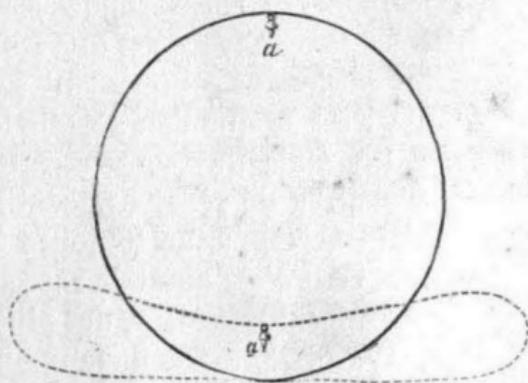


Fig. 9. Élasticité d'un cercle d'acier.

ticalement sur un plan. On saisit à la main un bouton *a*, et en l'abaissant verticalement on donne au cercle la forme représentée sur la figure; en abandonnant le bouton, le cercle revient à sa forme primitive. Cette expérience est d'ailleurs complètement l'analogue de la précédente. Le retour à la forme primitive ne se fait jamais brusquement; mais par une suite d'oscillations de la nature de celles que l'on étudie en acoustique. Les corps sont diversement élastiques; une balle de terre glaise humide comparée à une balle de caoutchouc en donne la preuve. On distingue principalement l'*élasticité de traction*, l'*élasticité*

de flexion, l'élasticité de torsion. Les deux premières doivent être surtout considérées au point de vue de la résistance des matériaux.

16. **Élasticité de traction.** — Quand on suspend des poids à l'extrémité d'une tige métallique, ou comme l'on dit d'une verge, ces poids tendent à tomber; la verge se déforme, et l'effort qu'elle fait en vertu de son élasticité pour revenir à sa longueur première fait équilibre aux poids et les soutient. S'Gravesande, Savart (1), Wertheim (2), ont étudié les lois qui président à ce phénomène. Voici le procédé employé: Une verge OO' (fig. 10) est serrée à ses extrémités dans les mâchoires de deux étaux E et F ; des vis telles que V servent à serrer les mâchoires; l'étau E est solidement fixé à un madrier vertical B . Une caisse G est attachée à l'étau F ; des vis t supportent la caisse que l'on charge de poids; en relevant les vis t , la caisse cesse de porter sur le sol et n'est plus soutenue que par l'élasticité de la verge; si l'on veut modifier les poids, l'on ramène la vis t au contact du sol et l'on peut ainsi changer les poids sans produire de secousses dans la verge. On relève,

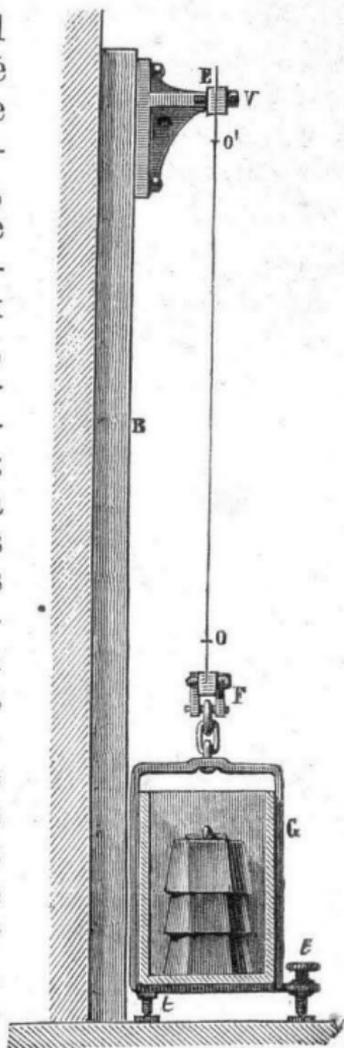


Fig. 10. Appar. de Wertheim pour l'allongement des lames.

(1) Savart (Félix), né à Mézières en 1791, mort en 1841, fut membre de l'Académie des sciences et professeur au Collège de France.

(2) Wertheim (Guillaume), né à Vienne (Autriche), le 6 mai 1805; naturalisé Français; examinateur d'admission à l'École polytechnique; auteur de remarquables travaux sur la physique moléculaire; mort le 29 janvier 1862.

avant et après chaque traction, la distance des deux traits O et O'. En faisant varier les poids et les verges, on arrive aux lois suivantes :

1^{re} loi : *Sous une même traction, les allongements des verges sont proportionnels à leur longueur.*

2^e loi : *Pour une même longueur, les allongements sont proportionnels aux poids tenseurs.*

3^e loi : *L'allongement est en raison inverse de la section de la verge.*

4^e loi : *Chaque substance, toutes choses égales d'ailleurs, ne s'allonge pas d'une même quantité; chacune a un coefficient d'allongement qui lui est propre.*

Une formule contient toutes ces lois, soient :

a l'allongement d'une barre exprimé en mètres;

l sa longueur exprimée en mètres;

s sa section exprimée en millimètres carrés;

P le poids tenseur exprimé en kilogrammes;

Q une quantité constante dépendant de la nature du corps.

$$\text{On a : } a = \frac{P \cdot l}{s} \times \frac{1}{Q}.$$

La quantité *Q* est dite *coefficient d'élasticité* ou *module d'élasticité de traction*. Voici sa valeur pour certains corps :

Acier fondu.	19	561
Acier anglais	17	278
Fer.	20	794
Cuivre.	10	519
Plomb.	1	727

Exercice. — Une tige cylindrique de fer, d'un centimètre de diamètre et d'un mètre de long, supporte un lustre du poids de 100 kilogrammes. De combien s'allonge-t-elle ?

17. **Élasticité de flexion.** — Supposons qu'une barre d'acier placée horizontalement porte, par ses deux extrémités, sur deux points d'appui; l'on accroche un poids en son milieu, elle se courbe, et l'élasticité développée soutient

le poids. Pour étudier l'élasticité de flexion, on peut se servir d'un rectangle d'acier $abcd$ (fig. 11). On l'accroche par le point f , milieu du côté supérieur, et au milieu O de la base inférieure l'on accroche des poids; les deux tiges horizontales plient, l'appareil prend la forme $a'b'c'd'$.

Le point O s'écarte de f jusqu'à O' et la valeur de l'écart est accusée par l'aiguille l que met en mouvement la roue dentée K , mue elle-même par une crémaillère. On trouve que : *L'écart est proportionnel à la charge et au cube de la longueur; il est inversement proportionnel à la largeur de la lame et au cube de son épaisseur.*

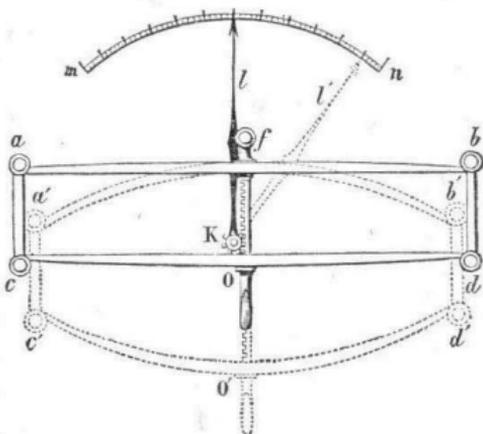


Fig. 11. Élasticité de flexion.

18. **Ténacité.** — Quand on opère sur une verge une flexion ou une traction trop forte, on peut en déterminer la rupture. La résistance plus ou moins grande qu'une verge tirée par un poids oppose à sa rupture s'appelle sa *ténacité*. Les poids nécessaires pour produire la rupture sont proportionnels à la section des verges. On appelle *coefficient de rupture* le nombre de kilogrammes nécessaires pour produire la rupture d'un fil d'un millimètre carré de section de la substance considérée. Voici pour quelques métaux la valeur du coefficient de rupture :

	kil.		kil.
Fer forgé.	40,00	Bronze des canons.	23,00
Tôle laminée (sens du lami- nage)	41,00	Cuivre laminé.	21,00
Id. (sens perpendiculaire). . .	36,00	Cuivre fondu.	13,40
Fer dit ruban très-doux.	45,00	Laiton.	12,60
Fil de fer non recuit.	60,00	Étain fondu.	3,00
Fonte grise.	13,00	Zinc fondu.	6,00
Acier.	75,00	Plomb fondu	1,28

Les applications de la ténacité des corps ont été exposées dans le cours de première année.

19. **Ductilité.** — Quand les métaux ont atteint la limite de leur élasticité, c'est-à-dire celle à partir de laquelle le corps ne revient plus à sa forme première, il ne s'en suit pas qu'il y ait rupture. Beaucoup de métaux perdent, bien avant de se rompre, leur élasticité et conservent d'une manière permanente la déformation qu'ils ont subie. Les métaux susceptibles de s'étirer ainsi sans se rompre sont dits métaux *ductiles*. On profite de cette propriété pour en faire des fils. La *filière* *f* (fig. 12) est une plaque d'acier

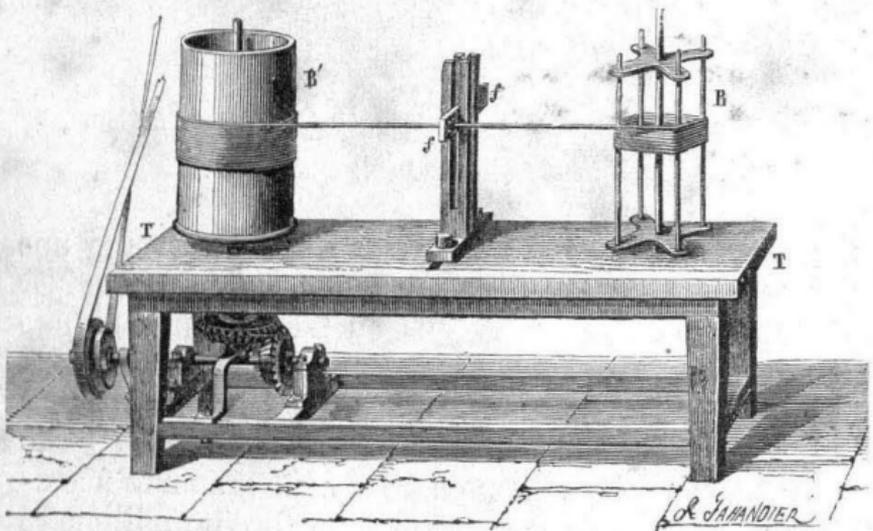


Fig. 12. Filière.

trempe percée de trous de divers diamètres; elle est fixée verticalement au milieu d'une table *T* appelée *banc à filer*; le fil à convertir en un autre plus fin est enroulé sur une bobine *B*, il est aminci à une extrémité et engagé dans un trou de la *filière* dont le diamètre est inférieur au sien; au moyen d'une pince on le tire, ce qui le force à traverser la *filière*; il faut pour cela qu'il s'amincisse et s'allonge. Le fil vient, après cette opération, s'enrouler sur une deuxième bobine *B'* mise en mouvement par le moteur de

l'atelier. De temps à autre on recuit le fil, c'est-à-dire qu'on le chauffe au rouge; sans cela il deviendrait rapidement cassant. Les métaux ont été rangés d'après leur ductilité dans l'ordre suivant :

Or.	Cuivre.
Argent.	Zinc.
Platine.	Étain.
Fer.	Plomb.
Nickel.	

20. Wollaston a profité de la ductilité de l'argent et du platine pour obtenir des fils de ce dernier métal n'ayant que $\frac{1}{1200}$ de millimètre de diamètre. Pour cela on tendait un fil de platine dans l'axe d'un cylindre de fonte, on coulait dans celui-ci de l'argent; le lingot obtenu était passé à la filière un très-grand nombre de fois, puis traité finalement par l'acide azotique qui dissout l'argent et laisse le platine intact.

21. **Malléabilité.** — La *malléabilité* est la propriété que possèdent certains corps de se réduire en feuilles par l'action du marteau ou du laminoir. Le batteur d'or obtient par le martelage, des feuilles d'or d'une ténuité extrême. Pour cela il place de petites lames déjà fort minces entre les feuillets d'un cahier fait de baudruche, qui est une membrane que l'on retire des intestins du bœuf; le cahier est placé sur une enclume et frappé avec un large marteau.

22. Le *laminoir* employé pour obtenir la plupart des métaux à l'état de lames consiste (fig. 13)

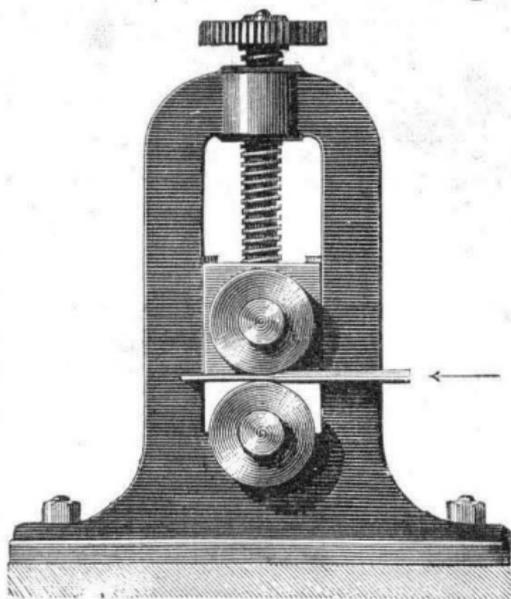


Fig. 13. Laminoir.

en deux cylindres d'acier, animés d'un mouvement de rotation contraire; la lame amincie par un bout que l'on introduit entre ces cylindres est entraînée par le frottement et s'écrase. Les métaux sont classés par ordre de malléabilité de la manière suivante :

Or.	Plomb.
Argent.	Zinc.
Cuivre.	Fer.
Étain.	Nickel.
Platine.	

23. **Écrouissage.** — Quand on dépasse la limite d'élasticité d'un corps, soit en le passant à la filière, soit en le laminant, soit de toute autre façon, les molécules prennent un nouvel état d'équilibre qui ne paraît pas aussi naturel que l'ancien; la densité est augmentée et les autres propriétés physiques sont aussi plus ou moins altérées. Quand un corps est dans ce nouvel état, on dit qu'il est *écroui*.

24. **Recuit.** — On fait cesser l'écrouissage, c'est-à-dire quel'on ramène le corps à l'état normal, en le faisant chauffer, puis en le refroidissant lentement; la chaleur dilate le corps, écarte ses molécules, et quand celles-ci se rapprochent par le refroidissement, elles viennent se placer dans leur position naturelle. Ainsi s'explique la nécessité de recuire les corps après chaque passage au laminoir ou à la filière.

25. **Trempe.** — Le refroidissement après le recuit doit être lent, sans quoi il peut encore en résulter un état moléculaire anormal. On dit alors qu'il y a trempe. L'un des plus remarquables effets de la trempe est celui qui se produit quand on laisse tomber dans l'eau froide des gouttes de verre fondu; les molécules externes se solidifient avant les internes, ce qui produit une distribution anormale de ces molécules. Le verre ainsi solidifié affecte une forme qui lui a fait donner le nom de *larmes*

bataviques (fig. 14). Ces larmes sont très-dures, elles résistent à d'assez forts coups de marteau; mais si l'on brise l'extrémité de la pointe, la larme vole en éclats. Le verre se trempe avec la plus grande facilité; quand on a fabriqué une pièce de verre, il faut toujours la recuire, sans quoi elle serait d'une fragilité excessive.



Fig. 14.

Larme batavique.

26. C'est surtout pour les métaux que l'on a recours à la trempe. L'acier recuit à une forte chaleur, puis très-lentement refroidi, est malléable, fibreux, ductile; si on le chauffe jusqu'au voisinage de son point de fusion, puis qu'on le trempe brusquement dans l'eau froide, il devient cassant comme le verre; s'il n'a été porté qu'au rouge-cerise avant la trempe, il est moins cassant. Ordinairement, après avoir trempé l'acier, on le fait recuire, il passe alors par des teintes successives; pour les ressorts on recuit jusqu'à la couleur bleue; c'est alors que l'élasticité de l'acier est la plus grande. L'alliage des tamtams chinois, formé de quatre parties de cuivre pour une d'étain, se comporte à la trempe d'une façon tout opposée à celle de l'acier; la trempe le rend ductile et malléable, tandis que refroidi lentement il est dur et cassant.

27. **Résistance des matériaux.** — L'élasticité, la flexibilité, la ductilité, la ténacité doivent être prises en grande considération dans l'art des constructions. Il faut connaître pour chaque substance la résistance qu'elle offre à la rupture ou à l'écrasement, et encore faut-il distinguer deux sortes de résistance. On nomme *résistance instantanée*, la limite de l'effort qui produit, dans un temps très-court, la rupture ou l'écrasement d'un corps solide, et *résistance permanente*, la limite des efforts que ce corps peut supporter indéfiniment et sans altérations subséquentes. La pre-

mière est facile à déterminer; quant à la seconde, l'observation seule peut servir de guide; on se fonde sur les exemples fournis par des constructions depuis longtemps existantes. Il faut d'ailleurs remarquer qu'un même corps n'offre pas la même résistance dans toutes les directions; le bois résiste surtout à un effort exercé dans la direction de ses fibres; la plus grande résistance des pierres a lieu quand elles sont placées dans le même sens que dans la carrière.

28. Le plus communément, c'est un effort transversal qu'ont à supporter les corps employés dans les constructions; c'est le cas des poutres, des chevrons, des solives qui supportent les planchers et les toits. La résistance à la rupture est proportionnelle à la largeur; elle croît à peu près comme le carré de l'épaisseur; elle diminue proportionnellement à la longueur. Seulement il faut tenir compte, dans le calcul des résistances, de ce fait que les poutres ont d'abord à supporter leur poids, de sorte que leur résistance utile est l'excès de leur résistance absolue sur leur propre poids. De là des remarques importantes. Considérons deux poutres telles que les dimensions de l'une soient doubles de celles de l'autre. La résistance de la plus grande sera quatre fois plus considérable que celle de la plus petite. La résistance de deux poutres semblables croît comme le carré des dimensions homologues. En effet la longueur étant doublée, la résistance est diminuée de moitié; mais l'augmentation de largeur compense cet effet, de sorte que la résistance ne dépend que de l'épaisseur. D'un autre côté, le volume de la plus grosse poutre est 8 fois celui de la plus petite, et son poids est aussi 8 fois plus grand. Ainsi, en doublant les dimensions, la résistance est quadruplée, mais la portion de cette résistance absorbée pour soutenir le poids de la poutre est 8 fois plus grande. En triplant, la résistance est 9 fois plus grande, l'action du poids 27 fois plus forte, et ainsi de suite. De là il résulte que l'on ne peut excéder

certaines dimensions, le poids seul du solide pouvant surpasser la force de résistance, et qu'il ne faut pas, par la résistance des pièces d'un modèle, préjuger de la résistance de la construction elle-même. De là vient, en partie, que les insectes, comme l'a si bien montré M. Plateau, ont relativement une force musculaire plus grande que celle des grands animaux. Les fils de télégraphes, tendus sur une grande longueur, ne peuvent supporter que leur propre poids et celui de la masse de givre qui pendant l'hiver s'attache après eux.

CHAPITRE III

COMPRESSIBILITÉ ET ÉLASTICITÉ DES LIQUIDES

29. **Compressibilité de l'eau.** — Pendant longtemps l'on a ignoré si, par le fait de la compression, les liquides pouvaient changer de volume, et si par suite ils étaient élastiques. L'expérience a constaté qu'il en est ainsi, et que de plus les liquides ne peuvent éprouver par compression des changements permanents; ils paraissent avoir une élasticité sans limite. Les premières expériences à ce sujet sont dues aux académiciens *del Cimento* à Florence;



elles donnèrent des résultats négatifs. L'une des plus remarquables est la suivante : Une sphère d'or ou d'argent fut remplie d'eau; en la déformant par le martelage on diminuait son volume, la sphère étant le solide qui, sous la moindre surface, contient le plus grand volume; mais l'on ne sut si l'eau avait diminué de volume, car elle suinta à travers le métal, démontrant ainsi sa porosité. Canton prouva en 1761 que l'eau était compressible; Perkins tenta plus tard quelques mesures; Oerstedt arriva le premier à des résultats assez satisfaisants.

30. **Piezomètre d'Oersted.** — On donne le nom de *piezomètre* à tout appareil susceptible d'être appliqué à la mesure de la compressibilité des liquides. Celui d'Oersted (fig. 15) est une modification de l'appareil de Canton. Il con-

Fig. 15. Piézomètre d'Oersted.

siste en un réservoir cylindrique de verre *b* surmonté d'un tube étroit. L'appareil est presque entièrement rempli de liquide ; une goutte de mercure servant d'index s'appuie sur la colonne de liquide qui s'élève dans le tube. Le piézomètre est disposé sur une planchette ; à côté de lui est fixé un tube *c*, fermé par son extrémité supérieure et destiné à servir de manomètre ; le tout est introduit dans une éprouvette à pied en verre *a* (fig. 16), munie d'une monture métallique *e* dans laquelle s'engage un piston *h* que mène une vis *k*. Le robinet à entonnoir *g* sert à remplir complètement l'éprouvette d'eau. En exerçant sur cette eau une pression, celle-ci se transmet au liquide du piézomètre qui se comprime, l'index de mercure s'abaisse, et comme le tube dans lequel il se meut est divisé en parties d'égale capacité, l'on en peut conclure la valeur de la compressibilité des liquides.

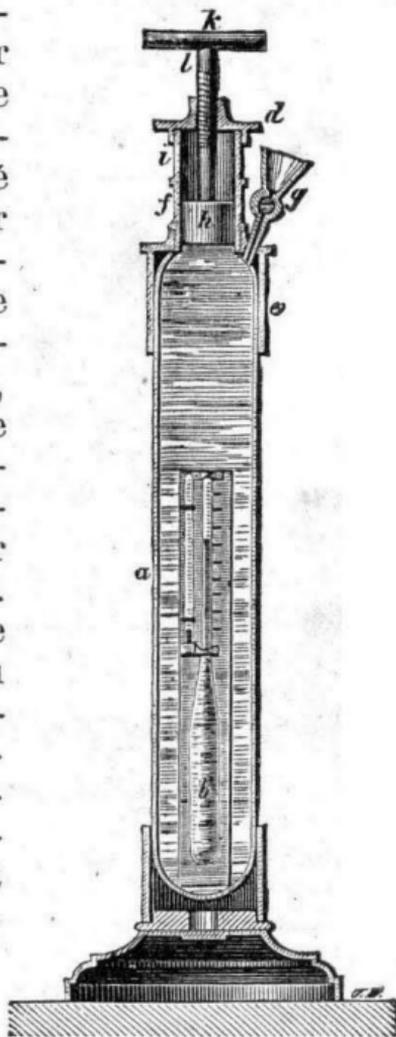


Fig. 16. Piézomètre d'Øersted.

31. Correction due à l'enveloppe. —

Ce qui enlève de la valeur aux résultats d'Øersted, c'est que ce savant ne remarquait pas que la compression, bien que s'exerçant à la fois au dedans et au dehors du piézomètre, diminuait le volume intérieur de cet instrument et la grandeur des effets observés. MM. Colladon ¹ et Sturm ², après avoir ap-

1. Colladon, ingénieur français qui vécut longtemps en Russie.

2. Sturm (Jacques-Charles-François), né à Genève, mort le 18 décembre 1855. Mathématicien distingué, membre de l'Académie des sciences, professeur à l'École polytechnique et à la Sorbonne.

porté quelques modifications heureuses à l'appareil d'Oërs-
ted, reprirent les expériences de ce physicien; mais,
quand ils voulurent tenir compte de l'influence de l'enve-
loppe, ils s'appuyèrent sur une théorie fautive de la con-
stitution des enveloppes. Enfin M. Regnault (1) imagina un
instrument à l'aide duquel on tient compte directement
de la diminution de volume du piézomètre. Opérant avec
cet instrument, M. Grassi est arrivé aux résultats admis
aujourd'hui.

32. **Coefficients de compressibilité.** — Ce que l'on déter-
mine, c'est le *coefficient de compressibilité*. On appelle de ce
nom la fraction dont diminue l'unité de volume du liquide,
pour un excès de pression d'une atmosphère. Si l'on admet,
ce qui est sensiblement vrai pour l'eau, que la diminution
de volume est proportionnelle à l'accroissement de la pres-
sion, le coefficient de compressibilité suffit pour détermi-
ner la compression sous l'action d'une force donnée.

Tableau des coefficients de compressibilité des liquides.

NOMS DES LIQUIDES.	TEMPÉRATURE.	COEFFICIENTS.	OBSERVATIONS.
Mercure.	0°	0,0000295	Compressibilité indé- pendante de la pression.
Eau.	0	0,0000503	
Id.	11	0,0000180	
Id.	18	0,0000163	
Id.	25	0,0000156	
Id.	53	0,0000141	

(1) Regnault (Henri-Victor), né à Aix-la-Chapelle, ingénieur en chef des mines, professeur à l'École polytechnique et au Collège de France, directeur de la manufacture de Sèvres, membre de l'Académie des sciences auteur de beaucoup de travaux sur la chaleur, qui sont surtout remarquables par la rigueur apportée dans l'expérimentation.

Tableau des coefficients de compressibilité des liquides.

(suite).

NOMS DES LIQUIDES.	TEMPÉRATURE.	COEFFICIENTS.	OBSERVATIONS.
Éther.	0°	0,000111	Sous une pression de 3,4 at.
Id.	0	0,000131	— — 7,0
Alcool.	7	0,0000828	— — 2,3
Id.	7	0,0000853	— — 9,5
Chloroforme.	12	0,0000648	— — 1,3
Id.	12	0,0000743	— — 9,2
Esprit de bois.	14	0,0000913	

Exercice. — Au fond de la mer, à la profondeur de 10,000 mètres, la pression est d'environ 1,000 atmosphères; si l'on puise un litre d'eau à cette profondeur, quel sera son volume à la surface de la terre? On supposera l'eau à 0°.

LIVRE II

PESANTEUR

CHAPITRE 1^{er}

MESURE DES POIDS

33. **Théorie du levier.** — La mesure des poids s'effectue avec la balance, et pour bien comprendre cet instrument, il faut connaître la théorie du levier. Considérons une règle de bois AB (fig. 17) traversée en son milieu par un prisme triangulaire d'acier dont les arêtes sont horizontales, et dont l'une s'appuie par ses extrémités sur deux anneaux fixes. Cette règle AB peut tourner autour d'un axe O qui

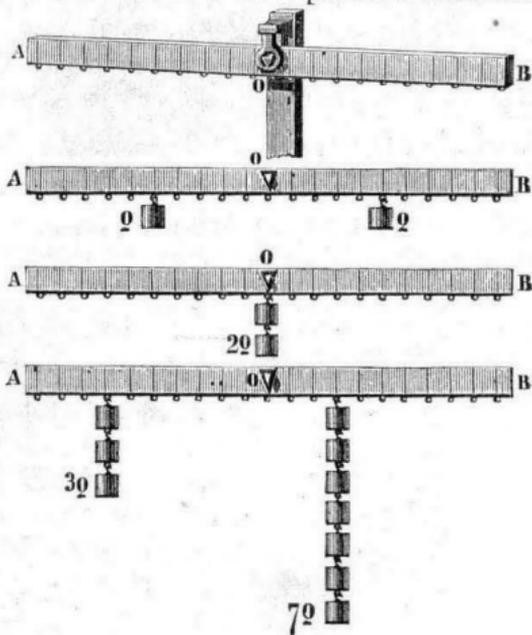


Fig. 17. Équilibre du levier.

est l'arête inférieure du prisme. Des poids peuvent être suspendus de distance en distance au-dessous de la barre. Considérons l'un de ces poids Q , la distance de son point d'attache à l'axe de rotation O est dite le *bras* du levier sur lequel ce poids agit. Si deux poids égaux à Q sont attachés à égale distance du point O , la barre reste horizontale, c'est ce qu'on exprime en disant que : *Si des poids égaux agissent sur des bras de levier égaux, ils se font équilibre.* Tout se passe en réalité comme si les deux poids réunis étaient attachés, comme l'indique la figure, au-dessous du point O ; en effet, si l'on soutenait la règle AB à l'aide d'un appareil à ressort, on trouverait que le ressort est également tendu quand les deux poids Q sont accrochés au-dessous de O ou quand ils sont de part et d'autre de ce point, à égale distance.

34. Si des poids sont attachés en deux points inégalement distants de O , par exemple, 3 poids égaux à Q à 7 décimètres de O , et 7 poids égaux à Q en un autre point, on constate que, pour l'équilibre, il faut que cet autre point soit à 3 décimètres de l'axe de rotation, ce que l'on exprime en disant que : *Pour que deux poids se fassent équilibre, il faut que, multipliés par la longueur de leurs bras de levier, ils donnent des produits égaux.*

35. **Description et théorie de la balance.** — La balance a pour pièce essentielle une barre métallique AB (fig. 18) nom-



Fig. 18. Fléau de balance.

mée *fléau*; cette barre est traversée par un prisme triangulaire O appelé *couteau*, dont l'arête inférieure repose sur deux supports en matière dure, généralement en agate ou en acier. De cette façon, le fléau peut tourner autour d'un axe qui est l'arête même du couteau. Quand le fléau est seul, il n'est soumis qu'à son poids; on s'arrange,

dans sa construction, de façon qu'il soit alors en équilibre quand il est horizontal. Il suffit, pour que cette condition soit remplie, que son centre de gravité G soit sur la verticale qui passe par le point d'appui. En effet, toutes les actions de la pesanteur sur AB pouvant se remplacer par une force unique P égale au poids du fléau et appliquée au point G , on conçoit que la direction de cette force passant par O ne puisse produire aucune rotation autour de cet axe. Forçons maintenant le fléau à s'incliner de façon à prendre la position $A'B'$ (fig. 19), le centre de gravité

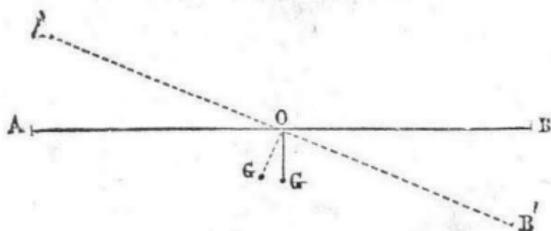


Fig. 19. Théorie de la balance.

s'étant transporté de G en G' , le poids P , qui lui est appliqué, tend à le faire tourner pour le ramener dans sa position première; ce qui indique que non-seulement l'équilibre existe quand le fléau est horizontal, mais encore qu'il est stable. Il n'en serait plus de même si le point G était sur l'axe O ; dans ce cas, l'équilibre serait indifférent, c'est-à-dire qu'il existerait dans toutes les positions de AB , puisque toujours le poids P serait appliqué sur l'axe même. Enfin, si le point G était au-dessus de O , l'équilibre serait instable; le fléau à peine dévié tendrait à faire un tour complet, la balance serait dite *folle*.

36. Aux deux points A et B sont deux autres couteaux dont l'arête est tournée vers le haut; les arêtes de ces trois couteaux doivent être parallèles et sur un même plan horizontal. Aux deux extrémités sont suspendus les bassins b (fig. 20). Si les poids de ces bassins sont égaux, leur ensemble pourra être remplacé par un poids double, appliqué au point O milieu de AB , et ne pouvant produire aucune rotation du fléau; celui-ci restera donc horizontal.

Plaçons dans chaque plateau des poids égaux et l'équilibre ne sera pas encore troublé, parce que ces deux poids pro-

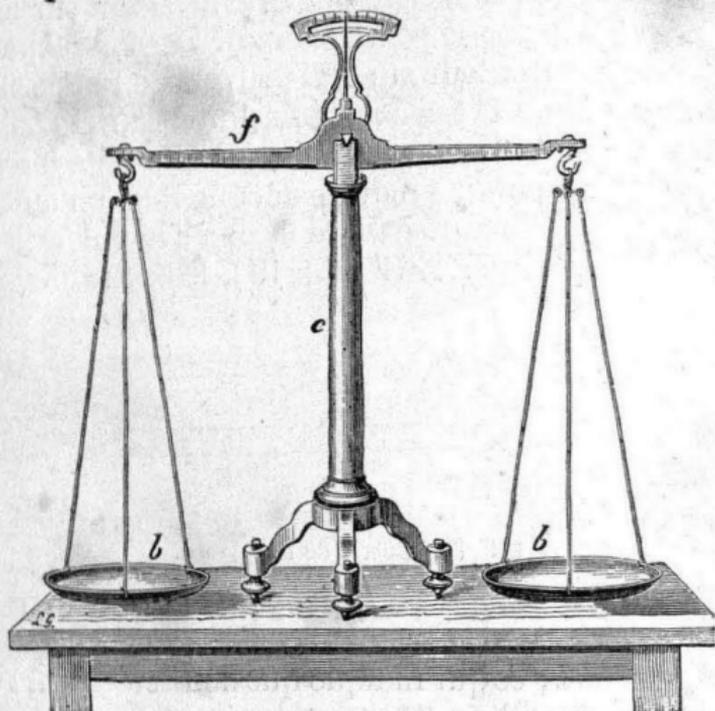


Fig. 20. Balance ordinaire.

duiront le même effet qu'un seul poids égal à leur somme et appliqué au point O. Ajoutons enfin dans un seul plateau un poids p et aussitôt le fléau s'inclinera, par exemple jusqu'en $A'B'$ (fig. 19); la rotation se continuerait jusqu'à ce que AB devint vertical sans le poids du fléau qui, appliqué en G' , tend à faire tourner en sens contraire. Sous les actions inverses de P et de p le fléau se fixe dans un état d'équilibre $A'B'$. Une balance, pour être bonne, doit être juste et sensible; pour cela, elle doit satisfaire à plusieurs conditions qu'il est facile de déduire de ce qui précède.

37. Conditions de justesse. — Elles ont pour but d'assurer l'horizontalité du fléau, quand des poids égaux sont dans les deux plateaux. Il faut donc :

1° Que les deux bras de fléau soient identiques, afin que le

centre de gravité G soit dans la verticale du point O , c'est-à-dire à égale distance des extrémités du fléau ;

2° Que le centre de gravité soit au-dessous de O , pour que l'équilibre soit stable ;

3° Que les arêtes des couteaux A et B soient à égale distance de l'arête du couteau O , afin que des poids égaux appliqués en A et en B se fassent équilibre ;

4° Que les deux bassins soient de même poids, de même volume, de même nature, en un mot, aussi identiques que possible.

38. Conditions de sensibilité. — La sensibilité consiste en ce fait que le fléau dévie de l'horizontalité d'une façon notable sous des poids aussi petits que possible. Pour que la sensibilité soit grande :

1° Les bras de fléau doivent être longs, afin que l'influence du petit excès de poids p soit plus grande, cet excès de poids exerçant son effort sur un bras de levier plus long ;

2° Le fléau doit être léger, pour que le poids P du fléau appliqué en G ait une influence faible ;

3° Il faut, pour arriver au même résultat, que G soit le plus près possible de O , afin que P agisse sur un bras de levier très-court.

39. Position des trois couteaux. — Quand on achète une balance, il faut toujours se rendre compte de sa sensibilité ; seulement si le marchand vous dit qu'un milligramme suffit pour faire dévier le fléau, il faut lui demander sous quelle charge. On appelle *charge* la somme des poids placés dans chaque plateau. Telle balance, qui chavire si l'on met un milligramme dans un plateau, restera insensible s'il y a déjà 500 grammes dans chaque bassin. Cela tient à ce que les trois points A , O , B (fig. 21), qui re-

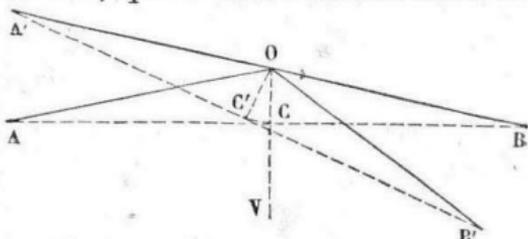
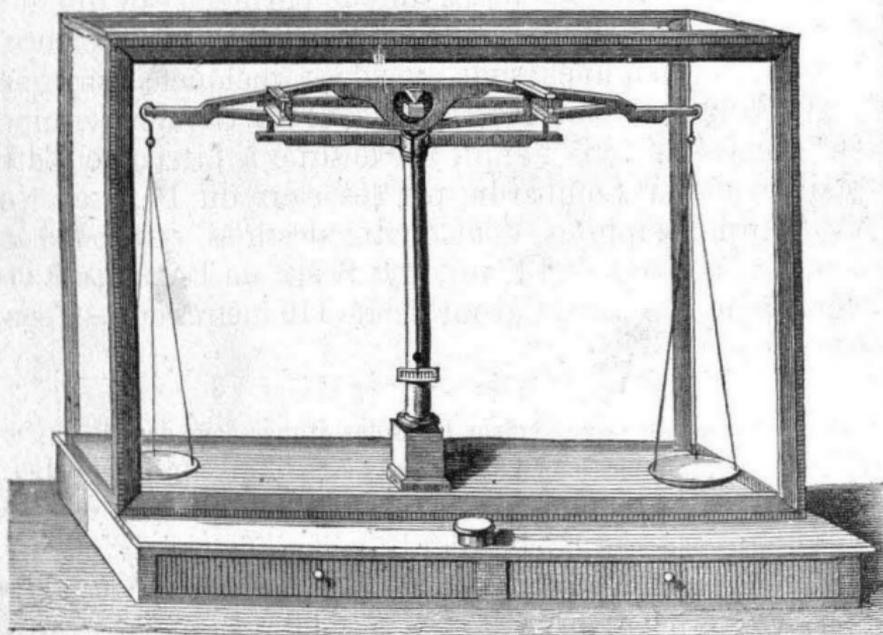


Fig. 21. Position des trois couteaux.

présentent les arêtes des trois couteaux, ne sont pas en ligne droite comme nous l'avons supposé. Les points A et B sont en général au-dessous du point O, le fléau fléchissant sous l'action des poids placés dans les bassins. Soient Q deux poids égaux placés dans les plateaux, ils agissent comme un poids égal à $2Q$ appliqués en C milieu de AB. Dévions le fléau, les points A et B viennent en A' et B', le point C en C'. Les poids Q agissent comme s'ils étaient appliqués en C', ils tendent donc à ramener le fléau à sa position première, c'est-à-dire à détruire l'action du petit excès de poids p qui serait appliqué en B'.

40. **Détails de construction.** — Dans les balances de quelque précision (fig. 22), le fléau est une barre d'acier fondu



4 Fig. 22. Balance de précision.

et trempé; il doit être d'une seule pièce; il a généralement la forme d'un losange allongé, c'est la grande diagonale de ce losange qui doit être horizontale dans le cas de l'équilibre. Souvent le fléau est évidé pour le rendre plus

léger ; mais pour lui maintenir de la rigidité et l'empêcher de fléchir, on soutient les contours par des traverses métalliques.

41. Les couteaux ne doivent pas avoir une arête trop aiguë, parce qu'alors ils seraient facilement émoussés, leur tranchant se transformerait en une portion de surface cylindrique, et, suivant la génératrice de ce cylindre qui reposerait sur les plans d'appui, l'axe de rotation ne serait plus le même. Comme il est essentiel que le couteau central s'use le moins possible, on adapte aux balances une pièce appelée *fourchette* que l'on peut élever ou abaisser, de façon à soulever le fléau ou à le laisser reposer sur son couteau, suivant que l'on veut ou non se servir de la balance.

42. Une aiguille fixée au fléau permet d'en apprécier les déplacements. Elle est verticale quand le fléau est horizontal et elle se meut devant un arc de cercle divisé. Plus elle est longue, plus ses indications sont appréciables.

43. Les balances de précision sont renfermées dans des cages de verre qui les préservent des agitations de l'air. Dans ces cages l'on maintient des vases pleins de chlorure de calcium fondu, ou mieux de chaux vive, qui dessèche l'air et s'oppose à l'oxydation des couteaux.

44. **Double pesée de Borda.** — Nous avons vu que l'une des conditions nécessaires pour qu'une balance soit juste, c'est que les bras de levier soient égaux. Or, cette condition n'est jamais réalisée complètement. Borda ¹ a imaginé une méthode de pesée qui n'exige pas que cette condition soit remplie. On met le corps dans l'un des bassins, on lui fait équilibre en plaçant dans l'autre plateau une

1. Borda (Jean-Charles), astronome français, né à Dax en 1733; mort en 1799.

tare, c'est-à-dire des substances quelconques, telles que grenaille de plomb, fragments de papier d'étain, etc.; puis on enlève le corps et on le remplace par des poids marqués, jusqu'à ce qu'on ait rétabli l'équilibre. Ces poids donnent le résultat cherché, car ils produisent exactement le même effet que le corps dont ils tiennent la place.

45. **Exécution des pesées de précision.** — Les pesées de précision se font toujours par la méthode de Borda; mais cette méthode ayant l'inconvénient d'exiger deux pesées au lieu d'une, l'on y remédie généralement en plaçant toujours le corps à peser dans un même vase, par exemple une capsule de platine ou de porcelaine. Une fois pour toutes l'on fait la tare de cette capsule avec un poids placé à côté, 30^{gr} par exemple. La tare est formée par un vase cylindrique de fer-blanc, muni d'un couvercle et contenant des substances quelconques, pourvu qu'elles ne soient pas hygrométriques; le mieux est de se borner à l'emploi de fragments de métaux. Le corps étant dans sa capsule, on le pèse toujours sur le même plateau, celui de droite par exemple, la tare étant dans le plateau de gauche; on voit que s'il faut ajouter 12^{gr} par exemple à côté de la capsule pour rétablir l'équilibre, le poids du corps est évidemment 18^{gr}, différence entre 30^{gr} et 12^{gr}.

46. Pour les pesées de précision, on se sert d'une balance dont la sensibilité soit bien éprouvée; on a soin qu'elle ne soit pas exposée dans une de ses parties plus que dans d'autres à l'action d'une source de chaleur telle que la radiation directe du soleil ou d'un poêle, sans quoi il se produirait à l'intérieur de la cage des courants d'air qui feraient osciller le fléau. On se garde de rien enlever ou de rien placer sur les bassins tant que le fléau repose sur son coudeau, afin de ne pas ébrécher celui-ci par la secousse. Quand dans les tâtonnements l'on vient de changer un poids, on ferme la cage, on abaisse doucement la fourchette pour éviter les chocs, et l'on examine les oscil-

lations de l'aiguille; quand elles sont lentes et qu'elles s'écartent à peu près également de part et d'autre du zéro, c'est la preuve que l'on approche du poids cherché.

Exercice. — Faire la théorie des différentes balances décrites dans le cours de première année. On s'appuiera sur la théorie du levier (33 et 34)

CHAPITRE II

PRESSIIONS EXERCÉES PAR LES LIQUIDES

47. Pressions exercées par les liquides. — Les pressions exercées par les liquides sont de deux sortes : il y a les pressions qu'ils exercent

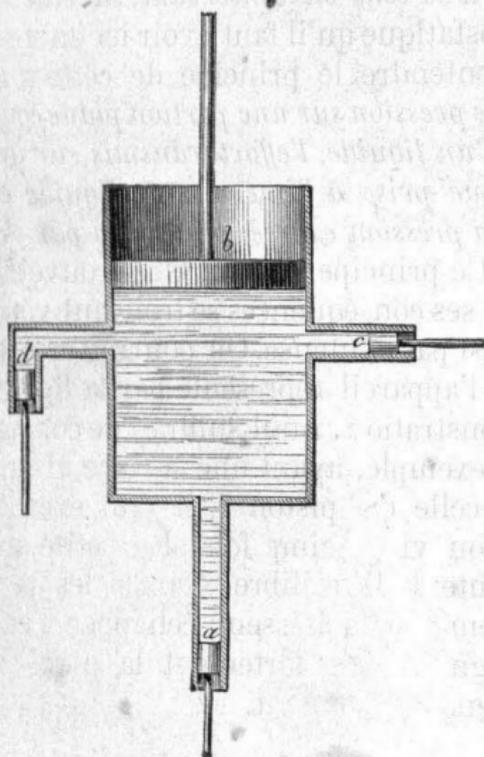


Fig. 23.

Transmission des pressions hydrostatiques.

pour bien la saisir, il faut d'abord donner une définition.

parce qu'ils sont pesants, et celles qu'ils transmettent. Considérons un vase plein d'eau (fig. 23) ; il présente quatre ouvertures fermées par les pistons *a b c d* ; pressions *b*, et l'élasticité du liquide fait reculer les autres pistons ; il y a donc pression transmise ; les pistons *d* et *c*, qui ne sont pas opposés à *b* reculent comme *a* ; il y a donc transmission en tous sens. Pascal a établi la loi de cette transmission ;

48. Pression hydrostatique. — *On appelle pression hydrostatique, exercée en un point par ou sur un liquide, l'effort qui serait exercé normalement sur une surface plane égale à l'unité, passant par le point considéré et partout également pressée.* Supposons que le piston *b* ait une surface de 25 décimètres carrés, que le décimètre carré soit pris pour unité de surface, et que l'on exerce sur le piston une pression de 100 kilogrammes, le liquide placé au-dessous du piston reçoit une *pression hydrostatique* égale à $\frac{100}{25}$ kilogrammes ou 4 kilogrammes.

49. Principe de l'égalité de transmission des pressions. — *Si l'on exerce une pression en un point d'une masse liquide, cette pression se transmet en tous sens en conservant sa valeur.* C'est la pression hydrostatique qu'il faut avoir ici en vue, de sorte que l'on doit entendre le principe de cette manière : *Si l'on exerce une pression sur une portion plane égale à l'unité de la surface d'un liquide, l'effort transmis sur une surface plane quelconque prise à l'intérieur du liquide ou sur la paroi est égal à la pression exercée multipliée par l'étendue de cette surface.* Ce principe ne peut être prouvé directement, mais toutes ses conséquences se trouvant vérifiées, son exactitude n'est pas douteuse. On pourrait croire, au premier abord, que l'appareil représenté par la fig. 23 peut servir à une démonstration, qu'il suffirait de constater que le piston *a*, par exemple, ayant une surface vingt-cinq fois moindre que celle du piston *b*, il faut exercer exactement une pression vingt-cinq fois plus petite sur *a* que sur *b* pour maintenir l'équilibre. Mais si les pistons se meuvent facilement, ils laissent échapper l'eau comprimée, et s'ils joignent trop fortement la paroi, le frottement s'oppose à leur mouvement.

50. Principe de l'égalité de pression. — Au principe précédent, qui est l'un des fondements de l'hydrostatique, c'est-à-dire de la science de l'équilibre des liquides, il faut joindre cet autre, découvert par Pascal : *Une molécule li-*

quide située au sein d'un liquide en équilibre est également pressée dans toutes les directions. Ce principe ne se démontre pas plus que le précédent; on comprend pourtant qu'il est la conséquence forcée de ce fait que les molécules liquides ont entre elles une adhérence si faible que la moindre force suffit à les déplacer.

51. **Pressions exercées par les liquides en vertu de leur poids sur le fond des vases qui les contiennent.** — Les pressions exercées par les liquides en vertu de leur poids ont été aussi étudiées par Pascal. Quand on ne considère que la pression exercée sur le fond horizontal du vase contenant le liquide, on trouve qu'elle ne dépend que de la hauteur du niveau du liquide au-dessus du fond du vase. On le prouve à l'aide d'une balance dont l'un des plateaux est remplacé par un disque de verre (fig. 24). Celui-ci sert

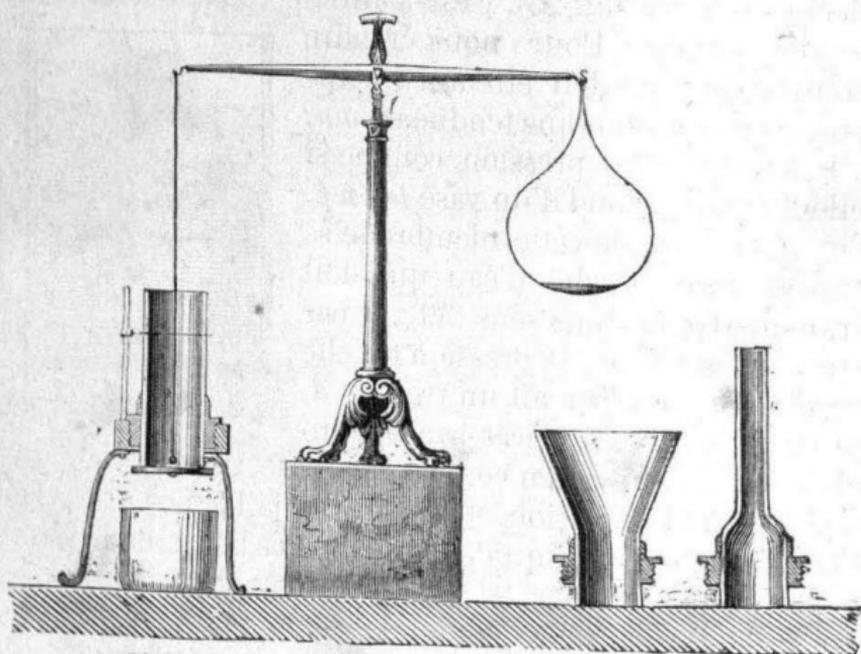


Fig. 24. Appareil de Pascal perfectionné par Masson.

de fond à un vase vissé sur un trépied; des poids étant placés dans l'unique plateau de la balance, on verse de

l'eau dans le vase jusqu'à ce que celle-ci fasse descendre le disque de verre pour s'écouler. On note quel est alors le niveau de l'eau. On remplace le vase successivement par plusieurs autres de formes diverses, mais de même ouverture à la partie inférieure; on amène aussi l'obturateur à leur servir de fond, et pour chacun d'eux l'équilibre est rompu précisément quand l'eau que l'on y verse arrive au même niveau. Tous ces vases ayant même fond, l'on en conclut que *la pression sur le fond des vases ne dépend que de la hauteur du niveau du liquide au-dessus du fond.*

52. Pressions exercées par les liquides en vertu de leur poids sur les parois latérales des vases qui les contiennent. — Les pressions exercées par les liquides en vertu de leur poids ne sont pas appliquées seulement sur le fond des vases, mais encore sur leurs parois latérales, dans la direction des flèches *ma*, *nb* (fig. 25), c'est-à-dire perpendiculairement à ces points.

Pour nous rendre compte qu'il en doit être ainsi, supposons une membrane tendue en *mn*, elle subirait une pression comme si elle formait le fond d'un vase *lmnp*. Or, à la place de cette membrane se trouve une couche d'eau qui doit transmettre en tous sens (49), et par suite en *ma* et *nb*, la pression qu'elle reçoit. Si l'on perceait un trou en *a*, la paroi étant remplacée par la tran-

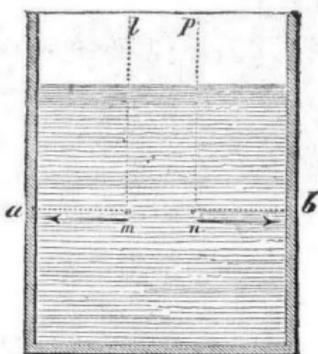


Fig. 25. Pressions latérales.

che liquide qui est en contact avec elle, cette tranche céderait sous la pression et le liquide jaillirait. Le fait de l'écoulement d'un liquide par un orifice latéral suffit donc à prouver la pression, et le jet étant normal à la paroi au point de départ, cela démontre que *la pression qui détermine l'écoulement est normale à cette paroi.* Remarquons encore que les deux pressions *ma*, *nb* se contre-balancent : quand on ouvre un orifice en *a*, la pression *ma* n'a plus

d'action sur le vase qui est sollicité à se mouvoir par la pression nb ; en effet, vient-on à placer une éprouvette E

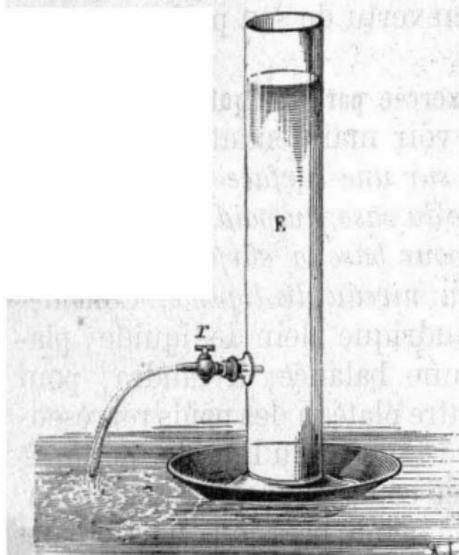


Fig. 26.

Réaction d'un liquide qui s'écoule.

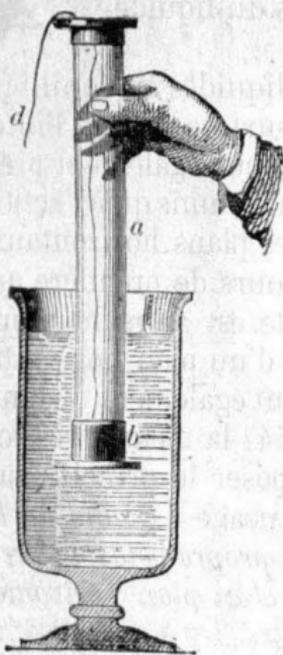


Fig. 27.

Pression de bas en haut.

(fig. 26) dans une cuvette flottant sur l'eau, et à faire écouler par un robinet latéral un liquide contenu dans cette éprouvette, on verra le flotteur se déplacer dans le sens inverse de l'écoulement du liquide. On dit ordinairement que le mouvement est dû à la réaction du liquide qui s'écoule.

53. Pression de bas en haut exercée par les liquides.

— La transmission des pressions, se faisant en tous sens, doit aussi s'opérer de bas en haut. Pour le prouver, l'on se sert d'un cylindre a que peut fermer un obturateur b soutenu par un fil d (fig. 27). L'obturateur étant appliqué contre le tube, on descend le tout dans un vase plein d'eau, on lâche le fil d , et la pression du liquide soutient seule l'obturateur. Si ce fait est bien dû à la pression transmise, cette pression doit être égale à celle qui s'exercerait sur l'obturateur, s'il était le fond d'un vase contenant de l'eau, jusqu'à la hauteur qu'occupe au-dessus de lui le niveau du liquide. Pour le prouver, il suffit de verser doucement de l'eau dans le tube; l'obturateur se détache

quand le niveau du liquide est devenu le même dans le tube et dans le vase ; l'obturateur, étant également pressé sur ses deux faces, tombe en vertu de son poids.

54. Valeur de la pression exercée par les liquides en vertu de leur poids. — Il est facile de voir maintenant que *la pression exercée par un liquide sur une surface horizontale est égale, quelle que soit la forme du vase, au poids d'une colonne liquide cylindrique ayant pour base la surface pressée, et pour hauteur sa distance au niveau du liquide.* Considérons, en effet, un vase cylindrique plein de liquide, plaçons-le sur le plateau d'une balance; il faudra, pour l'équilibre, placer dans l'autre plateau des poids représentant celui du vase augmenté de celui du liquide. Les pressions que supporte le vase se composent de pressions verticales exercées sur son fond, et de pressions horizontales exercées sur ses faces latérales; ces dernières ne peuvent avoir aucune action sur la balance : donc la pression sur le fond du vase est bien égale au poids du liquide.

55. Surfaces de niveau. — Dans les liquides en équilibre, on nomme *surface de niveau* toute surface prise à l'intérieur de ce liquide et se trouvant partout également pressée; dans le cas de liquides qui ne sont soumis qu'à l'action de la pesanteur, ces surfaces sont des plans horizontaux. En effet, l'on sait, par expérience (cours de première année), que la surface libre du liquide est alors horizontale; par conséquent, tous les points d'un plan horizontal pris à l'intérieur du liquide se trouvent également distants de la surface et subissent dès lors (54) la même pression hydrostatique. Nous pouvons donc poser le principe suivant dont nous ferons un fréquent usage : *Quand un liquide n'est soumis qu'à l'action de son propre poids, la pression est la même dans tous les points d'un plan horizontal quelconque mené au travers du liquide.* Il y a une restriction à faire à ce principe : il n'est vrai qu'autant que le volume du liquide est suffisamment petit pour que sa sur-

face libre soit un plan horizontal; on ne pourrait donc pas l'appliquer à une mer d'une certaine étendue.

56. En vertu de la propriété des surfaces de niveau et des principes fondamentaux de l'hydrostatique, on voit que la pression hydrostatique en un point d'une paroi inclinée dépend de la position du point sur la paroi, c'est-à-dire de sa distance à la surface libre.

57. **Presse hydraulique.** — Le plus important peut-être des appareils fondés sur les principes d'hydrostatique, et particulièrement sur celui de la transmission des pressions, est la *presse hydraulique*. Elle consiste en deux corps de pompe dans lesquels se meuvent deux pistons plongeurs *a* et *b* (fig. 28); le grand corps de pompe *xy* est en fonte, son

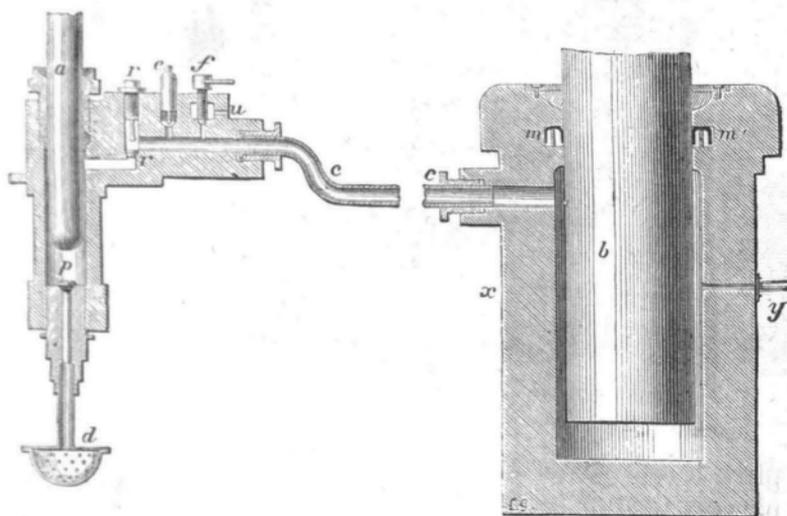


Fig. 28. Coupe de la presse hydraulique.

épaisseur est considérable, et il communique par un tube métallique *cc* avec le petit corps de pompe. On exerce sur la tête du piston *a* un effort, par exemple de 300 kilogrammes; si sa section est 100 fois plus petite que celle

du piston *b*, ce dernier se trouve pressé de bas en haut par un effort de 30,000 kilogrammes (49), effort qu'il exerce à son tour sur les objets situés au-dessus de lui; ces objets placés sur un plateau *g* (fig. 29) se trouvent pressés contre une plate-forme maintenue au-dessus d'eux. Cette multi-

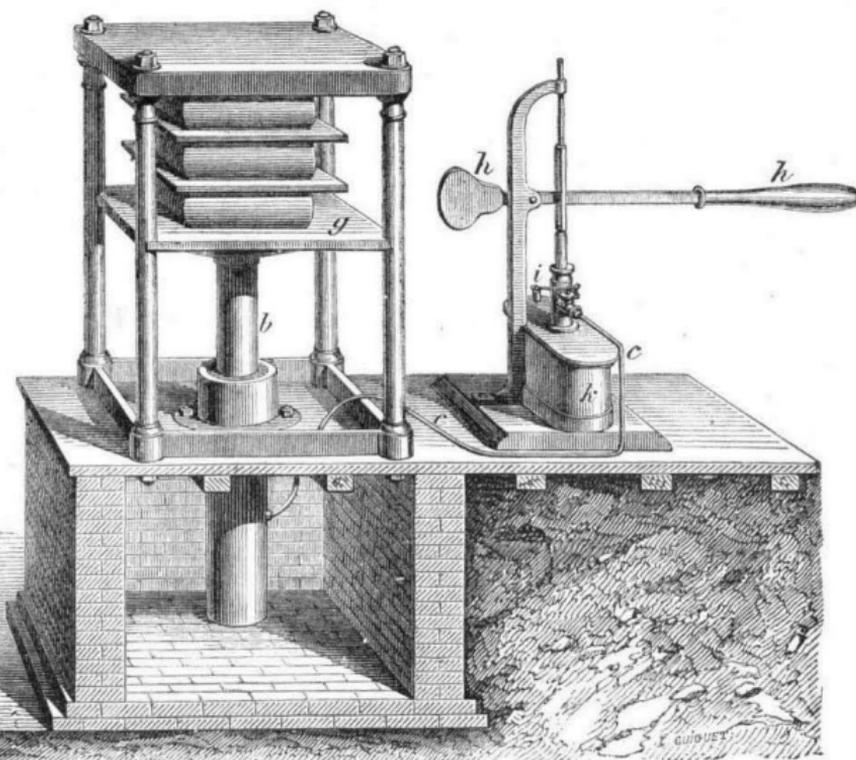


Fig. 29. Presse hydraulique.

plication de la force ne s'obtient qu'à la condition de faire parcourir au petit piston un chemin bien supérieur à celui que parcourt le grand; c'est ce que l'on exprime en mécanique en disant que : *Ce que l'on gagne en force, on le perd en chemin parcouru.* En effet, quand le petit piston s'est abaissé d'un décimètre, il a déplacé un volume d'eau qui est venu se placer sous *b*, mais qui, occupant là une surface 100 fois plus grande, n'a plus qu'une hauteur 100 fois plus petite, de sorte que l'abaissement d'un décimètre

de a n'a élevé b que d'un millimètre. Pour élever de deux décimètres le gros piston, il faudrait faire parcourir 20 mètres au petit. Il est évidemment impossible d'obtenir un pareil résultat. On y obvie de la manière suivante. Le fond du petit corps de pompe communique par un canal métallique avec une bêche pleine d'eau; ce canal est fermé par la soupape p (fig. 28) et se termine dans l'eau par la pomme d'arrosoir d ; de plus, la communication entre les deux pistons est interrompue par une soupape r . Abaissons le piston a , la pression de l'eau va soulever r , la presse fonctionnera, et a ayant parcouru deux décimètres, b se sera élevé de deux millimètres. Relevons a , la pression de l'eau tient fermée la soupape r , que son poids avait déjà fait retomber, mais l'eau de la bêche pressée par l'atmosphère s'élève, soulève p et vient remplir le vide laissé sous le piston a . On recommence, ce qui fait monter de nouveau le piston b de deux millimètres; après cent coups du piston a , le piston b se sera soulevé de deux décimètres. En e est une soupape de sûreté que l'on charge de poids i (fig. 29). F est une vis fermant un orifice; quand on retire cette vis, le liquide comprimé s'écoule par a dans la bêche k , on peut alors ramener b au bas de sa course.

58. Nous avons supposé l'action exercée sur le petit piston égale à 300 kilogrammes. Ce résultat est obtenu à l'aide d'un levier hh , grâce auquel l'effort qu'exerce un homme sur l'extrémité du levier est décuplé sur la tête du piston. Or un homme exerce facilement sur le levier un effort de 30 kilogrammes.

59. La presse hydraulique inventée par Pascal est longtemps restée sans applications; la pression énorme exercée dans la caisse xy faisait filtrer l'eau entre le piston et le corps de pompe; l'ingénieur anglais Bramah ¹ y a re-

1. Bramah (Joseph), mécanicien anglais, né à Strasbourg en 1719; mort en 1814. Inventeur de serrures de sûreté fort estimées.

médié à l'aide d'un *cuir embouti*; on le voit en place (fig. 28) dans l'espace annulaire mm' . C'est un anneau de cuir (fig. 30) dont la portion interne et la portion externe ont été rabattues comme l'indique la figure; un cercle de métal maintient le cuir en place. Quand l'eau arrive par infiltration dans l'espace annulaire mm' , elle applique par sa pression le cuir sur les parois et se ferme à elle-même toute issue.

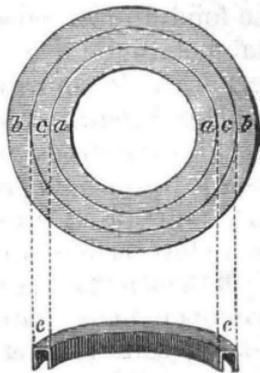


Fig. 30. Cuir embouti.

60. Applications de la presse hydraulique. — La presse hydraulique a de nombreux emplois, parmi lesquels il faut citer :

1° *Fabrication des huiles.* — Les graines oléagineuses, étant contenues dans un sac, sont placées entre la tête du gros piston et la plate-forme fixe; on exerce ensuite la compression. On préfère pour cet usage les presses à piston horizontal aux presses à piston vertical.

2° *Mise en balles.* — Beaucoup de substances, telles que le coton, le foin, les étoffes, seraient trop embarrassantes à transporter sous leur volume naturel; on peut sans inconvénient les comprimer et faire ce que l'on appelle des balles.

3° *Réunion des essieux aux roues des locomotives.* — Les roues des locomotives doivent être fixées assez fortement sur leurs essieux pour qu'aucun choc ne puisse les en séparer; pour cela, les extrémités des essieux sont légèrement coniques, ce qui permet de les engager dans les moyeux des roues, puis, à l'aide de l'action exercée par une presse hydraulique à cylindre horizontal, on fait pénétrer lentement les essieux dans les moyeux. Si l'on voulait ensuite retirer l'essieu, il faudrait scier le moyeu. C'est de la même manière que l'on emmanche sur leurs essieux les cylindres des moulins destinés à broyer les

cannes à sucre; la presse hydraulique doit exercer dans ce cas un effort de trois à quatre cent mille kilogrammes.

4° *Docks flottants.* — Les docks flottants, fort en usage en Angleterre, sont des plates-formes disposées dans la mer au-dessus du piston d'une presse hydraulique gigantesque. Quand on veut réparer un navire, on l'amène au-dessus de cette plate-forme, on le cale, puis en faisant jouer la presse, on le soulève, on le met à sec et on peut ainsi le radouber.

5° *Établissement des piles de pont.* — A Bordeaux, l'on a établi un pont dont les piles sont des tubes métalliques enfoncés dans le lit du fleuve à une profondeur convenable. Les piles étant posées à leur place, on eut recours pour les enfoncer au procédé suivant. On établit sur la pile un plancher, sur ce plancher une presse hydraulique et sur la tête du gros piston un deuxième plancher relié par des chaînes à des bateaux chargés de matières fort pesantes et amarrés le long des piles. En faisant jouer la presse, on tendait à soulever les bateaux, mais ceux-ci pesant alors de tout leur poids sur la pile la contraignaient à s'enfoncer dans le sol.

6° *Extraction du jus de la pulpe de betterave.* — Dans les fabriques de sucre, la betterave est d'abord amenée à l'état de pulpe par le moyen d'un râpage; cette pulpe est placée dans des enveloppes en laine superposées et séparées les unes des autres par des plaques ou claires métalliques; on soumet chaque sac à une première pression à l'aide d'une presse à vis qui lui fait rendre 35 à 40 pour 100, puis l'on porte à la presse hydraulique et l'on soumet à une pression de 800,000 kilogrammes.

7° *Essai des chaudières des machines à vapeur.* — Les chaudières étant complètement remplies d'eau et toutes les ouvertures hermétiquement fermées sauf une, on met cette dernière en communication, à la place de la caisse *xy* avec le tube *c* de la presse; on exerce ainsi sur la paroi une pression triple de celle qu'elle doit subir sous l'action de la vapeur. L'administration de la marine impériale se

contente d'une pression double dans le cas des chaudières neuves, et égale seulement à une fois et demie dans le cas des chaudières réparées. D'ailleurs l'on a moins pour but dans cette opération de vérifier la résistance de la chaudière, que de s'assurer que les joints de rivure sont étanches.

61. **Équilibre des liquides superposés.** — *Lorsque plusieurs liquides, contenus dans un même vase, ne sont pas susceptibles de se mélanger, et qu'ils se trouvent en équilibre, les surfaces de séparation sont planes et horizontales, et la superposition doit avoir lieu par ordre de densité. C'est là un fait d'expérience que l'on vérifie d'ordinaire en construisant ce que l'on appelle une fiole des quatre éléments. Dans une éprouvette à pied, on place du mercure, de l'huile de tartre, de l'esprit-de-vin, de l'huile de pétrole. On ferme avec un bouchon, l'on agite, et après le repos l'on constate sur les liquides séparés la loi énoncée.*

62. C'est en vertu de la superposition par ordre de densité que l'on voit, à l'embouchure des fleuves, l'eau douce flotter sur l'eau salée, et, dans l'Atlantique, les eaux du Gulf-Stream rester à la surface. Citons encore le vin que l'on peut faire flotter sur l'eau, et l'huile, dans les veilleuses, superposée au même liquide.

63. **Vases communicants.** — Si deux vases communiquent par leur partie inférieure et qu'ils contiennent le même liquide, l'expérience prouve que *dans chaque vase la surface libre est plane et horizontale, et que ces deux surfaces sont dans un même plan.* On se rend bien compte qu'il doit en être ainsi si l'on isole par la pensée la portion *gd* (fig. 31)

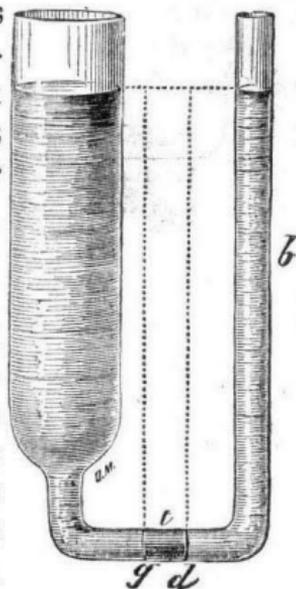


Fig. 31.
Vases communicants.

de liquide dans le tube de communication t : elle reçoit d'un côté la pression du liquide contenu dans le tube a , et, d'autre part, la pression du liquide du tube b . Ces deux pressions ne peuvent être égales (54) qu'autant que les hauteurs du liquide dans les deux vases au-dessus de gd sont les mêmes.

64. Il peut arriver que les vases contiennent deux liquides différents, par exemple de l'eau et du mercure ; on constate alors que les surfaces libres et la surface de séparation sont encore planes et horizontales ; de plus, les hauteurs des deux liquides au-dessus du plan de la surface de séparation sont en raison inverse de leurs densités. Soit a (fig. 32) le vase qui contient l'eau, nv le plan horizontal qui passe par la surface de séparation des deux liquides. S'il n'y avait rien au-dessus de ce plan, ni en n ni en v , le mercure, s'élevant à des hauteurs égales dans les deux vases, serait en équilibre (63) ; pour que cet équilibre subsiste, il faut que les pressions hydrostatiques exercées sur le plan nv en n et en v soient égales, ce qui exige que les hauteurs des deux liquides au-dessus de ce plan soient en raison inverse de leurs densités.

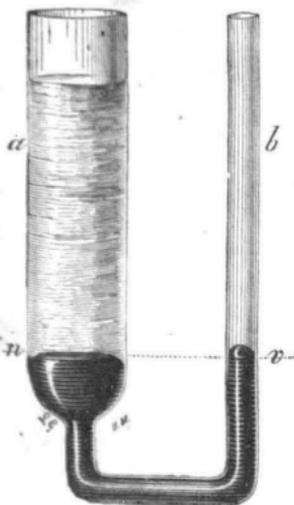


Fig. 32. Vases communicants. hydrostatiques exercées sur le plan nv en n et en v soient égales, ce qui exige que les hauteurs des deux liquides au-dessus de ce plan soient en raison inverse de leurs densités.

65. Niveau d'eau. — La première application qu'il faille citer du principe des vases communicants est le *niveau d'eau*, dont la description et l'usage ont été donnés dans le cours de première année. Deux fioles de verre sont réunies par leur fond à l'aide d'un long tube ; de l'eau s'élève dans les deux fioles et le rayon visuel qui rase les deux niveaux est horizontal.

66. **Tunnels-siphons.** — On donne en hydraulique le nom de *tunnels-siphons* à des tubes communicants destinés à faire passer les eaux d'un canal à ciel ouvert, soit sous une voûte, soit sous un autre canal servant à la navigation, ne pouvant pas être coupé par le premier et ayant ses eaux à un plus bas niveau. Le fait se présente souvent dans le parcours des eaux d'irrigation ou de dessèchement. Le système adopté est le suivant : à droite et à gauche du canal de navigation sous lequel il faut passer, on pratique deux puits en maçonnerie ; à quelque distance au-dessus de leur fond, les puits sont réunis par des tubes de fonte à emboîtement, de la nature de ceux qui sont employés pour les tuyaux de conduite des eaux. Les deux portions du canal d'irrigation sont ainsi réunies par des tubes communicants. On a soin de placer les tuyaux à distance du fond des puits, afin de purifier l'eau qui dépose son limon au-dessous du niveau des tuyaux de fonte. Les tunnels-siphons sont employés quelquefois sur une vaste échelle. Par exemple, le canal Cavour, terminé en décembre 1865 et qui est destiné à l'irrigation des plaines de la Lombardie par les eaux du Pô, traverse 130 tunnels-siphons, dont quatre destinés à la conduite sous les rivières de l'Elvo, de la Sesia, de l'Agogna et de Terdoppio. Le canal Cavour débite 110 mètres cubes d'eau par seconde.

67. **Moyen de faire arriver l'eau des étangs dans des réservoirs placés au loin à la même hauteur.** — Si dans une propriété l'on possède un étang, une pièce d'eau, et que l'on veuille établir un bassin dans les jardins, il suffira, pour le remplir, de le mettre en communication par des canaux souterrains avec l'étang ; le liquide s'établira au même niveau entre ces deux réservoirs, qui ne seront autres que des vases communicants de grande dimension.

68. **Canaux de Versailles.** — L'application de ce principe a été faite aux jardins de Versailles, dont les pièces d'eau

sont alimentées comme il suit : Les plateaux élevés qui s'étendent de Versailles à Rambouillet, et ont une superficie d'environ trente lieues carrées, sont bordés de rigoles dans lesquelles se déversent les eaux résultant de la pluie ou de la fonte des neiges; ces rigoles, qui ont un développement de 157,652 mètres et une largeur de 20 mètres, alimentent des étangs tels que ceux de Trappes ou de Saint-Quentin, de Saclay, de Bois-d'Arcy, de Saint-Hubert, de Perray, etc. Des canaux souterrains reçoivent ces eaux et réunissent à l'est de Versailles, dans les bassins de Montbauron, celles qui viennent des lieux élevés; les eaux qui viennent de Trappes ont ainsi à parcourir souterrainement 10,772 mètres pour venir reprendre leur niveau à Montbauron. Quant aux eaux plus basses, elles se rendent dans un bassin de 13 mètres moins élevé que le précédent. Il arrive ainsi annuellement à Versailles, par l'application du principe des vases communicants, de 5 à 7,000 mètres cubes d'eau, dont la ville emploie un peu moins de moitié pour ses besoins, et dont le reste est disponible pour le jeu des eaux du parc. C'est ainsi qu'après l'insuccès de la machine de Marly et la tentative avortée de dérivation de l'Eure, on est arrivé bien plus simplement à fournir à Versailles l'eau dont cette ville avait besoin.

69. Origine de l'eau des rivières et des sources. — La nature réalise, pour alimenter les sources et les rivières, ce qui a été pratiqué à Versailles. Beaucoup de plateaux, plus élevés que la contrée qui les environne, ont un sol perméable, du sable par exemple, comme les plateaux d'Orléans; d'autres fois, et cela se présente dans les montagnes, le sol est formé de rochers crevassés. L'eau des pluies est facilement absorbée et s'infiltré; elle rencontre, dans son parcours, des couches de terre argileuse qu'elle ne peut pénétrer; elle glisse entre ces couches comme dans des canaux; ces canaux finissent par déboucher en quelque endroit à l'air libre; il en résulte une source si l'eau accu-

mulée est peu abondante, une rivière si la masse liquide est considérable.

70. **Puits artésiens.** — On obtient les puits artésiens quand on donne une issue à l'eau emprisonnée dans une couche perméable entre deux couches imperméables qui se relèvent au-dessus du lieu du forage. Si, par exemple (fig. 33), des couches affectent la forme d'un entonnoir,

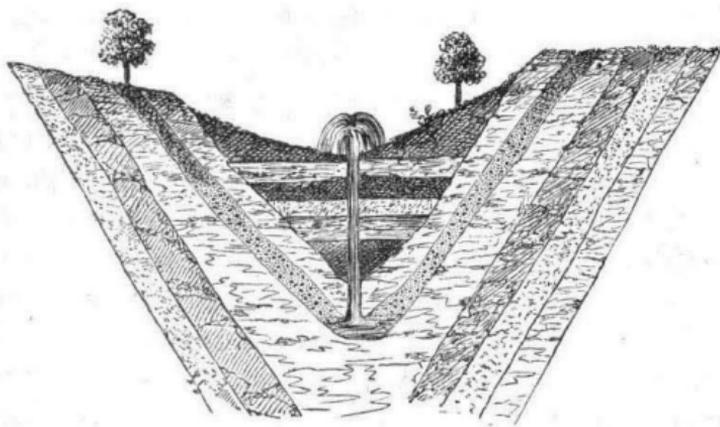


Fig. 33. Puits artésien.

que l'une d'elles soit sableuse et comprise entre deux lits marneux, l'eau, tombant sur le pourtour de la couche sableuse et pénétrant à son intérieur, s'y accumule; et, si l'on creuse le sol en face du point le plus bas, le liquide jaillit pour reprendre son niveau. A Paris, l'on a pu obtenir des puits artésiens; en voici la raison: si l'on creuse le sol dans cette ville, on rencontre successivement de l'argile plastique, de la craie, le *gault*, qui est une espèce de marne bleue; toutes ces couches sont imperméables. Vient ensuite un sable verdâtre connu sous le nom de *grès vert*, qui forme une couche perméable; au-dessous est une autre couche argileuse, le *terrain wealdien*, que l'eau ne peut traverser. Toutes ces couches se relèvent et viennent affleurer le sol en des points situés autour de Paris et plus élevés que cette ville. Ainsi le grès vert se

trouve à Troyes, à Auxerre, à Saint-Dizier; il constitue là une partie du plateau de Langres. Il en résulte une infiltration énorme dans cette couche; les eaux de pluie qui pénètrent ainsi dans le grès vert restent comprimées entre le gault et l'argile wealdienne. Elles s'accumulent au fond de la couche perméable, et si l'on fore un canal vertical arrivant jusqu'à elles, en vertu du principe des vases communicants, elles s'élèvent, tendant, comme l'on dit, à prendre leur niveau; elles peuvent même jaillir à une grande hauteur.

71. Les eaux des puits artésiens ont une température assez élevée qui tient à leur origine. L'on sait, en effet, qu'à partir d'une certaine profondeur à l'intérieur du sol, les différentes couches vont se réchauffant à mesure que la profondeur augmente. La température de l'eau du puits de Grenelle est, à sa sortie, de 28°; ce puits a une profondeur de 548 mètres. A Rochefort, l'administration de la marine a fait creuser un puits artésien de 825 mètres de profondeur : l'eau en sort à 42°.

72. **Sources jaillissantes.** — Les sources jaillissantes sont des puits artésiens naturels; l'eau, emprisonnée dans la couche perméable, a accès à l'extérieur à un niveau moindre que celui qui existe dans son réservoir souterrain, et, pour reprendre ce niveau, elle doit se projeter à une certaine hauteur. Telle est la source de Cléron, dans le Doubs. Des sources jaillissantes se produisent quelquefois subitement à la suite d'un tremblement de terre, par suite des crevasses qui s'ouvrent depuis la surface du sol jusqu'aux nappes d'eau souterraines. C'est ainsi qu'en 1846, près de Lorenzano, en Toscane, on vit apparaître des sources jaillissantes suivant six directions, dans l'une desquelles l'on comptait jusqu'à vingt-quatre sources. Les eaux des sources jaillissantes ont, la plupart du temps, une température élevée comme celle des puits artésiens. Dans certains pays, on les emploie au chauffage;

c'est ainsi qu'à Cannstadt, près de Stuttgart, existe une source jaillissante qui chauffe des serres, et alimente des bassins de natation, où l'on se baigne l'hiver.

73. **Jets d'eau.** — Une application moins grandiose, mais toute semblable, de la théorie des vases communicants, est l'emploi des jets d'eau comme ornements de nos jardins. La figure 34 représente le jet d'eau du grand

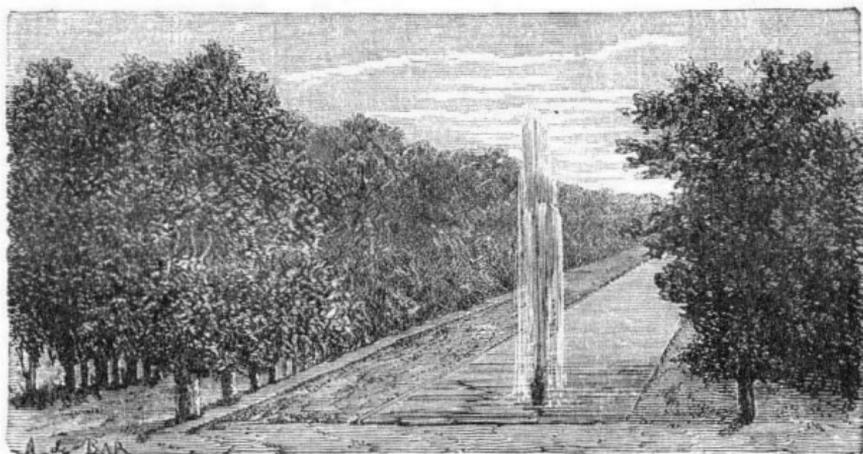


Fig. 34. Jet d'eau.

canal à Fontainebleau. L'eau amenée souterrainement de réservoirs élevés jaillit par un orifice étroit, et, tendant à reprendre son niveau, s'élançe dans les airs. La chute des gouttelettes qui retombent gêne l'ascension des autres et empêche cette ascension d'être aussi considérable. Si un coup de vent a lieu et déplace l'eau latéralement, le jet monte aussitôt à une bien plus grande hauteur, parce qu'il n'est pas arrêté par l'eau qui retombe.

74. **Exception à la loi des vases communicants, phénomènes capillaires.** — La loi des vases communicants est en défaut quand l'un des deux tubes a un diamètre très-petit, quand il est, comme l'on dit, *capillaire*. L'expérience prouve alors (fig. 35) que si le liquide mouille le tube, il

s'élève plus dans la branche capillaire que dans l'autre, et cela d'autant plus que cette branche est plus étroite; c'est l'inverse qui a lieu quand le liquide ne mouille pas. Dans les tubes capillaires en verre, l'eau s'élève au-dessus de son niveau normal, et le mercure reste au-dessous de ce niveau. On remarque en même temps que la

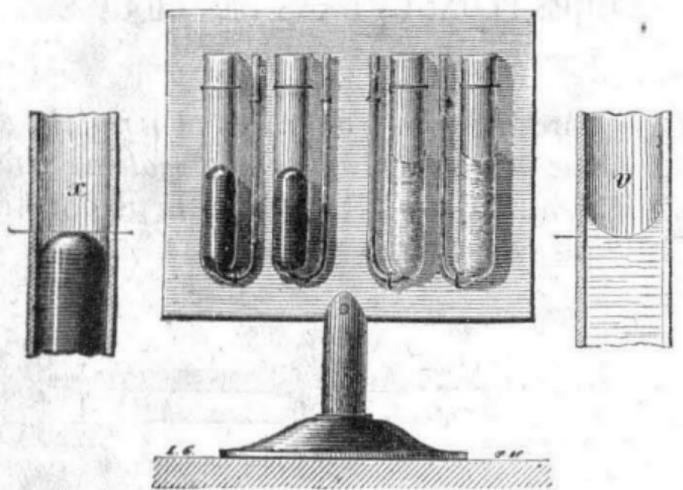


Fig. 35. Appareil pour démontrer la capillarité.

surface n'est plus plane, même quand le tube a un certain diamètre; cette surface forme ce que l'on appelle un *ménisque*, qui est convexe dans le cas du mercure et des autres liquides dont le niveau se déprime, et qui est concave pour les liquides qui tendent à subir l'élévation capillaire.

CHAPITRE III

DES CORPS PLONGÉS DANS LES LIQUIDES

75. **Principe d'Archimède.** — *Tout corps plongé dans un liquide éprouve une poussée de bas en haut égale au poids du liquide dont il tient la place.* Rappelons la démonstration expérimentale de ce principe (fig. 36). On se sert d'une

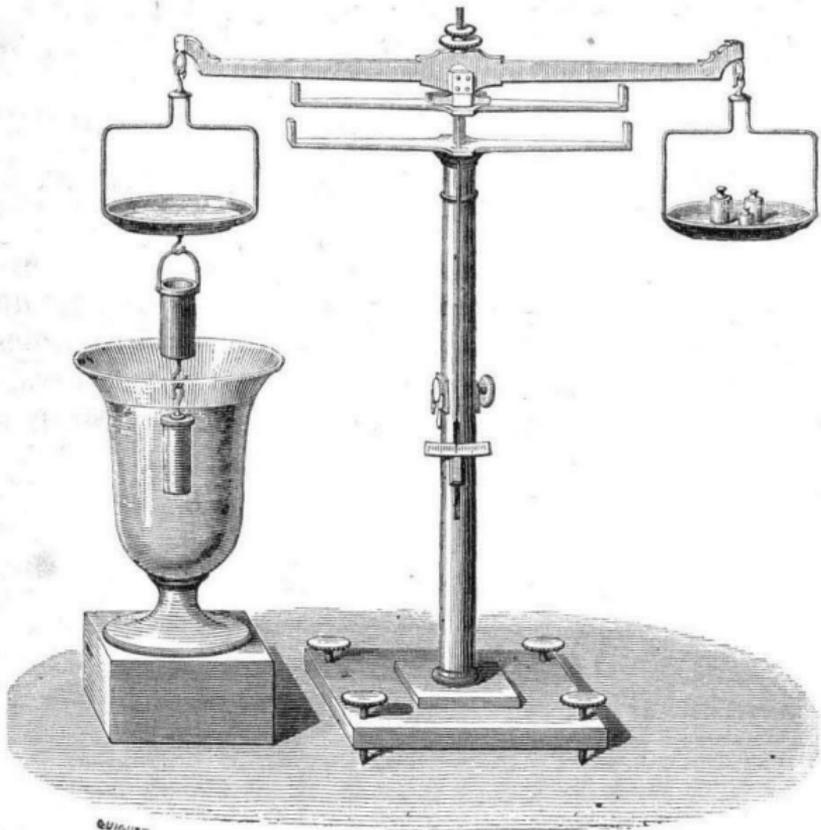


Fig. 36. Principe d'Archimède.

balance hydrostatique, qui ne diffère des autres qu'en ce que son fléau s'élève et s'abaisse à l'aide d'une crémaillère, tout en reposant sur le couteau, et que les bassins portent au-dessous d'eux des crochets. L'on a deux cylindres, l'un plein, l'autre creux, dont la cavité est remplie exactement par le cylindre plein. On attache sous l'un des plateaux le cylindre creux, et, au-dessous de lui, le cylindre plein; on fait équilibre dans l'autre plateau avec des poids quelconques. On place au-dessous des cylindres un vase plein d'eau, et l'on abaisse le fléau à l'aide de la crémaillère. A peine le cylindre plein commence-t-il à s'enfoncer dans l'eau, que l'équilibre est troublé, mais cet équilibre est rétabli si, le cylindre plein plongeant en entier, on a rempli complètement d'eau le cylindre creux; la poussée de bas en haut est donc bien égale au poids d'un volume d'eau égal à celui du corps plongé dans ce liquide. On peut se rendre facilement compte de la raison de cette poussée de bas en haut. En effet, le corps plongé reçoit des liquides des poussées qui sont partout normales à ce corps; les poussées dirigées horizontalement se détruisent les unes les autres; quant aux poussées verticales, celles qui s'exercent à la partie inférieure du corps, et qui, par suite, sont dirigées de bas en haut, sont les plus fortes, car elles sont appliquées sur les points les plus éloignés de la surface libre, et, par suite, elles sont dues à des colonnes liquides plus considérables que les pressions exercées de haut en bas à la partie supérieure du corps plongé.

76. Réaction du corps plongé sur le liquide. — En même temps que le liquide exerce un effort sur le solide qui y est plongé, il reçoit de ce solide une pression égale et contraire. Pour s'en rendre compte, il suffit, dans l'expérience précédente, de placer le vase plein d'eau sur l'un des plateaux d'une balance de Roberval et de lui faire équilibre avec des poids. Au moment où le cylindre pénètre dans l'eau, l'équilibre est rompu dans les deux ba-

lances; si, de part et d'autre, on le rétablit avec des poids, on trouve qu'il faut mettre les mêmes poids dans les deux balances.

77. **Corps flottants.** — Quand un corps flotte à la surface d'un liquide, il est soumis à l'action de deux forces : son propre poids, et une poussée égale au poids du liquide déplacé; il faut pour l'équilibre : 1° que ces deux forces soient égales; 2° que le centre de gravité G du corps (fig. 37) et celui C du liquide déplacé soient sur une même

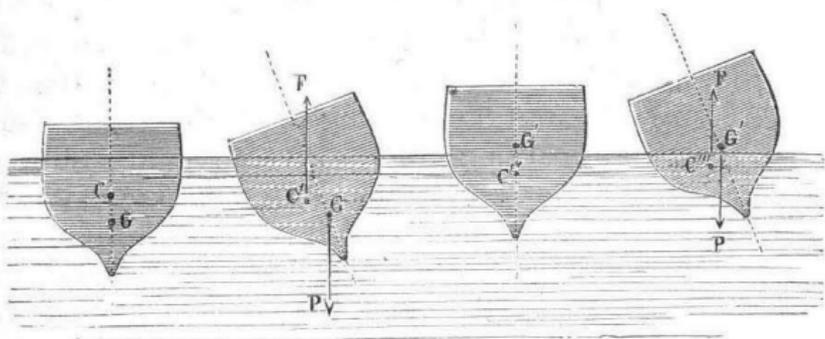


Fig. 37. Équilibre des corps flottants.

verticale. Ce point C est dit *centre de poussée*. La première condition est nécessaire pour que les forces contraires soient égales, et la seconde doit avoir lieu pour que ces forces soient opposées.

78. Les corps flottants peuvent affecter diverses positions d'équilibre, que l'on distingue en *équilibre stable*, *instable* et *indifférent*. L'équilibre est dit stable quand le corps flottant, dérangé un peu de sa position d'équilibre, y revient de lui-même; il est instable quand, si peu dérangé qu'il soit, le corps continue à se déplacer pour aller prendre une autre position. L'équilibre est indifférent quand le corps flottant déplacé reste indifféremment dans toutes les situations. On a un exemple d'équilibre indifférent dans le cas d'une sphère de bois flottant à la surface de l'eau. Un morceau de bois qui aurait la forme d'un

œuf serait en équilibre instable si on le faisait flotter de façon qu'il se tint droit, mais l'équilibre serait stable s'il flottait couché.

79. La stabilité de l'équilibre existe toujours quand le centre de gravité du corps flottant est au-dessous du centre de gravité du liquide déplacé. Dans ce cas, en effet, si l'on incline le corps plongé, la poussée F appliquée en C' et le poids P du corps appliqué en G tendent à le ramener dans la position primitive. Mais, si cette condition est suffisante, elle n'est nullement nécessaire; il peut arriver que le déplacement du corps plongé, déterminant une nouvelle forme du volume d'eau déplacé, la poussée du liquide et le poids du corps concourent à ramener le corps flottant dans sa position première, bien que le centre de gravité du corps flottant soit au-dessus de celui du liquide déplacé. Supposons, par exemple, que le centre de gravité soit en G' , le centre de poussée en C'' , et que le corps immergé s'inclinant, ces points occupent les positions G' et C''' , il est facile de voir que l'équilibre est encore stable, bien que le centre de poussée se trouve au-dessous du centre de gravité. Le lest dont on charge le fond des navires tend à leur donner de la stabilité en descendant leur centre de gravité G au-dessous du centre de poussée C .

80. **Flotteur d'alarme.** — Le flotteur d'alarme des chaudières à vapeur est une application du principe d'Archimède et de la théorie des corps flottants. Il se compose (fig. 38) d'une sphère métallique creuse E flottant sur l'eau de la chaudière et soutenue par un contre-poids P . Tant que le niveau dans la chaudière est suffisamment élevé, la sphère F tend à monter et applique la soupape D sur le tube AA . Si le niveau s'abaisse, la sphère E descend; le levier à l'extrémité duquel elle se trouve pivote autour du point O , la soupape D s'ouvre, la vapeur s'échappe par le tube AA , sort par l'orifice annulaire BB

et, frappant le biseau du timbre CC, produit un sifflement continu.

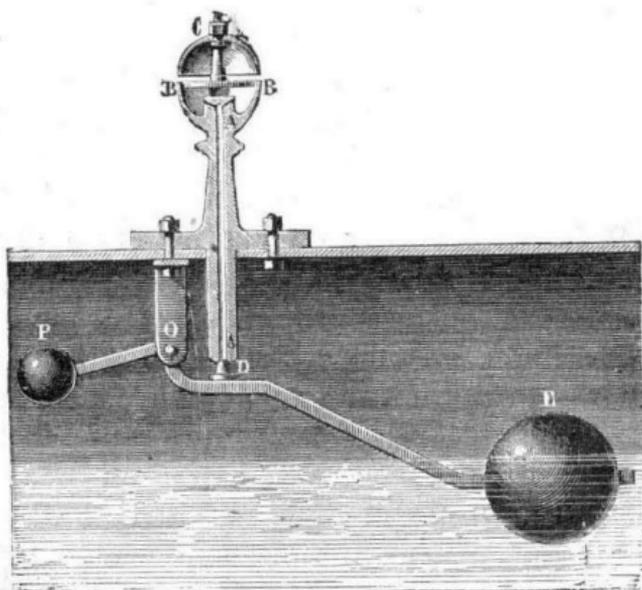


Fig. 38. Flotteur d'alarme.

81. **Régulateur à eau.** — Le même principe est appliqué dans les régulateurs à eau dont certaines machines à vapeur se trouvent munies. La machine, tout en produisant le travail auquel on l'applique, fait mouvoir une petite pompe, qui amène de l'eau dans un réservoir étroit, d'où cette eau s'écoule par un orifice latéral. Si la machine va trop vite, l'écoulement devenant insuffisant, le niveau s'élève dans le réservoir qui se remplit; ce niveau s'abaisse au contraire si la machine va trop lentement. Un flotteur placé dans le réservoir s'élève avec le niveau du liquide et s'abaisse avec lui; ce flotteur est une boule métallique creuse qui mène un levier comme la sphère du flotteur d'alarme et agit alors sur le robinet d'admission de la vapeur pour l'ouvrir davantage, quand la machine se ralentit, et pour diminuer l'afflux de vapeur, quand au contraire il y a trop de rapidité dans la marche. Il est évident que ce régulateur est d'autant plus sensible, que la surface de l'eau dans le réservoir a moins d'étendue.

82. **Robinet à flotteur.** — Certains robinets (fig. 39) s'ouvrent et se ferment d'eux-mêmes, par une application du principe d'Archimède. A la clef *d* du robinet est fixé un levier portant une boule métallique creuse flottant dans

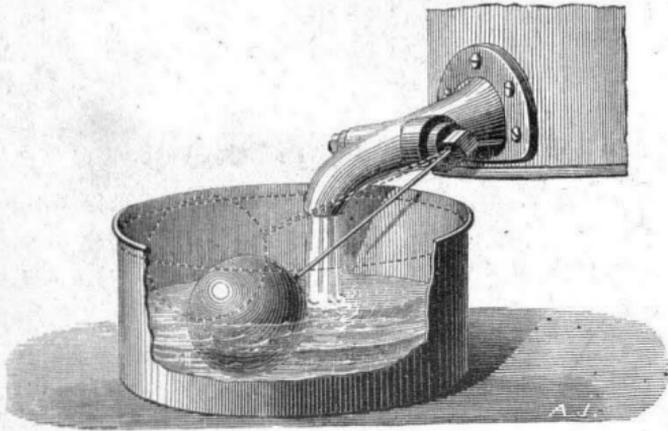


Fig. 39. Robinet à flotteur.

le bassin dans lequel l'écoulement se produit; suivant la position du flotteur, le robinet est ouvert ou fermé. Dans les fabriques de sucre, les sirops sont déversés sur les filtres au moyen de semblables robinets.

83. **Applications diverses du principe d'Archimède.** — Rappelons, comme applications du principe d'Archimède, l'appareil appelé *ludion*, l'emploi que font les poissons de leur vessie natatoire, l'usage des ceintures de natation. (Voir le cours de première année.) C'est en appliquant ce principe que, dans les ports de la Hollande, on peut introduire des navires d'un fort tirant d'eau; on accole à ces navires des bateaux pesamment chargés appelés chameaux; on décharge ces bateaux, qui dès lors tendent à se soulever et à soulever avec eux le navire auquel ils sont unis. Pour transporter leurs obélisques, les Égyptiens creusaient un canal sous ces monolithes, ce canal se remplissait à l'époque des grandes eaux; on amenait sous l'obélisque des

bateaux pesamment chargés; en les déchargeant, ils s'élevaient, et soulevaient l'obélisque qu'ils transportaient ensuite par les canaux navigables. Enfin le principe d'Archimède est appliqué à la recherche des densités.

CHAPITRE IV

MESURE DES DENSITÉS DES CORPS

84. **Densités.** — On appelle *densité* d'un corps solide ou liquide le rapport que l'on obtient en divisant le poids d'un certain volume de ce corps par le poids d'un égal volume d'eau prise à la température de 4 degrés. Cette densité variant avec la température du corps, on est dans l'usage, quand on ne donne aucune indication de température, de considérer la densité du corps quand sa température est de 0°.

85. **Poids spécifique.** — On appelle *poids spécifique* d'un corps solide ou liquide le poids de l'unité de volume de ce corps. La densité est, on le voit, un nombre abstrait, et le poids spécifique un nombre concret, puisqu'il exprime un poids, mais ces deux nombres sont égaux en valeur absolue; cela résulte de ce que l'unité de poids ou kilogramme est précisément le poids de l'unité de volume d'eau, du litre d'eau, à la température de 4°. De là vient que, dans le langage, on confond les expressions de densité et de poids spécifique; nous nous conformerons à l'usage.

86. **Détermination de la densité des corps solides par la méthode de la balance hydrostatique.** — Pour cette détermination comme pour toutes les suivantes, il faut opérer par doubles pesées et en effectuant le moins d'opérations possible, afin de diminuer les chances d'erreur; on doit d'ailleurs s'astreindre aux précautions exigées pour avoir des pesées

exactes (45,46). Les opérations à effectuer sont les suivantes :

1° On place le corps, par exemple un fragment de chrome, sur l'un des plateaux de la balance hydrostatique, et l'on en fait la tare ;

2° On remplace les corps par des poids marqués ; supposons que 36^{sr},84 soit les poids du fragment de chrome.

3° On enlève les poids, et sous le même plateau l'on suspend le corps par un fil très-délié ; en abaissant la crémaillère de la balance, on fait plonger le corps dans un vase plein d'eau ; il faut, pour rétablir l'équilibre troublé, ajouter dans le bassin auquel le corps est suspendu un poids de 6^{sr},21 qui exprime évidemment la poussée exercée par l'eau, c'est-à-dire (75) le poids d'un volume d'eau égal au volume du corps.

La densité cherchée est :

$$D = \frac{\text{poids du corps}}{\text{poids d'un égal volume d'eau}} = \frac{36,84}{6,21} = 5,90.$$

Pour opérer rigoureusement, il faudrait prendre l'eau à 4° et le corps à 0°. On se rapproche le plus possible de ces conditions, ce qui suffit, parce que la densité des corps solides varie peu avec la température.

87. Cette méthode n'est pas applicable aux corps pulvérulents, ni aux corps solubles dans l'eau. Pour ces derniers on a recours à l'artifice suivant : cherchons la densité du sucre ; au lieu de plonger le corps dans l'eau, nous le ferons plonger dans l'alcool, et nous trouverons pour rapport du poids du morceau de sucre à celui d'un égal volume d'alcool, 1,90 : le sucre pèse donc 1,90 fois autant que le même volume d'alcool ; mais la densité de l'alcool est connue et égale à 0,79, c'est-à-dire que la poussée que l'alcool exerçait sur le sucre est 0,79 fois celle qu'eût exercée le même volume d'eau ; donc le poids du morceau de sucre est 1,90 fois les 79 centièmes du poids d'un égal volume d'eau ; et comme $1,90 \times 0,79 = 1,50$, on en conclut que la densité du sucre est 1,50. Si les corps sont po-

reux, on les cire ou on les vernit avant de les plonger dans l'eau, mais il faut que le vernis n'augmente pas sensiblement le poids du corps. Dans le cas des substances plus légères que l'eau, on les leste avec une substance pesante d'une densité connue, et dont l'on tient compte dans le calcul.

88. Quand on a terminé la fabrication d'un canon, il faut s'assurer qu'il n'existe, dans la masse, aucune souf-
fure ; pour cela on prend la densité, mais, au lieu de suspendre le canon sur une balance, ce qui ne serait guère possible, on le suspend par un câble au sein d'un baquet plein d'eau, posé sur une bascule, de sorte, qu'au lieu de mesurer la poussée du liquide sur le canon, l'on mesure la poussée égale et contraire (76) du canon sur le liquide.

Exercices. — 1° Un morceau de plomb pèse 47 gr.,48; plongé dans l'eau il éprouve une poussée égale à 4 gr., 15. Quelle est la densité du plomb ?

2° La densité de l'aluminium fondu est 2,56; un fragment de ce corps éprouve, par immersion dans l'eau, une poussée égale à 3 gr.,78; quel est le poids de ce fragment ?

3° On emploie pour faire un canon du bronze dont la densité est 8,55; le poids du canon est de 255 kilogrammes; en le plongeant dans l'eau, il exerce sur ce liquide une poussée de 27 kilogrammes; y a-t-il une souf-
fure dans le canon? quel est son volume ?

4° On pèse un corps, son poids est 5 grammes; on l'attache à une balle de plomb du poids de 30 grammes; on suspend le tout sous les plateaux d'une balance hydrostatique. La perte de poids dans l'eau est de 9 gr.,5. La densité du plomb est 11,44; quelle est celle de l'autre corps ?



Fig. 40. Flaçon pour la recherche de la densité des solides.

89. Détermination de la densité des solides par le procédé du flaçon. — Un flaçon de verre mince (fig. 40) à large ouverture est fermé par un bouchon creux percé d'un petit trou à sa partie supérieure, de sorte que si l'on

vient à remplir ce flacon d'eau, il sera toujours plein de la même quantité de liquide, l'excès s'écoulant par l'orifice du bouchon.

Cherchons la densité de l'étain. L'on a fait, une fois pour toutes, une tare du flacon vide, accompagné de 70 grammes, par exemple (45). Les opérations qui restent à faire sont les suivantes :

1^o Le flacon plein d'eau étant placé dans l'un des plateaux de la balance à côté du fragment d'étain, il faut 10^{gr},637 à côté du flacon, pour équilibrer la tare placée dans l'autre plateau.

2^o On enlève le corps; il faut alors, pour équilibrer la tare, un poids de 22^{gr},411, ajouté à côté du flacon plein d'eau.

3^o On place le corps dans le flacon, il expulse ainsi un volume d'eau égal au sien; et, pour rétablir l'équilibre, il faut mettre 12^{gr},248 à côté du flacon.

De ces diverses opérations on déduit que le poids de l'étain est 22^{gr},411 — 10^{gr},637, c'est-à-dire 11^{gr},774 et que le poids d'un volume d'eau égal à celui de l'étain est 12^{gr},248 — 10^{gr},637, c'est-à-dire 1^{gr},611. La densité cherchée est donc $\frac{11,774}{1,611} = 7,30$.

90. Le procédé du flacon est le plus précis de tous, il permet l'emploi de balances d'une grande sensibilité. Il est applicable aux corps pulvérulents; seulement, dans ce cas, il faut chasser du flacon les bulles d'air qui restent adhérentes aux poussières; l'on y arrive en exposant pendant quelque temps, dans le vide, le flacon ouvert, contenant l'eau et le corps. Le procédé du flacon permet aussi d'opérer toujours à zéro degré; il suffit, en effet, de modifier un peu le bouchon: on le continue par un tube étroit et ouvert, sur lequel est marqué un trait d'affleurement; le flacon étant depuis un certain temps dans la glace avec l'eau qu'il contient, on fait affleurer cette

eau au trait; de cette manière, l'on opère toujours sur des volumes qui sont les mêmes à zéro degré.

Exercice. — Un morceau d'or pèse 9 gr.,7; un flacon plein d'eau pèse 95 grammes; on met l'or dans le flacon, ce qui expulse une partie de l'eau, et le poids de l'ensemble est de 104 gr.,2. On demande la densité de l'or.

91. Détermination de la densité des corps solides par l'aréomètre de Nicholson. — L'aréomètre de Nicholson (fig. 41) se

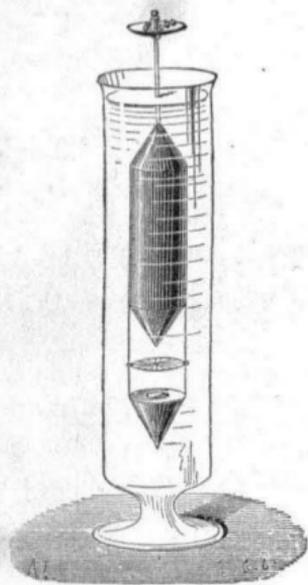


Fig. 41.

Aréomètre de Nicholson.

compose d'un cylindre métallique, généralement en tôle mince vernissée, terminé par deux cônes; au-dessous du cône inférieur, l'appareil soutient un lest qui est un vase rempli de plomb, et dont la base supérieure est concave, de manière à pouvoir servir de support. Le cône supérieur est surmonté d'une mince tige cylindrique, terminée par une capsule. Sur la tige est un repère. L'appareil est lesté de telle façon que, lorsqu'il est plongé dans l'eau, le repère s'élève notablement au-dessus de ce liquide. Les opérations à effectuer pour trouver la densité d'un corps avec cet appareil sont les suivantes :

1° On ajoute des poids dans la capsule supérieure, de façon que l'instrument enfonce dans l'eau juste au point de repère; soient 51^{sr},72 les poids en question.

2° On place sur la capsule un fragment du corps sur lequel on opère; on rétablit l'affleurement avec des poids; il faut pour cela 36^{sr},87. Le poids du corps est donc $51^{\text{sr}},72 - 36^{\text{sr}},87 = 14^{\text{sr}},85$.

3° Le corps est transporté au-dessus du lest dans la cavité formant support. Le poids qu'il faut mettre dans la capsule pour que l'affleurement existe est 38^{sr},90. Donc

le poids de l'eau déplacée par le corps dont on cherche la densité est $38^{\text{gr}},90 - 36^{\text{gr}},87 = 2^{\text{gr}},03$.

La densité cherchée est $\frac{1485}{203} = 7,31$.

Si la substance sur laquelle on opère est plus légère que l'eau, il faut la maintenir plongée; à cet effet, l'appareil porte au-dessus du lest une petite grille métallique, que l'on fait appuyer sur le corps pour le fixer. Cet appareil est fort en usage dans les excursions minéralogiques, parce qu'il est facile à emporter.

92. Détermination de la densité des liquides par le procédé de la balance hydrostatique. — On se sert d'un corps lesté, par exemple d'une petite boule de verre renfermant un peu de mercure et complètement fermée.

Voici la suite des opérations :

1° On suspend, à l'aide d'un fil, cette boule sous l'un des plateaux de la balance, et on fait la tare.

2° Baissant ensuite le fléau de la balance hydrostatique, on fait plonger la boule au sein du liquide sur lequel on expérimente. Ce sera, par exemple, une dissolution de 15 parties en poids de sel marin dans 85 parties d'eau. Pour rétablir l'équilibre qui se trouve rompu dans la balance, il faut ajouter, du côté de la boule, un poids : soit $6^{\text{gr}},98$.

3° On répète l'expérience en faisant plonger la boule dans l'eau; le poids qui rétablit l'équilibre n'est plus que $6^{\text{gr}},28$.

Les deux poids $6^{\text{gr}},98$ et $6^{\text{gr}},26$ représentent dans chaque cas les poids des volumes liquides déplacés (75); leur quotient est donc la densité cherchée $D = \frac{698}{626} = 1,115$.

93. Détermination de la densité des liquides par le procédé du flacon. — Le flacon employé (fig. 42) a la forme d'un tube cylindrique fermé à un bout, l'autre extrémité est réunie par un tube capillaire à un tube entonnoir; sur la partie

capillaire est tracé un repère *a*. Ce flacon ne pourrait, de lui-même, se tenir vertical, il faut le placer sur un petit support.

Quand l'on opère sur un liquide volatil, on ferme le flacon avec un bouchon qui s'oppose à l'évaporation.

Les opérations à effectuer sont les suivantes :

1° On fait, une fois pour toutes, la tare du flacon placé sur son support et accompagné d'un poids connu, 25 grammes par exemple (45).

2° On remplit le flacon jusqu'en *a* du liquide sur lequel on opère, par exemple du chloroforme; ce remplissage se fait comme celui d'un thermomètre. On place le flacon et son support sur la balance, et, pour équilibrer la tare, il suffit d'un poids de 6^{sr},693, par exemple. Le poids du chloroforme qui remplit le flacon jusqu'au repère est donc 25^{sr},000 — 6^{sr},693 = 18^{sr},307.

3° On répète avec de l'eau l'opération faite avec le chloroforme; le poids nécessaire pour rétablir l'affleurement est alors 12^{sr},795, ce qui prouve que le poids de l'eau qui remplit le flacon jusqu'au repère est de 25^{sr},000 — 12^{sr},795 = 12^{sr},205. On en conclut que la densité du chloroforme



Fig. 42.

Flacon pour la recherche de la densité des liquides.

$$\text{est : } \frac{18,307}{12,205} = 1,50.$$

Les liquides étant très-dilatables, il est nécessaire de tenir compte de la température; l'on y arrive en plaçant avant chaque pesée le flacon dans la glace fondante, et faisant affleurer le liquide au repère quand la température est bien celle de zéro degré. On laisse, à cet effet, un excès de liquide après le remplissage, et l'on rétablit l'affleurement, en pompant l'excès de liquide avec du papier buvard que l'on a roulé sur lui-même pour l'introduire dans le goulot du flacon.

Exercice. — Un flacon à densité pèse, quand il est vide, 60 grammes, quand il est plein d'eau, 95 grammes, et quand il est plein de mercure 536 grammes. On demande la densité du mercure.

94. Recherche de la densité des liquides par l'aréomètre de Fahrenheit. — C'est Fahrenheit qui inventa les aréomètres, Nicholson en fit l'application aux corps solides. L'aréomètre de Fahrenheit (fig. 43) consiste en un cylindre de verre, quelquefois d'argent, lesté à sa partie inférieure par une boule contenant du mercure, et muni, à l'autre extrémité, d'une tige sur laquelle est tracé un repère, et qui supporte une capsule. Les opérations sont les suivantes :

1° On pèse l'aréomètre; soit ce poids $32^{\text{gr}},115$.

2° On place l'aréomètre dans le liquide sur lequel on opère, le sulfure de carbone par exemple. Pour amener l'instrument à affleurer dans le liquide à l'endroit du repère, il faut ajouter dans la capsule $13^{\text{gr}},753$. Le poids d'un volume de sulfure de carbone, égal à celui de l'instrument jusqu'au repère, est donc $32^{\text{gr}},115 + 13^{\text{gr}},753 = 45^{\text{gr}},868$.

3° On répète avec de l'eau la même opération. L'affleurement est obtenu par un poids de $4^{\text{gr}},210$. Donc le poids du volume d'eau que l'instrument déplace est $32^{\text{gr}},115 + 4^{\text{gr}},210$ ou $36^{\text{gr}},325$, et la densité cherchée est $D = \frac{45,868}{36,325} = 1,293$.

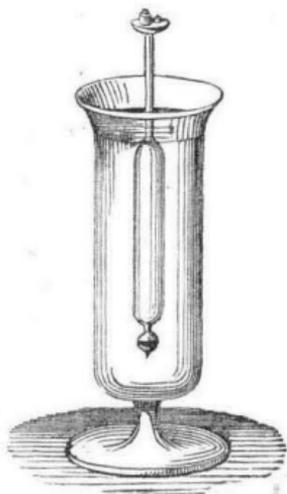


Fig. 43.
Aréomètre de Fahrenheit.

95. Aréomètres à poids constants. — Dans les aréomètres de Fahrenheit et de Nicholson, le volume immergé de l'instrument est le même dans chaque opération, d'où le nom d'*aréomètres à volume constant* qui leur a été donné. On a construit d'autres instruments dans lesquels le volume immergé est variable; mais on ne les surcharge

d'aucun poids, d'où le nom d'*aréomètres à poids constant*. Ils ne s'appliquent qu'aux liquides, et, pour la plupart, ne donnent point la densité du corps, mais seulement le moyen de reconnaître si divers échantillons d'un même liquide ont la même densité. Tels sont les aréomètres de Baumé. Ces appareils ont l'avantage de donner leurs indications par une simple lecture, sans qu'on ait à faire aucun calcul, ni aucune pesée ou opération analogue. Ils suffisent à l'industriel, auquel ils apprennent si la marchandise livrée est dans un état de pureté et de concentration convenable. Nous allons décrire les aréomètres de Baumé, dont l'un, appelé *pèse-acide*, *pèse-sel*, *pèse-sirop*, est employé pour les liquides plus denses que l'eau, tandis que le second, appelé *pèse-liqueur*, ne peut servir que pour les liquides moins denses que l'eau.



Fig. 44.
Pèse-acide
de Baumé.

96. Pèse-acide de Baumé. — Cet appareil consiste (fig. 44) en une sphère de verre lestée par du mercure, et surmontée d'une tige cylindrique d'un diamètre d'autant plus faible, quel'on veut rendre l'appareil plus sensible. Le lest est tel que dans l'eau l'appareil affleure vers le haut de la tige. On marque en ce point zéro; puis l'on fait une dissolution de 15 parties de sel marin dans 85 parties d'eau; on plonge l'appareil dans cette liqueur et on marque 15 au point d'affleurement. L'intervalle compris sur la tige entre ces deux repères est partagé en 15 parties égales, et les divisions sont prolongées sur toute la tige. De ce mode de graduation résulte nécessairement qu'à une densité déterminée correspond un degré également déterminé; ainsi l'acide sul-

furique du commerce doit marquer 66°, l'eau-forte 28°, le sulfure de carbone pur 35°, la glycérine 34°, etc. Dans la fabrication du sucre, on filtre les jus quand ils ont été amenés à 25° du pèse-sirop.

97. **Pèse-liqueur de Baumé.** — La forme de cet instrument (fig. 45) est la même que celle du précédent. On leste de façon qu'il affleure dans l'eau vers le bas; on marque 10 degrés en ce point et zéro au point d'affleurement dans une liqueur formée par la dissolution de 10 parties de sel marin dans 90 parties d'eau. On partage en 10 parties l'espace compris entre ces deux points d'affleurement, et l'on prolonge les divisions sur la tige. L'usage de cet instrument est tout semblable à celui du précédent. Cependant, quand il s'agit de mélanges d'alcool et d'eau, on lui préfère l'alcoomètre centésimal de Gay-Lussac.



Fig. 45.
Pèse-liqueur
de Baumé.

98. **Alcoomètre centésimal.** — Cet appareil (fig. 46) a la même forme que les précédents. Il est lesté de façon à affleurer dans l'alcool pur, vers le haut de sa tige; en ce point, l'on marque 100°. On fait ensuite un mélange de 95 volumes d'alcool pur et d'assez d'eau pour qu'après la contraction du mélange l'on obtienne 100 volumes. On plonge l'alcoomètre dans ce mélange, et l'on marque 95° au point d'affleurement. On répète la même opération en prenant des mélanges contenant, pour 100 volumes, 90 volumes d'alcool, puis 85, 80, etc., et l'on inscrit ces nombres aux points d'affleurement obtenus. On partage, en cinq parties d'égale longueur les intervalles compris sur la tige entre les différents repères. Pour évaluer la proportion d'alcool qui entre dans une liqueur, dans de l'alcool du commerce, par exemple, il suffit, s'il n'entre dans cette liqueur que de l'alcool et de l'eau, d'y plonger l'alcoomètre; la division qui correspond au point d'affleurement indique combien il y a d'alcool dans 100 parties du liquide

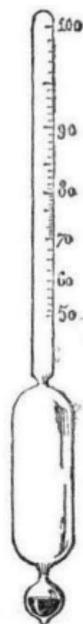


Fig. 46.
Alcoomètre
centésimal.

99. **Alambic Salleron.** — Si l'on n'a pas affaire à un simple mélange d'alcool et d'eau, il faut distiller une portion du liquide. Supposons que l'on veuille déterminer le degré alcoométrique d'un vin, on se servira de l'alambic de M. Salleron (fig. 47) ou de tout autre appareil analogue. Une éprouvette à pied porte vers le haut un trait *a*; on la remplit jusqu'en ce point, et le vin, ainsi mesuré, est introduit dans un ballon B que l'on chauffe avec une lampe A, et qui est fermé par un bouchon en caoutchouc, percé d'un trou dans lequel s'engage un petit tube de cuivre coudé. Celui-ci est réuni par un tube

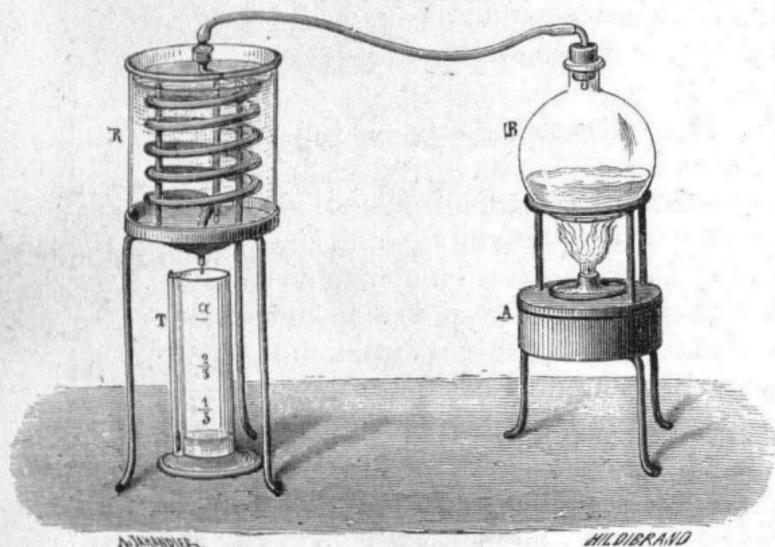


Fig. 47. Alambic Salleron.

en caoutchouc à un petit serpentín placé dans un réfrigérant R plein d'eau froide. Le liquide condensé dans cette distillation est recueilli dans l'éprouvette qui a servi à mesurer le vin. On arrête la distillation quand l'éprouvette est remplie au tiers. Des expériences de Gay-Lussac ont prouvé que, dans ce cas, tout l'alcool d'un vin ordinaire a distillé. On ajoute de l'eau pour ramener au repère *a*, et l'on a ainsi un mélange d'eau et d'alcool ayant une richesse alcoolique exactement égale à celle du vin

lui-même. C'est dans ce liquide que l'on plonge l'alcoomètre; le degré qu'il marque est celui du vin.

100. Tables de correction. — Il faut remarquer cependant que, la densité d'un liquide variant avec sa température, les aréomètres à poids constant donneraient des indications fautives si on ne les employait toujours dans des liquides à la même température, ou plutôt si l'on ne corrigait les indications de la différence de température. Tous ces appareils sont gradués pour la température de 15° , dont on s'écarte toujours peu à l'intérieur des appartements; cependant, comme il serait difficile d'opérer toujours dans les mêmes conditions, il faut recourir à des tables de correction que les constructeurs fournissent avec leurs instruments. Ainsi, par exemple, on distille un vin dans l'alambic Salleron; à la fin de l'opération, quand on a rempli d'eau jusqu'au trait *a* et agité pour bien établir le mélange, on note la température d'un thermomètre T placé dans l'éprouvette qui contient le liquide, et, en même temps, on relève l'indication de l'alcoomètre. Si l'on trouve ainsi que la température est 20° et le degré alcoométrique égal à 15, les tables indiquent que la valeur trouvée est trop forte d'une unité, et que la proportion d'alcool est seulement de 14 pour 100.

101. Poids d'un corps solide ou liquide dont on connaît le volume et la densité. — La connaissance de la densité d'un corps permet d'en trouver le poids connaissant le volume. En effet, la densité et le poids spécifique sont représentés par le même nombre, et ce nombre exprime le poids de l'unité de volume. Donc le poids d'un corps s'obtient en multipliant son volume par sa densité.

102. Densité des gaz. — Il ne devrait pas y avoir de différence entre la définition de la densité d'un gaz et celle d'un corps solide ou liquide. Mais les nombres auxquels on serait conduit auraient une valeur fort petite; la den-

sité de l'hydrogène serait, par exemple, 0,000896. Pour éviter l'emploi de fractions décimales aussi complexes, on prend pour densité d'un gaz le rapport qui existe entre le poids d'un certain volume de ce gaz à la température de 0° et sous la pression atmosphérique, et le poids d'un égal volume d'air, à la même température et sous la même pression.

103. Recherche de la densité des gaz. — La recherche de la densité d'un gaz est une opération fort délicate; en principe, l'on pèse un ballon successivement vide, plein du gaz considéré et plein d'air. On connaît ainsi les poids de volumes égaux du gaz et de l'air. En divisant ces deux poids l'un par l'autre, on a la densité cherchée. Les difficultés pratiques de l'opération entraînent à de nombreuses corrections que nous ne pouvons exposer ici.

104. Poids d'une masse de gaz dont on connaît le volume et la densité. — Le poids d'une masse de gaz, même quand la température est de 0° et la pression celle de l'atmosphère, n'est plus exprimé par le produit du volume par la densité. En effet, par exemple, quand on dit que la densité du chlore est 2,44, cela veut dire (102) que le poids d'un litre de chlore est 2,44 fois celui d'un litre d'air, et comme le litre d'air pèse 1^{er},2931, il s'ensuit que le litre de chlore pèse $1^{\text{er}},2931 \times 2,44$ ou 3^{er},155, et que, pour avoir le poids d'une masse d'un gaz à la température de 0° et sous la pression ordinaire de l'atmosphère, il faut multiplier le volume du gaz, non-seulement par sa densité, mais en outre par le poids de l'unité de volume d'air.

Tableau des densités des corps solides.

NOMS DES CORPS.	DENSITÉS.	NOMS DES CORPS.	DENSITÉS.
Cuivre fondu.	8,85	Verre à vitres	2,53
Cuivre laminé.	8,95	Verre à glaces.	2,46
Zinc fondu.	6,95	Cris al.	3,33
Zinc laminé.	7,19	Verré de St-Gobain.	2,49
Fer fondu.	7,21	Porcelaine de Sèvres.	2,24
Fer forgé.	7,79	Porcelaine de Chine.	2,38
Fer martelé.	7,90	Porcelaine de Saxe.	2,49
Argent fondu.	10,47	Albâtre calcaire.	2,76
Or fondu.	19,26	Albâtre gypseux	2,31
Platine fondu.	21,53	Porphyre.	2,70
Platine laminé.	22,06	Marbre de Carrare	2,72
Améthyste orientale.	3,92	Marbre de Paros	2,84
Diamant.	3,55	Jais.	1,31
Émeraude orientale.	3,95	Bronze des statues.	8,95
Rubis oriental.	3,91	Laiton.	8,43
Saphir oriental.	3,98	Maillechort.	8,61
Turquoise.	2,84	Acier trempé.	7,82

Tableau des densités des corps liquides.

NOMS DES CORPS.	DENSITÉS.	NOMS DES CORPS.	DENSITÉS.
Eau de mer.	1,027	Alcool absolu.	0,813
Mercure.	13,596	Éther.	0,736

Tableau des densités des corps liquides (suite).

NOMS DES CORPS.	DENSITÉS.	NOMS DES CORPS.	DENSITÉS.
Acide sulfurique monohydraté. . .	1,854	Benzine (à 15°). . .	0,850
Acide azotiq. fumant	1,520	Pétrole distillé naphte)	0,847
Sulfure de carbone	1,293	Huile d'olive (à 12°).	0,919
Glycérine (à 15°). .	1,280	Huile de colza (à 15°)	0,925
Essencè de citron. .	0,847	Sang humain . . .	1,055
— de girofle .	0,920	Salive humaine. . .	1,006
— d'amandes amères.	1,043	Lait de vache. . . .	1,032
— de rose. . .	0,832	Lait d'ânesse . . .	1,035

Tableau des densités des gaz.

NOMS DES CORPS.	DENSITÉS.	NOMS DES CORPS.	DENSITÉS.
Oxygène.	1,1056	Acide sulfureux. . . .	2,1930
Hydrogène.	0,0693	— sulfhydrique.. .	1,1912
Azote.	0,9714	— chlorhydrique. .	1,2474
Chlore.	2,4216	Cyanogène.	1,8064
Oxyde de carbone .	0,9567	Hydrogène phosphoré .	1,1840
Acide carbonique. .	1,5290	Ammoniaque.	0,5967
Protoxyde d'azote. .	1,5269	Hydrogène protocarb. .	0,5590
Bioxyde d'azote. . .	1,0388	Hydrogène bicarboné. .	0,9850

Exercices : 1° Un corps pèse 25 grammes dans l'air : dans l'eau, il ne pèse plus que 20 grammes, et dans un autre liquide 15 grammes. En conclure la densité du corps et celle du second liquide.

2° L'on a deux vases communiquants, l'un est rempli de mercure jusqu'à une hauteur de 0^m,175, l'autre est rempli d'un liquide qui s'élève jusqu'à 1^m,42; ces deux colonnes se font équilibre. On demande la densité de ce dernier liquide, connaissant la densité du mercure qui est 13,596.

3° Un ballon renferme 8 gr., 548 d'air, on le remplit de protoxyde d'azote dont la densité est 1,527. On demande quel sera le poids de ce gaz, la température et la pression ne changeant pas.

4° Un ballon pèse vide 263 gr. 525; plein d'air à la température de 0° et sous la pression moyenne de l'atmosphère, il pèse 375 gr. 825. Quelle est sa capacité ?

Le même ballon plein de gaz pèse 293 gr. 687, les conditions de température et de pression restant les mêmes. Quelle est la densité de ce gaz ?

5° La densité de l'air considéré comme un simple mélange d'oxygène et d'azote é'ant prise pour unité, la densité de l'azote étant 0,971346 et celle de l'oxygène 1,105612; en déduire : 1° Combien il y a de litres d'oxygène et d'azote dans 100 litres d'air; 2° combien il y a de grammes d'oxygène et d'azote dans 100 grammes d'air.

CHAPITRE V

PRESSION ATMOSPHÉRIQUE, BAROMÈTRE.

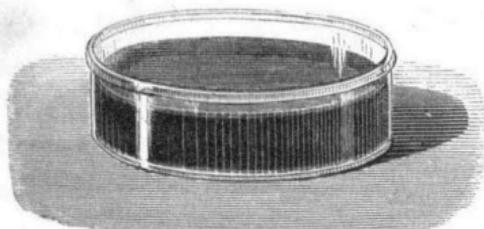
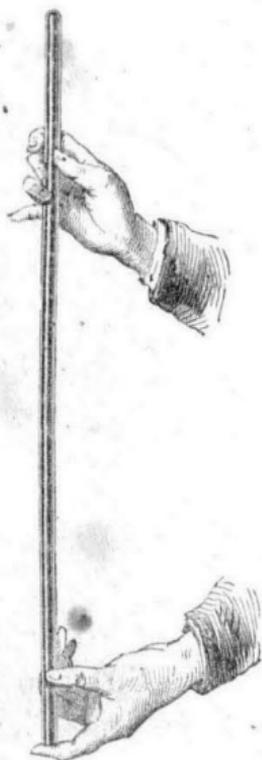


Fig. 48. Expérience de Torricelli.

105. **Pression atmosphérique.** — L'air est soumis, comme les autres corps de la nature, à l'action de la pesanteur; il en résulte qu'il exerce une pression sur tous les solides ou liquides qui s'y trouvent plongés. C'est cette pression que l'on nomme la *pression atmosphérique*. C'est elle qui, dans l'expérience de Torricelli, maintient le mercure soulevé. Rappelons cette expérience développée dans le cours de première année.

106. **Expérience de Torricelli.** — On prend un tube de verre de 80 centimètres de longueur environ, fermé à une de ses extrémités; on le remplit de mercure, on bouche avec le doigt

l'extrémité ouverte, et l'on renverse, en faisant plonger cette extrémité dans un vase plein de mercure; on enlève le doigt, le mercure s'abaisse et vient se fixer à un certain niveau. Sur le plan horizontal de la surface libre du liquide dans la cuvette (fig. 48) la pression hydrostatique doit être la même en tous les points (55). A l'intérieur du tube, cette pression est le poids d'une colonne de mercure ayant pour base l'unité de surface et pour hauteur la distance au plan de la surface du liquide dans le tube. Hors du tube existe la pression atmosphérique, dont la valeur est la même que celle exercée par le mercure, et se trouve ainsi mesurée de par le poids de la colonne soulevée.

107. Évaluation des pressions atmosphériques par les hauteurs de colonnes verticales de mercure. — La pression atmosphérique peut être évaluée par la hauteur d'une colonne de mercure.

Supposons, par exemple,

qu'à des époques différentes la pression de l'atmosphère élève le mercure dans le tube de Torricelli à 76^{cm} , 77^{cm} , 75^{cm} . Les pressions hydrostatiques correspondantes de l'atmosphère seront égales aux poids de colonnes de mercure, dont les hauteurs sont 76^{cm} , 77^{cm} , 75^{cm} ; ces nombres

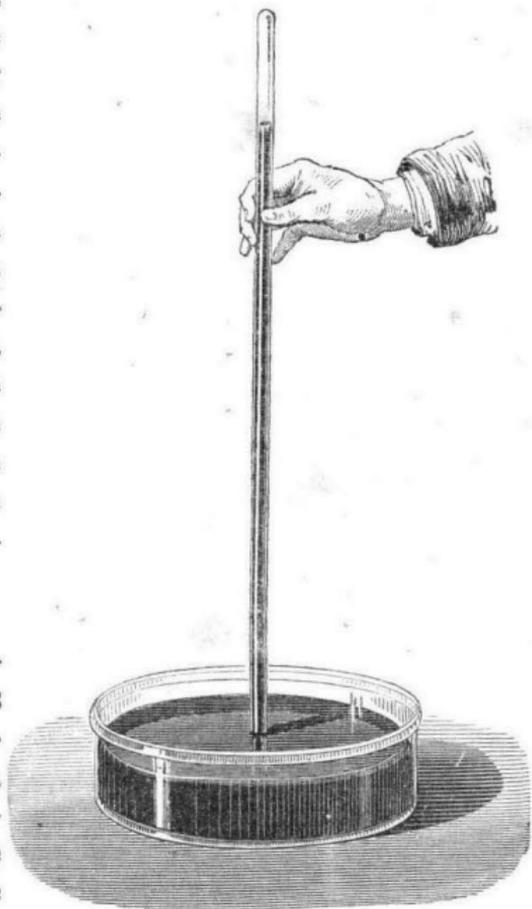


Fig. 48. Expérience de Torricelli.

sont donc proportionnels aux pressions et leur servent de mesure. Il est évident d'ailleurs qu'il s'agit de la distance verticale du niveau du mercure dans le tube au niveau dans la cuvette, car la pression d'une colonne liquide ne dépend (54) que de cette différence de niveau. Si l'on avait, plongeant dans la même cuvette, divers tubes de Torricelli inclinés diversement sur la verticale, les colonnes liquides auraient dans ces tubes des longueurs différentes, mais elles auraient toutes leur niveau supérieur dans un même plan horizontal.

108. Valeur de la pression atmosphérique. — En moyenne, la hauteur du mercure soulevé dans le tube de Torricelli est de 760 millimètres ; cette hauteur, tout en mesurant la pression atmosphérique, n'exprime pas pour cela sa valeur en kilogrammes. Pour avoir cette valeur il suffit de trouver le poids d'un cylindre de mercure dont la base est 1 centimètre carré et la hauteur 76 centimètres. Le volume de ce cylindre est de 76 centimètres cubes et son poids (101), le produit de 76 centimètres cubes par la densité du mercure 13,596. Ce produit $76 \times 13,596 = 1033$ représente des grammes ; on s'en rend compte en remarquant que le poids de 1 centimètre cube d'eau étant 1 gramme, celui de 1 centimètre cube de mercure doit être 13,596 fois plus considérable d'après la définition des densités (84). C'est cette pression d'à peu près 1 kilogr. par centimètre carré que l'on appelle pression d'une atmosphère.

109. Construction des baromètres. — On donne le nom de baromètre à tout appareil destiné à mesurer la pression atmosphérique. Ceux de ces instruments que l'on rencontre dans les appartements ont été décrits dans le cours de première année. Presque tous ont pour point de départ l'expérience de Torricelli ; mais il faut prendre certaines précautions dans la construction de l'appareil pour qu'il donne des indications précises. Le

tube doit être bien droit, régulier dans toute sa longueur et exempt de bulles et de stries; sans cette régularité, la forme de la surface terminale du mercure ne serait pas la même, quelle que soit la hauteur du liquide. On lave ce tube à l'acide azotique bouillant, on le rince à l'eau distillée, on le sèche, on le ferme à un bout, et on souffle à l'autre une ampoule qui se termine par une pointe éfilée. Le mercure doit être pur, afin que le liquide employé soit bien le même dans tous les baromètres. Il faut le débarrasser des métaux étrangers qu'il peut contenir, et surtout d'un oxyde noir qui se forme spontanément à l'air,

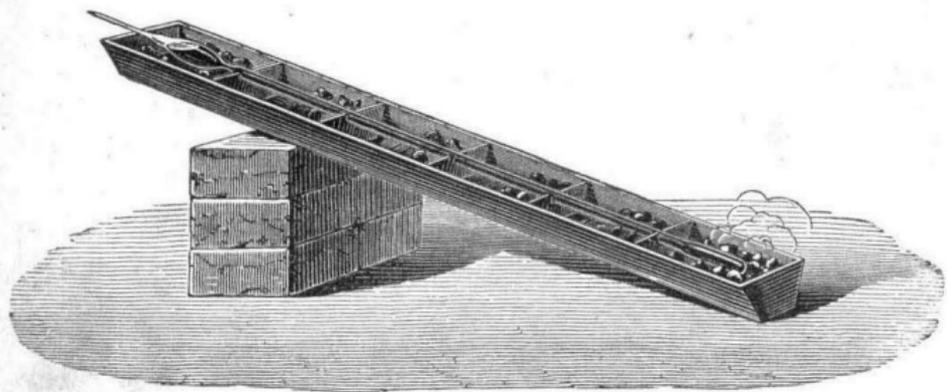


Fig. 49. Construction des baromètres.

termit le métal et le fait adhérer au verre. Pour cela, on fait digérer avec de l'acide azotique qui dissout d'abord les métaux étrangers et l'oxyde avant d'attaquer le mercure. On lave ensuite le métal à grande eau, on le sèche avec du papier buvard et on le conserve dans un vase fermé contenant aussi peu d'air que possible. On remplit le tube de mercure pur jusqu'à la naissance de l'ampoule. De nombreuses bulles d'air et d'humidité sont interposées entre le mercure et le verre; il faut les chasser, car si, à ce moment, l'on retournait le tube, comme dans l'expérience de Torricelli, ces bulles monteraient lentement le long des parois et finiraient par se répandre dans cet.

espace vide appelé *chambre barométrique* qui se trouve au-dessus du mercure; là elles exerceraient une pression qui diminuerait la hauteur de la colonne liquide soulevée. On chasse toutes ces bulles en disposant le tube sur une grille (fig. 49) inclinée. On place sur cette grille à quelque distance du tube et dans toute la longueur, des charbons ardents; le mercure se dilate et une portion vient se loger dans l'ampoule. On promène ensuite avec une pince, le long du tube, un gros charbon enflammé, bientôt la surface du mercure prend un aspect mat, une multitude de petites bulles se forment le long du tube, se réunissent les unes aux autres et glissent jusqu'à la partie supérieure. Il ne faut pas chauffer de façon à avoir des bulles trop volumineuses, elles diviseraient la colonne, en soulevaient une portion qui, retombant ensuite, briserait le tube par son choc. L'opération terminée, la surface du mercure a pris le long du tube un aspect brillant, toutes les bulles ont disparu. On détache alors l'ampoule, on achève s'il y a lieu de remplir le tube avec du mercure sec et chaud et on renverse dans la cuvette. On reconnaît que l'appareil a été bien construit, et que la chambre barométrique ne contient pas d'air en inclinant l'appareil; le mercure doit en frappant le fond du tube faire entendre un bruit sec.

110. **Baromètre de Fortin.** — De tous les baromètres, le plus employé pour les observations météorologiques est celui de Fortin. Dans cet instrument (fig. 50), la cuvette B se compose à sa partie supérieure d'un large tube de verre mastiqué par le haut dans un disque de buis G et par le bas dans un cylindre du même bois I; ce tube de verre est d'ailleurs maintenu par trois tiges de cuivre avec écrous qui réunissent deux anneaux de cuivre, l'un posé sur le disque G, l'autre entourant le cylindre I. Ce cylindre continue la paroi de la cuvette, de même qu'un second cylindre OO se posant sur le premier; sur la base de ce dernier est ficelé un sac P en peau de chamois;

un morceau de buis D, collé sur le fond du sac, reçoit la pointe d'une vis V. L'écrou de cette vis est le fond d'un cylindre métallique, lequel se visse sur l'anneau de cuivre qui entoure I. La cuvette est donc en verre, buis et peau de chamois, mais revêtue de cuivre, excepté dans sa portion en verre. Le tube T descend jusque vers le milieu de la cuvette, il est retenu et fixé par une peau de chamois ficelée sur lui en un point où il porte un étranglement, et ficelée d'autre part à un rebord *f* de la pièce de bois G. Une pointe d'ivoire *a* descend dans la cuvette : elle doit affleurer le mercure au moment de chaque observation. Pour cela on fait mouvoir la vis V ; si on la relève, la capacité intérieure de la cuvette diminuant par le mouvement du fond en peau P, le

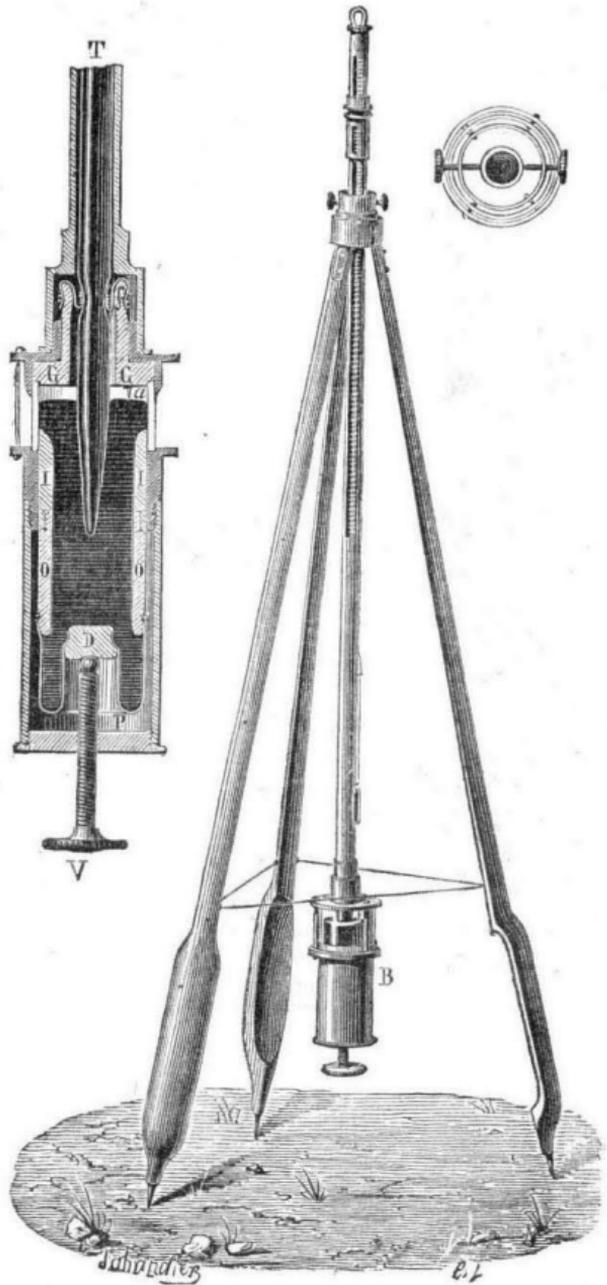


Fig. 50. Baromètre de Fortin.

vette diminuant par le mouvement du fond en peau P, le

niveau du mercure s'élève dans la cuvette; il s'abaisse quand on dévisse V, et de cette façon l'affleurement s'obtient facilement. Autour du tube est une gaine métallique portant vers la partie supérieure deux fentes; sur le bord de l'une d'elles est une échelle graduée en millimètres dont le zéro, s'il était marqué, correspondrait à l'extrémité

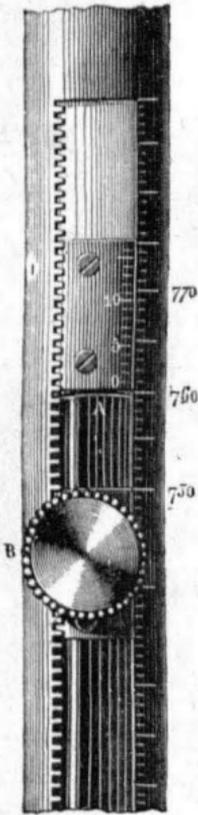


Fig. 51. Vernier du baromètre de Fortin.

de la pointe *a*. Entre les deux fentes on voit le sommet de la colonne de mercure. Un curseur annulaire se meut entre le tube et sa gaine, il est formé de deux anneaux reliés entre eux: l'un (fig. 51) est un vernier qui glisse le long de l'échelle, l'autre porte un bouton B auquel est fixée une roue dentée engrenant avec une crémaillère découpée dans le bord de la fente; en tournant le bouton, on déplace le curseur. Ce vernier sert à apprécier les dixièmes de millimètre. Pour faire une lecture, on amène le bord inférieur de l'anneau-vernier à affleurer la partie supérieure de la surface A du mercure, qui est bombée par le fait de la capillarité. L'air atmosphérique doit pouvoir exercer sa pression sur le mercure de la cuvette; cela lui est facile, car la gaine de laiton ne touche pas le tube: elle est tenue éloignée par de petits morceaux de liège placés de distance en distance; l'air est en communication libre par cet espace avec la peau de chamois qui fixe le tube à la cuvette; les pores de cette peau sont assez larges pour être facilement perméables aux gaz.

111. **Suspension de Cardan.** — Pour que la lecture faite sur l'échelle représente bien la distance verticale des deux niveaux dans le tube et dans la cuvette, il faut que l'échelle soit parfaitement verticale, et, par suite, qu'il en

soit de même de l'axe du baromètre. On y arrive en suspendant l'instrument à l'aide d'un procédé dû à Cardan ¹. Le tube est placé au centre de deux cercles concentriques; le plus grand de ces cercles est supporté par trois pieds reposant sur le sol, le second est soutenu à l'intérieur du premier par deux tiges opposées, autour desquelles il peut tourner; enfin le tube est saisi, vers sa partie supérieure, par deux vis horizontales opposées l'une à l'autre, ayant leur écrou dans le deuxième anneau, de sorte que le tube peut prendre un mouvement autour de l'axe formé par les deux vis, mais cet axe est perpendiculaire à celui autour duquel tourne l'anneau intérieur. Le tube, susceptible de se déplacer ainsi dans deux directions rectangulaires entre elles, peut prendre toutes les directions possibles; il se placera donc de façon que son centre de gravité soit dans la verticale du centre de suspension. Comme d'ailleurs l'appareil est parfaitement symétrique autour de cet axe, son centre de gravité est sur cet axe, et le tube se trouve vertical.

112. Transport du baromètre de Fortin. — Quand on veut transporter le baromètre, par exemple pour faire des observations pendant un voyage, on commence par remonter la vis V, le mercure s'élève dans la cuvette, finit par la remplir, et, l'action de la vis continuant, la pression produit l'ascension du mercure dans le tube jusqu'à ce que la chambre barométrique soit devenue nulle; à ce moment l'on doit s'arrêter. On ne craint plus de voir le baromètre brisé par le choc du mercure contre la paroi. On renferme l'appareil dans un étui; on le transporte la cuvette en haut. Quand on veut observer, on replace l'appareil dans la suspension de Cardan et on ramène le mercure à l'affleurement de la pointe d'ivoire.

113. Observation du baromètre. — Pour observer le baro-

1. Cardan (Jérôme), né à Paris en 1501, mort en 1576, savant d'un esprit très-bizarre.

mètre, il faut se conformer à l'instruction suivante, émanée de l'Observatoire de Paris : « On tourne la vis V, « placée au-dessous du réservoir, jusqu'à ce que le niveau de mercure dans la cuvette affleure exactement à « l'extrémité inférieure de la pointe d'ivoire. Quand le « mercure de la cuvette est trop bas, en plaçant l'œil à la « hauteur de la pointe ou un peu au-dessus, du côté opposé à la lumière, on aperçoit un jour entre la pointe « et son image réfléchié dans le mercure. Quand le mercure est, au contraire, trop haut, les objets rectilignes « réfléchis à la surface du métal sont déformés dans le « voisinage de la pointe. Une feuille de papier blanc, sur laquelle est tracée une ligne noire verticale et que l'on place en arrière de la cuvette, peut très-bien servir à cet examen. L'affleurement étant obtenu, on donne, avec le doigt, quelques petits chocs à l'instrument pour vaincre l'adhérence du mercure au verre et rendre à l'action capillaire, dans le tube barométrique, sa valeur normale. Les chocs donnés avant l'affleurement dans la cuvette ne dispenseraient pas d'en produire après. On fait ensuite mouvoir le curseur de la tige du baromètre jusqu'à ce que l'œil, placé dans le plan des deux bords supérieurs de la double fenêtre du curseur, cesse d'apercevoir du jour entre ces bords et le sommet arrondi du mercure. Cette opération se trouve également facilitée par une feuille de papier blanc bien éclairée, que l'on pose en arrière du baromètre. Le vernier du curseur fait connaître la hauteur du mercure en millimètres et fractions de millimètre. »

114. **Corrections barométriques.** — Il faut faire subir certaines corrections à la lecture faite sur l'échelle du baromètre. D'abord il est très-rare que le zéro de la division coïncide avec l'extrémité de la pointe d'ivoire, même dans les baromètres les mieux construits; les déplacements, les dilatations, ou simplement le poids de la cuvette, tendent à changer la position du zéro. — L'action capillaire du

verre empêche, dans les baromètres à tubes étroits, le mercure de monter à son niveau; il faudrait donner à ces tubes trois centimètres au moins de diamètre pour que cette action fût insensible; on corrige cette erreur, en même temps que la précédente, en comparant au même moment la hauteur du baromètre considéré à celle d'un baromètre fixe, installé à demeure dans un observatoire, et ayant un tube d'un diamètre suffisant pour qu'il ne s'y produise aucune erreur capillaire. La différence donnera la correction fixe qu'il faudra faire subir à toutes les lectures de l'instrument. — Reste l'influence de la température. Si l'on fabriquait des baromètres avec des liquides différents (voir le cours de première année), les hauteurs des colonnes soulevées seraient en raison inverse des densités. Or, du mercure à 15° n'a pas la même densité que du mercure à zéro, et du mercure porté à 15° ne donne pas la hauteur que l'on veut mesurer, qui est celle du baromètre à zéro. Il existe des tables qui permettent d'effectuer la correction résultant de la température. Le baromètre porte d'ailleurs un thermomètre dont on doit faire l'observation en même temps que celle du baromètre.

115. Baromètre de Gay-Lussac. — Gay-Lussac avait cru se mettre à l'abri de toute erreur capillaire en construisant un baromètre particulier (fig. 52). Cet instrument se compose de deux portions de tubes de diamètres identiques réunis par un tube capillaire *bc*, ce qui donne à l'appareil la forme d'un siphon renversé. L'accès de l'air a lieu par un trou *a* assez fin pour que la capillarité empêche le mercure de sortir par cet orifice s'il se trouvait à sa hauteur. Une gaine métallique entoure le baromètre; cette gaine porte deux échelles divisées, l'une ascendante, l'autre descendante, ayant même zéro situé vers le milieu du tube. Deux curseurs permettent de relever les distances des deux niveaux du mercure au zéro des échelles; la somme des deux longueurs observées donne la différence de niveau, c'est-à-dire la hauteur barométrique.

C'est à cause de l'égalité de diamètre des deux branches que l'on pouvait espérer que les deux effets capillaires aux deux surfaces terminales du mercure se compenseraient; mais il arrive que, par l'effet du temps, la capillarité varie inégalement dans la branche fermée et dans la branche ouverte, de manière qu'une correction est encore

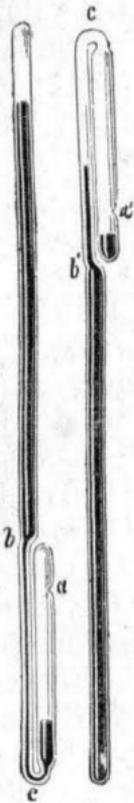


Fig. 52 et 53.
Baromètre
de Gay-Lussac.

nécessaire. Si l'idée de Gay-Lussac avait été rigoureusement exacte, l'on aurait pu sans inconvénient donner à ces baromètres un diamètre de 4 à 5 millimètres seulement, ce qui eût été fort avantageux pour le transport. Quand on veut transporter un baromètre de Gay-Lussac, on le retourne dans la position $a'c'b'$ (fig. 53). Si ensuite on vient à le redresser, le tube $a'c'$ étant capillaire, le mercure qui descend dans ce tube ne peut se diviser pour donner passage à l'air. Un constructeur, Buntén, avait imaginé un perfectionnement pour empêcher la rentrée de l'air pendant cette opération, mais ce perfectionnement n'est pas très-nécessaire et enlève de la solidité à l'appareil. Le baromètre de Gay-Lussac est aussi soutenu par une suspension à la Cardan. Il est d'usage d'attacher à sa partie inférieure un poids cylindrique, afin d'amener plus sûrement le centre de gravité dans l'axe de figure. Il faut faire subir aux indications du baromètre de Gay-Lussac les mêmes corrections qu'à celles du baromètre de Fortin, en ce qui concerne la température.

116. Usages du baromètre. — Le véritable but du baromètre est de donner la mesure exacte de la pression atmosphérique, c'est-à-dire de la force élastique de l'air au niveau du sol; cette force élastique ne dépend pas unique-

ment du poids de la couche d'air atmosphérique, mais en outre des mouvements qui s'y produisent. Si, par exemple, un courant d'air rapide vient à s'abaisser vers le sol, il exerce par sa vitesse une pression qui s'ajoute au poids, pour faire monter le baromètre. Quand l'air est mélangé de vapeur, cette dernière a une densité qui n'est que les $\frac{5}{8}$ de celle de l'air, mais sa force élastique est la même que si, à la place de vapeur, il y avait de l'air, de sorte que la pression est supérieure au poids. Quand on dit que le baromètre mesure la pression atmosphérique, on dit une vérité; mais quand on dit qu'il mesure le poids de l'atmosphère, on commet la plupart du temps une erreur, fort légère il est vrai. De la possibilité d'évaluer la pression atmosphérique découlent plusieurs applications, telles que la prévision du temps et la mesure des hauteurs.

117. **Emploi du baromètre pour la prévision du temps.** — Dès que le baromètre fut connu, l'on remarqua un lien entre ses indications et l'état du ciel. On s'empressa alors de placer à côté de l'échelle les mots : *très-sec, beau fixe, beau temps, variable, pluie ou vent, grande pluie, tempête*. Sur les baromètres construits en France, ces indications sont espacées de 9 millimètres en 9 millimètres, le mot *variable* étant à la division 760 millimètres, et l'indication *très-sec* étant la plus élevée. Remarquons d'abord que l'on suppose ainsi que la pression atmosphérique moyenne correspond à la hauteur de 760 millimètres, et ceci n'est vrai que sur le parallèle de 50° et au niveau de la mer. Changeons de parallèle et nous verrons qu'au niveau de la mer on devra mettre le mot *variable* en face des divisions suivantes :

758 ^{mm}	à l'équateur.
763	sur le parallèle de 35°.
756	dans les régions septentrionales.

D'un autre côté, l'altitude, c'est-à-dire la hauteur au-dessus du niveau de la mer, a une influence plus grande

encore sur la hauteur moyenne du baromètre, car, à mesure qu'on s'élève, la couche d'air qui presse sur le mercure devient de moins en moins considérable. Deux habitants d'une même maison, l'un au rez-de-chaussée, l'autre au cinquième étage, doivent trouver un désaccord entre leurs baromètres. D'après cela, l'indication *variable* doit, dans chaque localité, être placée différemment, toujours en face de la hauteur moyenne, c'est-à-dire :

A l'Observatoire de Paris, en face de. . .	756 ^{mm}	6
A Kœnigsberg.	760	9
A Berlin	758	6
A Lima,	681	9
A l'hospice du Saint-Bernard.	563	0

Il n'est pas non plus exact de placer dans chaque pays, à des distances de 9 millimètres, les mots *beau temps*, *beau fixe*, etc. Sous l'équateur, par exemple, une baisse anormale de quelques millimètres, qui serait insignifiante dans nos climats, est l'indice d'une perturbation atmosphérique notable. Des perturbations atmosphériques d'égale énergie dépriment moins la colonne mercurielle dans le midi que dans le nord de la France, dans les lieux élevés que dans les lieux bas. D'un autre côté, le baromètre varie dans le courant de la journée d'une façon normale qui n'est que 0^{mm},7 dans nos climats, mais qui atteint jusqu'à 4 millimètres dans les régions intertropicales. On doit conclure de tout ceci, que, dans chaque localité, il faut faire une étude particulière des oscillations générales du baromètre avant d'appliquer cet instrument à la prévision du temps, et alors seulement on pourra tirer un grand parti de ces observations.

Néanmoins, on peut prendre pour base les remarques suivantes dues à Kaemtz. L'air chaud, étant moins dense que l'air froid, exerce des pressions barométriques faibles. L'air froid agit en sens contraire. En Europe, les vents du S.-O., qui sont les plus chauds, font baisser le baromètre : ce sont aussi ceux qui amènent la pluie; de là la coïncidence observée. Les vents froids du N.-E., au con-

traire, élèvent la colonne barométrique et s'accompagnent presque toujours d'un ciel pur et serein. Il faut bien spécifier qu'il ne s'agit que de l'Europe. Dans l'Australie, les vents chauds font baisser le baromètre, mais ils sont secs. A l'embouchure de la Plata, les vents d'ouest sont froids et pluvieux, ils font monter le baromètre.

118. **Usage du baromètre pour mesurer les hauteurs.** — La pression atmosphérique en un lieu est immédiatement connue par l'observation du baromètre, et depuis l'ascension de Périer au Puy-de-Dôme (voir le cours de première année), on sait que la pression diminue à mesure que l'on s'élève. Si l'on connaissait la loi de ce décroissement, il serait facile de déduire la hauteur absolue d'un lieu au-dessus du niveau de la mer, de l'observation du baromètre. Dans l'ignorance où l'on est à cet égard, on a fait appel à la fois à l'expérience et à la théorie, et l'on a obtenu des relations empiriques souvent fort compliquées; la plus simple est la suivante, due à M. Babinet ¹ et qui ne s'applique que pour des différences de hauteur ne dépassant pas 200 mètres :

$$h = 10000 \left[1 + 0,002 (T + t) \right] \frac{B - b}{B + b}.$$

Dans cette formule, h est la différence de hauteur verticale de deux stations; B et T sont la pression barométrique et la température à la station inférieure, b et t la pression barométrique et la température à la station supérieure.

1. M. Babinet (Jacques), savant physicien français, né à Lusignan, membre de l'Académie des sciences, astronome à l'Observatoire de Paris.

CHAPITRE VI

MESURE ET LOIS DE L'ÉLASTICITÉ DES GAZ.

119. **Élasticité des gaz.** — Si l'on prend un tube de verre fermé par un bout (fig. 54), qu'on limite dans ce tube, à l'aide d'un piston, une certaine masse d'air atmosphérique, le piston restera en équilibre parce qu'il recevra sur l'une de ses faces l'action de la pression atmosphérique, et sur l'autre face une réaction égale qui est ce que l'on a appelé la force élastique de l'air. Cette force élastique résulte de la tendance qu'ont les molécules des gaz à s'éloigner les unes des autres, ce qui donne lieu à un effort exercé sur les parois des vases qui les contiennent. Cet effort a une valeur très-variable suivant les circonstances; il dépend, par exemple, du volume occupé par la masse gazeuse; si l'on enfonce, en effet, le piston, puis qu'on l'abandonne à lui-même, l'air comprimé ayant augmenté de force élastique, les deux faces du piston ne sont plus également pressées et celui-ci est ramené à sa position première. Ce petit appareil porte le nom de *briquet à air*, parce qu'en enfonçant brusquement le piston, on développe assez de chaleur pour enflammer un peu de coton imbibé de sulfure de carbone et placé au fond du tube.

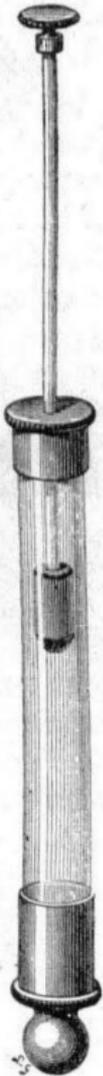


Fig. 54.
Briquet à air.

120. Il est important de connaître les lois de l'élasticité des gaz, et il faut pour cela avoir à sa disposition un moyen de mesurer

la force élastique d'une masse gazeuse. Les instruments destinés à remplir ce but sont appelés *manomètres*. Le plus simple est le manomètre à air libre.

121. **Manomètre à air libre.** — Cet appareil est fondé sur le même principe que le baromètre. Il se compose d'une cuvette métallique (fig. 55) dont l'ouverture est fermée par un bouchon à vis dans lequel est mastiqué un tube en verre *b* ouvert aux deux bouts. La cuvette contient du mercure jusqu'à un niveau assez élevé, et peut, par une tubulure *a*, être mise en communication avec le réservoir contenant le gaz comprimé dont on veut évaluer la force élastique; sous la pression de ce gaz, le mercure monte dans le tube *b* à une hauteur de 153 centimètres par exemple. Considérons le plan horizontal qui passe par le niveau du mercure dans la cuvette; dans tous les points de ce plan, la pression doit être la même (55); or, sur ce plan, extérieurement au tube, existe la force élastique que l'on veut évaluer; dans le tube, la pression hydrostatique se compose de deux parties, d'abord du poids d'une colonne de mercure ayant pour base l'unité de surface et pour hauteur la distance verticale des niveaux dans le tube et dans la cuvette; ensuite de la pression atmosphérique qui s'exerce au sommet de la colonne mercurielle et qui est transmise intégralement par cette colonne (49). Si donc on relève la hauteur du baromètre et qu'on la trouve égale à 75 centimètres, par exemple, on en conclura que la force élastique du gaz comprimé exerce une pression hydrostatique égale au poids d'une colonne de mercure ayant pour base l'unité de surface et pour hauteur $153 + 75 = 228$ centimètres. Les différentes forces élastiques pourront ainsi être évaluées par les poids de colonnes

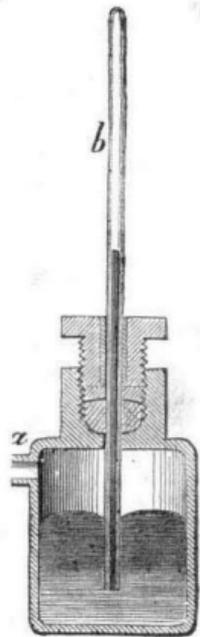


Fig. 55.
Manomètre
à air libre.

de mercure ; ces colonnes ayant toutes même base, leurs poids sont proportionnels à leurs hauteurs, et ces hauteurs sont prises pour mesure des forces élastiques.

122. **Évaluation des pressions en atmosphères.** — Quand les forces élastiques atteignent une certaine valeur, il est d'usage de chercher leur rapport à la pression atmosphérique ordinaire. Ainsi, la pression de 228 centimètres est triple de la pression de 76 centimètres qu'exerce en moyenne l'air atmosphérique ; on dit que cette pression est de 3 atmosphères. C'est généralement la pression en atmosphères que l'on inscrit sur les manomètres. On doit marquer 1 atmosphère au niveau du mercure, quand il est le même dans la cuvette et le tube.

123. **Manomètres à air libre employés dans l'industrie.** — C'est

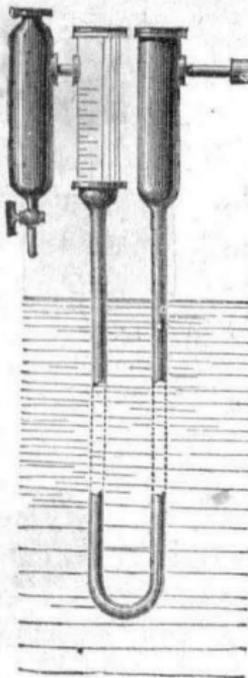


Fig. 56.

Manomètre à air libre.

surtout pour apprécier la force élastique de la vapeur que l'usage du manomètre est nécessaire dans l'industrie ; mais alors, si l'on a recours au manomètre à air libre, la fragilité d'un long tube de verre plein de mercure est un écueil. On y a remédié par l'emploi d'un tube de fer ; pour apprécier la hauteur du liquide, un morceau de fer flotte sur le mercure dans le tube et est soutenu par un fil qui passe sur une poulie et supporte un contre-poids ; ce dernier se déplace le long d'une règle divisée, en même temps que le flotteur monte ou s'abaisse.

124. On se sert encore de l'appareil (fig. 56). Un long tube de fer recourbé et en général partiellement enfoncé dans le sol réunit deux cylindres ; le premier est en fonte et communique, par une tubulure la-

térale avec le générateur à vapeur; le second est en cristal et porte des divisions équidistantes. Le mercure est en quantité telle, qu'il arrive dans le cylindre de cristal dès que la pression de la vapeur est de deux atmosphères; mais, à cause de la différence de diamètre du cylindre et du tube, le mercure descendant de 76 centimètres dans ce dernier ne monte que de 5 centimètres dans le cylindre de cristal. Sur ce cylindre, à paroi résistante et de peu de longueur, sont des divisions permettant d'apprécier les pressions en atmosphères et même en dixièmes d'atmosphère; il suffit d'observer à quelle division le mercure s'arrête. Il faut qu'au-dessus du mercure la pression atmosphérique s'exerce librement; c'est par la partie supérieure et ouverte d'un troisième cylindre métallique que la communication a lieu avec l'air atmosphérique. Si la pression devient trop forte, le mercure remplit entièrement le cylindre de cristal; il se déverse alors dans le troisième cylindre, et, à l'aide d'un robinet, on peut le recueillir afin de le reverser dans le tube du manomètre.

125. **Loi de Mariotte.** — Le phénomène de la variation de force élastique d'une masse gazeuse avec la variation du volume est soumis à une loi qui fut découverte en même temps en France par Mariotte, et en Angleterre par Boyle. Cette loi est susceptible de plusieurs énoncés qui rentrent tous les uns dans les autres.

1^{er} Énoncé : *Les volumes qu'occupe une même masse de gaz à la même température, mais sous des pressions diverses, sont inversement proportionnels à ces pressions.*

Supposons que, dans un cylindre fermé par un bout, l'on ait un volume de 50^{cc} d'air limité par un piston, et que l'on enfonce le piston jusqu'à ramener le volume à 25^{cc}, la force élastique de l'air aura doublé d'après la loi; si, au contraire, en soulevant le piston, on porte le volume à 100^{cc}, la force élastique du gaz comprimé doit, d'après Mariotte, être moitié moindre qu'à l'origine.

126. Pour démontrer sa loi, Mariotte se servait de l'ap-

pareil suivant (fig. 57) : sur un socle CD est dressée ver-
 ticalement une planche sur laquelle se trouve fixé un tube

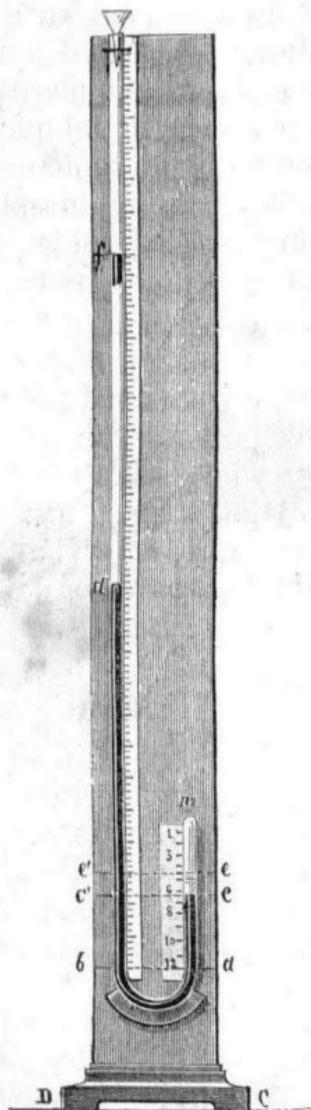


Fig. 57.
 Tube de Mariotte.

de verre recourbé, dont la courte
 branche est fermée. Deux échelles
 sont placées le long des tubes, la
 plus grande divisée en centimè-
 tres et millimètres, la plus petite
 correspondant à des capacités
 égales de la branche fermée; la
 grande échelle a son point de
 départ sur le plan horizontal *ab*,
 la petite au point *m*. On com-
 mence par introduire du mercure
 dans l'appareil jusqu'à l'extré-
 mité des deux échelles. On a ainsi
 une masse d'air limitée en *am*,
 dont la pression est la pression
 atmosphérique; car en tous les
 points du plan *ab* la pression hy-
 drostatique doit être la même, du
 moment qu'il y a équilibre (55).
 On lit sur l'échelle la valeur du
 volume occupé par le gaz. On
 ajoute du mercure dans la grande
 branche ouverte, de manière à
 diminuer le volume gazeux de
 moitié; le niveau du mercure est
 alors en *c* dans la branche fer-
 mée, en *d* dans la branche ou-
 verte. Sur le plan horizontal *cc'*,
 la pression doit être la même sur
 tous les points; or, en *c* s'exerce la
 force élastique du gaz et en *c'* la

pression atmosphérique augmentée du poids de la
 colonne de mercure *c'd*. Si l'on consulte le baromètre,
 on voit que sa hauteur est précisément égale à *c'd*, de
 sorte qu'en *c'* et par suite en *c* s'exerce une pression

double de la pression atmosphérique, ce qui vérifie la loi. — Ajoutons encore du mercure, de façon que le volume de l'air ne soit plus que le tiers de ce qu'il était primitivement; les niveaux seront ainsi amenés en e et en f . Pour connaître la force élastique du gaz, il suffit de mesurer la pression exercée sur la surface du mercure en e' , ce point étant dans le même plan horizontal que e . Or, la distance $e'f$ se trouve être double de la hauteur du baromètre, et, en tenant compte de la pression atmosphérique qui s'exerce en f et se transmet par le liquide, on voit que la pression en e' et en e est de 3 atmosphères, ce qui vérifie la loi.

127. Par des procédés analogues au précédent, la loi de Mariotte a été vérifiée par divers expérimentateurs, du moins dans le cas des gaz permanents, jusqu'à une pression égale à plus de vingt fois celle de l'atmosphère.

128. Dans le cas des pressions inférieures à la pression atmosphérique, Mariotte opérait de la manière suivante. Un tube barométrique (fig. 58) plonge dans une cuvette très-profonde. Dans la chambre barométrique on a introduit de l'air. En enfonçant suffisamment le tube dans la cuvette, on peut amener cet air à la pression atmosphérique, et alors le niveau du mercure est le même dans le tube et dans la cuvette. Si on soulève le tube de façon que, par suite de la diminution de pression, le volume gazeux ait doublé, et si l'on mesure la hauteur de

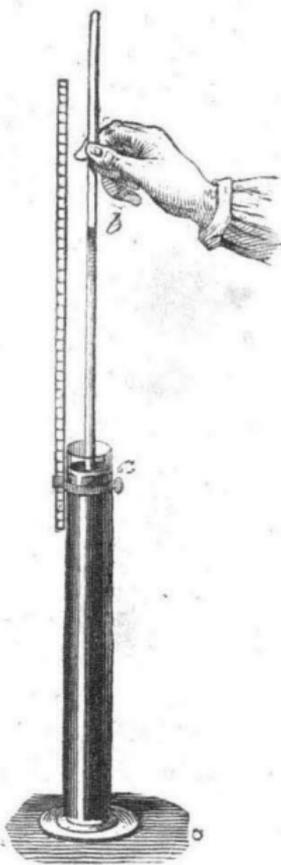


Fig. 58.
Appareil de Mariotte à
cuvette profonde.

la colonne mercurielle soulevée, on trouve que cette colonne *ab* est la moitié de la hauteur du baromètre.

Exercices. — 1° Dans un sac imperméable se trouve renfermé un gaz qui occupe un volume de 6 lit.,354 quand la pression atmosphérique est de 0^m,76. Cette pression devenant de 0^m,64, le sac se gonfle et le gaz occupe un volume plus grand que l'on demande d'évaluer.

2° Dans le baromètre à cuvette profonde (fig. 58), il y a 3 centimètres cubes d'air dans la chambre barométrique, et la différence des niveaux dans le tube et dans la cuvette est de 588 millimètres. On soulève le tube de façon que l'air occupe un volume de 4 centimètres cubes; la hauteur de la colonne de mercure soulevée est alors de ,630 millimètres. On demande quelle est la pression de l'atmosphère ?

129. 2° Énoncé : *Une même masse de gaz conservant la même température, mais changeant de volume, le produit du nombre qui mesure le volume par celui qui mesure la force élastique du gaz reste toujours le même.* Ainsi, par exemple, un gaz occupe 0^m,50, et sa force élastique est susceptible de faire équilibre à une colonne de mercure de 0^m,76 de hauteur. Le produit de 50 par 76 est 3,800. On comprime ce gaz pour ramener le volume à n'être plus que 0^m,25. La force élastique est devenue double, c'est-à-dire qu'elle est mesurée par une colonne de mercure de 76^{cm} × 2 = 152^{cm}. Le produit de 25 par 152 est encore 3,800. C'est de cette façon que dans les calculs il est plus commode de faire entrer la loi de Mariotte.

130. 3° Énoncé : *Une même masse de gaz conservant la même température, mais changeant de volume, la densité du gaz est proportionnelle à la force élastique.* En effet, réduisez à moitié le volume d'une masse de gaz, la force élastique a doublé; mais, en même temps, le poids de l'unité de volume a doublé aussi, puisqu'il y a deux fois plus de gaz dans cette unité. Donc la densité a doublé comme la force élastique.

131. **Manomètre à air comprimé.** — L'augmentation de force élastique des gaz quand on diminue leur volume, a conduit à l'emploi du manomètre à air comprimé. Un

réservoir en fonte très-épaisse (fig. 59) porte une tubulure dans laquelle est mastiqué un tube de verre fermé à sa partie supérieure. Une tubulure latérale en fer sert à mettre le réservoir en communication avec la vapeur ou le gaz comprimé. Du mercure se trouve dans le réservoir et est refoulé par la pression dans le tube de verre, mais celui-ci contient de l'air qui résiste par sa force élastique d'autant plus que son volume est plus diminué. La quantité d'air limitée dans le manomètre est telle que le niveau soit le même à l'intérieur et à l'extérieur du tube quand la tubulure latérale est en communication avec l'atmosphère. Une échelle est tracée sur la planchette qui supporte l'appareil, elle porte l'indication 1 atmosphère au niveau du mercure dans le tube et dans la cuvette, quand ces niveaux sont identiques. On a marqué 2 atmosphères, 3 atmosphères, etc.; aux points où s'arrête le mercure quand le gaz mis en communication avec l'appareil possède une force élastique double, triple, etc., de celle de l'air atmosphérique. Cette graduation se fait expérimentalement; un réservoir plein d'air comprimé est mis en relation, d'une part avec le manomètre à graduer, et, d'autre part, avec un manomètre à air libre; on fait varier la force élastique de l'air du réservoir et l'on gradue de façon qu'il y ait concordance entre les deux manomètres.

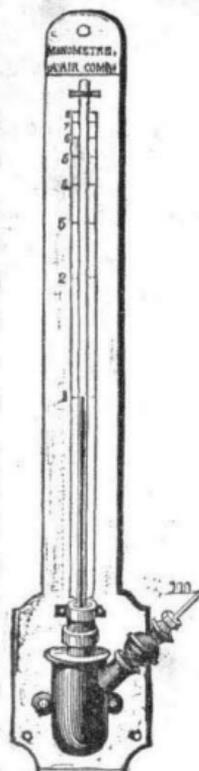


Fig. 59.

Manomètre à air comprimé.

Exercice. — Le volume de l'air dans le manomètre à air comprimé a-t-il été réduit à moitié quand l'appareil marque 2 atmosphères?

132. **Manomètre métallique.** — Le manomètre le plus usité aujourd'hui dans l'industrie est le manomètre métallique de M. Bourdon. Il est formé (fig. 60) d'un tube de laiton aplati, contourné, et communiquant par un tuyau

à robinet avec la vapeur ou le gaz comprimé. L'extrémité fermée du tube porte une aiguille parcourant les divisions

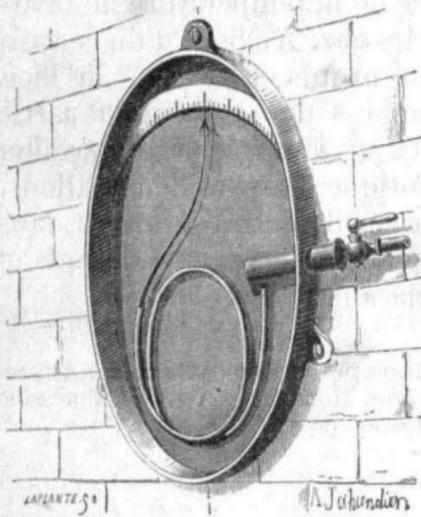


Fig. 60.

Manomètre métallique.

d'un cadran. Le gaz comprimé dans le tube tend à détruire l'enroulement et fait mouvoir l'aiguille. Les déplacements de l'extrémité de l'aiguille sont sensiblement proportionnels aux pressions ; il en résulte que, pour graduer, on se contente de marquer 1 atmosphère au point où l'aiguille s'arrête quand l'intérieur du tube communique avec l'atmosphère, puis on met l'appareil en communication avec de l'air comprimé à 6 atmosphères, par exemple,

on marque 6 en face de l'aiguille, et l'on divise le cadran d'après l'indication de ces deux points de repère.

133. Lois du mélange des gaz. — Le mélange des gaz qui n'ont l'un sur l'autre aucune action chimique est soumis à deux lois :

1^o *Les gaz se mélangent intimement, et chacun d'eux est répandu dans toutes les parties du vase qui contient le mélange.*

2^o *Chaque gaz exerce sa pression comme s'il était seul, et la pression totale est la somme des pressions exercées par chaque gaz.*

Comme vérification de la première loi, on peut citer une expérience de Berthollet : ce savant remplit deux ballons égaux, l'un d'hydrogène, l'autre d'acide carbonique ; ces deux ballons étant fermés par des robinets, il

les vissa l'un sur l'autre, les transporta dans les caves de l'Observatoire, où la constance de la température ne favorise aucun mouvement dans les gaz. Au bout d'un certain temps de repos les ballons furent mis en relation, et bien que le ballon plein du gaz le plus dense fût à la partie inférieure, on trouva au bout d'un jour que la composition du mélange gazeux était identique dans les deux ballons. Quant à la seconde loi, on la vérifie en introduisant dans un espace clos des quantités connues de gaz différents et en notant chaque fois la variation de pression.

Exercice. — Dans un ballon de 10 litres de capacité l'on introduit 5 litres d'oxygène à la pression de 2 atmosphères, 3 litres d'hydrogène à la pression de $1^m,25$, et 25 litres d'azote à la pression de $0^m,56$. On demande la force élastique du mélange.

CHAPITRE VII

MACHINE PNEUMATIQUE.

134. **Machine d'Otto de Guéricke.** — C'est en 1650 qu'Otto de Guéricke inventa la machine pneumatique. Rappelons le principe de cet appareil, déjà indiqué dans le cours de première année. Dans un corps de pompe A (fig. 61) se meut un piston M, qui est percé d'un canal intérieur, fermé

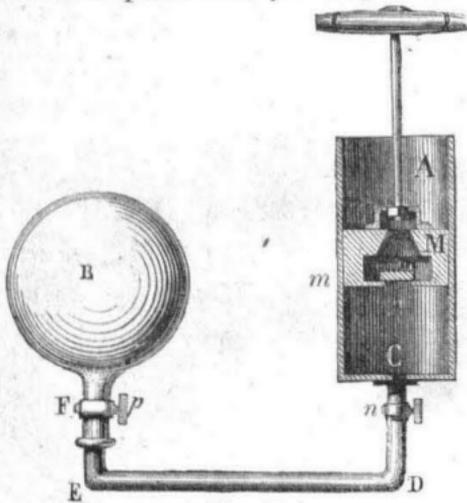


Fig. 61.

Machine à un seul corps de pompe.

par un clapet *m*. La base du corps de pompe C communique avec un tube CDE, sur lequel est placé un robinet *n*. A l'extrémité de ce tube on visse le ballon B dans lequel on veut faire le vide, et que ferme un robinet *p*. Le robinet *n* étant fermé, l'on amène le piston au bas de sa course, l'air contenu au-dessous de lui soulève le clapet *m* et s'échappe. On ouvre alors *n* et *p*, on soulève le piston; le clapet *m* reste fermé, car il est pressé, d'une part par l'atmosphère, et d'autre part par l'air du ballon B et du canal CD, air qui est au plus à la pression atmosphérique; mais

l'espace que le piston laisse derrière lui ne peut rester vide, et l'air du ballon B se précipite, se partageant entre le volume du corps de pompe et celui qu'il occupait auparavant; il en résulte, pour cet air, une diminution de force élastique, que la loi de Mariotte permet de calculer. On

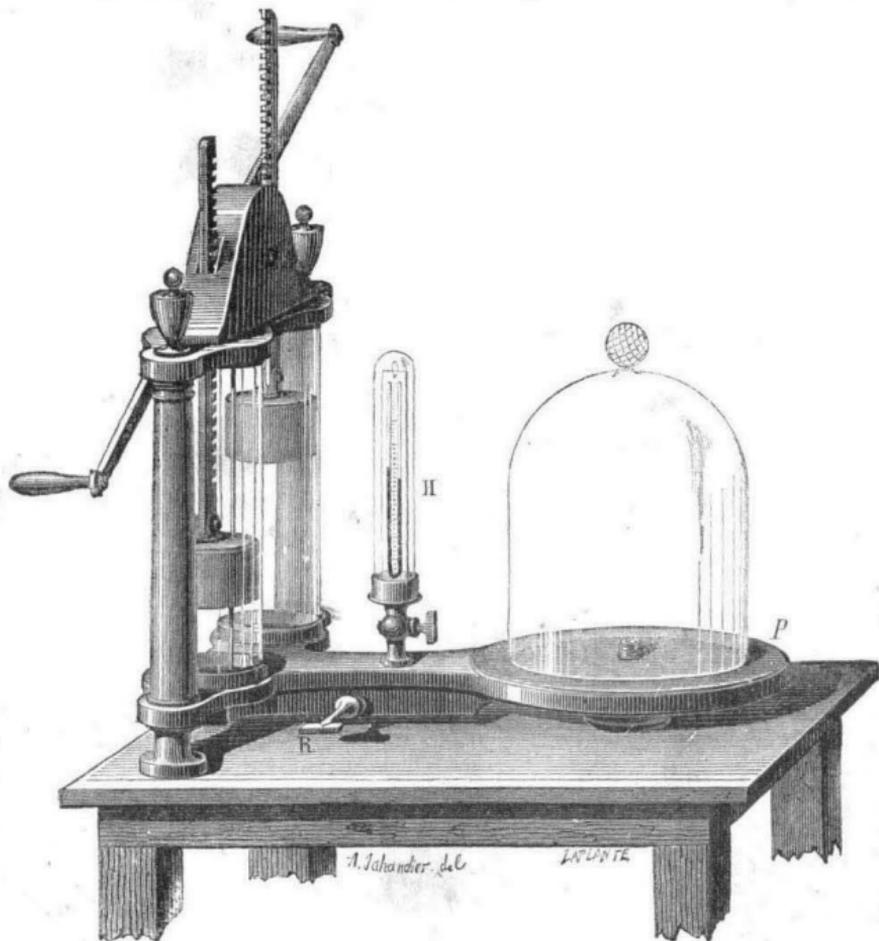


Fig. 62.
Machine pneumatique.

ferme *n*, on baisse le piston, l'état de l'air ne change pas dans B, mais le gaz contenu dans le corps de pompe est expulsé. On ouvre *n* et on recommence. Chaque coup de piston expulse une nouvelle quantité d'air et diminue la force élastique de celui qui reste dans le récipient B. Une

semblable machine est très-imparfaite, et on lui a fait subir de notables perfectionnements.

135. **Machine à deux corps de pompe.** — La machine actuellement en usage dans les cabinets de physique est représentée en perspective (fig. 62). Dans les machines à un seul corps de pompe, la manœuvre devenait très-pénible vers la fin, parce que le piston supportait sur la face supérieure la pression atmosphérique, et sur son autre face une pression très-faible, de sorte que si la surface du piston était, par exemple, de 30 centimètres carrés, on ar-

rivait facilement à avoir à vaincre pour soulever le piston, une résistance de 25 kilogrammes et plus. Avec deux pistons accouplés il n'en est pas de même; les tiges de ces pistons sont des crémaillères engrenant avec une roue dentée P (fig. 63), à laquelle, au moyen d'une manivelle, on donne un mouvement de rotation alternatif. Quand un piston monte, l'atmosphère presse sur sa surface; mais cette pression s'exerce aussi sur le piston qui descend, et ces deux pistons s'é-

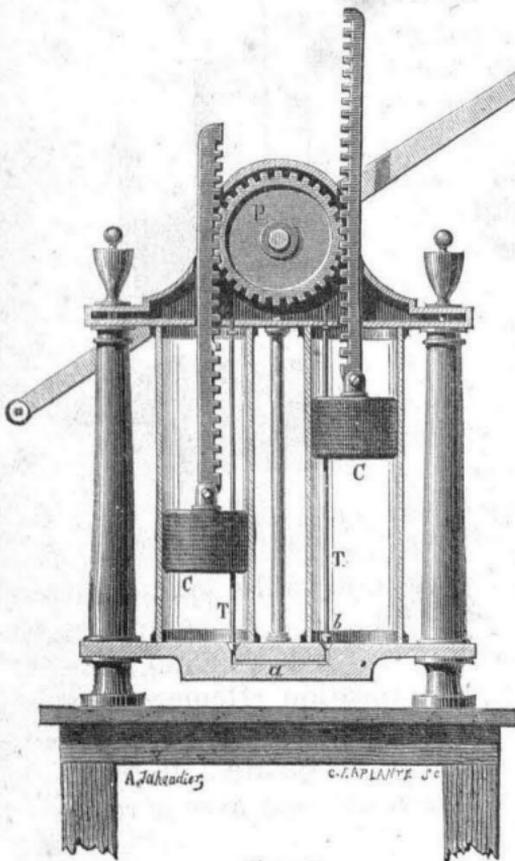


FIG. 63.

Machine pneumatique.

le feraient deux poids égaux placés sur les deux plateaux d'une balance; il en résulte que, pour manœuvrer la machine, il n'y a pas plus d'effort à faire à la fin de l'opération qu'au commencement. Le mouvement alternatif est, malgré cela, très-fatigant à produire.

136. **Détail des pistons.** — Chaque piston est formé de rondelles de cuir C (fig. 64) lubrifiées par de l'huile, et serrées entre deux plaques métalliques MN, PQ, par la pression d'un écrou D. A l'intérieur est une cavité communiquant, d'une part, librement avec l'atmosphère, et d'autre part, par l'orifice *a* avec la partie inférieure du corps de pompe; sur cet orifice s'applique un disque métallique, muni d'une tige qui le conduit et pressé par un ressort à boudin. Le ressort a pour point d'appui un anneau métallique, qui sert de guide à la tige de la soupape. Le piston est traversé, à frottement dur, par la tige T de la soupape tronconique *b*, qui ferme le canal allant au récipient. Quand on fait monter le piston, celui-ci entraîne *b*; mais, comme cette soupape ne doit se soulever que d'une petite quantité, $\frac{1}{2}$ millimètre environ, l'extrémité de sa tige porte une saillie qui vient buter contre la face supérieure du corps de pompe, et arrête le mouvement. Le piston, en redescendant, ramène *b* clore le canal de communication. Remarquons que la soupape *b* étant fermée dans l'un des corps de pompe, elle est ouverte dans l'autre, et qu'ainsi il n'y a jamais qu'un seul piston en communication avec le récipient.

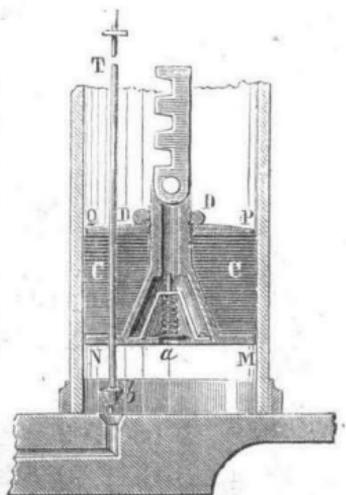


FIG. 61.

Coupe d'un piston.

137 **Robinet de rentrée.** — Les orifices qui sont à la base

de chacun des pistons communiquent avec les extrémités d'un même conduit (fig. 65); sur le milieu de ce conduit

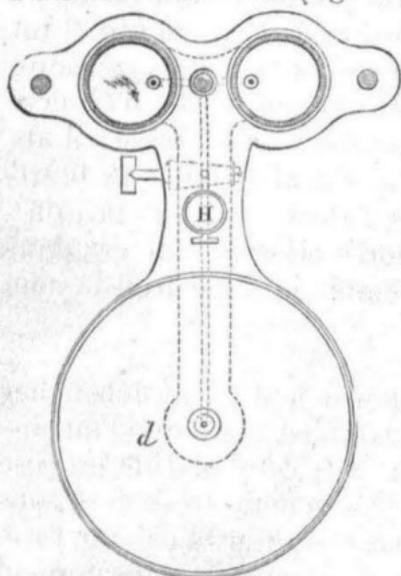


Fig. 65.

Plan de la machine pneumatique.



Fig. 66.
Robinet de
rentrée.

s'embranché un autre canal qui va au récipient: c'est le canal d'épuisement. Il porte un robinet R qui permet d'ouvrir ou de fermer la communication entre les corps de pompe et le récipient; mais ce robinet, outre le canal ordinaire, en porte un autre recourbé. La figure 66 représente une coupe de ce robinet dans deux positions qui diffèrent de 90°. Dans la première, la clef est horizontale, et il y a communication entre le corps de pompe et les pistons: la machine peut alors fonctionner. Dans la deuxième position,

la communication est interrompue, la clef est verticale et le canal d'épuisement est en rapport avec le conduit contourné du robinet et, par suite, avec l'air atmosphérique, de sorte que, suivant les circonstances, on mettra le récipient en communication avec l'atmosphère, ce qui laissera rentrer l'air; ou bien le récipient demeurera clos de toutes parts, tandis que sous les pistons il y aura communication avec l'air extérieur.

138. **Éprouvette.** — Il faut connaître la pression de l'air raréfié. Pour cela, sur le canal d'épuisement se trouve une éprouvette renversée H, mastiquée dans une monture à robinet. Dans l'éprouvette, et fixé sur une échelle métallique, se trouve un baromètre à siphon, incomplet,

dont chaque branche n'a guère que 20 centimètres de hauteur. La branche fermée est complètement pleine de mercure, ainsi qu'une petite portion de la courbure. Tant que la pression de l'air dans le récipient reste supérieure à la différence des niveaux du mercure, on n'observe rien; mais cette pression diminuant sans cesse, il arrive un moment où le mercure s'abaisse dans la branche fermée en s'élevant dans l'autre, et alors la différence des niveaux mesure la force élastique du gaz dans le récipient. On donne à l'ensemble de l'appareil le nom d'*éprouvette*.

139. **Platine.** — Le canal d'épuisement vient déboucher au centre d'un plateau de verre bien plan, que l'on appelle la platine de la machine. Sur cette platine on pose une cloche de verre à bords parfaitement dressés, et sous la cloche les objets que l'on veut exposer dans l'air raréfié. La fermeture n'est généralement pas suffisamment hermétique. Pour obvier à cet inconvénient, le meilleur moyen est d'appliquer sur la platine un disque de caoutchouc non vulcanisé, de 1 millimètre ou 2 d'épaisseur, et qui a été chauffé avant d'être étendu; une faible pression sur la cloche, pendant que l'on donne les premiers coups de piston, suffit pour que l'intérieur de ce récipient n'ait aucune communication avec l'extérieur. L'extrémité du canal d'épuisement porte d'ailleurs un pas de vis sur lequel on peut visser les vases dans lesquels on aurait à faire le vide.

140. **Limite de la raréfaction.** — Dans les meilleures machines, l'éprouvette accuse toujours une différence de niveau d'au moins 1 millimètre; dans toutes, quand on a atteint une certaine limite, on ne peut plus la dépasser. Cela tient à ce que le piston ne s'applique jamais exactement sur le fond du corps de pompe: il reste entre les deux un espace appelé *espace nuisible*. Lorsque le piston arrive au bas de sa course, l'espace nuisible est rempli

d'air à la pression atmosphérique, puisque, pendant tout le temps que le piston s'abaisse, sa soupape est ouverte. Outre que cet air n'est jamais expulsé, il s'oppose, par sa force élastique, à la sortie du gaz du récipient, et quand l'air de l'espace nuisible répandu dans le corps de pompe, après qu'on a soulevé le piston, possède encore une force élastique égale à celle de l'air du récipient, il est évident que la machine doit cesser de fonctionner.

141. Machines à double épuisement. — La machine que nous venons de décrire est dite à simple effet ou à simple épuisement. S'il arrive, en effet, qu'elle fasse le vide d'une manière continue, il n'en est pas moins vrai que chaque piston n'agit que dans la période où il s'élève; quand il descend, il n'influe en rien sur l'air du récipient. On a cherché à produire l'épuisement à la fois pendant la montée et la descente du piston, et d'immenses machines ont été con-

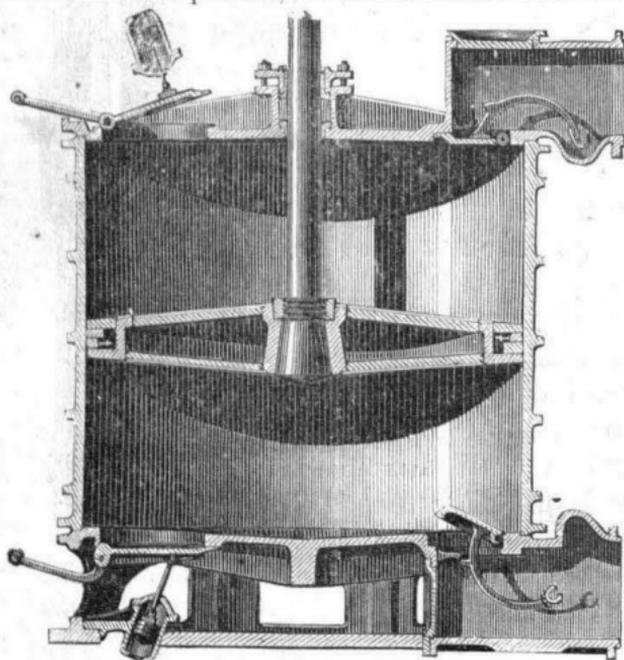


Fig. 67.

Machine à double épuisement.

struites sur ce principe pour le chemin de fer atmosphérique de Saint-Germain.

142. Machines de Saint-Germain. — Les machines établies à Saint-Germain étaient au nombre de quatre. Chacune d'elles se composait (fig. 67) d'un corps de pompe de 2^m,50 de hau-

teur environ et d'un diamètre un peu plus considérable. Dans l'intérieur se mouvait un piston plein. Sur chacune des bases du corps de pompe se trouvaient deux clapets s'ouvrant en sens inverse. Ceux qui s'ouvraient de dehors en dedans donnaient accès dans deux canaux conduisant au canal d'épuisement. Les deux autres clapets, s'ouvrant de dedans en dehors, mettaient le corps de pompe en relation avec l'air extérieur. Des butoirs limitaient l'excursion des soupapes. Supposons que le piston s'abaisse, l'air qu'il comprime au-dessous de lui maintient fermée la soupape qui, au fond du corps de pompe, clôt le canal d'épuisement, tandis que l'autre soupape s'ouvre, et l'air comprimé est expulsé dans l'atmosphère. Au-dessus du piston, le vide se forme, la soupape s'ouvrant au haut du corps de pompe de dedans en dehors reste appliquée par la pression de l'air extérieur, et l'autre soupape s'ouvrant, l'air du canal d'épuisement se précipite dans le corps de pompe. C'est l'effet inverse qui a lieu quand le piston remonte.

143. Au chemin de fer de Saint-Germain, le canal d'épuisement communiquait avec un long tube placé sous la voie et de 0^m,80 de diamètre; un double piston glissait dans ce cylindre (fig. 68) entraînant derrière lui un assemblage de cinq galets. Le tube portait une fente longitudinale recouverte par une bande de cuir, attachée à l'un seulement des bords de l'ouverture. La pression atmosphérique suffisait pour maintenir la bande de cuir parfaitement au contact. Le vide étant fait en avant du piston, celui-ci se mettait en mouvement sous l'influence de la pression atmosphérique qui s'exerçait derrière lui. Une tige de

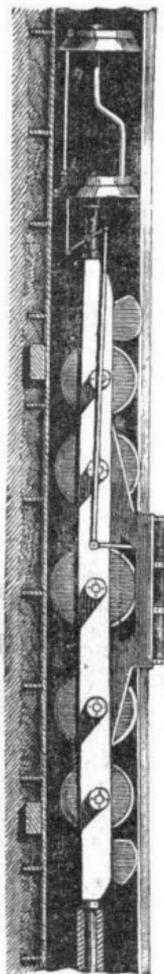


Fig. 68.

Chemin de fer
atmosphérique.

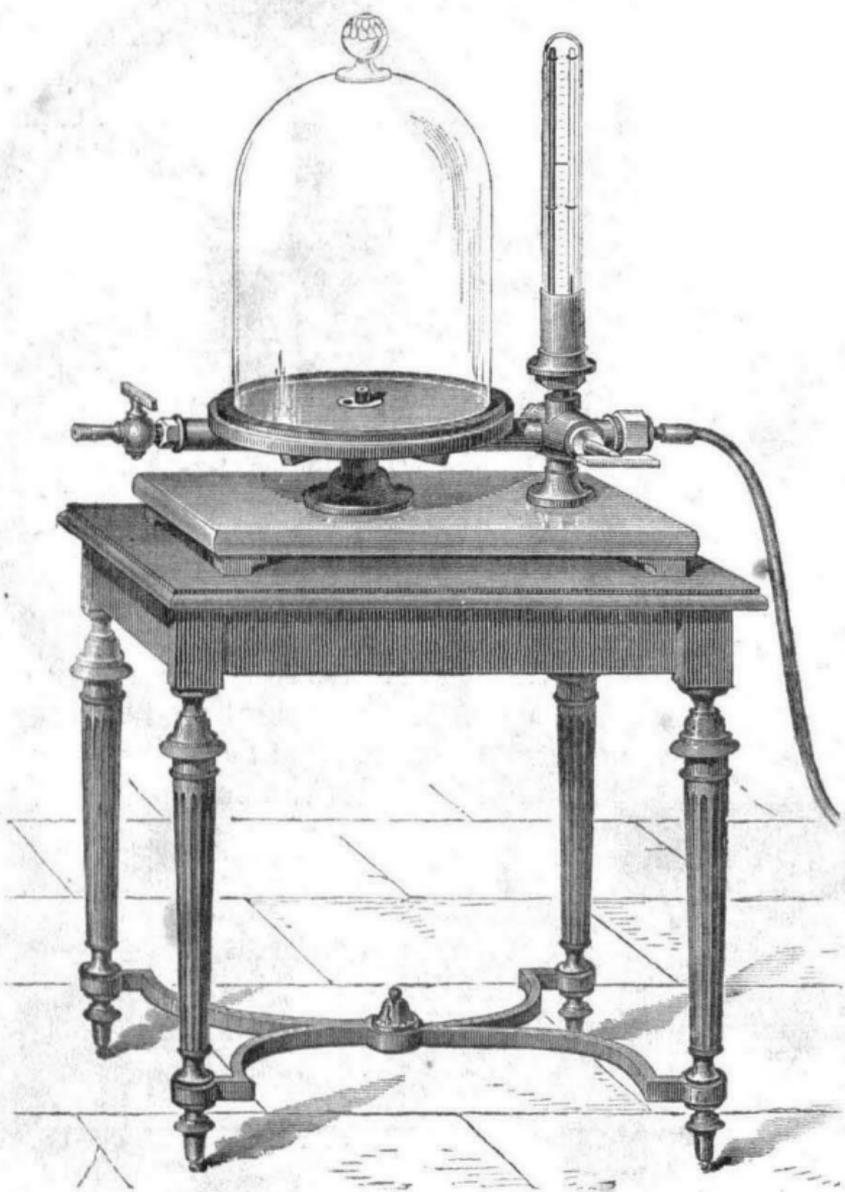


Fig. 60.

Machine Bianchi.

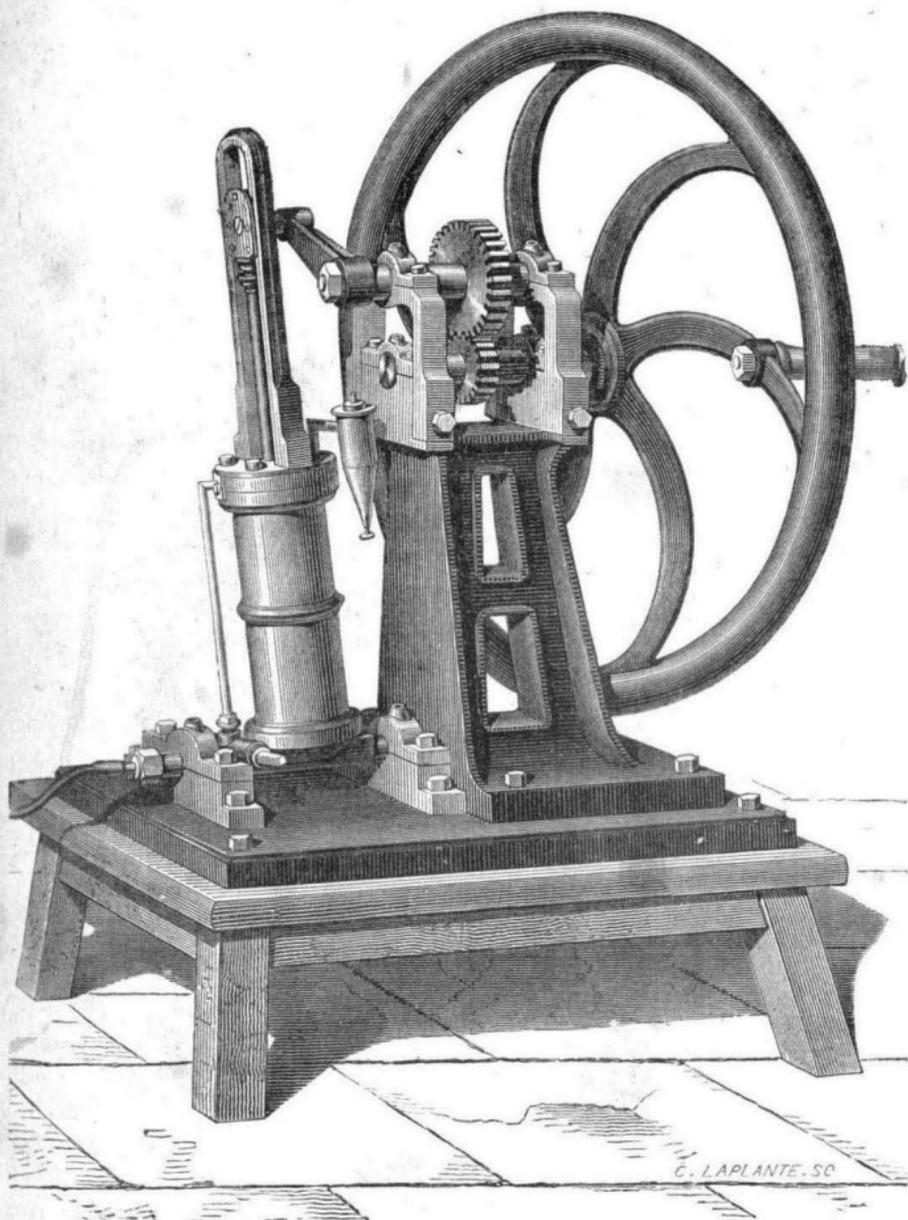


Fig. 69 bis.
Machine Bianchi.

fer attachée à la queue du piston et sortant par la fente du tube, en soulevant la bande de cuir, se rattachait au premier wagon du train qui se trouvait ainsi entraîné à la suite du piston. Ce procédé de traction a été abandonné comme trop coûteux.

144. **Machine de M. Bianchi** ¹. — Une machine à double épuisement, fort répandue aujourd'hui dans les cabinets de physique, est celle de M. Bianchi (fig. 69). Elle est à un seul corps de pompe; le piston est semblable à celui de la machine ordinaire, seulement la cavité qui contient la soupape (fig. 70) n'est plus en relation avec l'atmosphère que par la tige du piston qui, à cet effet, est creuse. Une tige rigide de laiton traverse le piston à frottement dur

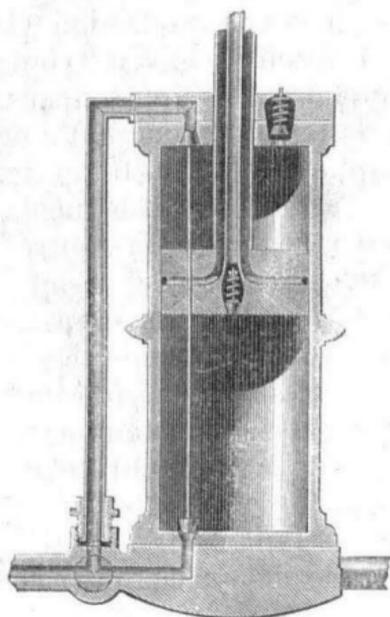


Fig. 70.

Détail de la soupape.

et se termine à la partie inférieure, comme dans les machines ordinaires, par une soupape tronconique, fermant l'orifice du canal d'épuisement, et à la partie supérieure par une deuxième soupape toute semblable à la première et qui ferme une ouverture communiquant avec un tuyau métallique, lequel descend extérieurement le long du corps de pompe et s'embranche sur le canal d'épuisement. Le récipient dans lequel on fait le vide se trouve de cette manière en relation, alternativement avec la partie inférieure et la partie supérieure

1. M. Bianchi (Barthélemi), né à Montpellier, constructeur d'instruments de physique, fait chevalier de la Légion d'honneur à l'occasion de ses expériences sur la poudre comprimée. Il n'avait pas exposé à Londres.

soupape tronconique intérieure se ferme, l'air se comprime sous le piston et s'échappe par l'intérieur de ce dernier et de sa tige, en même temps un vide se fait au-dessus du piston et l'air du récipient est appelé pour le remplir. Si le piston remonte, c'est la soupape tronconique supérieure qui se ferme, et l'air comprimé s'échappe par une soupape toute semblable à celle du piston, et placée sur la face supérieure du corps de pompe; l'aspiration de l'air du récipient se fait sous le piston. L'on peut dire que la machine de M. Bianchi ressemble, dans sa partie inférieure, à la machine pneumatique ordinaire, et, dans sa portion supérieure, à la machine de Saint-Germain. Quelques autres perfectionnements doivent être signalés dans cet appareil. Ainsi, dans les machines ordinaires, l'air à la fin de l'opération arrive à un degré de raréfaction tel qu'il ne force plus la soupape du piston à s'ouvrir; pour y remédier, M. Bianchi munit à sa base chaque soupape destinée à laisser échapper l'air dans l'atmosphère d'une saillie qui pour l'une la soulève quand le piston frappe le bas du corps de pompe, et pour l'autre produit le même effet au moment où le piston est en haut de sa course. Dans la machine ordinaire, l'huile qui lubrifie les pistons rancit dans l'appareil et s'oppose au jeu de la soupape du piston; on y remédie d'ordinaire, jusqu'à un certain point, en maintenant toujours au-dessus du piston une couche d'huile de pied de bœuf et faisant fonctionner la machine au moins tous les huit jours; M. Bianchi établit un godet en haut de la tige du piston; l'huile que l'on met dans ce godet coule lentement à l'intérieur de la tige et renouvelle par déplacement l'huile déjà existante dans le piston, qui est rejetée dans le réservoir R. Il faut encore avoir le soin de manœuvrer fréquemment la machine. — Au mouvement alternatif si pénible des machines à deux corps de pompe, M. Bianchi substitue la rotation d'une manivelle qui par un système de roues dentées communique son mouvement à une deuxième manivelle, conduisant la tête du piston. Le corps de pompe est assujetti

à osciller autour d'un axe placé à sa base et traversé par le canal d'épuisement. Quand la manivelle fixée à la tige du piston est verticale, le corps de pompe l'est aussi, et le piston se trouve en haut ou en bas de sa course. Quand elle est horizontale, le corps de pompe est incliné et le piston au milieu de sa course. Le mouvement de la machine se conçoit d'après cela. Un volant aide à passer les points morts. Un tube de caoutchouc continue le canal d'épuisement jusqu'au récipient.

145. Application de la machine pneumatique à l'essai de la résistance des tuyaux de conduite. — Les tuyaux de conduite d'eau ou de gaz ont à supporter l'effort des masses de terre qui les recouvrent; cet effort est dirigé de dehors en dedans. Il faut donc que ces canaux aient une certaine résistance à l'écrasement. Pour reconnaître qu'il en est ainsi, on dispose un certain nombre de tuyaux en place, on les réunit les uns aux autres, on ferme une extrémité, on fait le vide à l'intérieur des tuyaux, de sorte qu'ils ont à supporter la pression atmosphérique; s'ils résistent, on les conserve. Cette opération a en même temps pour but de s'assurer s'il n'y a aucune fuite aux jointures, car, s'il y en avait, le vide ne pourrait être fait dans les tuyaux.

146. Évaporation dans le vide. — Dans les laboratoires, et même dans l'industrie, on favorise l'évaporation des dissolutions en les exposant dans le vide. C'est ainsi que, dans la fabrication du sucre de betterave, le jus, après filtration, est amené dans des réservoirs où l'on fait le vide et que l'on chauffe à la vapeur. Les machines pneumatiques de M. Bianchi ont été employées en grand pour cet usage.

147. Ventouses à pompe. — La machine pneumatique est en usage en médecine pour les ventouses à pompe. Ce sont de petites cloches de verre dont on applique l'ouverture sur la peau; une petite machine pneumatique à un

seul cylindre, mastiquée sur la tubulure de la cloche, permet de faire le vide. La peau, pressée de dedans en dehors par les gaz et les liquides de l'économie, se tuméfie, et, si on la pique, le sang jaillit abondamment.

148. **Flamage des tissus de coton.** — L'une des applications les plus curieuses de la machine pneumatique est la suivante. Les fils de coton sont toujours plus ou moins barbus, de sorte que les tissus que l'on en obtient ne sont jamais parfaitement unis; il faut pourtant réaliser cette condition dans certains cas, par exemple pour les calicots destinés à l'impression. On procède au flamage de ces toiles. Pour cela, on amène du gaz d'éclairage dans un tube sur lequel une série de trous est disposée en file rectiligne; on enflamme le gaz au sortir de ces trous, et l'on fait passer le tissu rapidement au-dessus de la flamme. Pour donner à celle-ci une longueur suffisante et une grande régularité, on dispose un deuxième tube parallèlement au premier; ce tube porte une fente longitudinale, faisant face à la flamme, et est mis en communication avec la machine pneumatique. L'aspiration ainsi produite force la flamme à traverser le tissu, et si celui-ci est animé d'un mouvement convenable, les barbes sont brûlées sans que la toile soit altérée.

149. **Renouvellement de l'air dans les mines de houille.** — Dans certaines mines de houille, pour renouveler l'air, on dispose à l'ouverture d'une galerie une véritable machine pneumatique, formée de deux grands corps de pompe en bois, dans lesquels une machine à vapeur fait mouvoir des pistons. Ce procédé est d'ailleurs peu employé.

150. **Expériences diverses.** — Rappelons que dans les cabinets de physique on fait à l'aide de la machine pneumatique diverses expériences, telles que le jet d'eau dans le vide, le moulinet dans le vide, le crève-vessie, le coupe-

pomme, les hémisphères de Magdebourg. Il est intéressant de revenir sur cette dernière expérience.

151. **Hémisphères de Magdebourg.** — Deux hémisphères creux sont accolés l'un à l'autre par un plan diamétral que, pour fixer les idées, nous admettrons horizontal. On fait le vide à l'intérieur aussi parfaitement que possible et, pour plus de simplicité, nous supposerons négligeable la force élastique de l'air restant. Si l'on veut séparer les hémisphères, on éprouve une résistance considérable due à ce que l'atmosphère pressant sur eux les maintient rapprochés. Évaluer cette résistance est au premier abord difficile, car la pression atmosphérique s'exerce partout normalement à la paroi, et l'on voit bien que l'effort à vaincre n'est qu'une fraction de cette pression sur la surface de la sphère. Or, supposons que la surface de chaque hémisphère ait la forme d'un escalier à marches horizontales et circulaires, ayant quelque analogie avec les marches d'un perron ; ces surfaces se composeraient de portions horizontales et verticales ; les pressions exercées sur les surfaces verticales ne s'opposeraient en aucune façon à la séparation des hémisphères, tandis que les pressions sur les surfaces horizontales agiraient directement en sens inverse de l'effort à exercer ; ce sont donc celles-ci seules qu'il faudrait considérer. Ramenons, par la pensée, dans un même plan, toutes les surfaces horizontales des marches de notre escalier ; en se plaçant côte à côte, elles couvriraient une surface précisément égale à celle d'un grand cercle de la sphère ; donc, pour un hémisphère, l'action de l'atmosphère serait égale au poids d'une colonne de mercure ayant pour base la surface d'un grand cercle de l'appareil, et pour hauteur celle du baromètre à l'instant considéré. Comme il y a deux hémisphères, en doublant ce poids, on aurait la mesure de l'effort à vaincre pour séparer les hémisphères dont la surface extérieure eût été modifiée comme il vient d'être indiqué. Mais remarquons que la dimension et le nombre

des marches n'a aucune influence sur le résultat, de sorte que celui-ci reste le même quand la hauteur des marches diminue indéfiniment, en même temps que leur nombre augmente, c'est-à-dire quand, à la limite, on est revenu à la surface sphérique elle-même.

Exercice. — On a construit deux hémisphères de Magdebourg de 1 mètre de diamètre. On demande la pression qu'ils supporteront après le vide fait, en supposant le baromètre à 0^m,76 de hauteur, et la valeur de l'effort nécessaire pour les séparer. Le mercure a pour densité 13,59.

CHAPITRE VIII.

ÉCOULEMENT DES LIQUIDES ET DES GAZ.

152. **Siphon.** — Le siphon consiste en un tube ABC (fig. 71), à deux branches inégales, destiné au transvasement des liquides. Supposons que, par un moyen quelcon-

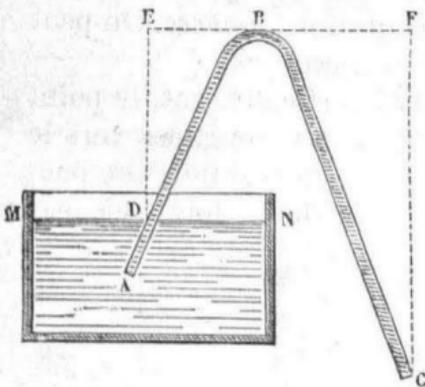


Fig. 71.

Siphon.

que, on ait rempli ce tube du liquide à transvaser, et que son extrémité A soit plongée dans un vase MN contenant le même liquide. Considérons une tranche liquide dans l'intérieur du tube, au point le plus élevé B, et cherchons à quelles pressions elle est soumise de part et d'autre. Sur le niveau du liquide, dans le vase MN, s'exerce la pression at-

mosphérique. Soit H la hauteur d'une colonne de liquide à transvaser, susceptible de faire équilibre à la pression atmosphérique; sur tout le plan MN et, par suite, en D, s'exerce une pression mesurée par H (106); soit h la hauteur DE, la pression exercée sur la surface B, dans le sens DB, sera moindre qu'en D, de toute la pression résultant de la colonne DB: ce sera donc $H - h$. De même en C, à l'orifice du tube, s'exerce la pression atmosphérique, et si h' est la hauteur CF, la pres-

sion sur la tranche B dans le sens CB est mesurée par $H - h'$. Ainsi, de part et d'autre de la tranche considérée, les pressions exercées sont mesurées par les poids de colonnes du liquide considéré, ayant pour base la surface de la tranche, et pour hauteur, d'une part $H - h$, et d'autre part, $H - h'$. Si les hauteurs h et h' étaient égales, les pressions $H - h$ et $H - h'$ le seraient aussi; mais il n'en est pas ainsi, car h' étant plus grand que h , la différence $H - h$ surpasse la différence $H - h'$ et l'écoulement a lieu, de sorte que le vase MN se vide par l'orifice C. Il est à remarquer que l'excès de la pression $H - h$ sur $H - h'$ a pour valeur $h - h'$, et c'est en vertu de la pression exercée par une colonne du liquide égale à $h' - h$ que l'écoulement a lieu.

153. Nous avons supposé le siphon plein du liquide sur lequel on opère; on dit alors qu'il est *amorcé*. On peut opérer l'amorçement de plusieurs manières :

1° On peut tenir le tube ABC verticalement, le point B en bas, et les deux ouvertures A et C tournées vers le haut et placées dans un même plan horizontal; on peut alors remplir le siphon, fermer avec deux doigts les orifices A et C, retourner, plonger l'extrémité de A dans le vase MN, et l'appareil étant dans la position de la figure, retirer les doigts.

2° On peut plonger la petite branche dans le liquide et aspirer en C avec la bouche. Ce procédé n'est pas praticable quand le liquide ne peut être introduit dans la bouche.

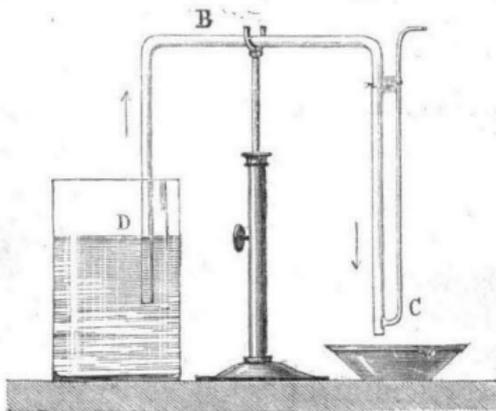


Fig. 72.

Siphon.

3° On soude au siphon (fig. 72), vers l'extrémité infé-

rieure C de la grande branche et plus bas que le point D, un tube de verre très-étroit. On ferme l'orifice C avec le doigt, et on aspire par le tube latéral. On s'arrête quand le liquide remonte dans ce tube. Si ce liquide était même assez dangereux pour ne pouvoir être mis en contact avec le doigt, il faudrait garnir celui-ci d'un morceau de caoutchouc.

4° Dans les fabriques d'acide sulfurique, on transvase ce liquide avec des siphons en platine, que l'on amorce d'une façon particulière (fig. 73). La grande branche est beaucoup plus longue que l'autre; elle porte, à sa partie

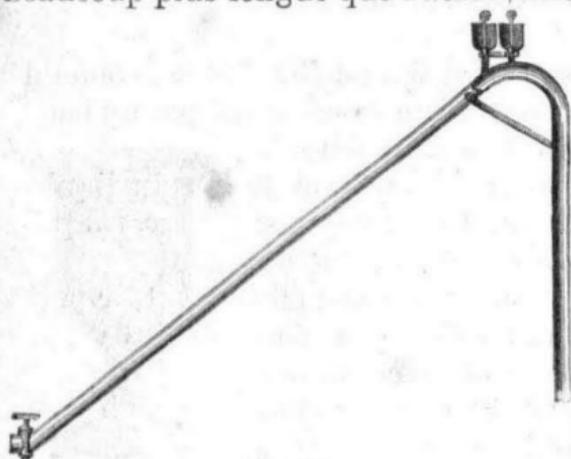


Fig. 73.

Siphon pour l'acide sulfurique.

supérieure, deux orifices munis d'entonnoirs, et fermés par des bouchons, pour amorcer, on ferme l'extrémité de la grande branche qui est munie, à cet effet, d'un robinet, et on verse de l'acide sulfurique par l'entonnoir de l'orifice inférieur; cet acide remplit la grande

branche dont l'air expulsé sort par l'orifice supérieur. On ferme les deux orifices, on ouvre le robinet, et la grande branche du siphon se vide; l'air contenu dans la petite branche remplit l'espace qu'abandonne l'acide et, par suite de cette augmentation de volume, il diminue de force élastique; mais alors la pression atmosphérique, n'étant plus suffisamment contre-balancée par la force élastique de l'air emprisonné, force le liquide à s'élever dans la petite branche jusqu'en haut du siphon, et même à retomber dans la grande branche, de manière à déterminer l'amorcement.

154. **Siphon flotteur.** — On engage quelquefois la petite branche du siphon dans un flotteur, en liège par exemple; il en résulte que cette branche enfonce toujours de la même quantité dans le liquide, et que la différence de hauteur entre le niveau du liquide à transvaser, et l'orifice de la grande branche ne change pas de valeur, de sorte que la pression $h' - h$ reste la même, et que l'écoulement est continu et constant.

On peut, avec le siphon, obtenir aussi des écoulements intermittents; le vase de Tantale, les fontaines intermittentes naturelles en fournissent la preuve.

155. **Vase de Tantale.** — Un siphon (fig. 74) est contenu dans un vase dont le pied est un canal fermé par un bouchon dans lequel passe la longue branche d'un siphon. On verse de l'eau dans le vase; si elle ne s'élève pas tout à fait jusqu'au sommet du siphon, celui-ci ne s'amorce pas; mais, si l'on ajoute un peu plus de liquide, l'amorçement a lieu et le vase se vide. Si dans le verre tombe continuellement un filet d'eau plus faible que celui qui s'écoule par le siphon, le verre ne se videra pas moins, et de plus le siphon cessera d'être amorcé; mais l'absence d'écoulement permettra au verre de se remplir, et de cette façon le siphon pourra être amorcé de nouveau; l'on aura ainsi un écoulement intermittent. Le vase de Tantale tire son nom d'une disposition qu'on lui donne souvent; le siphon est couché le long de la paroi, si l'on place les lèvres au-dessus de lui et que l'on incline le vase pour boire, l'eau vient recouvrir le sommet du siphon, qui alors s'amorce, et le verre se vide.



Fig. 74

Vase de Tantale.

156. **Fontaine intermittente naturelle.** — On trouve dans la nature de véritables vases de Tantale. L'eau filtrant à tra-

vers les fissures du sol (fig. 75), arrive dans un réservoir, le remplit lentement; lorsque le niveau a atteint une certaine hauteur, un canal latéral, en forme de siphon, se trouve plein et s'amorce; le réservoir se vide par ce moyen beaucoup plus vite qu'il ne se remplit, de sorte qu'à un certain moment, la courte branche du siphon ayant son extrémité au-dessus du niveau de l'eau, l'écoulement s'arrête pour recommencer plus tard; le phénomène pré-

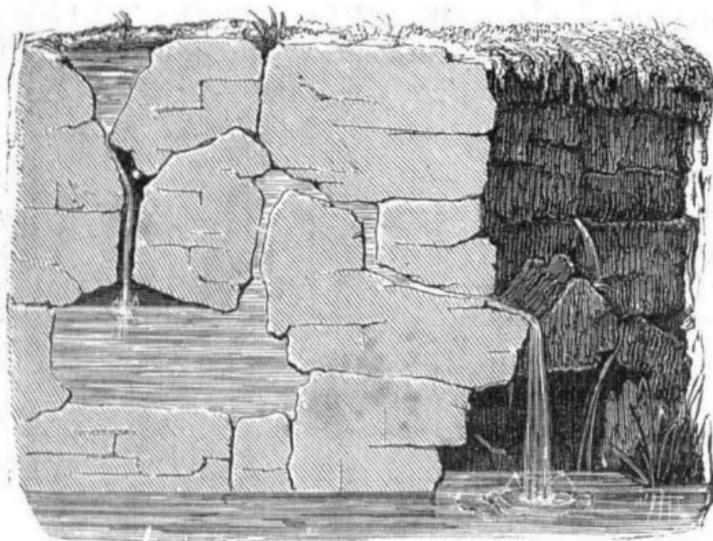


Fig. 75.

Fontaine intermittente naturelle.

sente d'ordinaire une grande régularité dans ses périodes. La figure 75 représente une fontaine intermittente naturelle au moment où l'écoulement est près de cesser.

157. **Siphons capillaires.** — Si l'on place une mèche de coton ou d'amiante, un chiffon, à cheval sur la paroi d'un vase plein de liquide, ce liquide s'élève par capillarité entre les fils, et, redescendant ensuite le long de la mèche, il en résulte un siphon qui s'amorce de lui-même;

si le liquide contient des poussières en suspension, il se trouve en même temps filtré. C'est ainsi que l'on filtre et que l'on transvase l'encre de Chine après qu'on l'a broyée.

158. **Vase de Mariotte.** — Puisque c'est la pression qu'exerce le liquide au-dessus de l'orifice qui détermine son écoulement, on voit que, dans un vase quelconque, l'écoulement ne pourra être constant, le niveau du liquide dans le vase se rapprochant sans cesse de l'orifice de sortie. Mariotte est arrivé à obtenir cette constance dans l'écoulement par l'artifice suivant. Le vase employé (fig. 76) est un flacon portant vers le bas une tubulure fermée par un bouchon que traverse un tube *b* qui est l'orifice de sortie. Le goulot est fermé aussi par un bouchon de liège qui supporte un tube plongeant dans le liquide jusqu'en *a*. Supposons que l'on enfonce ce tube de façon que *a* et *b* se trouvent sur le même plan horizontal; l'écoulement qui se produira dès qu'on aura ouvert *b* s'arrêtera presque aussitôt et l'on remarquera que le niveau du liquide dans le tube *a* sera alors arrivé à l'orifice de ce tube. Examinons quelles seront à ce moment les pressions dans les différents points du plan horizontal considéré. En *b*, nous trouvons la pression atmosphérique qui s'exerce directement; en *a*, il en est de même;

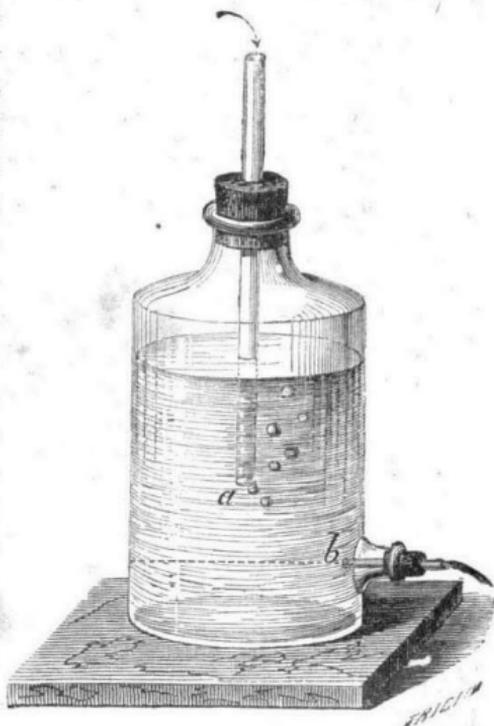


Fig. 76.

Vase de Mariotte.

dans les autres points, il y a la pression des couches liquides situées au-dessus du plan, augmentées de la force élastique de l'air contenu dans le flacon au-dessus du liquide; puisque l'écoulement s'est arrêté, c'est que ces deux actions réunies équivalent à la pression atmosphérique. Relevons maintenant le tube *a* dans la situation indiquée par la figure; la pression atmosphérique qui s'exerce à son orifice l'emportera sur la pression existant dans le plan horizontal où cet orifice a été amené; cet excès de pression fera rentrer de l'air qui ira rejoindre celui qui est au sommet du flacon et augmenter sa force élastique; au niveau *a*, la pression sur tout le plan horizontal sera bientôt la pression atmosphérique, et, sur le plan horizontal qui passe par *b*, l'on aura la pression atmosphérique augmentée du poids d'une colonne d'eau ayant pour hauteur la distance des plans horizontaux passant par *a* et par *b*. Comme à l'orifice *b* la pression atmosphérique s'exerce seule, l'écoulement se produira, et cela d'une manière constante, puisque l'excès de pression qui le détermine reste constamment le même tant que le niveau du liquide dans le flacon ne descend pas au-dessous de *a*.

159. **Encrier siphonide.** — On voit, par l'étude des appareils précédents, quel rôle joue la pression atmosphérique dans l'écoulement des liquides. L'encrier siphonide, la

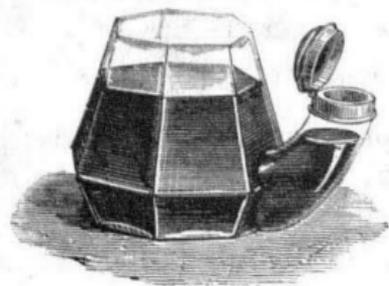


Fig. 77.

Encrier siphonide.

lampe d'Argand, en sont d'autres exemples. Dans le premier (fig. 77), les deux niveaux du liquide ne sont pas les mêmes; sur l'un d'eux s'exerce la pression atmosphérique, et sur l'autre, celle de l'air emprisonné dans l'encrier; cet air étant à une pression moindre que la pression atmosphérique, la différence de niveau se trouve

expliquée ; l'encre s'usant et s'évaporant, il arrive un moment où le niveau dans le tuyau s'abaisse assez pour que de l'air puisse rentrer, et aller, comme dans le vase de Mariotte, augmenter la force élastique de celui qui est emprisonné ; à ce moment, le niveau s'abaisse un peu dans l'encrier et monte dans le tube.

160. **Lampe d'Argand**¹. — L'huile est contenue dans un réservoir *v* (fig. 78) que l'on retire et que l'on remet à vo-

lonté. Si on le retire, une soupape métallique retombe par son propre poids, et, fermant l'orifice, empêche l'huile de sortir. Si on replace le réservoir, une tige fixée à la soupape la soulève en butant contre le fond de l'appareil. L'huile s'écoule par l'ouverture *a*, le tube *b*, et arrive dans le bec ; mais là elle s'arrête à peu de distance de l'extrémité, parce que l'huile s'est élevée dans les deux vases communiquants un peu au-dessus de l'orifice *a*, qui est ainsi noyé. L'écoulement n'est plus possible,

parce que, à l'extérieur, s'exerce la pression de l'air atmosphérique, et à l'intérieur du vase *v*, il y a, comme dans l'encrier siphonide, une colonne liquide soulevée et de l'air dilaté. C'est la capillarité qui élève l'huile dans la mèche.

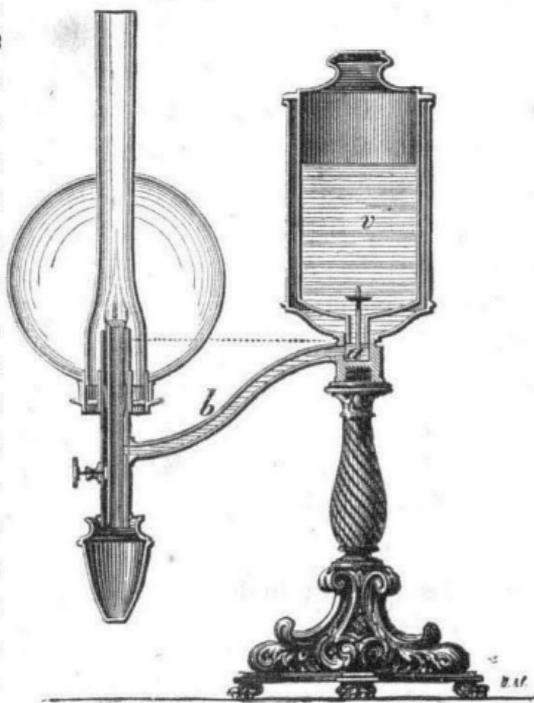


Fig. 78.

Lampe d'Argand.

¹. Argand (Aimé), né à Genève, mort en 1803, inventeur véritable des quinquets.

Par suite de l'usure du combustible, l'orifice *a* se découvre de temps en temps, de l'air rentre, de l'huile sort de *v*. L'orifice *a* est échancré pour faciliter la rentrée de l'air.

161. **Gazomètres.** — Il est encore plus important de pouvoir régler l'écoulement des gaz que celui des liquides. Pour satisfaire aux exigences de l'éclairage des villes, il faut, à l'aide de très-grands appareils, lancer le gaz dans toutes les directions, avec une vitesse parfaitement constante, c'est-à-dire à l'aide d'une pression sûrement réglementée. On y arrive à l'aide des gazomètres. Chacun de ces appareils (fig. 79) consiste en une citerne pleine d'eau

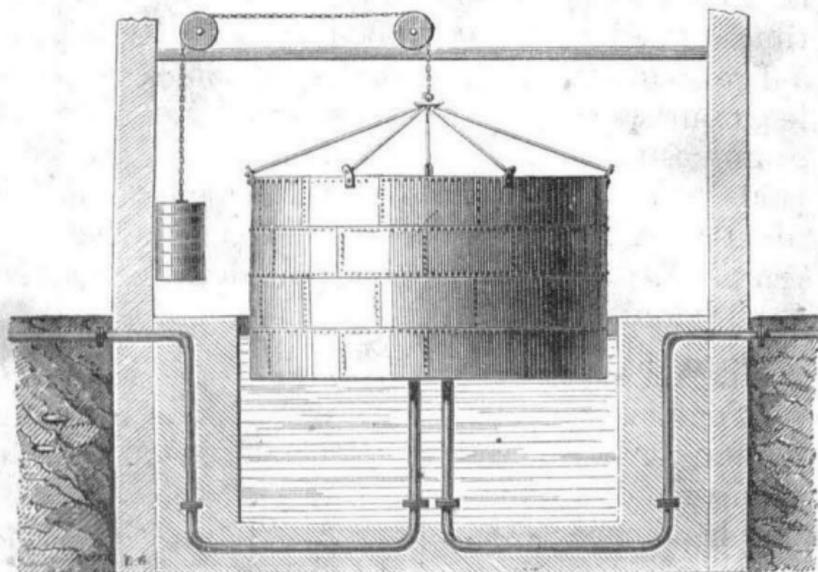


Fig. 79.

Gazomètre.

et bien étanche, assez solide pour résister aux pressions qu'y exerce le liquide. Une cloche renversée, formée de feuilles de tôle réunies par des clous rivés, plonge dans l'eau de la citerne. C'est avec cette cloche que le gaz est emprisonné; il y arrive par un tube se recourbant dans l'eau, et s'écoule par un autre disposé de même; ces deux tubes sont munis de robinets que l'on ouvre et que l'on

ferme tour à tour. La cloche, par son poids, exercerait, dans certains cas, une pression trop considérable; elle est retenue par un contre-poids qui passe sur des poulies, mais qui n'est cependant pas aussi considérable que l'on pourrait croire. Soit, par exemple, un gazomètre dont la cloche ait 1 000 mètres carrés de base, et 20 mètres de hauteur; sa capacité sera de 20 000 mètres cubes. Supposons que l'excès de pression du gaz dans l'appareil, sur la pression atmosphérique, soit mesuré par une colonne d'eau de 5 centimètres de hauteur; la différence de niveau dans la cloche et hors de la cloche sera de 5 centimètres. Mais une pression de cette nature exercée sur toute la surface du gaz est égale au poids d'un cylindre d'eau ayant 5 centimètres de hauteur et 1 000 mètres carrés de base, c'est-à-dire 50 000 kilogrammes. La différence de poids entre le gazomètre et le contre-poids devant être de 50 000 kilogrammes à l'époque de la combustion du gaz, ce contre-poids ne peut avoir une grande valeur; mais on doit l'augmenter considérablement si, au lieu de lancer le gaz, on remplit l'appareil, parce qu'il faut alors que sous la cloche la pression n'excède pas celle de l'atmosphère.

162. Loi de Torricelli sur la vitesse d'écoulement des liquides.

— Nous avons vu dans tout ce qui précède que l'écoulement d'un liquide par un orifice dépendait de la hauteur du niveau du liquide au-dessus de l'orifice. La loi précise du phénomène est la suivante : *La vitesse d'un liquide, à sa sortie d'un orifice pratiqué dans les parois d'un réservoir, est celle qu'aurait acquise un corps pesant en tombant librement de la hauteur comprise entre le niveau du liquide dans le réservoir et le centre de cet orifice.*

Ce théorème, connu sous le nom de théorème de Torricelli, a été établi par ce physicien en 1643, comme une conséquence des lois de la chute des corps, dues à Galilée. Cette loi conduit à la formule :

$$v = \sqrt{2g H},$$

v étant la vitesse du liquide à la sortie de l'orifice, H la charge, c'est-à-dire la hauteur du liquide dans le réservoir au-dessus de l'orifice de sortie. Pour démontrer cette loi par l'expérience, on se sert d'un appareil dû à S'Gravesande. Un cylindre métallique (fig. 80) est surmonté d'un autre cylindre beaucoup plus large avec lequel il communique; ces deux cylindres sont remplis d'eau jusqu'à un niveau tracé sur la paroi du plus large. Sur le

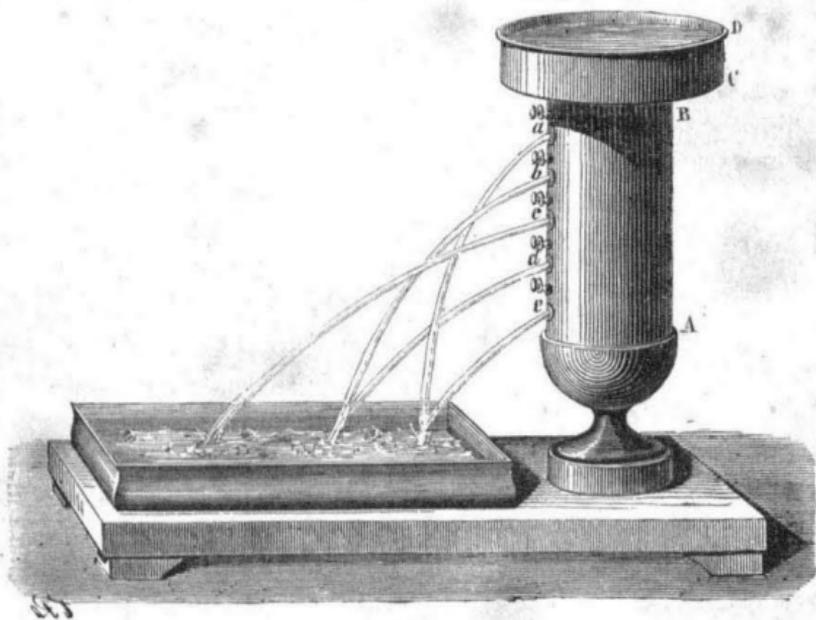


Fig. 80.

Appareil pour démontrer la loi sur l'écoulement des liquides.

petit cylindre, et selon une même ligne verticale, sont pratiquées cinq ouvertures équidistantes fermées chacune par un obturateur. Au dehors et en face des trous est une caisse rectangulaire destinée à recevoir l'eau qui s'écoule. Derrière l'appareil on peut placer une planchette sur laquelle sont tracées les paraboles que doivent décrire, en vertu des lois de la balistique, les jets liquides, s'ils ont au départ la vitesse donnée par la loi de Torricelli. On

voit qu'il en est ainsi. L'amplitude du jet fourni par l'ouverture médiane est la plus grande, les autres sont égales deux par deux quand elles répondent à des orifices également éloignés de l'orifice central.

163. On peut encore citer, comme vérification de la loi de Torricelli, le fait que les jets d'eau s'élèvent au niveau du liquide dans le réservoir; cela résulte en effet de la valeur précédente de la vitesse à la sortie. On montre ce fait à l'aide d'un vase de verre (fig. 81) sur lequel s'embranché un tube percé d'un orifice par lequel le liquide jaillit verticalement.



Fig. 81. Jet d'eau.

164. La loi de Torricelli n'est vraie que dans le cas des orifices en minces parois, c'est-à-dire dans lesquelles la plus petite dimension de l'orifice est toujours supérieure à l'épaisseur de la paroi; sans cela la vitesse est influencée par les ajutages et leur attraction sur le liquide. Il n'en reste pas moins la loi suivante : *Les bouches de sortie étant identiques, les vitesses sont toujours entre elles comme les racines carrées des charges.*

LIVRE III

DE LA CHALEUR.

CHAPITRE I

THERMOMÈTRES.

165. **Chaleur et froid.** — Le témoignage de nos sens nous rend compte de la chaleur et du froid ; mais ce ne sont là que deux degrés d'action d'une même cause. Prenons deux corps inégalement échauffés, l'un sera source de chaleur par rapport à l'autre, mais il pourra être source de froid par rapport à un troisième. Un corps n'est donc que plus ou moins chaud.

166. **Température.** — La principale action de la chaleur sur les corps est un effet de dilatation ; plusieurs expériences prouvent ce fait et ont été exposées avec détail dans le cours de première année. C'est sur ce phénomène de la dilatation que sont basés les appareils destinés à mesurer les températures. On ne peut définir d'une façon à la fois précise et claire le mot *température*, sans faire usage d'expressions qui ne seraient pas définissables à leur tour ; mais tout le monde a la notion de la température

c'est une de ces idées primordiales qui portent leur définition en elles-mêmes. Ce que l'on peut poser en principe, c'est que : si des corps mis en relation, et soustraits à toute influence étrangère, ne modifient en rien leur état ni leur volume, ils sont dits à la même température ; s'il n'en est pas ainsi, ces corps sont à des températures différentes, celui qui se comporte comme source de chaleur est considéré comme à une température plus élevée.

167. **Mesure des températures.** — Pour la mesure des températures, on prend un corps qui, soumis à l'action d'une source de chaleur, se dilate ; ce corps, placé dans un milieu, se met en équilibre de température avec lui et prend un certain volume ; si, placé dans un second milieu, il prend le même volume, les deux milieux sont à une même température. Un *thermomètre* est donc un corps qui peut servir à constater lui-même l'égalité ou l'inégalité de son propre volume dans les différents lieux où il est placé. Ce corps ne peut cependant donner une véritable mesure de la température, car on ne sait ce que c'est que des températures doubles, triples, etc., les unes des autres.

168. **Choix d'un corps thermométrique.** — On doit exclure les solides de la liste des corps thermométriques usuels. D'abord ils sont peu dilatables, ensuite il est difficile de trouver deux échantillons identiques d'un même corps ; car en admettant, ce qui a rarement lieu, que les solides employés soient chimiquement purs, ils ont été forcément soumis à des actions mécaniques diverses qui ont leur influence sur la dilatation ; les thermomètres solides ne peuvent pas être rigoureusement comparables entre eux.

169. Les liquides sont plus dilatables, et peuvent être pris sous des formes qui rendent faciles à constater leurs variations de volume ; de plus ils peuvent, en général, être obtenus purs et identiques. Il reste une cause d'er-

reur qui tient au défaut d'identité des vases renfermant le liquide, et cette influence, bien que faible, n'est cependant pas négligeable.

170. Les gaz offrent l'avantage d'une grande dilatation, et d'une pureté absolue; la dilatation de l'enveloppe influe fort peu, et par suite les variations des propriétés physiques de cette enveloppe ne peuvent causer d'erreurs appréciables; seulement les thermomètres à gaz ont des dimensions considérables, leur observation est une expérience fort délicate et exige des calculs souvent pénibles. On emploie donc les liquides pour les observations usuelles, et les gaz servent dans les recherches scientifiques très-déli-
cates.

171. **Thermomètre à mercure.** — Parmi les liquides, le mercure présente de grands avantages, à cause de la facilité avec laquelle on purifie ce métal, et parce qu'il reste liquide à toutes les températures que l'on a d'ordinaire besoin d'observer. Le thermomètre à mercure se compose d'un réservoir cylindrique ou sphérique, soufflé à l'extrémité d'un tube capillaire; le réservoir et une portion du tube sont pleins de mercure. La colonne liquide est d'autant plus longue que la température est plus élevée, et une échelle de graduation placée le long du tube permet de comparer entre elles les indications du thermomètre.

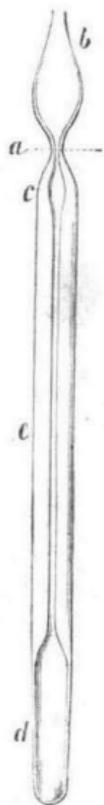


Fig. 82.
Construction
du thermomètre
à mercure.

172. **Construction du thermomètre à mercure.** — Pour construire ces appareils, l'on se sert de tubes capillaires; à l'une des extrémités a été soufflé le réservoir, à l'extrémité opposée est une ampoule *b* (fig. 82), terminée

par une pointe effilée et fermée. Cette ampoule est à elle seule plus volumineuse que le réservoir *d* et le tube *e*. Le tube, ainsi préparé, est fermé à la lampe aussitôt après la fabrication, pour empêcher la poussière de rentrer à l'intérieur, ce qui forcerait à un nettoyage long et difficile. La pointe étant brisée, on chauffe l'ampoule; l'air qu'elle contient augmente de force élastique, refoule l'air extérieur en se dilatant; on plonge la pointe dans le mercure (fig. 83) et on laisse refroidir; la force élastique de

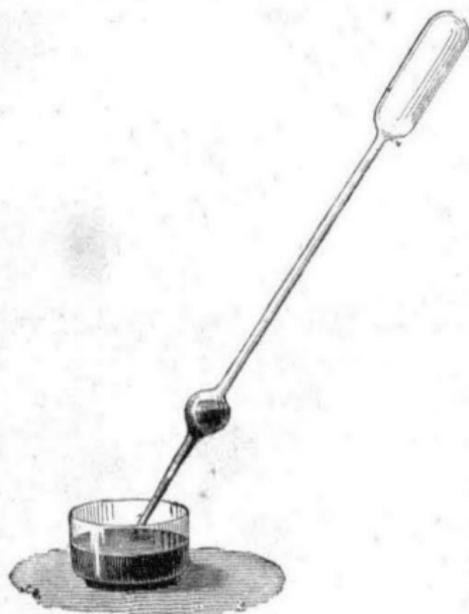


Fig. 83.

Remplissage du thermomètre.

l'air de l'ampoule diminue et ne peut plus faire équilibre à la pression atmosphérique, le mercure monte dans l'ampoule, la remplit en grande partie; on redresse le tube. On chauffe ensuite le réservoir *d*, l'air contenu dans celui-ci augmente à son tour de force élastique, repousse le mercure de l'ampoule *b* et sort partiellement à travers ce liquide; on laisse refroidir, l'appareil étant toujours vertical; par le fait de ce refroidissement, la force élastique de l'air diminue, et le mercure, pressé par l'atmosphère plus que par le gaz du réservoir, pénètre en partie dans ce dernier. L'appareil est alors posé sur une grille (fig. 84); on fait bouillir le mercure dans le réservoir, la vapeur produite chasse l'air contenu dans l'appareil, cet air se dégage au travers du mercure qui le surmonte; on laisse refroidir, la vapeur se condense, n'exerce plus aucune pression sur le liquide de l'ampoule, de sorte que celui-ci, sous l'influence de la pression atmosphérique, surmonte l'action capillaire et remplit le réservoir et le tube; il faut d'ail-

leurs avoir soin de chauffer aussi l'ampoule, sans quoi le mercure qu'elle contient, arrivant froid dans le réservoir, le ferait briser infailliblement. S'il restait de l'air dans le réservoir après cette opération, il suffirait d'une nouvelle ébullition pour le chasser. Cela fait, on détache l'ampoule, et on règle la quantité de mercure qui doit rester dans l'appareil. Supposons que le thermomètre ne doive pas être employé au-dessus d'une certaine température, on le porte à cette température; du mercure sort de l'appareil, et celui qui reste suffit aux observations. On ferme ensuite à la lampe l'extrémité du tube en *a* (fig. 82), en ménageant une petite chambre *c*, à la partie

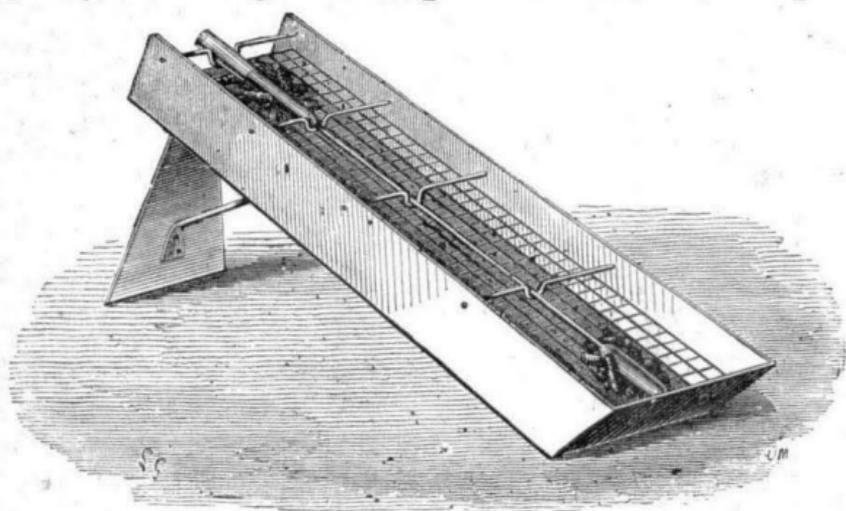


Fig. 81.

Ébullition du mercure pour la préparation du thermomètre.

supérieure de la colonne. Si par hasard on porte le thermomètre à une température supérieure à celle à laquelle il doit servir, le mercure se répand dans la chambre *c*, sans laquelle il briserait l'appareil par l'effet de la dilatation.

173. Graduation du thermomètre à mercure. — Pour rendre comparables les indications de différents thermomètres, la première idée qui se présente à l'esprit est celle qu'eut

Galilée, de construire des thermomètres identiques entre eux ; mais ces dimensions identiques sont très-difficiles à obtenir, et de plus présentent de grands inconvénients à cause des circonstances variables dans lesquelles on se trouve placé. Newton ¹ eut le premier l'idée de définir une température fixe par un phénomène facile à reproduire et ayant toujours lieu à la même température : ce phénomène est le point de fusion de la glace. Fahrenheit trouva un autre phénomène, l'ébullition de l'eau, qui se fait aussi à une température constamment la même dans les mêmes circonstances ; la première de ces deux températures a été prise pour point de départ de l'échelle des températures, c'est le zéro ; à la deuxième, on a placé le 100^e degré.

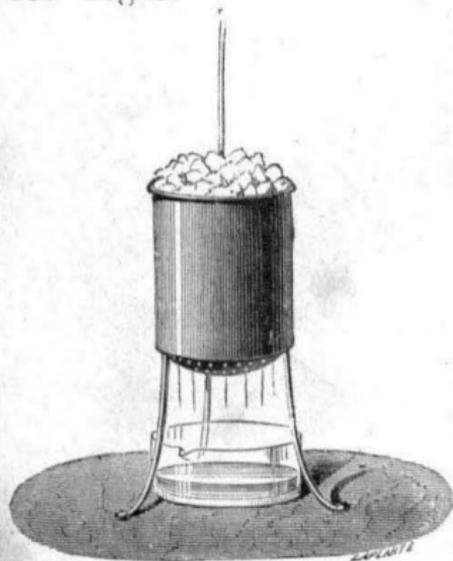


Fig. 85.

Détermination du zéro.

174. Détermination du zéro.
— Pour déterminer le point où sur le thermomètre l'on devra inscrire le zéro, on se sert d'un vase dont les parois sont percées de petits trous comme une écumoire ; c'est dans ce vase (fig. 85) que l'on place le thermomètre, entouré, jusqu'au niveau du mercure, soit de neige, soit de glace finement pilée ; l'eau s'écoule par les trous. On marque un trait au point où le niveau du mercure se fixe, c'est le zéro cherché.

175. Détermination du 100^e degré. — On suspend ensuite le thermomètre dans le vase de Wollaston (fig. 86). C'est

1. Newton (Isaac), né le 25 décembre 1642 à Woolstrop, dans le comté de Lincoln ; mort le 20 mars 1727. Il fut un des plus grands génies qui aient existé, découvrit la gravitation universelle, et, en même temps que Leibnitz, le calcul infinitésimal.

une chaudière cylindrique AB dans laquelle on fait bouillir de l'eau ; la vapeur circule à l'intérieur d'un tube cylindrique CD, dans l'axe duquel est soutenu le thermomètre, elle redescend extérieurement à ce tube et s'échappe par A ; de cette façon, l'espace qui contient le thermomètre est préservé de l'action refroidissante de l'air extérieur. On marque 100° au point où le mercure s'arrête, si toutefois la pression extérieure est de 760 millimètres ; quand il n'en est pas ainsi, le niveau du mercure est au-dessus ou au-dessous du point 100°, d'autant de fois $\frac{1}{27}$ de degré, que le baromètre indique de millimètres en plus ou en moins de 760. Cela tient à ce que (voir le cours de première année) la température d'ébullition d'un liquide dépend de la pression que ce liquide supporte. En réalité, c'est la pression dans l'enceinte où se trouve le thermomètre qu'il faudrait évaluer ; d'ordinaire, on s'assure qu'elle est la même que la pression atmosphérique en se servant d'un petit manomètre communiquant avec cette enceinte et qui n'est pas indiqué sur la figure.

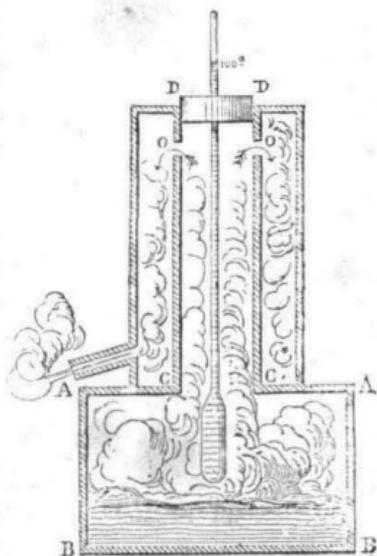


Fig. 86.

Détermination du 100^e d. gré.

176. **Division de l'échelle.** — Quand on a obtenu le point zéro et le point 100°, il suffit de diviser la portion de la tige contenue entre ces deux points en 100 parties d'égal volume et de prolonger les divisions au-dessus et au-dessous. Au lieu de diviser en parties d'égal volume, on se contente de graduer en parties d'égale longueur, en se servant pour cela de la machine à diviser ; il faut donc, pour que l'appareil fournisse des indications exactes, que son tube soit rigoureusement cylindrique. On s'assure que cette condition est remplie, en introduisant dans le tube

une colonne de mercure de 20^{mm} environ, lui faisant occuper diverses positions, et constatant que la longueur n'a pas changé; pour cela, l'on fait usage de la machine à diviser et du microscope que porte son chariot; dans ce microscope est un fil tendu, que l'on amène successivement au contact de l'image de chaque extrémité de la goutte liquide, et l'on peut, à l'aide de la vis micrométrique, en déduire la longueur de la goutte.

177. Calibrage des tubes thermométriques. — En réalité, il n'y a pas de tubes parfaitement cylindriques, et quand on veut opérer avec une grande rigueur, après avoir rejeté tous les tubes qui présentent des défauts tels que grains de sable, etc., ou qui ne sont pas déjà très-sensiblement cylindriques, on procède au calibrage, du moins pour les thermomètres de grande précision. Une goutte de mercure est introduite dans le tube et amenée à l'un des bouts; on marque avec un pinceau très-délié la position de ses extrémités; on la fait glisser ensuite de façon à l'amener exactement à la suite du dernier trait, on marque encore la position de la deuxième extrémité; on promène la goutte dans tout le tube, qui est ainsi divisé en parties d'égale capacité; ces parties étant déjà très-petites, et le tube très-sensiblement cylindrique, on peut, sans erreur appréciable subdiviser en parties d'égale longueur.

178. Thermomètre à échelle arbitraire. — La graduation sur le tube doit, quand il y a calibrage, précéder le remplissage; il est donc difficile qu'elle coïncide avec celle qui indique les degrés; aussi les thermomètres de précision sont-ils à échelle arbitraire, c'est-à-dire qu'au bas du tube on marque zéro, et que les divisions de la tige ont des grandeurs tout à fait quelconques. Supposons que nous ayons à nous servir d'un appareil ainsi construit; il faudra d'abord le placer dans la glace fondante, le mercure s'arrêtera à la division 127, par exemple; dans le vase de Wollaston, le mercure viendra se fixer en un autre point,

soit à la division 512; on en conclura que ces deux divisions correspondent aux points 0° et 100° ; de plus, chaque division de la tige correspond à une fraction de degré égale à $\frac{100}{385}$, puisqu'il y a 385 divisions de la 127° à la 512° , et que ces 385 divisions correspondent à 100° . Cela fait, on construit une table indiquant les valeurs en degrés de une, deux, trois, etc., jusqu'à neuf divisions du thermomètre; pour cela, on effectue la division $\frac{100}{385}$, ce qui donne 0,25974 : ce nombre est le premier de la table; en l'ajoutant à lui-même, on a le second; quant aux autres, il suffit, pour obtenir chacun d'eux, d'ajouter à 0,25974 le nombre qui les précède immédiatement. On a ainsi :

1	0,25974
2	0,51948
3	0,77922
4	1,03896
5	1,29870
6	1,55844
7	1,81818
8	2,07792
9	2,33766

Supposons que, à un certain moment, dans le thermomètre considéré, le mercure s'arrête à la division 716, et que l'on veuille connaître la température qu'il indique. On remarquera d'abord que le mercure s'élève à $716 - 127 = 589$ divisions au-dessus de celle qui correspond au zéro, puis l'on cherchera à combien de degrés correspond ce nombre de 589 divisions; on prendra les nombres d'ordre 9, 8 et 5, on les inscrira les uns au-dessous des autres, en avançant d'un rang à droite chacun des nombres successifs, et on fera l'addition :

2,	33766
20,	7792
129,	870
<hr/>	
152,	98686

On place la virgule comme dans le premier nombre inscrit, et l'on voit que la température est de $152^{\circ},98$,

179. Déplacement du zéro. — Des expériences de Legrand et de Despretz ¹ ont prouvé que le point où le mercure d'un thermomètre s'arrête dans la glace fondante est sujet à varier avec le temps; on dit que le zéro se déplace; cela tient à ce que le verre, chauffé à une température un peu élevée, subit une trempe par le refroidissement (25); la valeur du degré ne change pas pour cela d'une manière appréciable. Au bout d'un certain temps, la position des points fixes devient à peu près invariable. Le fait du déplacement du zéro conduit, pour les thermomètres à échelle arbitraire, à modifier de temps à autre le nombre à retrancher de l'indication du thermomètre avant de faire usage de la table; pour les thermomètres gradués en degrés, il y a une correction à faire subir aux lectures quand le zéro s'est déplacé..

180. Thermomètre à alcool. — On a employé d'autres liquides que le mercure pour la construction des thermomètres, principalement l'alcool. Les tubes de ces thermomètres sont moins capillaires que ceux des thermomètres à mercure; l'alcool étant bien plus dilatable que ce métal, le remplissage est plus facile; seulement, il reste fréquemment une bulle d'air dans le réservoir; pour la faire disparaître, on attache le tube à l'extrémité d'une ficelle et on lui donne un mouvement de fronde qui chasse la bulle. Si l'on peut déterminer le point zéro du thermomètre à alcool, on ne peut obtenir le point 100°, car l'alcool entre en ébullition à la température de 79°. On se borne d'ordinaire pour la graduation à déterminer le zéro par immersion dans la glace, puis une deuxième température arbitraire par comparaison avec un thermomètre à mercure; on divise l'espace compris en portions égales et l'on prolonge la graduation. Le thermomètre ainsi gradué n'est

1. Despretz (César-Mansuète), né à Lessines (Hainaut) le 13 mai 1789 mort le 15 mars 1863, membre de l'Académie des sciences, professeur de physique à la Sorbonne, auteur de travaux remarquables sur la chaleur et l'électricité.

pas exact, la dilatation de l'alcool ne suivant pas les mêmes lois que celle du mercure; il faudrait observer au moins de 5° en 5° la marche des deux thermomètres pour établir une concordance satisfaisante. Notons de plus que les thermomètres à alcool ne sont même pas rigoureusement comparables entre eux, parce qu'ils sont fabriqués avec des alcools de provenances diverses.

181. Échelles thermométriques diverses. —

On ne marque pas toujours 0° et 100° aux points de la fusion de la glace et de l'ébullition de l'eau : il en résulte des échelles diverses ; celle que nous avons indiquée est l'échelle centigrade, la plus répandue en France, où elle a succédé à l'échelle Réaumur, encore usitée en Allemagne et en Russie ; dans cette dernière, le zéro correspond toujours à la fusion de la glace ; mais, à la température d'ébullition de l'eau, on marque 80°. La fig. 87 représente deux thermomètres identiques portant, l'un l'échelle centigrade, l'autre l'échelle Réaumur. Puisque 80 degrés Réaumur valent 100 degrés centigrades, un degré Réaumur vaut $\frac{100}{80}$ ou $\frac{5}{4}$ de degré centigrade, ce qui prouve que, pour énoncer dans l'échelle Réaumur une température exprimée dans l'échelle centigrade, il suffit de multiplier le nombre observé par $\frac{4}{5}$, tandis qu'il faudra effectuer la multiplication par $\frac{5}{4}$ pour faire la transformation inverse. Il y a encore l'échelle

Fahrenheit usitée en Angleterre : la division 32 de cette échelle correspond à la température de la glace fondante et la division 212 au point d'ébullition de l'eau. De là, on tire que $212 - 32 = 180$ degrés Fahrenheit équivalent à 100 degrés centigrades, et qu'un degré Fahrenheit vaut les

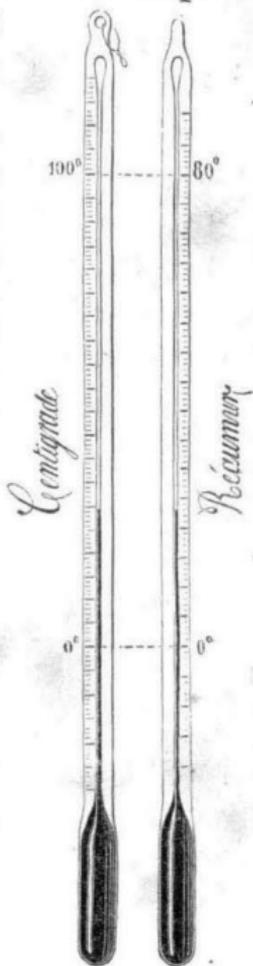


Fig. 87.
Thermomètre.

$\frac{5}{9}$ d'un degré centigrade. *Pour évaluer une température de l'échelle Fahrenheit dans l'échelle centigrade, on retranche d'abord 32 degrés, puis l'on multiplie par $\frac{5}{9}$ le nombre restant; pour faire la transformation inverse, on multiplie par $\frac{9}{5}$ le nombre de degrés centigrades et l'on ajoute 32.*

182. Remarque générale. — *Quelle que soit l'échelle thermométrique dont on fasse usage, elle ne permet que de classer les températures entre elles sans donner aucun renseignement sur les rapports de grandeur qui existent entre ces diverses températures.* Si les températures de différents corps sont 10° , 20° , 30° , cela ne signifie pas que la température du deuxième corps est double de celle du premier, et que celle du troisième en est le triple; cela veut dire seulement que la température du deuxième corps est supérieure à celle du premier et que celle du troisième l'emporte sur les deux autres. *Les degrés de température ne sont que des numéros d'ordre.*

Exercice : 1° Quelle est, en degrés Réaumur et en degrés Fahrenheit la température de 25° centigrades ?

2° A quelle température évaluée en degrés centigrades correspond le zéro de l'échelle Fahrenheit ?

3° A quelle température évaluée en degrés Fahrenheit correspond la température de 40° centigrades au-dessous de zéro ?

CHAPITRE II

CHALEUR RAYONNANTE.

183. **Rayonnement calorifique.** — L'expérience prouve que la chaleur se propage à distance : on a donné le nom de *rayonnement* à ce mode de propagation. Il est facile de s'assurer que la propagation par rayonnement ne peut être attribuée à la conductibilité de l'atmosphère : il suffit de remarquer avec Scheele que si l'on se place à quelque distance d'une cheminée dont le tirage est très-bon et empêche tout courant d'air vers l'observateur, on sent immédiatement l'impression de la chaleur. Deux expériences de Prévost, de Genève¹, sont encore plus concluantes ; il plaça entre une source de chaleur et un thermomètre le plateau de verre d'une machine électrique, puis il le fit tourner de façon qu'à chaque instant une nouvelle portion de verre était interposée entre la source et le thermomètre. Le plateau n'ayant pas le temps de s'échauffer ne peut établir de communication par conductibilité entre les couches d'air qu'il sépare, et si le thermomètre s'échauffe, comme cela a lieu, ce ne peut être que par rayonnement. La seconde expérience consiste à remplacer le plateau de verre par une nappe d'eau sans cesse renouvelée.

184. **Rayonnement dans le vide.** — La chaleur se propage par rayonnement dans le vide comme dans l'air. Pour le

1. Prévost (Isaac-Bénédict), physicien et naturaliste, né à Genève le 7 août 1755, mort le 18 juin 1819, auteur de travaux d'une grande originalité ; il n'eut aucun maître et acquit seul les connaissances qu'il possédait

démontrer, on prend, comme le fit Rumford¹, un tube de baromètre terminé par un ballon d'une assez grande capacité (fig. 88), et au centre duquel est le réservoir d'un thermomètre *a* soudé à la paroi; l'appareil est rempli de mercure, puis renversé sur une cuve pleine de ce métal ainsi qu'on le fait pour un véritable baromètre. Le mercure s'abaisse jusqu'à une certaine hauteur; on fond le tube à la



Fig. 88.

Expérience
de Rumford.

lampe au dehors du niveau du liquide et au-dessous du ballon, celui-ci se ferme et se sépare; on le plonge à moitié dans l'eau bouillante par la partie opposée à celle qui soutient le thermomètre; aussitôt le mercure monte dans cet instrument et on ne saurait attribuer cette élévation de température à une communication de chaleur par les parois, cette communication ne se faisant qu'avec une extrême lenteur, comme le prouve l'étude de la conductibilité calorifique du verre; d'ailleurs il est facile de constater que la paroi n'est pas échauffée vers le point où le thermomètre lui est soudé, bien que le mercure se soit déjà élevé dans cet appareil d'une quantité fort notable.

185. Direction de la propagation. — Dans un milieu homogène *la chaleur se propage en ligne droite*. On le démontre d'une façon grossière en interposant un écran entre une source de chaleur et un thermomètre, on voit aussitôt la température de celui-ci s'abaisser.

186. Vitesse de propagation. — La vitesse de propagation

1. Rumford (Benjamin-Thomson, comte de), physicien et philanthrope, né en 1753 dans le New-Hampshire (Amérique), membre de la Société royale de Londres, lieutenant général des armées du roi de Bavière, auteur de travaux sur la chaleur, épousa la veuve de Lavoisier; mort en 1814.

de la chaleur rayonnante est très-grande; le R. P. Secchi¹, employant une méthode du physicien de Wrède², a prouvé que la chaleur émise par le soleil se propageait avec la même vitesse que la lumière, c'est-à-dire parcourait environ 300,000 kilomètres par seconde.

187. **Rayon de chaleur.** — On donne le nom de *rayon de chaleur*, ou *rayon calorifique*, à toute direction que suit la chaleur en se propageant.

188. **Réflexion de la chaleur.** — Quand un rayon de chaleur vient frapper un obstacle, une surface plane par exemple, il y a réflexion, c'est-à-dire que les rayons se brisent et suivent une autre direction appelée *rayon réfléchi*. Les lois de ce phénomène sont les suivantes :

1° *Le rayon incident, le rayon réfléchi et la normale au point d'incidence sont dans un même plan.*

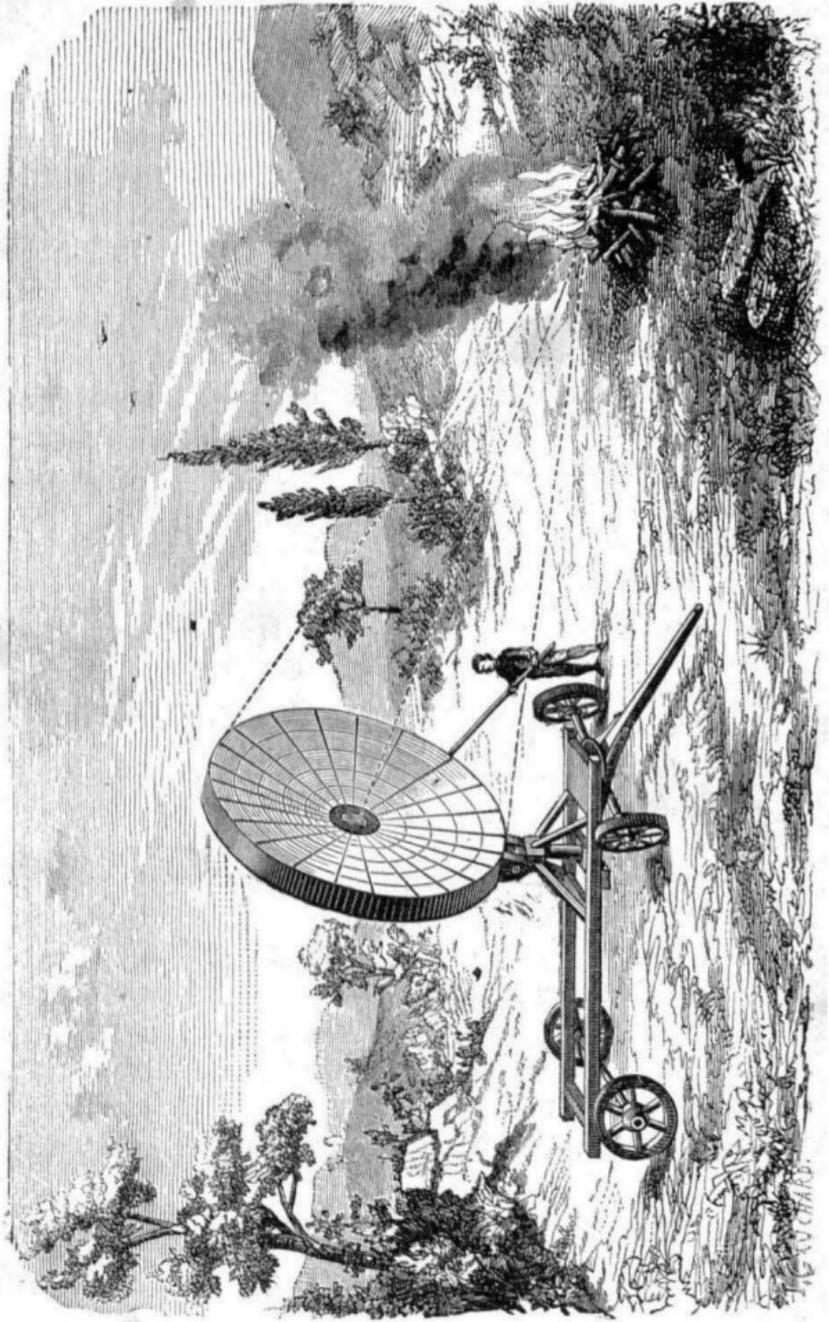
2° *L'angle du rayon incident avec la normale, ou angle d'incidence, égale l'angle du rayon réfléchi avec la normale, ou angle de réflexion.*

La démonstration directe de ces lois se fait au moyen de l'appareil de Melloni, qui sera décrit dans le cours de troisième année.

189. **Miroirs ardents.** — La vérification de certaines conséquences des lois précédentes peut leur servir de preuve. Ainsi, en réunissant des miroirs plans inclinés suivant des règles déduites des lois précédentes, on peut renvoyer en un même point les rayons réfléchis par ces différents miroirs; on obtient ainsi, au point de concours, une chaleur d'autant plus considérable que les glaces réfléchissantes sont plus nombreuses. C'est ainsi que sont construits

1. Secchi (Angelo), père jésuite, directeur de l'observatoire du Collège romain; auteur de remarquables observations sur le soleil et d'un appareil météorologique enregistreur qui a figuré à l'exposition universelle de 1867 et y a obtenu un grand prix.

2. De Wrède, savant suédois, auteur de beaux travaux sur la lumière.



(Fig. 89.) Miroirs ardents.

les miroirs ardents (fig. 89), que l'on prétend avoir été employés pour la première fois par Archimède pour brûler la flotte de Marcellus. L'expérience fut reprise plusieurs fois, et particulièrement en 1747, par Buffon ¹; le hêtre goudronné fut enflammé à 150 pieds de distance à l'aide de 148 glaces : à 40 pieds de distance, on put fondre tous les métaux. Plus tard, Robertson ² perfectionna les miroirs ardents, en rendant les glaces mobiles; un mécanisme simple permettait de manœuvrer toutes les glaces d'un même coup et de transporter à volonté le point de concours des rayons de chaleur d'un point à un autre. Tels devaient être les miroirs d'Archimède qui, dit-on, pouvaient atteindre et suivre les vaisseaux en mouvement.

190. **Miroirs conjugués de Mariotte.** — Aux miroirs plans associés, l'on peut substituer des miroirs sphériques; mais ici l'on est forcé d'adopter des dimensions restreintes. Mariotte a fait, au moyen de ces miroirs, une expérience qui peut être considérée comme une vérification des lois de la réflexion. Deux miroirs sphériques en métal poli (fig. 90) sont placés à distance, en face l'un de l'autre, de façon que leurs axes coïncident. On dispose un objet lumineux devant l'un des miroirs, en un point convenablement choisi, et l'on trouve sur un écran, en avant de l'autre miroir, l'image de cet objet. Si au corps lumineux on substitue des charbons incandescents, et à l'écran un fragment d'amadou ou de coton-poudre, on voit celui-ci prendre feu, ce qui prouve que les rayons calorifiques se réfléchissent suivant les mêmes lois que les rayons lumineux.

191. **Réflexion apparente du froid.** — En substituant aux

1. Buffon (Georges-Louis Leclerc, comte de), né à Montbard en Bourgogne, le 7 septembre 1707, mort le 16 avril 1788; l'un des plus célèbres naturalistes et des plus grands écrivains de son siècle. Membre de l'Académie des sciences à 26 ans, et intendant du Jardin du Roi à 32 ans.

2. Robertson (Étienne-Gaspard Robert, dit), né à Liège en 1762, mort en 1837, physicien et aéronaute, fut professeur de physique à Liège.

charbons de l'expérience de Mariotte des fragments de glace, et à l'amadou un thermomètre sensible, on voit la température de cet instrument s'abaisser; ce fait avait porté à croire qu'il existait des rayons de froid comme des rayons de chaleur, et que ces rayons, partis de la glace et réfléchis par les miroirs, venaient refroidir le thermomètre. Il n'en peut être ainsi, puisque le froid et

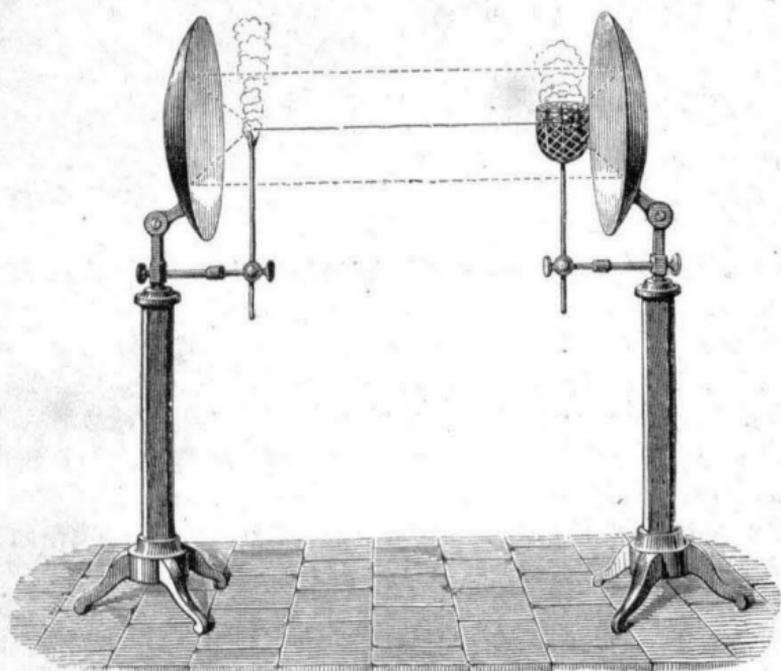


Fig. 90.

Miroirs conjugués de Mariotte

le chaud ne sont que deux effets d'une même cause. Voici ce qui a lieu : tous les corps rayonnent de la chaleur, non-seulement ceux qui nous semblent très-chauds, mais encore ceux qui sont à la température ambiante, et même ceux qui sont au-dessous de cette température. La glace, que nous appelons corps froid parce que sa température est inférieure à celle de nos doigts qui la touchent, n'en

est pas moins un corps rayonnant de la chaleur, et dans l'expérience que nous considérons, elle envoie de la chaleur au thermomètre, moins cependant que cet instrument ne lui en envoie à son tour, de sorte que c'est parce qu'il donne plus de chaleur qu'il n'en reçoit que le thermomètre indique un abaissement de température.

192. **Diffusion de la chaleur.** — Outre la réflexion opérée d'après les lois précédentes, c'est-à-dire régulièrement, il en est une autre qui a lieu en tous sens, irrégulièrement, et que l'on appelle *diffusion* ; elle se produit surtout à la surface des corps peu polis ; elle varie avec la direction dans laquelle on l'observe.

193. **Corps diathermanes et athermanes.** — Parmi les corps, il en est que la chaleur rayonnante peut traverser, tandis que d'autres sont opaques pour elle : les premiers sont appelés diathermanes, les autres athermanes. Il est à remarquer qu'il faut faire ici une distinction entre la chaleur et la lumière, car, par exemple, le quartz enfumé, la dissolution d'iode dans le sulfure de carbone sont opaques et diathermanes. Cette distinction sera précisée dans l'étude de la lumière.

194. **Absorption de la chaleur par les corps.** — Si toute la chaleur rayonnée sur un corps se réfléchissait à sa surface, ou le traversait sans perte, les corps exposés aux rayons calorifiques ne s'échaufferaient pas. Il y a en même temps une absorption de chaleur, grâce à laquelle la température du corps s'élève.

Les corps sont donc susceptibles d'émettre, de réfléchir, de diffuser, de transmettre, d'absorber de la chaleur, mais ils ne le font pas tous de même, et on peut connaître dans quel rapport chacun d'eux produit ces effets.

195. **Pouvoirs émissifs.** — Différents corps portés à la même température n'émettent pas la même quantité de

chaleur; une même surface n'envoie pas la même quantité de chaleur dans toutes les directions. On appelle *pouvoir émissif absolu* d'un corps dans une direction donnée et pour une température déterminée, *la quantité de chaleur émise pendant l'unité de temps par l'unité de surface du corps, dans la direction et pour la température énoncées*. Ce pouvoir absolu ne peut pas être en réalité déterminé; on le rapporte à celui du noir de fumée, et l'on a ainsi ce que l'on appelle le *pouvoir émissif relatif*. On définit d'après cela le pouvoir émissif d'un corps dans une direction donnée, et à une température donnée, *le rapport de l'intensité de la chaleur émise par le corps dans les conditions énoncées à celle qu'émettrait dans les mêmes circonstances de température et de direction une surface égale recouverte de noir de fumée*. Non-seulement le pouvoir émissif dépend de la nature des corps, mais encore de leur état physique; une surface dépolie rayonne plus qu'une surface polie, du moins dans le cas des métaux polis au laminoir ou au marteau. Cela ne paraît pas dépendre du poli lui-même, mais de l'état moléculaire qu'entraîne le polissage; ainsi le marbre et l'ivoire ont le même pouvoir émissif, que leur surface soit striée ou non. L'argent laminé a un pouvoir émissif plus grand quand il est dépoli; c'est le contraire pour l'argent fondu.

196. **Pouvoir réflecteur.** — On appelle *pouvoir réflecteur absolu* d'un corps le rapport entre la quantité de chaleur qu'il réfléchit et celle qu'il reçoit dans le même temps. Le pouvoir réflecteur relativement à un autre corps est le quotient du pouvoir réflecteur absolu par le pouvoir réflecteur absolu de cet autre corps. Le pouvoir réflecteur variant avec l'incidence, il faut toujours indiquer sous quelle incidence on le considère. Pour les métaux et les sulfures polis, le maximum du pouvoir réflecteur a lieu vers l'incidence de 70° à 75° , et depuis cet angle jusqu'à l'incidence normale la valeur du pouvoir reste la même.

197. **Pouvoir absorbant.** — On appelle *pouvoir absorbant absolu* d'un corps le rapport entre la quantité de chaleur qu'il absorbe et celle qu'il reçoit dans le même temps. On considère aussi le *pouvoir absorbant relatif* qui est le quotient de la quantité de chaleur qu'absorbe un corps à celle qu'absorbe dans les mêmes circonstances un corps de surface égale enduit de noir de fumée. Le pouvoir absorbant est sujet aux mêmes causes de variation que le pouvoir émissif.

CHAPITRE III

DILATATION DES CORPS.

198. **Coefficients de dilatation des corps solides.** — Si l'on chauffe un corps solide, un prisme métallique par exemple, ses dimensions augmentent; la quantité dont le volume du corps a augmenté est sa *dilatation cubique* ou *en volume*; la quantité dont s'est accrue la longueur d'une de ses arêtes est dite la *dilatation linéaire* de cette arête; l'augmentation de surface que subit une face du corps est la *dilatation superficielle* de cette face. Pour évaluer ces dilatations, on considère celle de l'unité et l'on appelle *coefficient de dilatation* linéaire, superficielle ou cubique, l'accroissement de l'unité de longueur, ou de surface, ou de volume du corps considéré, quand ce corps passe de la température de zéro à celle de 1 degré.

199. **Dilatation linéaire des corps solides.** — Le coefficient de dilatation linéaire est une fraction très-petite de l'unité de longueur; ainsi, pour le fer par exemple, il égale 0,0000118. Ce nombre permet d'estimer l'accroissement d'une longueur quelconque de fer quand la température augmente; si, par exemple, on a une barre de 25 mètres à 0°, chacune des unités de longueur qu'elle contient augmentant de 0^m,0000118 quand la température passe de 0° à 1°, l'accroissement de la barre sera 25^m × 0,0000118; c'est-à-dire une fraction de sa longueur égale au coefficient de dilatation. Mais il y a d'autres variations de température que celle qui consiste à faire passer les corps

de 0° à 1° ; or l'on remarque que toute augmentation de température de 1° entraîne un accroissement de longueur sensiblement le même, si bien qu'en passant, par exemple, de 35° à 36° une barre de fer augmente encore à très-peu près des 0,0000118 de sa longueur à zéro. Cependant, à mesure que la température croît, l'accroissement de longueur pour une variation de 1° prend une valeur de plus en plus grande: c'est ce que l'on exprime en disant, que le coefficient de dilatation est à toute température sensiblement le même qu'à zéro, bien qu'il croisse avec la température. La connaissance du coefficient de dilatation linéaire d'un corps permet de résoudre certains problèmes dont nous allons donner quelques exemples.

200. *Problème I.* — Les rails des chemins de fer ont une longueur de 6 mètres à 0° ; quelle est leur longueur à 35° ?

Chaque mètre croît de 0,0000118 pour une augmentation de température de 1 degré; la température s'élevant de 35° , chaque mètre s'accroît de $35 \times 0,0000118$, et par suite devient $1 + 0,0000118 \times 35$; mais il y a 6 mètres dans la longueur d'un rail à zéro; donc celui-ci à 35° a pour longueur $6 \times (1 + 0,0000118 \times 35)$; d'où cette règle: *Pour avoir à une température donnée la longueur d'une barre, il suffit de multiplier la longueur de cette barre à zéro, par l'unité augmentée du produit du coefficient de dilatation par la température donnée.*

201. *Problème II.* — La longueur d'une règle de platine est 25 mètres à 20° ; quelle est la longueur à 0° , sachant que le coefficient de dilatation linéaire du platine est 0,0000088 ?

L'unité de longueur à zéro devient $1 + 0,0000088 \times 20$ en passant à 20° ; donc une longueur de $1 + 0,000080 \times 20$ à 20° ne sera plus à 0° que l'unité; donc autant de fois $1 + 0,0000088 \times 20$ est contenu dans 25 mètres, autant il y aura de mètres dans la longueur de la règle de platine ramenée à zéro; ce quotient $\frac{25}{1 + 0,0000088 \times 20}$ exprime la

longueur cherchée; ce qui conduit à cette règle: *Pour avoir à zéro la longueur d'une barre, connaissant à une température donnée la longueur de cette même barre, il faut diviser cette dernière longueur par l'unité augmentée du produit du coefficient de dilatation par la température considérée.*

202 *Problème III.* — La règle divisée sur laquelle on relève la hauteur d'un baromètre a été graduée en millimètres, la température étant 10° ; on observe la hauteur du baromètre par une température de 25° , on trouve 760 divisions; on demande la hauteur véritable de la colonne mercurielle, sachant que la substance de l'échelle est le laiton dont le coefficient de dilatation linéaire est 0,00001867.

Chaque division vaut un millimètre quand la règle est à 10° ; cherchons d'abord ce qu'elle devient quand la température descend à 0° . La solution du problème précédent

indique que chaque division devient: $\frac{1}{1 + 0,00001867 \times 10}$; mais en passant de zéro à 25° , cette longueur devient, d'après le premier problème :

$\frac{1}{1 + 0,00001867 \times 10} \times (1 + 0,00001867 \times 25)$; en effectuant les calculs, on a la longueur d'une division à 25° , et en multipliant par 760, on a la hauteur réelle du mercure : $760 \frac{1 + 0,00001867 \times 25}{1 + 0,00001867 \times 10}$.

Exercice : 1^o Un cercle d'essieu a un diamètre de 12 centimètres à la température de 0° , on le porte à 800° . On demande le diamètre du cercle à cette température, sachant qu'il est en fer, dont le coefficient de dilatation est 0,0000118.

2^o Deux règles, l'une de cristal, l'autre de plomb, diffèrent à 0° de 0^m,001; la plus longue, qui est en cristal, a alors 3 mètres; on demande à quelle température les deux règles seront devenues égales, le coefficient de dilatation du cristal étant 0,000007 et celui du plomb 0,000028.

203. **Dilatation cubique des corps solides.** — Le coefficient de dilatation cubique est plus considérable que le coefficient de dilatation linéaire; il en est même très-sensible-

ment le triple, comme il est facile de s'en assurer par l'expérience et aussi par le calcul. Supposons, en effet, un cube de cuivre à 0° dont l'arête soit l'unité de longueur ; le volume de ce cube est l'unité de volume, d'après la mesure des volumes. Supposons que l'on élève la température à 1° ; l'arête devient $1 + 0,00001712$, la fraction $0,00001712$ étant le coefficient de dilatation linéaire du cuivre, le volume du cube sera devenu $(1 + 0,00001712)^3$ ou $1,00513$; l'augmentation de volume est le coefficient de dilatation cubique, c'est $0,000513$, mais ce nombre est sensiblement le triple du coefficient de dilatation cubique. A l'aide du coefficient de dilatation cubique, on peut résoudre divers problèmes dont certains sont analogues à ceux auxquels conduit le coefficient de dilatation linéaire.

204. Problème IV. — Un boulet d'acier a un volume de 45^{cc} à 0° , on le porte à 15° ; quel est son nouveau volume sachant que le coefficient de dilatation linéaire de l'acier est $0,00001080$?

Chaque centimètre cube, pour une augmentation de température de 1° , croît d'une quantité égale au coefficient de dilatation cubique, c'est-à-dire triple du coefficient de dilatation linéaire ou de $0,0000324$; pour une augmentation de température de 15° , l'accroissement du volume est $0,0000324 \times 15$ et puisqu'il y a 45^{cc} le boulet a augmenté de $45 \times 0,0000324 \times 15$ et est devenu $45 (1 + 0,0000324 \times 15)$; d'où l'on voit que *l'accroissement de volume d'un corps qui passe de 0° à une autre température s'obtient en multipliant le volume du corps par le coefficient de dilatation cubique et par la température.* C'est la même règle que pour les dilatations linéaires.

Exercice : 1° Quel est à zéro degré le volume d'une masse de zinc qui est de 16 mètres cubes à 60° ? Le zinc a pour coefficient de dilatation cubique $0,0000932$.

2° Une boule de verre a un volume de 2 lit. 56 à la température de 20° , quel est son volume à 12° ? Le coefficient de dilatation cubique du verre est de $0,0000258$.

205. Dilatation superficielle des corps solides. — Le coefficient de dilatation superficielle est sensiblement double du

coefficient de dilatation linéaire, ce qui s'établit comme pour la dilatation cubique. Les problèmes relatifs à la dilatation superficielle se traitent exactement comme ceux qui se rapportent aux dilatations linéaires et cubiques.

206. **Détermination des coefficients de dilatation des corps solides.** — Pour connaître les coefficients de dilatation de chacun des corps solides, il suffit de déterminer le coefficient de dilatation linéaire; les autres s'en deduisent par une simple multiplication par 2 ou par 3; Laplace ¹ et

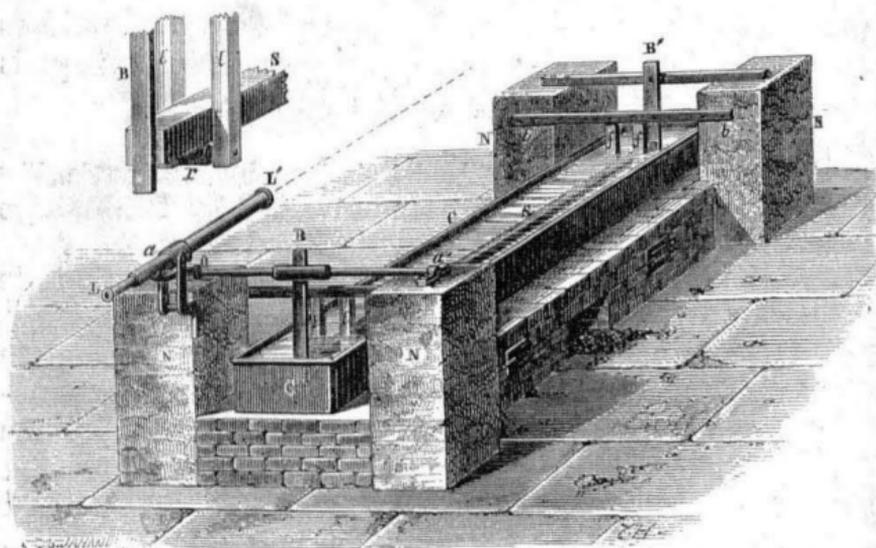


Fig. 91. Appareil de Lavoisier.

Lavoisier ² ont fait les premières recherches à ce sujet à l'aide de l'appareil suivant (fig. 91). Les barres S, sur lesquelles on opérail, avaient deux mètres de long, elles étaient disposées successivement dans une grande cuve c

1. Laplace (Pierre-Simon, marquis de), né à Beaumont-en-Auge le 23 mars 1749, mort le 5 mars 1827; fils de pauvres cultivateurs; ses magnifiques travaux d'astronomie et de physique mathématique le firent élever aux plus hautes dignités: il fut fait marquis et pair de France.

2. Lavoisier (Antoine-Laurent), né le 16 août 1743, mort en 1794, victime des passions politiques; l'un des plus grands génies qui aient existé, le fondateur de la chimie.

placée entre quatre dés en maçonnerie N. La barre était suspendue de distance en distance sur des rouleaux tels que *r* soutenus eux-mêmes par des tiges *ll* et *ff*. L'une des extrémités de la barre s'appuyait sur une lame de verre fixe *B'* et l'autre sur une lame de verre *B* pouvant tourner autour de l'axe *aa'*. A cet axe était fixé par un collier la lunette *LL'* qui visait une mire verticale éloignée de 200^m de sorte que la barre *S* venant à s'allonger poussait *B* qui faisait tourner l'axe *aa'*, et amenait la lunette à viser un point différent de la mire. On commençait par remplir la cuve d'eau que l'on amenait à la température de zéro en y jetant de la glace pilée. L'eau glacée était préférée à la glace même qui par son poids aurait fait fléchir les tiges *s*. Quand la température avait été maintenue à zéro pendant un certain temps, on regardait dans la lunette sur quelle division de la mire cet instrument était pointé. On enlevait l'eau, on la remplaçait par de l'huile que l'on portait à une température élevée, et quand plusieurs thermomètres placés dans les différents points de la cuve indiquaient tous la même température, et cela depuis un certain temps, l'on faisait une nouvelle observation à la lunette. Supposons que l'on ait opéré sur une barre de zinc, que les deux points de la mire visés successivement aient été distants de 2^m,485; considérons le triangle formé par la distance de ces deux points et les deux directions de la lunette, ce triangle est semblable à celui qui a pour base l'accroissement de longueur de *S* et les deux positions de la barre *B*. Ces deux triangles étant semblables, leurs côtés sont proportionnels. Supposons que la tige *B* ait une longueur de 0^m,5 depuis l'axe *aa'* jusqu'au point où elle touche la tige *S*; le rapport de deux côtés homologues dans les deux triangles sera $\frac{200}{0,5}$ puisque la lunette est distante de la mire de 200^m; donc chaque côté du petit triangle n'est que la 400^e partie de son homologue dans le grand, et l'allongement de la barre est la 400^e partie de 2^m,485 ou 0^m,00621. Mais cet accroissement répond à la différence des deux températures

auxquelles a été portée la barre; soit 100° cette différence, l'allongement de la barre pour 1 degré est de $0^{\text{m}},0000621$; enfin la barre ayant 2^{m} , l'allongement de l'unité de longueur pour un accroissement de température de 1° ou le coefficient de dilatation est $0,000031$.

207. Coefficients de dilatation des corps liquides. — Les corps solides en se dilatant ne subissent pas de déformation, ils restent semblables à eux-mêmes, de sorte que l'on peut établir l'influence de la dilatation sur la longueur d'une arête ou l'aire d'une surface. Pour les liquides, il n'en est plus de même; la dilatation cubique est seule à considérer. Le coefficient de dilatation cubique se définit d'ailleurs comme pour les corps solides; c'est l'accroissement que subit l'unité de volume en passant de 0° à 1° . Les problèmes relatifs à la dilatation des liquides se traitent d'après cela comme ceux qui ont rapport à la dilatation cubique des solides.

208. Variation de densité des liquides avec la température. — Nous avons appelé poids spécifique d'un corps, le poids de l'unité de volume de ce corps; par le fait de la dilatation ce poids spécifique varie avec la température. Soit par exemple le mercure; un litre de ce corps pèse $13^{\text{kr}},598$ à la température de 0° ; prenons un litre à la température de 25° et ramenons-le à zéro, son volume change et devient

$\frac{1}{1 + \frac{1}{5550} \times 25}$, si $\frac{1}{5550}$ est le coefficient de dilatation du métal

(201), mais le poids ne change pas et est égal au volume à zéro multiplié par la densité à cette température, c'est-à-dire égale à $\frac{1}{1 + \frac{1}{5550} \times 25} \times 13,598$. Ce poids étant celui de

de l'unité de volume du mercure à 25° est, par cela même, la densité de ce corps à cette température. Donc pour avoir la densité d'un corps à une température quelconque, il

suffit de diviser la densité à zéro par l'unité augmentée du produit de la température par le coefficient de dilatation. Cette règle que nous trouvons dans le cas des liquides s'appliquerait évidemment tout aussi bien aux corps solides.

209. **Dilatation apparente et absolue.** — Pour mesurer le coefficient de dilatation d'un liquide, un premier moyen s'offre tout d'abord à l'esprit. On prendrait un vase de la forme d'un thermomètre, on le remplirait du liquide à expérimenter, d'alcool par exemple, de façon qu'à la température de 0° le liquide arrive au zéro de la graduation de la tige. On porterait l'appareil à une température déterminée, soit 100° , on verrait de combien de divisions de la tige le volume du liquide s'est augmenté, et si l'on connaissait le rapport entre le volume d'une division de la tige et celui du réservoir, on aurait, en apparence, tous les éléments nécessaires pour déterminer le coefficient de dilatation cherché. Supposons, pour préciser les idées, que le volume du réservoir jusqu'au zéro des divisions de la tige soit de 1 litre, la température étant de 0° ; soit de plus $\frac{1}{6480}$ le volume d'une division de la tige et 713 le nombre de ces divisions remplies au-dessus du zéro, par le liquide, quand la température s'est élevée de 100° ; on en déduit que le volume du liquide s'est accru de 713 fois sa 6480^{e} partie, c'est-à-dire d'une fraction de sa valeur égale à $\frac{713}{6480}$, c'est-à-dire de $0^{\text{li}}, 11$. Pour une augmentation de température de 1° , l'accroissement de volume eût été $0^{\text{li}}, 0011$; ce nombre paraît donc être le coefficient cherché. Il n'en est rien, parce que le volume de l'enveloppe a varié, le volume du réservoir jusqu'au zéro n'est pas un litre à 100° comme à 0° et le volume de chaque division s'est ainsi modifié. Le coefficient de dilatation observé est ce que l'on appelle le *coefficient de dilatation apparente*, ce n'est pas le *coefficient de dilatation absolue* ou *réelle*, celui qu'en définitive il importe de connaître.

210. **Coefficient de dilatation absolue du mercure.** — On a

cherché pour le mercure seulement le coefficient de dilatation absolue. Cette recherche a été faite par Dulong ¹ et Petit ². Le principe de leur appareil est le suivant. Deux tubes A et B (fig. 92) communiquant par un canal étroit

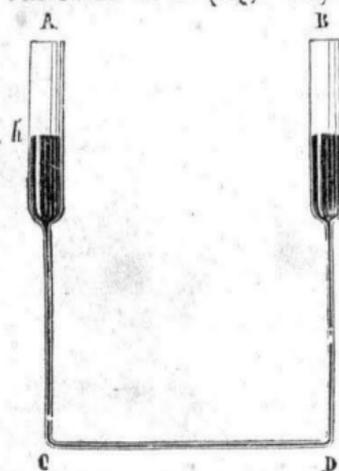


Fig. 92. Principe de l'appareil Dulong.

CD sont pleins de mercure; l'un est entouré de glace, l'autre est porté à une température élevée, 100° par exemple; les niveaux du mercure dans les deux tubes ne sont pas les mêmes, le mercure le plus chaud étant moins dense s'élève à une hauteur h' plus grande que celle h à laquelle s'arrête le mercure froid; d'ailleurs, ces hauteurs sont en raison inverse des densités (64); mais la densité à 100° est $\frac{13,598}{1 + 100 a}$, en

désignant par a le coefficient de dilatation cherché; donc

$$h' : h = 13,598 : \frac{13,598}{1 + 100 a},$$

$$\frac{h'}{h} = \frac{1 + 100 a}{1}.$$

Si l'on s'appuie sur une propriété connue des proportions on en déduit :

$$\frac{h' - h}{h} = 100 a,$$

$$a = \frac{1}{100} \frac{h' - h}{h}.$$

Si donc on mesure h et $h' - h$, il est facile d'en déduire a .

1. Dulong (Pierre-Louis), né à Rouen en 1785, mort en 1838; secrétaire perpétuel de l'Académie des sciences, s'occupa de chimie avec succès avant d'entreprendre ses beaux travaux sur la chaleur.

2. Petit (Alexis-Thérèse), né à Vesoul en 1791, mort en 1820; beau-frère et collaborateur d'Arago.

211. Voici comment l'expérience était disposée. Une barre de fer en forme de T (fig. 93) reposait sur un socle à vis calantes, le canal de communication était placé sur cette barre et amené à une horizontalité parfaite ; ce tube était d'ailleurs capillaire ; les deux branches verticales, très-étroites aussi dans leur partie inférieure, avaient un diamètre notable dans la région où devaient s'arrêter les niveaux, afin qu'il ne pût y avoir en ces points aucune

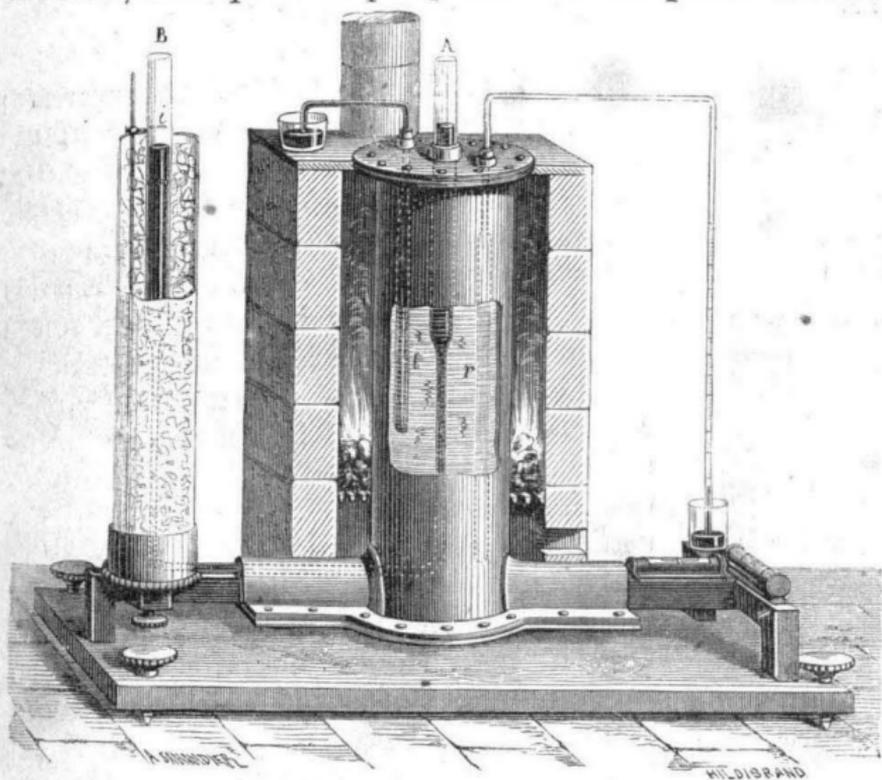


Fig. 93. Appareil Dulong.

action capillaire. Le tube B était entouré d'un manchon que l'on remplissait de glace fondante ; une fenêtre ménagée dans ce manchon permettait d'apercevoir le niveau du mercure. Quant à l'autre branche A, elle était dans l'axe d'un cylindre de cuivre, se prolongeant par deux appendices boulonnés et parfaitement étanches ; ce cylindre était rempli d'huile et maçonné dans un fourneau posé

sur l'appareil. Au sein de l'huile, et pour en connaître la température, se trouvaient les réservoirs *r* et *t* d'un thermomètre à gaz et d'un thermomètre à poids. La quantité de mercure placée dans l'appareil était suffisante pour que dans le tube A le niveau fût visible, c'est-à-dire un peu au-dessus du vase plein d'huile. La différence de niveau était observée à l'aide d'une lunette se déplaçant verticalement le long d'une règle divisée; on visait successivement les deux niveaux avec la lunette.

212. Détermination du coefficient de dilatation apparente; thermomètre à poids. — Le coefficient de dilatation apparente de chaque liquide varie naturellement avec la substance de l'enveloppe; on considère d'ordinaire le cas où cette enveloppe est en verre. On peut employer la méthode déjà indiquée (210), on se sert encore du thermomètre à poids (fig. 94). C'est un réservoir cylindrique auquel est soudé



Fig. 94.
Thermomètre
à poids.

un petit tube capillaire recourbé. L'appareil est pesé vide, puis plein de mercure à la température de zéro; on le porte ensuite à une température élevée, l'on recueille dans un godet le mercure qui s'écoule, on pèse, et l'on peut, d'après cela, calculer facilement le coefficient de dilatation apparente. En effet, soit 756 gr. le poids du mercure contenu dans l'appareil à zéro degré et 11^{gr},5 le poids qui sort quand la température est à 100°; la dilatation est le volume occupé par le poids 11^{gr},5, et le coefficient de dilatation est la centième partie du rapport de ce volume à celui de l'appareil; mais ce dernier volume est occupé par le poids 756^{gr} — 11^{gr},5 de mercure, et les volumes de deux corps de même nature, par exemple de deux poids de mercure à la même température, sont dans le rapport de ces poids; donc le coefficient de dilatation cherché est la centième partie de $\frac{756 - 11,5}{11,5}$ ou $\frac{1}{6480}$.

Exercice. — Comment le thermomètre à poids peut-il servir à déterminer la température?

213. Relation entre le coefficient de dilatation absolue et le coefficient de dilatation apparente. — Si l'on retranche le coefficient de dilatation apparente $\frac{1}{6480}$ du coefficient de dilatation absolue $\frac{1}{5550}$, on trouve sensiblement le coefficient de dilatation du verre. Ceci est un fait général que l'on démontre par le calcul; l'accroissement de volume réel étant masqué en partie par l'accroissement de volume de l'enveloppe, il en résulte que, *en ajoutant au coefficient de dilatation apparente le coefficient de dilatation cubique de l'enveloppe, on trouve le coefficient de dilatation absolue cherché*; il suffit donc de déterminer la dilatation apparente dans une enveloppe connue. L'enveloppe que l'on choisit est toujours en verre: c'est celle d'un thermomètre à poids, ou d'un thermomètre ordinaire; seulement les verres étant d'espèces différentes au point de vue de la dilatation, non-seulement à cause de la différence dans la composition chimique, mais encore dans l'état physique, chaque enveloppe a subi une trempe différente; il est donc essentiel de déterminer directement le coefficient de dilatation de l'enveloppe même dont on se sert; pour cela, on détermine d'abord avec elle le coefficient de dilatation apparente du mercure et l'on retranche ce nombre du coefficient de dilatation absolue $\frac{1}{5550}$. Ceci explique pourquoi il a fallu, pour un corps au moins, déterminer directement le coefficient de dilatation absolue.

Exercice : 1° Un vase de verre est rempli d'alcool à la température de 0°, il contient alors 4 litres de ce liquide; la température s'élève à 25°; quel est le poids d'alcool qui s'écoule hors du vase, sachant que la densité de l'alcool est 0,8, son coefficient de dilatation 0,0011, et celui du verre 0,0000087.

2° Dans un thermomètre centigrade à mercure, combien le volume du réservoir jusqu'au zéro contiendrait-il de fois le volume d'une division?

3° La température étant 15°, une sphère de verre lestée perd de son poids 25 gr. dans l'alcool; combien perdrait-elle dans le même liquide si la température s'abaissait à 0°? On suppose connus les coefficients de dilatation du verre et de l'alcool, et la densité de ce dernier liquide.

214. Dilatation de l'eau. — L'eau se dilate d'une manière anormale, puisqu'elle présente un maximum de densité

à 4°; elle augmente de volume en s'éloignant de cette température, soit qu'elle s'échauffe, soit qu'elle se refroidisse. Les raisonnements précédents ne sont donc pas applicables à l'eau; on a dû dresser pour ce liquide des tables donnant le poids de l'unité de volume à des températures diverses. (Voir le cours de première année.)

215. **Dilatation des gaz.** — Les gaz échauffés tendent à se dilater; mais, s'ils ne peuvent augmenter de volume, leur force élastique s'accroît; on ne peut donc entendre le coefficient de dilatation des gaz à la manière des coefficients de dilatation des liquides ou des solides, qu'autant que le gaz peut se dilater librement, c'est-à-dire en restant toujours soumis à une pression constante. Gay-Lussac a entrepris des recherches dans ce sens.

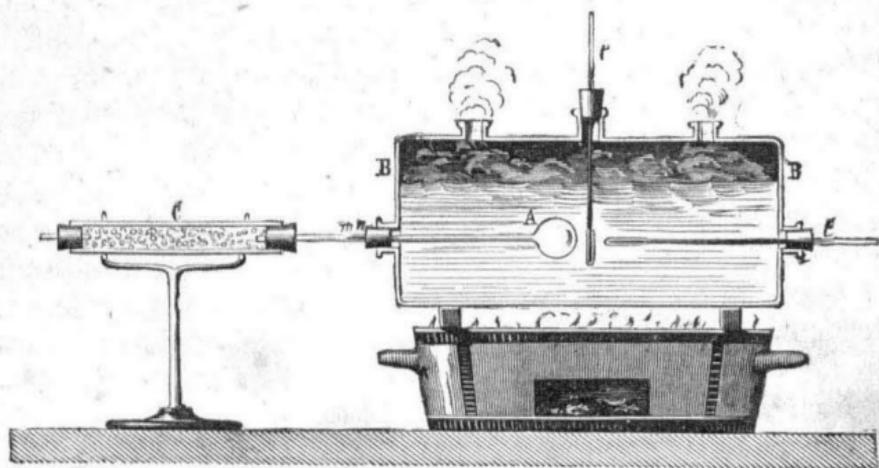


Fig. 95. Appareil de Gay-Lussac.

216. **Détermination du coefficient de dilatation des gaz sous pression constante.** — Gay-Lussac renfermait les gaz sur lesquels il opérait dans un ballon A (fig. 95) soudé à un long tube de verre; une gouttelette de mercure *mn* limitait le gaz et lui laissait toute liberté pour se dilater; on chauffait dans une étuve BB, dont la température était indiquée par les thermomètres *t*. L'appareil ayant été

d'abord amené à 0° , on notait la position de l'index sur la tige, puis on portait à 100° et on faisait une nouvelle observation. La tige étant graduée en portions d'égale capacité, on pouvait noter l'accroissement de volume du gaz dont on connaissait d'ailleurs le volume initial, d'après celui du ballon A, qui avait été déterminé avant l'expérience. Il fallait opérer sur des gaz secs; aussi, avant de les introduire, leur faisait-on traverser d'abord un tube C, rempli d'une substance desséchante, telle que le chlorure de calcium fondu.

217. Lois de Gay-Lussac. — Il résulte des expériences de Gay-Lussac : 1° que l'on peut appliquer à la dilatation des gaz sous pression constante tout ce qui a été dit sur la dilatation cubique des solides et des liquides; 2° que le coefficient de dilatation de tous les gaz est sensiblement le même, du moins quand on ne considère que ceux qui sont permanents ou difficilement liquéfiables, c'est-à-dire ceux qui suivent très-sensiblement la loi de Mariotte.

218. Application des coefficients de dilatation. — On a indiqué, dans le cours de première année, certaines applications des phénomènes de dilatation; par exemple : le procédé employé pour cercler les roues de voiture; le moyen d'obtenir des clous rivés serrant fortement; la manière dont on a redressé certains murs du Conservatoire des Arts et Métiers; l'emploi de la chaleur pour déboucher les flacons de verre; la nécessité de laisser du jeu entre les rails, les tuyaux de conduite; la manière de découper le verre avec un charbon rouge, etc. Nous allons nous occuper ici avec détails de certaines applications, telles que les corrections barométriques, la compensation des pendules, des horloges, etc.

219. Corrections barométriques. — On a vu, dans l'étude du baromètre (114), qu'il fallait faire subir aux lectures faites sur cet instrument des corrections dépendant de la

température. Supposons, par exemple, qu'on lise sur l'échelle une hauteur de 760 divisions, que la température soit à ce moment de 25° et que l'échelle ait été divisée à 10°. Un problème déjà résolu (203) nous apprend que la hauteur réelle n'est que de 760 $\frac{1 + 0,0000187 \times 10}{1 + 0,0000187 \times 25}$ millimètres, ce qui donne, en effectuant les calculs, 759,77. La hauteur de la colonne de mercure soulevée est donc en réalité 759,77; mais ce mercure n'est pas à zéro, il est à 25°, et dès lors, d'après un problème précédent (209), sa densité n'est que $\frac{13,598}{1 + \frac{25}{5550}}$ ou 13,537; d'ailleurs, deux

baromètres construits avec des liquides différents, ont leurs hauteurs en raison inverse des densités; si donc un baromètre était construit avec du mercure à zéro, sa hauteur h serait telle que l'on eût :

$$\frac{h}{759,77} = \frac{13,537}{13,598}$$

ou bien

$$h = 759,77 \frac{13,537}{13,598}$$

C'est ainsi qu'on a calculé les tables de correction. Il faut remarquer pourtant que les échelles sont en général divisées à la température de 0°.

220. Pendule compensateur à gril. — Les pendules qui servent à régulariser le mouvement des horloges doivent avoir une longueur constante. Il faut donc que cette longueur soit indépendante de la température. On peut y arriver à l'aide du pendule à gril. Ce pendule se compose d'une tige d'acier oscillant autour du point de suspension et supportant un cadre aussi en acier (fig. 96). De la barre inférieure de ce cadre s'élèvent deux tiges de laiton, qui, avec une autre barre horizontale, forment un deuxième cadre. Celui-ci en supporte un troisième en acier, sur lequel repose un quatrième cadre en laiton;

à la barre horizontale supérieure de celui-ci est fixée la tige d'acier qui supporte la lentille du pendule. Sur la figure, les tiges d'acier se distinguent de celles de laiton, en ce qu'elles sont en trait plein. Toutes les barres verticales d'acier, en s'allongeant, tendent à faire descendre la lentille ; les barres de laiton la font monter. Si donc la dilatation des tiges verticales de laiton produit un allongement égal à celui qui résulte de la dilatation des tiges d'acier, il y a compensation, et le centre de la lentille conserve sa distance au point d'appui, quelle que soit la température. Il est facile de calculer la longueur à donner aux différents cadres pour que cette condition soit réalisée.



Fig. 96.
Pendule à grill

221. **Pendule compensateur de Martin.**— On doit entendre par longueur d'un pendule, la distance du point de suspension à un autre point appelé centre d'oscillation, et dont la position dépend de celle du centre de gravité du pendule ; il faut donc, quand la lentille du pendule descend, relever le centre de gravité du système pour que la distance du centre d'oscillation au point de suspension ne change pas ; il faut, au contraire descendre le centre de gravité quand, la température s'abaisse, la lentille s'élève. Un horloger, nommé Martin, est arrivé

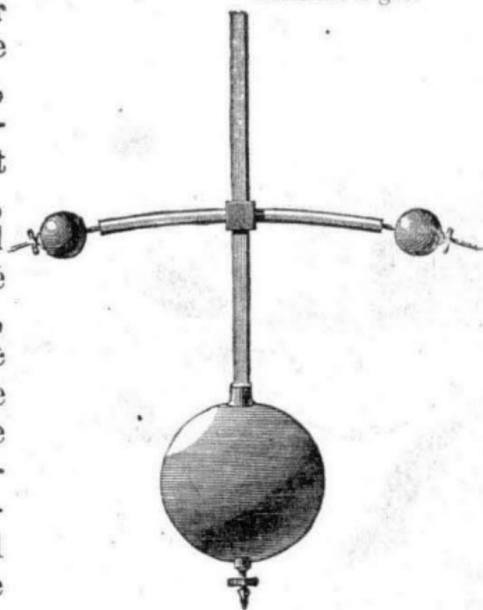


Fig. 97.
Pendule compensateur de Martin.

à ce résultat en implantant perpendiculairement sur la tige du pendule une lame métallique (fig. 97), portant à ses extrémités deux boules pesantes; cette lame est formée de deux portions superposées et soudées; la supérieure est moins dilatable que l'inférieure; si la température s'abaisse, la lame inférieure se contractant plus que la supérieure, le système se recourbe comme l'indique la figure; quand il y a échauffement, la courbure se produit en sens inverse. Les lames, ainsi accolées, sont dites *lames de compensation*; sur leur emploi sont fondés plusieurs instruments, particulièrement des thermomètres dont le plus connu est celui de Bréguet.

222. **Thermomètre de Bréguet.** — Le thermomètre de Bréguet (fig. 98) est un ruban métallique, contourné en hélice et composé d'une lame d'argent à l'intérieur et d'une lame de platine à l'extérieur, ces deux métaux étant séparés par une lame d'or qui sert à les souder l'un à l'autre.

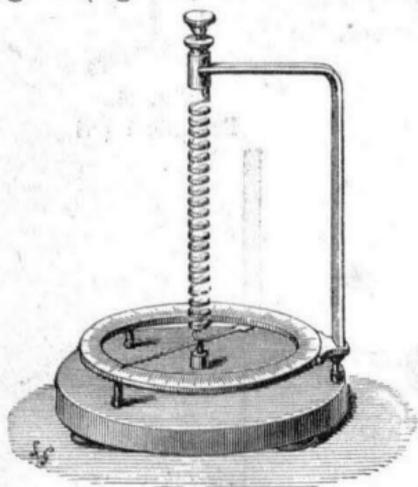


Fig. 98.

Thermomètre de Bréguet.

L'argent étant plus dilatable que le platine, il en résulte que si la température augmente, l'hélice se détend et la courbure des spires diminue. L'hélice est fixée par sa partie supérieure à un support; à sa partie inférieure est suspendue une aiguille, qui parcourt les divisions d'un cercle; la graduation de ce cercle s'obtient par comparaison, c'est-à-dire en portant successivement l'appareil à diverses températures données par un thermomètre à mercure, et inscrivant chaque fois ces températures en face de l'aiguille. Cet appareil est très-sensible, ce qui le rend quelquefois utile.

223. **Pyromètre de Brongniart.** — Un autre thermomètre métallique est celui dont se servait Brongniart ¹ à la manufacture de Sèvres. L'emploi auquel il était destiné lui a fait donner le nom de *pyromètre*. Une plaque de porcelaine (fig. 99) porte une rainure dans laquelle on place une lame de fer bien appuyée sur un talon qui ferme la rainure; une règle de porcelaine traversant le fourneau repose, d'une part, sur l'extrémité de la règle de fer, et de l'autre, sur la petite branche d'un levier coudé. Le fer

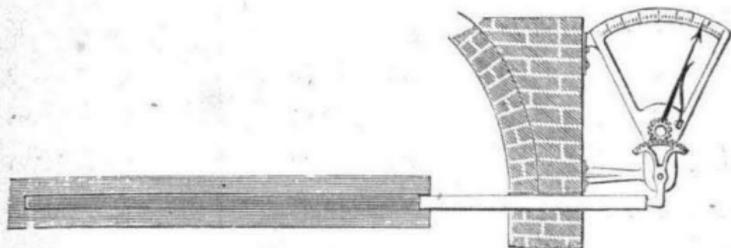


Fig. 99. Pyromètre de Brongniart.

se dilatant pousse la règle de porcelaine, qui ne se dilate elle-même que d'une manière à peine sensible. Cette règle met en mouvement le levier coudé, qui, à l'aide d'un engrenage, conduit une aiguille sur un cadran divisé. Les divisions correspondent aux diverses températures jusqu'à 1500 degrés. Cet instrument n'est pas très-exact, mais suffit aux besoins de certaines industries

1. Brongniart (Alexandre), né à Paris en 1770, mort en 1847, minéralogiste et géologue, directeur de la manufacture de porcelaine de Sèvres.

Tableau des coefficients de dilatation des corps solides.

NOMS DES CORPS.	COEFFICIENTS de DILATATION LINÉAIRE.	COEFFICIENTS de DILATATION CUBIQUE.
Platine de 0° à 100° . .	0,00000884	0,00002653
Acier trempé (jaune).	0,0000123956	0,0000371869
Acier poule.	0,00001150	0,00003450
Fer doux.	0,000012583	0,000037719
Or de départ	0,000014661	0,000033903
Cuivre.	0,000011173	0,000011519
Laiton.	0,000018782	0,000056316
Argent.	0,000019097	0,000057311
Étain.	0,000020547	0,000061641
Plomb.	0,000028184	0,000085152
Bismuth.	0,000013927	0,000011751
Zinc.	0,000029417	0,000088251
Cristal de Choisy-le-Roi.	0,0000076	0,0000228
Verre ordinaire. . . .	0,0000092	0,00002761

Tableau des coefficients de dilatation des liquides.

NOMS DES CORPS.	COEFFICIENT DE DILATATION CUBIQUE.	NOMS DES CORPS.	COEFFICIENT DE DILATATION CUBIQUE.
Mercure de 0° à 100.	0,0001815	Alcool à 0°.	0,0010486
Éther à 0°.	0,0015932	Aldéhyde à 0°.	0,0016535
Chloroforme à 0°. . .	0,0011071	Éther acétique à 0°.	0,0012585

Tableau des coefficients de dilatation des gaz.

NOMS DES CORPS	COEFFICIENT DE DILATATION CUBIQUE.	NOMS DES CORPS.	COEFFICIENT DE DILATATION CUBIQUE.
Air.	0,00367	Protoxyde d'azote.	0,003719
Hydrogène. . . .	0,003661	Acide sulfureux. .	0,003903
Oxyde de carbone.	0,003669	Cyanogène. . . .	0,003877
Acide carbonique.	0,003710		

CHAPITRE IV

FUSION ET SOLIDIFICATION.

224. **Fusibilité des corps.** — Chacun des corps de la nature peut être solide, liquide ou gazeux ; seulement l'état dans lequel il se trouve dépend toujours de sa température, et c'est à cette cause unique qu'est subordonnée la solidité ou la liquidité d'une substance. On a douté longtemps de la possibilité de fondre tous les corps ; on appelait *substances réfractaires* celles dont la fusion paraissait impossible, même aux plus hautes températures ; aujourd'hui que M. H. Sainte-Claire Deville ¹ a fondu le platine dans des forges, qu'avec l'aide de M. Debray ² il a pu liquéfier le même métal en grande masse sous l'action du chalumeau à gaz oxy-hydrogène, qu'enfin Despretz a ramolli le charbon en élevant sa température à l'aide du courant d'une pile de 600 éléments, on ne connaît plus de substances réfractaires. On ne donne pas en effet ce nom aux corps, comme le marbre et le bois, qui se décomposent avant d'avoir atteint leur point de fusion.

225. **Fusion vitreuse.** — D'ordinaire les corps, en fondant, n'affectent aucun état intermédiaire entre l'état solide et

1. Sainte-Claire Deville (Henri), l'un des plus célèbres chimistes de notre époque, né à Saint-Thomas (Antilles), membre de l'Académie des sciences, professeur de chimie à l'École normale, et à la Faculté des sciences de Paris.

2. Debray (Henri), né à Amiens, chimiste distingué, examinateur d'admission à l'École polytechnique.

l'état liquide ; ainsi, quand un morceau de bismuth fond dans une capsule, on peut retirer à un certain moment la portion non fondue, on la trouve aussi solide qu'avant ; de même pour le soufre, le cuivre et la plupart des corps. Il n'en est pas ainsi du verre et de quelques autres substances : avant d'atteindre l'état liquide, elles passent par un état pâteux, puis huileux que l'on retrouve dans le beurre pendant la chaleur de l'été. On dit qu'il y a *fusion vitreuse* ; ce mot est d'autant plus exact que d'ordinaire ces substances, comme le borax, certains phosphates, etc., prennent en se refroidissant, après leur fusion, l'aspect du verre.

226. **Lois de la fusion.** — Le phénomène de la fusion est soumis à deux lois :

1^o *Chaque corps passe de l'état solide à l'état liquide, toujours à la même température ;*

2^o *Pendant tout le temps que mettent les corps à passer de l'état solide à l'état liquide, leur température reste invariable.*

Ces deux lois sont faciles à vérifier : pour la première, il suffit de faire fondre un grand nombre de fois chaque corps et de constater chaque fois avec un thermomètre à quelle température la fusion commence ; pour la seconde, il faut laisser le thermomètre dans le liquide formé pendant tout le temps qu'il est au contact du solide non fondu. Quelle que soit l'ardeur du brasier, le thermomètre reste invariable ; il ne reprend sa marche ascendante qu'après la disparition de toute partie solide. La chaleur fournie par le foyer a dû cependant être employée à quelque chose ; il semble qu'elle se soit unie au corps pour le transformer en liquide, et que, logée dans son intérieur, elle soit devenue cachée ou comme l'on dit *latente*. Nous reviendrons plus tard sur ce fait.

227. **Point de fusion.** — L'on appelle point de fusion d'un corps la température à laquelle ce corps passe de

l'état solide à l'état liquide. Voici un tableau des points de fusion des différents corps :

Tableau des points de fusion.

NOMS DES CORPS.	POINTS de FUSION	NOMS DES CORPS.	POINTS de FUSION.
Platine.	2000	Zinc.	360
Nickel.	1800	Plomb.	320
Fer martelé anglais. . .	1600	Bismuth	262
Fer doux français. . . .	1500	Étain.	230
Aciers les moins fusibles.	1400	Sélénium. . . .	227
Aciers les plus fusibles. .	1300	Arsenic métalliq.	210
Fonte manganésée. . . .	1250	Soufre.	110
Fonte grise (2 ^e fusion). .	1200	Iode.	107
Fonte grise très-fusible. .	1100	Sodium.	95
Fonte blanche peu fusible.	1100	Acide stéarique. .	70
Fonte blanche très-fusible.	1050	Cire blanche . . .	68
Or pur.	1150	Po'assium. . . .	63
Or au titre des monnaies.	1080	Stéarine	55
Cuivre	1250	Spermacéti . . .	49
Argent pur.	1000	Phosphore . . .	44
Bronze.	900	Suif.	33
Antimoine.	432	Beurre.	33

228. **Solidification.** — Le corps liquéfié venant à se refroidir, il arrive un moment où la température de ce corps devient incompatible avec l'état liquide; il y a solidification, non pas d'une façon instantanée, mais d'une manière lente. La solidification se fait en passant par un état pâ-

teux pour les corps susceptibles d'éprouver la fusion vitrée et pour ces corps-là seulement.

229. **Lois de la solidification.** — Le phénomène de la solidification est soumis à deux lois :

1^o *La température à laquelle se fait la solidification est fixe pour une même substance, et est la même que celle du point de fusion ;*

2^o *Tant que la solidification n'est pas complète, la température du bain reste stationnaire, quelle que soit l'intensité de la cause refroidissante.*

Ces deux lois sont faciles à vérifier expérimentalement, en opérant comme pour les lois de la fusion.

230. **Surfusion.** — Certains faits paraissent en opposition avec la première de ces lois : la température à laquelle la solidification commence est parfois inférieure au point de fusion ; mais ce fait, qu'on appelle *surfusion*, ne s'observe jamais que dans des circonstances exceptionnelles ; ainsi l'eau a pu être amenée, sans se solidifier, à une température voisine de 16 degrés au-dessous de zéro, en abaissant très-lentement la température, et maintenant le liquide dans des vases très-étroits et préservés de toute espèce d'agitation. Un très-petit choc peut produire la solidification ; l'introduction d'un morceau de glace la détermine toujours. Au moment de la solidification, la température remonte à zéro. Le phénomène de surfusion a encore été remarqué sur d'autres corps que l'eau, sur l'étain et principalement sur le phosphore. Le fait de la surfusion tient sans doute à ce que les molécules n'occupent pas la même position relative dans le même corps à l'état solide et à l'état liquide. Quand la température est descendue au-dessous du point de solidification, les molécules sont dans un état d'équilibre instable que le moindre choc peut déranger ; mais si ce choc ne se produit pas, cet équilibre subsiste ainsi que l'état liquide qui en est la conséquence.

231. **Cristallisation.** — Quand la solidification se fait lentement, les molécules se déplacent peu à peu pour prendre la disposition qui convient à l'état solide et généralement à l'état cristallin. C'est ainsi que la solidification graduelle conduit à la formation de cristaux, tandis que la solidification brusque détermine des phénomènes de trempe comme ceux qui ont été constatés dans les larmes bataviques (25).

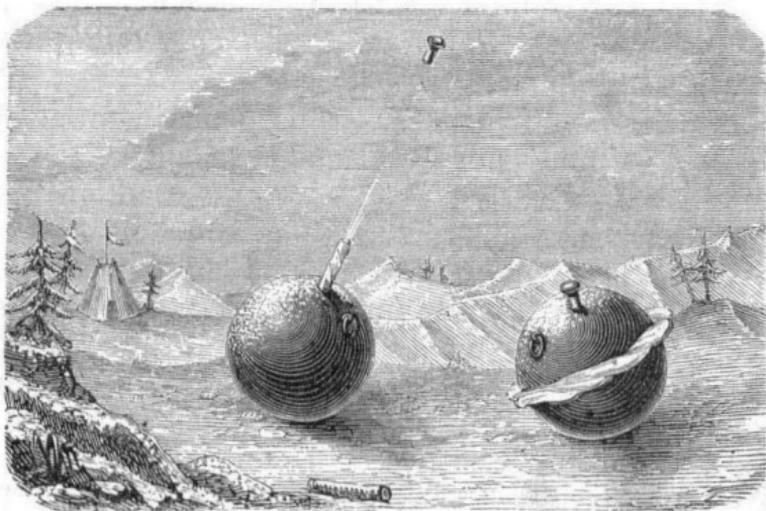


Fig. 100. Congélation de l'eau.

232. **Changement de volume pendant la solidification.** — La solidification est généralement accompagnée d'un changement de volume. Ordinairement le corps se contracte. Cependant il y a des exceptions; ainsi l'eau, la fonte de fer, le bismuth, l'antimoine, augmentent de volume en se solidifiant. Il suffit de rappeler à ce sujet les expériences du major Edward Williams qui, ayant rempli d'eau des bombes (fig. 100) les exposa à une température inférieure à zéro; une fois, le bouchon fut projeté à plus de 100 mètres et une colonne de glace de 25 centimètres de longueur sortit de l'orifice; une autre fois, la bombe se brisa. Dans le cours de première année, on a insisté sur ces phénomènes, leurs effets et leurs applications.

CHAPITRE V

DES VAPEURS.

233. **Formation des vapeurs.** — Certains liquides, l'eau, l'alcool, l'éther, etc., exposés à l'air dans un vase ouvert, disparaissent d'une façon plus ou moins rapide ; ils se répandent dans l'atmosphère en prenant l'état gazeux, et leur présence est alors accusée par l'odeur, si ces liquides sont odorants ; on dit qu'ils se sont réduits en vapeur. C'est par suite de ce fait que l'air contient constamment de la vapeur d'eau, que l'on voit se déposer, par exemple, sur la surface externe d'une carafe d'eau glacée. Il ne faut pas, d'ailleurs, confondre la vapeur avec ces brouillards que l'on voit se former au-dessus d'un vase d'eau bouillante, ou par les soirs d'été au-dessus d'un sol humide ; c'est fort improprement que le vulgaire a donné le nom de vapeur à ce qui est un amas de gouttelettes liquides condensées ; les vapeurs, à moins d'être colorées, ne sont pas plus visibles que l'air.

234. **Force élastique des vapeurs.** — Non-seulement les vapeurs sont invisibles comme l'air, mais de plus elles exercent comme lui et comme tous les gaz une certaine pression sur les corps environnants ; elles possèdent une force élastique. Pour le prouver, on fait passer dans la chambre d'un baromètre quelques gouttes d'un liquide volatil, aussitôt le mercure s'abaisse à l'intérieur de l'instrument. Cet abaissement ne peut être déterminé par le poids du liquide introduit, ce poids étant presque insensible ;

il est dû à la force élastique de la vapeur produite par le liquide, et le phénomène est tout semblable à celui que l'on eût observé si on avait introduit un peu de gaz dans la chambre barométrique. Tout baromètre dans lequel on a fait passer un peu de liquide volatil, est désigné par abréviation sous le nom de *baromètre à vapeur*. La dépression varie, d'ailleurs, avec le liquide employé ; il est facile de s'en assurer en disposant dans une même cuvette (fig.

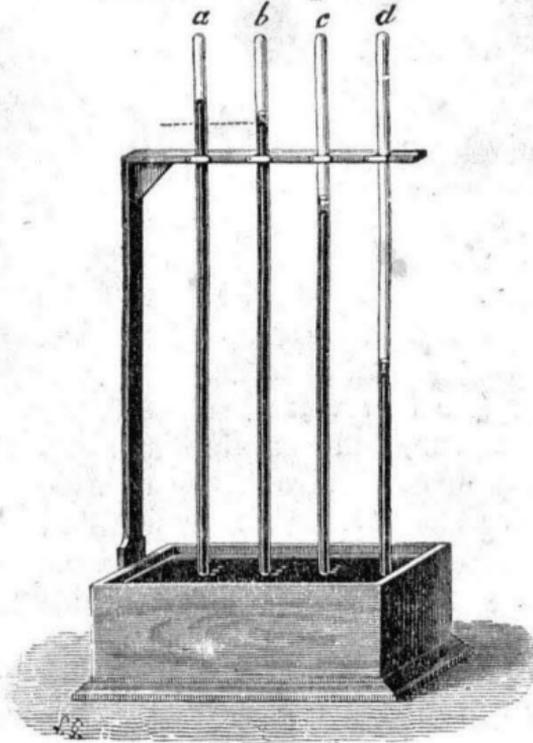


Fig. 101. Baromètre à vapeur.

101) divers baromètres à vapeur, contenant chacun un liquide différent. Un baromètre ordinaire *a* sert à relever la valeur des dépressions.

235. **Influence de la température sur la force élastique des vapeurs.** — Si l'on considère plusieurs baromètres à vapeur contenant le même liquide, on constate que le niveau du mercure est le même dans tous, si la température est aussi la même, pourvu cependant que la vapeur soit dans chacun d'eux en contact avec un excès de liquide ; mais si on élève la température, on voit aussitôt le niveau du mercure s'abaisser. Cette influence de la température peut être mise en évidence par deux expériences dues à Dalton ¹.

236. Dans la première, la force élastique de la vapeur

1. Dalton, physicien anglais, auteur de très-beaux travaux sur les propriétés des vapeurs.

reste inférieure à la pression atmosphérique. Un baromètre à vapeur et un baromètre normal reposent dans la même cuvette ; ils sont entourés d'un manchon de verre qui a pour fond le mercure de la cuvette, et que l'on remplit successivement d'eau à des températures de plus en plus élevées ; on constate qu'à chaque température correspond une différence de niveau particulière, et que cette différence de niveau s'accuse d'autant plus que la température est plus élevée.

237. Dans l'expérience précédente, on ne peut pas dépasser le point où le niveau arrive à être le même dans la cuvette et dans le baromètre à vapeur, c'est-à-dire où cette vapeur fait équilibre à la pression atmosphérique ; de là la deuxième expérience. Un tube recourbé (fig. 102), assez semblable au tube de Mariotte (126), contient du mercure qui remplit la petite branche, laquelle est fermée, et une portion de la grande branche qui est ouverte. Un peu de liquide volatil, de l'éther par exemple, a été préalablement introduit dans la petite branche, et est venu se loger au sommet *s* au-dessus du mercure qui fait pression sur lui. On plonge l'appareil dans de l'eau convenablement échauffée, aussitôt l'éther se vaporise, le mercure se soulève dans la branche ouverte, descend dans la branche fermée et la différence de niveau *ab*, augmentée de la hauteur barométrique, mesure la pression supportée par la vapeur. Plus la température s'élève, plus cette pression augmente.



Fig. 102.
Influence de la température sur la force élastique des vapeurs.

238. Tension maximum de la vapeur. -- Dans toutes les ex-

périences qui précèdent, on a supposé la vapeur au contact d'une certaine portion du liquide générateur; on dit dans

ce cas que l'espace dans lequel la vapeur est répandue en est saturé ou improprement, et par abréviation, que *la vapeur est saturée*. Ce fait de la saturation conduit à reconnaître une propriété fort curieuse des vapeurs.

Prenons l'appareil à cuvette profonde (fig. 103) qui a déjà servi pour la vérification de la loi de Mariotte, plaçons sur la cuvette MN deux baromètres,

l'un normal, l'autre à vapeur. le mercure s'élève dans ce dernier à la hauteur *a b*. Enfonçons le tube dans la cuvette, et la hauteur *a b* de la colonne sou-

levée ne change pas, bien que la vapeur se trouve réduite à occuper une place de plus en plus petite; cette vapeur, au lieu d'augmenter de force élastique, se condense et retourne à l'état liquide; elle se liquéfie

même complètement si le sommet du tube est abaissé jusqu'en *b*. Il en résulte qu'à la température à laquelle on opère, la vapeur saturée a une tension mesurée par la différence des niveaux dans les deux baromètres, et que cette tension ne

peut être dépassée, d'où son nom de *tension maximum*.

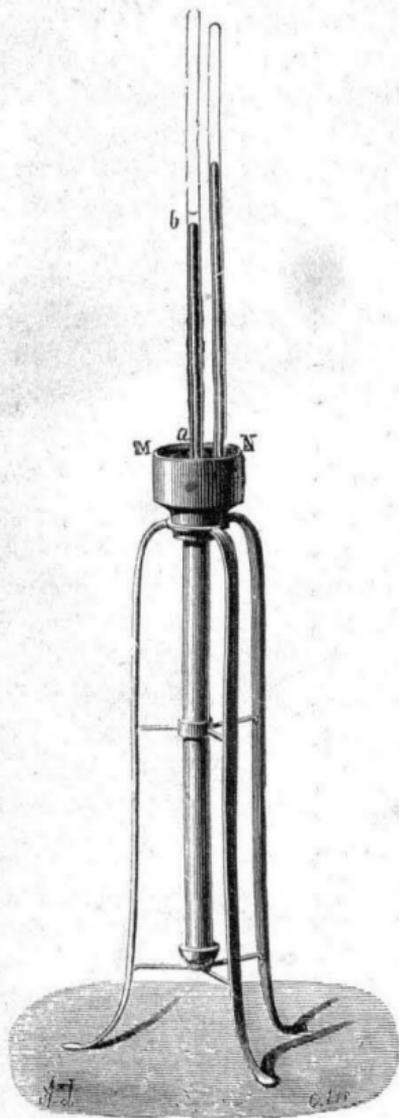


Fig. 103.

Tension maximum de la vapeur.

peut être dépassée, d'où son nom de *tension maximum*.

239. Identité des gaz et des vapeurs. — Supposons que dans

l'expérience précédente on soulève le tube du baromètre à mercure au lieu de l'enfoncer : la hauteur ab de la colonne soulevée n'en restera pas moins la même tant qu'il y aura, au-dessus du mercure, du liquide à volatiliser, et ce liquide se transformera en vapeur pour remplir toute la capacité de la chambre barométrique ; mais lorsque tout le liquide aura disparu, on verra la colonne ab augmenter, la force élastique de la vapeur diminuant suivant la loi de Mariotte. Donc, *au delà du point de saturation, les vapeurs se comportent comme les gaz*. Supposons maintenant que l'on comprime un gaz, il arrive un moment où il se liquéfie ; il n'y a d'exception que pour six gaz : l'hydrogène, l'oxygène, l'azote, l'hydrogène protocarboné, l'oxyde de carbone et le bioxyde d'azote, probablement parce que ces gaz n'ont pas encore été soumis à des pressions suffisantes. *Une fois arrivés à un état de compression convenable, les gaz cessent d'augmenter de force élastique, ils atteignent une tension maximum, et à partir de ce moment se liquéfient*. Il n'y a donc aucune distinction véritable entre ce que l'on est convenu d'appeler des gaz et des vapeurs ; si même ces deux mots distincts ont été créés, c'est qu'à cette époque on savait que les liquides pouvaient se réduire en vapeur, mais non pas que les gaz fussent liquéfiables.

240. Relation entre les températures et la tension maximum.

— Si maintenant on se rappelle ce qui a été dit (235) de l'influence des températures sur la tension des vapeurs, on voit que cela avait trait à la tension maximum ; que c'est elle qui croît et décroît si rapidement avec la température. On peut même se demander, en voyant cette variation si rapide, si, en abaissant la température, l'on ne doit pas trouver pour chaque corps un moment où la force élastique maximum devient nulle ; le mercure et l'acide sulfurique paraissent indiquer qu'il en est ainsi. M. Faraday ¹, ayant mis du mercure dans un flacon, sus-

1. Faraday (Michel), l'un des plus éminents physiciens de notre

pendit au-dessous du bouchon une feuille d'or, celle-ci blanchit, indiquant que le mercure émet des vapeurs qui attaquent l'or; mais cette expérience, qui réussit à la température zéro, ne donne plus les mêmes résultats quand la température s'est abaissée à 5 ou 6 degrés au-dessous de zéro; à ce moment la feuille d'or reste intacte, il semble que la tension maximum de la vapeur du mercure est devenue nulle. L'acide sulfurique, au contact de l'eau de baryte, se trouble et donne un précipité blanc de sulfate de baryte; cependant, si l'on place côte à côte, sous une même cloche, une capsule pleine d'acide sulfurique et une autre pleine d'eau de baryte, et si l'on vient en même temps à faire le vide sous la cloche pour faciliter l'évaporation, l'on ne constate aucun trouble dans l'eau de baryte, ce qui prouve qu'il n'y a sous la cloche aucune vapeur d'acide sulfurique. Il est d'ailleurs remarquable que ce soient précisément le mercure et l'acide sulfurique qui jouissent de cette propriété; il en résulte que le premier peut être employé pour les baromètres et les manomètres, et que le second peut servir à dessécher les gaz sans pour cela les imprégner de sa vapeur.

241. Principe de la paroi froide. — Quand une enceinte est saturée de vapeur et que ses différents points ne sont pas à la même température, la vapeur tend à prendre en chaque point une tension distincte, mais l'équilibre ne peut exister qu'autant que la tension soit la même partout; l'expérience prouve que dans ce cas, quand l'équilibre est établi, *la force élastique dans l'enceinte a pour valeur la tension maximum qui correspond au point le plus froid.* Tel est le principe connu sous le nom de principe de la paroi froide. Il est d'ailleurs facile d'en comprendre la raison. Prenons deux ballons bien bouchés, réunis à leur partie supérieure par un tube de verre deux fois recourbé

siècle, né en 1791, en Angleterre, mort en 1867. Fils d'un pauvre forgeron, d'abord ouvrier lui-même, il s'est élevé par son seul travail et son génie jusqu'au rang des premiers savants du monde.

qui s'engage dans les deux bouchons ; l'un des ballons est au quart rempli d'éther, l'autre vide ; tant qu'ils sont tous deux à la même température, rien ne se produit. Supposons que l'on enveloppe de glace le ballon vide, l'autre étant maintenu à la température ambiante, par exemple en le plongeant dans un bain d'eau : on crée une paroi froide dans l'enceinte où se répand la vapeur d'éther ; cette vapeur se condense partiellement au contact de la paroi froide pour prendre la tension maximum correspondante ; mais l'équilibre étant rompu, l'excès de pression fait affluer dans le ballon froid une nouvelle quantité de vapeur qui est immédiatement remplacée par l'évaporation de l'éther ; aussitôt une nouvelle condensation se produit dans le ballon froid, et le phénomène se continue jusqu'à ce que tout l'éther se soit évaporé et soit venu se condenser au contact de la paroi froide ; à ce moment, rien n'empêche l'équilibre de s'établir et la vapeur d'avoir partout la tension correspondante à celle de la paroi froide. Telle est la cause de toute distillation.

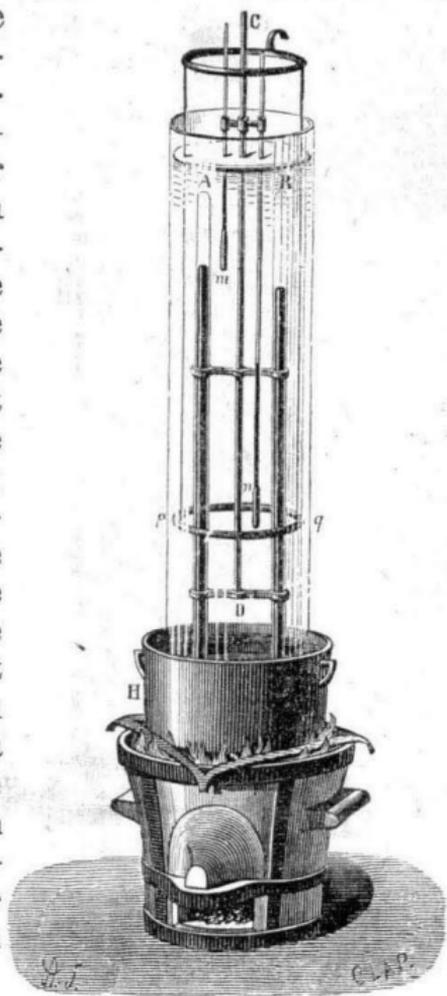


Fig. 103 bis.

Appareil de Dalton.

242. Mesure de la tension maximum de la vapeur d'eau par le procédé de Dalton. — Pour trouver la force élastique maximum correspondante à chaque température, Dalton em-

ployait l'appareil qui a servi à démontrer la variation de tension quand celle-ci reste inférieure à la pression atmosphérique. Cet appareil, modifié par Gay-Lussac, a été employé par ce dernier de la manière suivante. Une marmite en fonte H (fig. 103 bis) contient du mercure et sert de cuvette à deux baromètres, l'un A normal, l'autre B à vapeur; ces deux baromètres sont fixés à une même tige métallique CD; ils sont entourés par un manchon de verre

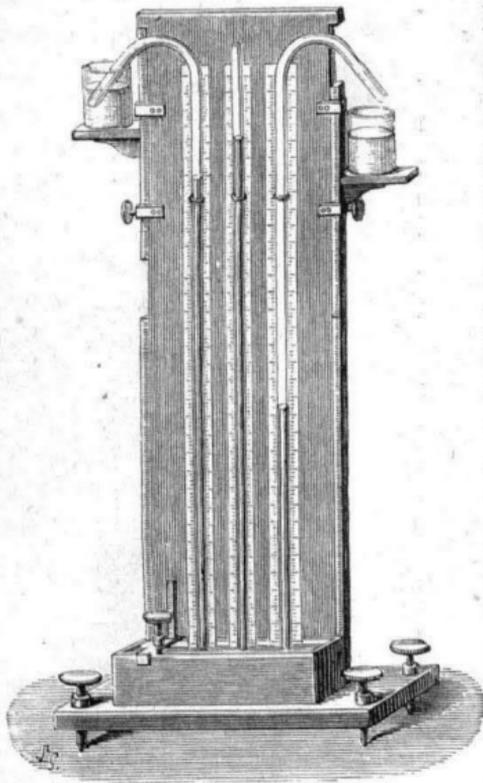


Fig. 104.

Mesure des tensions au-dessous de 0°

précédent ne peut pas être employé; il faut, comme le fit Gay-Lussac, mettre à profit le principe de la paroi froide. L'appareil (fig. 104) consistait en un baromètre normal, à côté duquel étaient placés un ou deux baromètres à vapeur, recourbés à la partie supérieure; on faisait plonger

plein d'eau, dont le fond est le mercure même de la cuvette; un agitateur permet de brasser l'eau et de rendre uniforme sa température, qui est donnée par deux thermomètres *m* et *n*; un fourneau permet de porter la marmite, le mercure qu'elle contient et l'eau du manchon à des températures croissantes. Pour observer la différence de niveau du mercure dans les deux baromètres, une règle divisée était placée le long de CD entre les deux tubes.

243. Tension maximum des vapeurs au-dessous de zéro. —

Pour les températures inférieures à zéro, le procédé

la partie courbe au sein d'un mélange réfrigérant, tout le liquide contenu au-dessus du mercure distillait, se rendait dans la région froide, et lorsque la distillation était achevée, la différence de niveau dans le baromètre normal et dans le baromètre à vapeur mesurait la force élastique correspondante à la température du mélange réfrigérant.

244. **Tension maximum des vapeurs aux températures supérieures à 100°.** — Pour les températures supérieures à 100°, les procédés employés sont assez compliqués et n'ont guère été appliqués qu'à la vapeur d'eau; la force élastique est d'ailleurs toujours mesurée par un manomètre à air libre. Les meilleures expériences à ce sujet sont celles de M. Regnault; ce physicien a repris aussi la mesure des forces élastiques de la vapeur d'eau à basse température : ce sont ses résultats que nous allons faire connaître. En donnant un extrait de ses tables, nous ferons remarquer la manière dont la pression croît avec la température; tandis qu'une variation de température de 0° à 100° n'entraîne même pas un changement de pression d'une atmosphère, il suffit d'une variation de 1° pour produire un accroissement de pression d'une atmosphère, quand la température atteint environ 260°.

Tableau des forces élastiques de la vapeur d'eau depuis
30 degrés au-dessous de zéro jusqu'à 230 degrés.

TEMPÉ- TURES.	FORCES ÉLASTIQUES.	TEMPÉ- TURES.	FORCES ÉLASTIQUES.	TEMPÉ- TURES.	FORCES ÉLASTIQUES.	TEMPÉ- TURES.	FORCES ÉLASTIQUES.
-30°	^{mm} 0,386	75	^{mm} 288,517	160	^m 4,652	200	^m 11,689
-25	0,605	80	334,643	162	4,893	202	12,183
-20	0,927	85	433,041	164	5,145	204	12,694
-10	2,093	90	525,450	166	5,407	206	13,221
- 5	3,413	95	633,778	168	5,679	208	13,764
0	4,600	100	760,000	170	5,967	210	14,325
+ 5	6,534	105	^m 906,410	172	6,255	212	14,902
10	9,165	110	1,075	174	6,560	214	15,497
15	12,699	115	1,269	176	6,877	216	16,110
20	17,291	120	1,491	178	7,206	218	16,741
25	23,550	125	1,743	180	7,547	220	17,390
30	31,518	130	2,030	182	7,899	222	18,059
35	41,827	135	2,353	184	8,265	223	18,400
40	54,906	140	2,718	186	8,644	224	18,716
45	71,391	145	3,126	188	9,037	225	19,097
50	91,982	150	3,581	190	9,443	226	19,453
55	117,478	152	3,778	192	9,863	227	19,814
60	148,791	154	3,983	194	10,297	228	20,180
65	186,945	156	4,196	196	10,746	229	20,550
70	233,092	158	4,419	198	11,210	230	20,926

245. Principe de la machine à vapeur. — C'est la grande force élastique que prennent les vapeurs quand on élève

leur température, qui les a fait adopter dans l'industrie comme force motrice, d'abord par Papin¹, puis par Newcomen², et enfin par Watt³. La machine de ce dernier

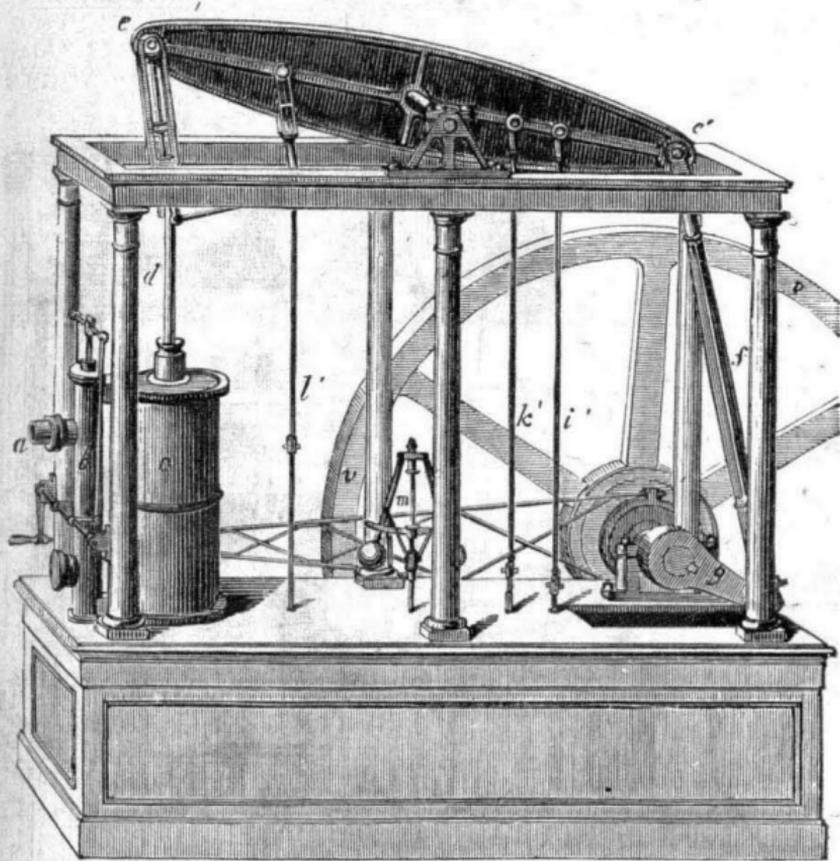


Fig. 105. Machine à vapeur de Watt.

est encore le type de celles que l'on emploie actuellement; nous allons en donner une description succincte, l'étude

1. Papin (Denis), né à Blois le 22 août 1645, mort vers 1710, sans ressource et sans asile. Véritable inventeur des machines à vapeur; on lui doit aussi un moyen de retirer la gélatine des os, à l'aide de ce que l'on appelle la marmite de Papin.

2. Newcomen, simple quincaillier ou serrurier de Dartmouth, dans le Devonshire, réalisa le premier, avec l'aide de Cawley, la machine à vapeur de Papin, de manière à lui donner un emploi industriel.

3. Watt (James), né en 1736 à Greenock en Écosse, mort le 25 août 1819,

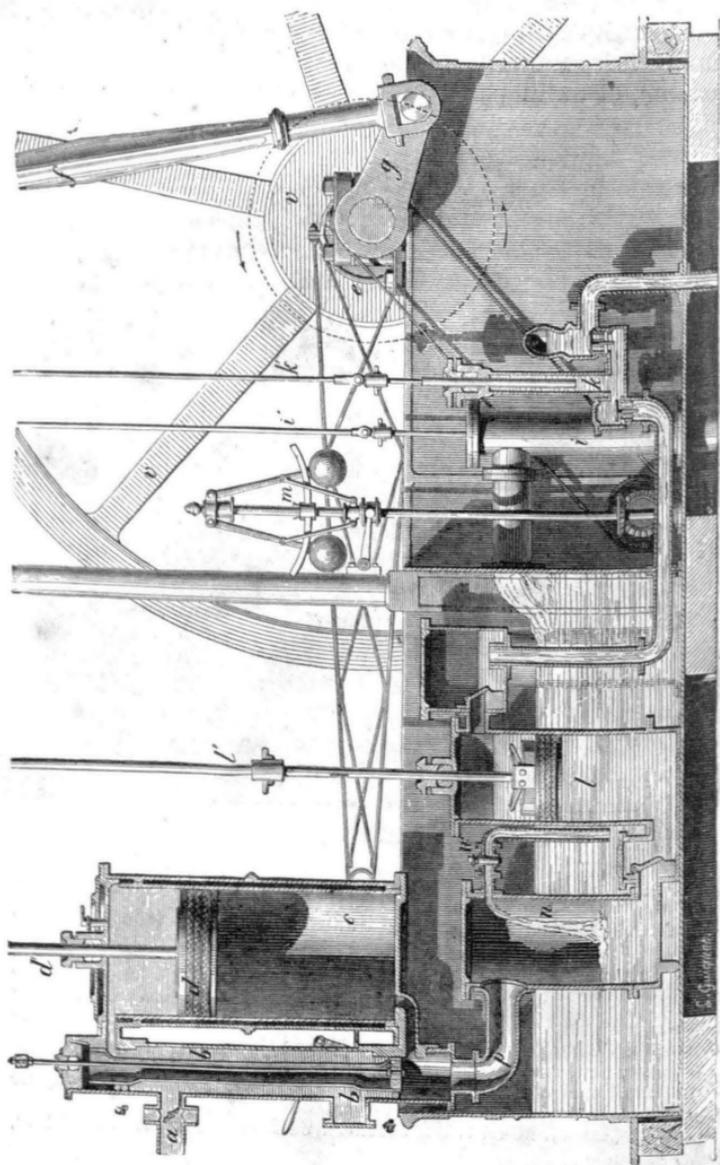


Fig. 106. Coupe de la machine de Watt.

C. G. Goussier del.

détaillée devant se faire dans le cours de mécanique

Dans un *corps de pompe c* (fig. 105) se meut un *piston d* (fig. 106). Le mouvement est produit par la vapeur qui presse alternativement sur chacune des faces du piston. Cette vapeur, fournie par une chaudière, se rend par un canal *a* dans un espace *b* appelé *boîte à vapeur*; de là elle pénètre dans le corps de pompe tantôt par la partie supérieure de celui-ci comme dans la figure, tantôt par la partie inférieure. La vapeur exerçant sa pression au-dehors du piston, rien ne doit contre-balancer son action, il faut donc que la vapeur précédemment amenée à la partie inférieure du corps de pompe cesse d'agir; ce résultat est atteint quand cette vapeur est en libre communication par le canal *p* avec l'espace *n* appelé *condenseur*, et dans lequel on injecte de l'eau à la température ordinaire; en vertu du principe de la paroi froide (241), la vapeur prend la tension correspondante à la température de cette eau et n'oppose plus d'obstacle sensible à la descente du piston. Quand celui-ci est au bas de sa course, une pièce appelée *tiroir*, disposée dans la boîte à vapeur, se déplace et modifie les communications; la partie supérieure du corps de pompe est mise en relation avec le condenseur et la vapeur comprimée se précipite sous le piston; on obtient de cette façon les mouvements alternatifs de la tige *d'*, à l'aide d'un parallélogramme articulé dont l'invention est due à Watt; ce mouvement est transmis à un *balancier e e'* qui mène une bielle *f* et une manivelle *g*; sur l'arbre de cette manivelle sont appliqués les organes qui transportent le mouvement aux différents outils.

246. **Volant.** — Un volant *v* est aussi placé sur l'arbre; c'est une roue d'un très-grand rayon, dont la masse, d'ailleurs considérable, est presque entièrement portée à la circonférence. Le volant régularise le jeu de la machine :

apporta des perfectionnements considérables à la machine à vapeur; on lui doit beaucoup d'inventions utiles.

en effet, s'il y a accroissement de force, cet accroissement ne peut accélérer que très-peu la vitesse d'une masse aussi grande que celle du volant; si, au contraire, il y a diminution de force, le volant continue sa marche par vitesse acquise et tend ainsi à maintenir l'uniformité dans le mouvement de la machine.

247. **Pompes.** — Au balancier sont attachées les tiges k'' l'' i' de pistons appartenant chacun à une pompe. La première i de ces pompes puise de l'eau froide dans un puits, et la verse dans une bêche, d'où elle pénètre par le robinet n' dans le condenseur n . La pompe à air l enlève du condenseur l'eau chaude et en même temps l'excès d'air qui peut s'y être introduit avec la vapeur ou autrement. La pompe alimentaire k injecte dans la chaudière une portion de l'eau chaude, puisée par la pompe à air, et répare ainsi les pertes du liquide de la chaudière qui se transforme en vapeur.

248. **Tiroir.** — Un excentrique e fixé sur l'arbre de la machine produit le mouvement du tiroir. Ce dernier appareil a besoin d'une description spéciale. C'est un tube creux, sans fond (fig. 107), plan du côté qui regarde le corps de pompe, cylindrique dans la partie opposée, renflé à ses deux extrémités; ces deux renflements, garnis d'étoupe, traversent la paroi supérieure et la partie inférieure de la boîte b sans laisser échapper de vapeur. Sur la face plane, le renflement n'a lieu que sous forme de rebords, plans, bien dressés, laissant une cavité entre leurs trois côtés. Le tiroir, étant appliqué sur la paroi de la boîte, ne touche cette paroi que par ses rebords et la vapeur circule librement autour de lui. Appelons x et y les deux ouvertures des canaux qui amènent la vapeur dans le corps de



Fig. 107.
Tiroir.

pompe; elles sont l'une un peu au-dessus, l'autre un peu au-dessous de la boîte à vapeur. Supposons le tiroir au haut de sa course (fig. 108), il entoure l'ouverture y entre les rebords plans de sa partie supérieure, et la vapeur passant sous les tiroirs peut pénétrer dans y ; pendant ce temps, x débouche librement dans le canal p qui va au condenseur. Supposons, au contraire, le tiroir au bas de sa course (fig. 109), il entoure x entre les trois rebords plans de sa partie inférieure, et la vapeur de la boîte b se précipite sous le corps de pompe; quant à y , cette ouverture débouche au-dessus du tiroir, et comme celui-ci est creux intérieurement, il met en libre communication y et p .

249. **Chaudière.** — La chaudière de la machine à vapeur est formée (fig. 110) d'un cylindre G terminé par deux hémisphères. Au-dessous sont deux autres cylindres appelés *bouilleurs*, dont un est représenté sur la figure en H , et qui se rattachent à

la chaudière par des tubes verticaux appelés *puisards*. Le tout est placé dans un fourneau, de telle sorte que les bouilleurs soient tout entiers dans la flamme, et que la partie supérieure de la chaudière soit préservée d'une manière absolue du contact du feu. Par le tube A arrive l'eau de la pompe d'alimentation; ce tube descend jusque dans les bouilleurs; s'il se terminait au niveau de la chaudière, l'eau qu'il amène se trouvant au contact de la vapeur produirait une condensation partielle. Un flotteur F sert à indiquer le ni-

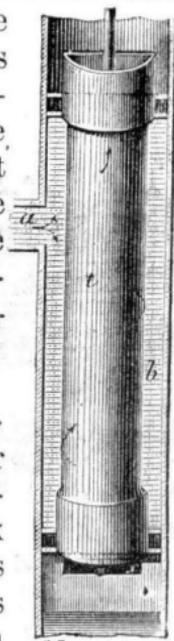


Fig. 108
Tiroir.

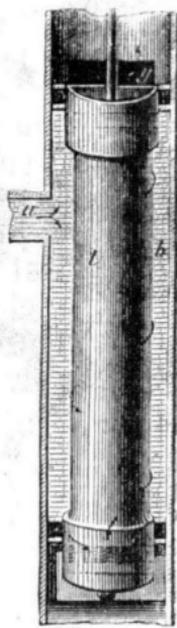


Fig. 109.
Tiroir.

veau de l'eau ; il peut être à sifflet d'alarme (80). La vapeur se rend à la machine par le canal C. En T est une large ouverture appelée *trou d'homme*, par laquelle on pénètre dans la chaudière pour la nettoyer. S est une *soupape de sûreté* pressée par le levier R qui supporte un poids ; quand la pression devient trop forte, la soupape se soulève et donne issue à la vapeur.

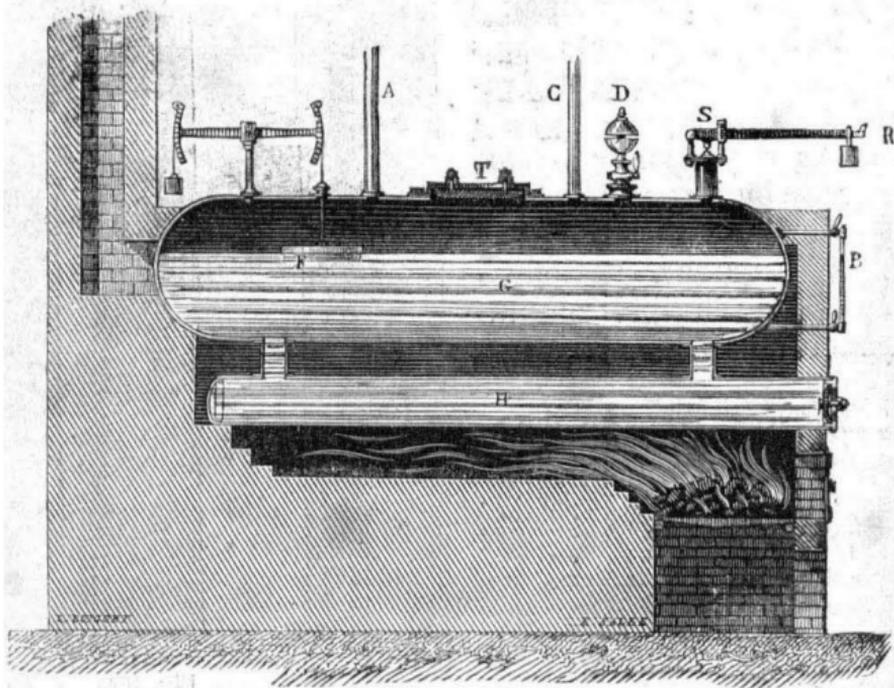


Fig. 110 Chaudière.

250. **Mélange des gaz et des vapeurs.** — Lorsque les vapeurs se mélangent aux gaz, on peut leur appliquer les lois du mélange des gaz entre eux. Ainsi : *Dans un mélange d'un gaz et d'une vapeur, chacun de ces corps exerce la même pression que s'il était seul.* Il faut ajouter que *la tension maxima d'une vapeur dans un gaz est la même que dans le vide pour la même température.* Pour démontrer ces lois, on se sert d'un appareil dû à Gay-Lussac ; il se compose (fig. 111) de deux tubes verticaux, l'un étroit

CD, l'autre notablement plus large. Ces tubes sont réunis à leur partie inférieure par une monture métallique. Un robinet *r*, placé sur cette monture, permet de laisser écouler le liquide contenu dans l'appareil. A la partie supérieure du tube large est une monture à robinet *r'* sur laquelle on peut visser différentes pièces; on commence par remplir l'appareil de mercure jusqu'à ce que le liquide s'élève à la partie supérieure du tube large, il s'élèvera dans l'autre tube à la même hauteur. On fixe alors sur le gros tube un ballon M plein d'un gaz sec, d'air par exemple; on ouvre les robinets de ce ballon ainsi que les robinets *r* et *r'*. Le mercure s'écoule; à un certain moment, on ferme les robinets, et l'on constate que le mercure s'est abaissé dans le gros tube à un certain niveau, et plus bas encore dans le tube étroit. Le gaz introduit est évidemment à une pression moindre que la pression atmosphérique; de là la différence de niveau dans les deux tubes. On ferme *r'*, et, en ajoutant du mercure par l'orifice D de la branche étroite, on ramène les niveaux à être les mêmes en N; le gaz enfermé dans l'appareil est alors à la pression atmosphérique; son volume se mesure sur une échelle divisée, placée à côté de la large branche.

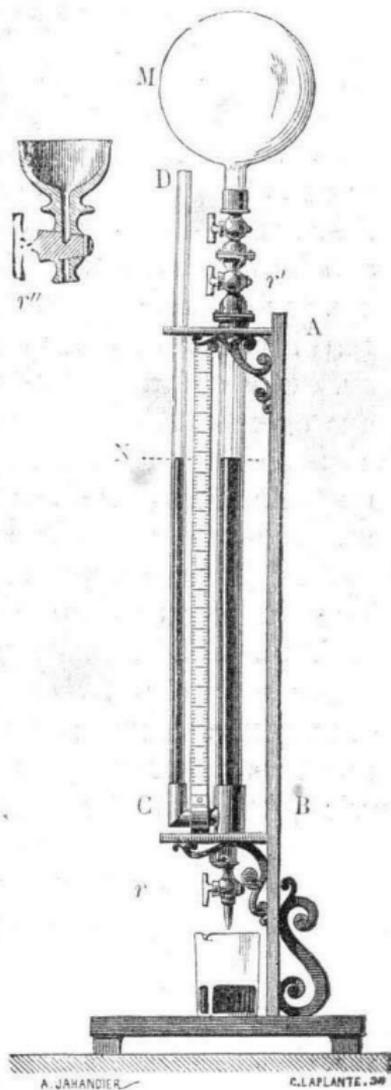


Fig. 111. Appareil de Gay-Lussac pour le mélange des gaz et des vapeurs.

On enlève le ballon et on lui substitue un robinet à cuiller r'' ; dans ce robinet, le boisseau n'est pas complètement foré, et présente par suite une cavité que l'on nomme la *cuiller*. Au-dessus du robinet est un entonnoir qui reçoit le liquide sur la vapeur duquel on veut opérer. On tourne plusieurs fois la clef du robinet r'' , et, de cette façon, on fait pénétrer, à chaque tour dans l'appareil, la quantité de liquide qui remplit la cuiller ; celui-ci est ainsi introduit peu à peu sans qu'il y ait communication entre l'air intérieur et l'air extérieur. On s'arrête dans l'introduction du liquide, lorsque la paroi paraît mouillée et que l'espace est saturé de vapeur. Cette opération faite, l'on reconnaît que la vapeur ayant exercé une certaine pression, le liquide est descendu dans la large branche et qu'il a monté dans l'autre. On ajoute alors du mercure par l'extrémité ouverte D, jusqu'à ce que le niveau soit redevenu dans le tube large ce qu'il était précédemment, c'est-à-dire en N.

Le volume du mélange est précisément celui qu'occupait l'air seul à la pression atmosphérique ; le poids de la colonne soulevée fait donc équilibre à la force élastique de la vapeur. Mais la hauteur de cette colonne est précisément celle qui sert de mesure à la force élastique, dans le vide, de la vapeur employée, quand la température est celle de l'opération ; on doit donc en conclure que cette force élastique est la même dans le vide et dans l'air, et que, dans le mélange des gaz et des vapeurs, le gaz et la vapeur agissent comme s'ils étaient seuls. Dans l'expérience précédente, on emploie de la vapeur saturée, mais une vapeur non saturée n'étant autre chose qu'un gaz, la loi du mélange des gaz est également applicable.

251. **Densité des vapeurs.** — Le volume qu'occupe une vapeur dépend de sa température et de la pression qu'elle supporte : il faut donc faire intervenir, comme pour les gaz, ces deux quantités dans la définition des poids spécifiques des vapeurs ; mais il faut de plus remarquer que la

température et la pression auxquelles la vapeur doit se trouver soumise, pour en prendre la densité, doivent être compatibles avec la possibilité de son existence à l'état de fluide élastique; aussi appelle-t-on densité d'une vapeur, le rapport qui existe entre le poids d'un certain volume de vapeur et le poids d'un même volume d'air pris dans les mêmes circonstances de température et de pression. Cette définition n'est donc pas tout à fait la même que dans le cas des gaz pour lesquels la comparaison se fait à 0° et sous la

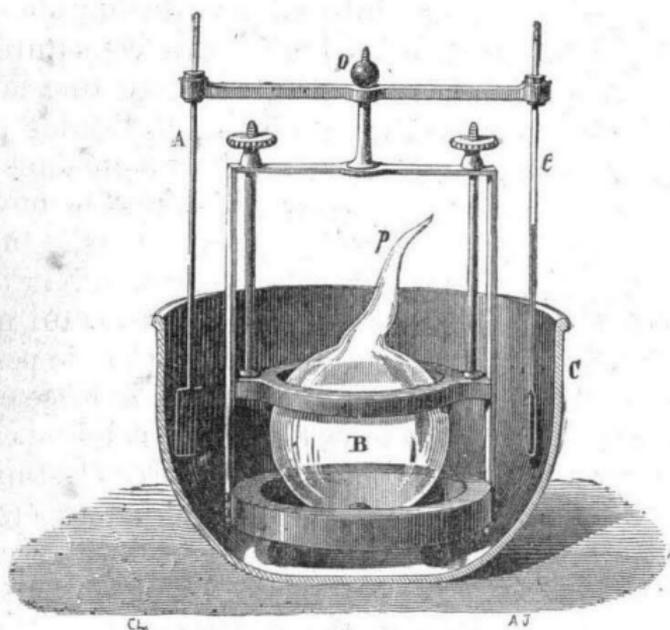


Fig. 112. Appareil de M. Dumas pour la densité des vapeurs

pression de 760^{mm} . D'ailleurs, ces deux définitions rentre-
raient l'une dans l'autre, si l'on admettait que la loi de
Mariotte s'applique à tous les gaz et à toutes les vapeurs
et, de plus, que, comme le pensait Gay-Lussac, tous les
gaz et toutes les vapeurs ont même coefficient de dilatation.

252. Le procédé le plus employé pour trouver la densité

d'une vapeur est dû à M. Dumas¹. On prend un ballon B à col effilé *p* (fig. 112) dans lequel on introduit une quantité suffisante du liquide ou du solide à vaporiser. On place le ballon dans une marmite C contenant du chlorure de zinc fondu ou une solution de chlorure de calcium; un support métallique, formé de deux anneaux réunis par des tiges verticales, maintient le ballon plongé dans le bain liquide. On chauffe et on porte à une température déterminée que l'on maintient constante et qu'on rend uniforme à l'aide d'un agitateur A mobile autour de O. Un thermomètre indique la température du bain. Le corps, en se volatilissant, chasse tout l'air du ballon; quand la vaporisation est complète, on ferme à la lampe la pointe effilée *p*. Le ballon refroidi est pesé, et, du poids de la vapeur qu'il contient comparé à son volume et au poids d'air qui remplirait ce volume, l'on déduit la densité de la vapeur.

253. **Densité limite.** — M. Cahours² a remarqué, le premier, que la densité de la vapeur d'un corps pouvait aller en diminuant à mesure que la température s'élève, mais qu'à partir d'une certaine température cette densité devenait constante; on a alors ce que l'on appelle la *densité limite*, dont la connaissance est très-utile en chimie. C'est ainsi que, comme l'ont fait voir MM. Deville et Troost³, la vapeur de soufre a pour densité limite 2,2, tandis que sa densité à 500° est 6,6, d'après M. Dumas.

1. Dumas (Jean-Baptiste), né à Alais (Gard), célèbre chimiste, membre de l'Académie des sciences et sénateur. Il s'est fait remarquer non-seulement par ses travaux, mais par l'éclat de son enseignement à la Sorbonne et au Collège de France.

2. Cahours (Auguste-André-Thomas), chimiste français, professeur à l'École centrale des Arts et Manufactures, examinateur de sortie à l'École polytechnique, essayeur des monnaies de France, auteur de travaux remarquables sur la chimie organique.

3. Troost, chimiste distingué, professeur au lycée Bonaparte.

CHAPITRE VI

HYGROMÉTRIE ET MÉTÉORES AQUEUX.

254. **État hygrométrique.** — On appelle *état hygrométrique* ou *fraction de saturation* le rapport de la force élastique de la vapeur d'eau contenue dans l'air, à la force élastique maximum de cette vapeur à la même température. On appelle *hygromètre* tout instrument destiné à la mesure de l'état hygrométrique. Il y a quatre espèces d'hygromètres : l'hygromètre chimique, les hygromètres d'absorption, ceux de condensation, et le psychromètre.

255. **Hygromètre chimique.** — L'hygromètre chimique a été inventé par Bunsen; il consiste en un aspirateur A (fig. 113) d'une contenance de 50 litres et à écoulement constant, qui communique par *d* avec une série de petits tubes en U contenant de la pierre ponce imbibée d'acide sulfurique. Au dernier d'entre eux est fixé un tube de verre, qui vient s'ouvrir au sein de l'air dont on cherche l'état hygrométrique. Un thermomètre est placé à l'ouverture de ce tube d'aspiration et donne la température de l'air ambiant. On fait passer lentement 50 litres d'air dans l'appareil, cet air abandonne son humidité dans les tubes 5 et 6; les tubes 1 et 2 empêchent l'humidité de l'aspirateur de rétrograder dans l'appareil; les tubes 3 et 4, ne changeant pas de poids, témoignent du bon fonctionne-

ment de l'appareil. L'augmentation de poids des tubes 5 et 6 donne le poids de l'eau contenue à l'état de vapeur dans 50 litres de l'air considéré ; on en déduit, par un calcul simple, la force élastique f que cette vapeur exerçait dans l'air, et l'on cherche dans les tables la force élastique maximum F de la vapeur, à la température où se trouvait l'air sur lequel on opérait. Le quotient $\frac{f}{F}$ est l'é-

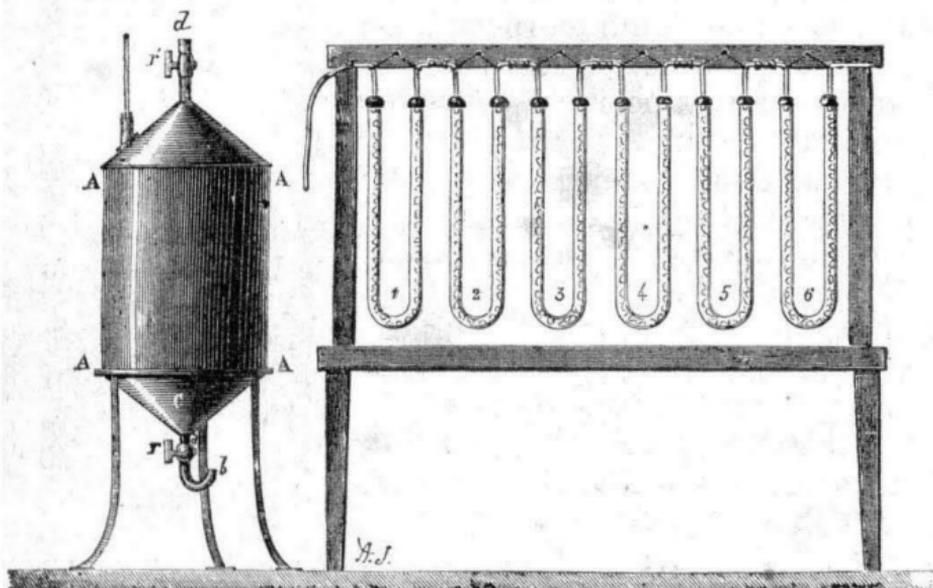


Fig. 113. Hygromètre chimique.

tat hygrométrique cherché. L'hygromètre chimique ne peut donner que l'état hygrométrique moyen pendant la durée de l'expérience ; il exige des pesées délicates, un jaugeage de l'aspirateur, des calculs fastidieux ; aussi n'est-il employé que pour contrôler les indications des autres hygromètres.

256. **Hygromètre à cheveu.** — Dans les hygromètres d'absorption, une substance absorbe l'humidité de l'air, et change de longueur par ce fait même. Le plus parfait de

ces instruments est l'hygromètre à cheveu de Saussure¹. Pour pouvoir servir de substance hygroscopique, les cheveux doivent être dégraissés; Saussure arrivait à ce résultat en les faisant bouillir par paquets pendant une demi-heure dans un liquide formé d'une dissolution de 10 gr. de carbonate de soude pour 1 litre d'eau. Aujourd'hui, on préfère dégraisser par un lavage dans l'éther ordinaire. L'appareil a la forme suivante: sur un cadre métallique (fig. 114) se trouve une vis qui tourne sans avancer dans le collet *c*; sur cette vis se meut un écrou mobile; à cet écrou est fixée par une pince *a* l'extrémité du cheveu. En faisant mouvoir la vis, on fait monter ou descendre l'écrou. L'autre extrémité du cheveu passe sur une poulie à deux gorges. Sur la seconde gorge s'enroule un fil de soie supportant un poids *f*; quand le cheveu se raccourcit, la poulie tourne dans un sens; si, au contraire, le cheveu s'allonge, le poids *f* fait tourner la poulie dans le sens opposé. Sur la poulie est fixée une aiguille *d* terminée par un contre-poids tel que le centre de gravité de l'aiguille soit au centre de rotation. Cette aiguille se meut sur un cadran divisé *sh*.

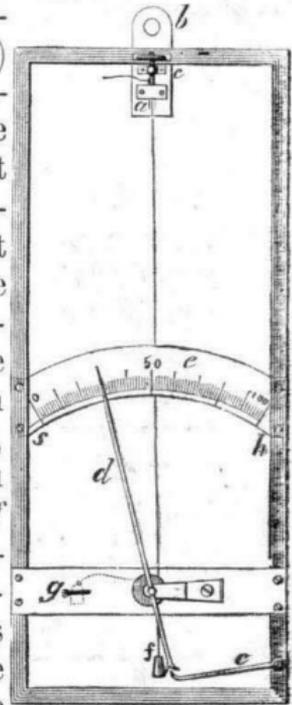


Fig. 114. Hygromètre à cheveu.

257. M. Regnault a reconnu que le poids *f* ne peut excéder 2 décigrammes sans que le cheveu trop fortement tiré ne se détériore rapidement. Le diamètre de la poulie doit avoir environ 5 millimètres. On donne au cheveu une longueur d'à peu près 25 centimètres. Aujourd'hui l'on cherche à employer des poids plus considérables, qui sont

1. Saussure (Horace-Bénédict de), naturaliste célèbre, né à Genève le 17 février 1740, mort le 22 janvier 1799. Il posa les bases de la géologie, et fit d'importantes observations de météorologie.

souvent nécessaires pour forcer la poulie à tourner. On fait alors usage de deux cheveux qui s'attachent par la partie supérieure à une petite tige de cuivre soutenue par un fil de soie attaché à l'écrou. Les deux autres extrémités s'enroulent ensemble sur la poulie.

258. Pour graduer l'hygromètre, l'on commence par déterminer le point d'humidité extrême. On suspend l'hygromètre dans un vase de verre clos de toute part. Les parois ont été mouillées, et on laisse même dans le vase des éponges humides. Le cheveu s'allonge jusqu'à une certaine limite qu'il ne dépasse pas. On atteint plus facilement cette limite en faisant le vide à l'intérieur du vase. On s'arrange de façon que l'aiguille soit à l'extrémité *h* du cadran divisé. En ce point, Saussure marquait 100°. Il cherchait ensuite le point de sécheresse extrême; pour cela, il mettait encore l'appareil sous son vase, mais celui-ci était sec et contenait de la crème de tartre fondue, destinée à absorber toute humidité. Au point où s'arrêtait l'aiguille, on marquait 0°. L'arc compris entre 0° et 100° était ensuite divisé en 100 parties égales. Saussure pensait que tous les hygromètres construits de cette façon devaient être comparables entre eux; mais s'ils s'accordent à 0° et à 100°, cet accord n'a plus lieu entre les deux points extrêmes. Les différents cheveux ne se comportent de même qu'autant qu'ils ont été pris sur la même personne et dégraissés dans la même opération. Gay-Lussac, qui croyait à l'accord entre les hygromètres, avait construit une table de correspondance entre les degrés de l'hygromètre et l'état hygrométrique. Cette table ne peut servir que pour l'hygromètre pour lequel elle a été faite. Il faut en établir une spéciale pour chaque instrument, on doit même en faire plusieurs pour des températures diverses; enfin le cheveu pouvant s'altérer, il faut s'assurer de temps à autre que les tables conviennent à la graduation de l'instrument.

259. Hygromètres de condensation. — Dans les hygromè-

tres de condensation, on refroidit un objet brillant, au contact de l'air. Quand cet objet est arrivé à une certaine température, il se recouvre d'une couche de rosée. Cette humidité commence à se déposer quand la force élastique de la vapeur d'eau est égale à la tension maximum correspondant à la température de l'objet froid. Ainsi, la température de l'air étant 20° , si le dépôt de rosée commence quand le corps est refroidi jusqu'à 12° , c'est que la force élastique de la vapeur dans l'air est de $10^{\text{mm}},46$, la tension maximum de la vapeur d'eau ayant cette valeur à la température de 12° ; d'ailleurs, la tension maximum de la vapeur d'eau à 20° étant $17^{\text{mm}},29$, l'état hygrométrique serait $\frac{10,46}{17,29}$. Le plus simple des hygromètres de condensation est celui de Daniell¹; il consiste en

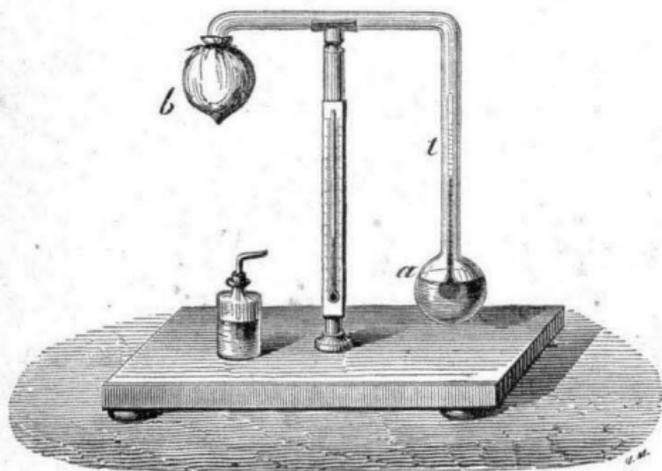


Fig. 115. Hygromètre de Daniell.

deux boules réunies par un tube; la boule *a* (fig. 115) est en verre bleuâtre; la boule *b* est recouverte de mouseline; à l'intérieur de *a* est un thermomètre *t* et une certaine quantité d'éther. Un pied sur lequel repose l'appareil porte un second thermomètre donnant la température extérieure. On verse de l'éther sur la boule *b*,

¹ Daniell, savant anglais, auteur d'une pile fort employée.

il en résulte un refroidissement ; car, comme nous le verrons plus loin, chaque fois qu'un liquide s'évapore, il absorbe une quantité considérable de chaleur. En vertu du principe de la paroi froide (241), il se produit une distillation dans l'appareil ; l'éther se rend de *a* en *b*, mais, en s'évaporant dans *a*, il refroidit cette boule sur laquelle on voit apparaître la rosée. On lit alors la température des deux thermomètres, et une table des forces élastiques de la vapeur d'eau permet de déterminer l'état hygrométrique.

Cet appareil présente certains défauts, dont le plus grand est que l'éther versé sur la boule *b* altère l'état hygrométrique de l'air, cet éther n'étant jamais exempt d'eau. Le meilleur hygromètre de condensation est celui de M. Regnault, que nous ne décrirons pas ici, parce qu'il est d'une manipulation délicate.

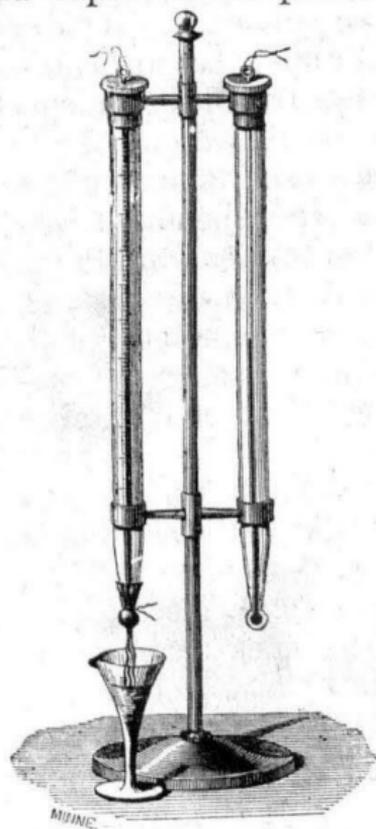


Fig. 116. Psychromètre.

260. Psychromètre. — Le psychromètre est fondé, lui aussi, sur le froid produit par l'évaporation. Quand un liquide s'évapore, non-seulement il absorbe de la chaleur, mais encore la quantité de chaleur absorbée dépend de la rapidité de l'évaporation. Le psychromètre paraît devoir remplacer les hygromètres, par suite des avantages qu'il offre, par sa construction et son mode d'observation.

L'idée première en est due à Leslie, mais c'est August qui l'employa sous la forme qu'on lui donne encore aujourd'hui. Deux thermomètres (fig. 116), aussi identiques que possible, se trouvent dans la même couche d'air ; le réservoir de l'un d'eux est maintenu humide par une mèche

de coton immergée partiellement dans l'eau; la différence de température indiquée par ces deux instruments dépend de la rapidité de l'évaporation de l'eau à la surface du thermomètre mouillé, et cette évaporation est d'autant plus rapide que l'air est plus sec. De l'observation de cet abaissement de température l'on peut conclure l'état hygrométrique; des tables ont été construites à cet effet.

261. **Brouillards.** — La vapeur d'eau qui se trouve dans l'atmosphère peut être amenée à se condenser; il suffit pour cela d'un refroidissement de l'air opéré par une cause quelconque; la vapeur d'eau condensée trouble la transparence de l'atmosphère et forme un brouillard quand elle reste à peu de distance de la surface du sol, tandis qu'elle constitue un nuage lorsqu'elle demeure suspendue à une certaine hauteur. La différence d'aspect des brouillards et des nuages ne dépend que de la distance qui nous en sépare; les formes des nuages perdent leur netteté quand on s'élève dans les airs; et quand l'on se trouve au milieu d'eux, c'est exactement comme si l'on était entouré d'un brouillard.

Les petits globules d'eau qui, disséminés au sein de l'air, constituent les brouillards, sont-ils pleins ou vides à l'intérieur? C'est une question sur laquelle les météorologistes sont loin d'être d'accord. La majorité pense cependant que ces globules ressemblent aux bulles de savon, qu'ils sont pleins d'air à l'intérieur, et que c'est pour cette raison qu'ils ne tombent qu'avec une grande lenteur. On dit que l'eau est sous la forme de *vésicules*, et l'état de l'eau dans les brouillards a reçu le nom d'*état vésiculaire*. Quoi qu'il en soit, les brouillards se forment quand le sol est plus chaud que l'air; ainsi, pendant l'automne, au moment du lever du soleil, l'eau des rivières est plus chaude que l'atmosphère, et les vapeurs résultant de l'évaporation se condensent au sein des couches d'air. En Angleterre, l'air est plus froid que l'eau du Gulf-Stream, qui vient baigner les côtes; aussi celles-ci

sont-elles généralement couvertes de brouillard. C'est un brouillard sur une petite échelle que l'on voit se former au-dessus de l'eau qui bout, dans l'air que rejette la respiration; c'est encore lui qui constitue ces panaches blancs qui se forment au-dessus des orifices de sortie de la vapeur dans les locomotives.

262. **Nuages.** — La condensation de la vapeur d'eau ayant lieu dans les régions supérieures de l'air, il en résulte la formation des nuages, qui sont constitués comme les brouillards d'eau *vésiculaire*. Plusieurs causes peuvent produire cette condensation; l'une d'elles, signalée par Hutton, est la suivante: deux masses d'air, l'une chaude, l'autre froide, toutes deux saturées ou presque saturées de vapeur d'eau viennent-elles à se rencontrer, elles prennent en se mélangeant une température commune, et il arrive que la force élastique maximum de la vapeur d'eau, correspondant à cette température moyenne, est inférieure à la force élastique moyenne de la vapeur d'eau contenue dans les deux masses; il y a alors condensation. Prenons un exemple simple: deux masses égales d'air, toutes deux saturées, l'une à 5°, l'autre à 25°, viennent à se mélanger; la température de ce mélange est de 15°, température à laquelle la force élastique maximum de la vapeur d'eau est 12^{mm},70; mais, à 5°, la tension maximum de la vapeur d'eau est 6^{mm},53 et à 25° elle est 23^{mm},55. Après le mélange, la force élastique de la vapeur tend à être la moyenne entre 23^{mm},55 et 6^{mm},53, c'est-à-dire de 15^{mm},04. Une semblable tension étant incompatible avec la température de 15°, il y a condensation jusqu'à ce que la vapeur n'ait plus qu'une tension de 12^{mm},70. C'est ainsi que l'arrivée dans notre atmosphère d'un vent froid du nord détermine la formation d'épais nuages. Quand des vents du sud-ouest, chauds et humides, arrivent dans les régions supérieures d'un air froid, il se forme à une grande hauteur des nuages, qui s'abaissent peu à peu avec le vent qui tend à les produire. La seule

réflexion sur les collines des vents chauds et humides suffit, comme l'a remarqué M. Babinet, pour amener ces masses dans des régions froides où les vapeurs se condensent.

263. **Causes de la suspension des nuages.** — Comme tous les corps pesants, les nuages tendent à tomber à la surface du sol; mais, à cause de l'extrême petitesse des vésicules, et peut-être de leur constitution, leur chute dans un air calme ne dépasse pas 1 mètre ou 1^m,50 par seconde, d'après les observations directes. Or, pendant le jour, le sol s'échauffe; il en résulte des courants ascendants qui ont d'ordinaire une vitesse de plus de 1^m,50 par seconde, surtout si le soleil n'est pas caché; les nuages reçoivent de ces courants d'air une pression supérieure à leur poids, d'où ce fait que pendant le jour les nuages s'élèvent. Le soir, au contraire, ils s'abaissent; mais là encore une cause s'oppose à leur chute: c'est que, à mesure qu'ils descendent, ils arrivent dans des couches de plus en plus chaudes, où les vésicules se vaporisent; ces vapeurs s'élèvent au-dessus du nuage, se condensent de nouveau, parce qu'elles retournent dans des régions froides; de sorte que le nuage, se détruisant sans cesse par le bas, et se reformant par le haut, reste suspendu. De là aussi la variation continuelle dans la forme d'un nuage.

264. **Formes des nuages.** — Il y a diverses espèces de nuages, distingués par Howard ¹ de la manière suivante :

Les *cirrus* (fig. 117) sont des filaments déliés, appelés *queues de chat* par les marins; ils résident à de grandes hauteurs dans l'atmosphère; des mesures directes ne fixent pas l'élévation des cirrus à moins de 6,000 mètres. C'est au sein de ces nuages que se forment les halos et les parhélies; dans nos pays, ils sont produits par le retour des vents du sud-ouest, dans les hautes régions de l'atmosphère, et amènent la pluie au bout de quelques jours.

1. Howard, savant voyageur anglais.

Les *cumulus* (fig. 118), ou *balles de coton* des marins, ont une forme arrondie ; ils sont blancs et s'accablent souvent les uns sur les autres ; d'ordinaire, ils se produisent

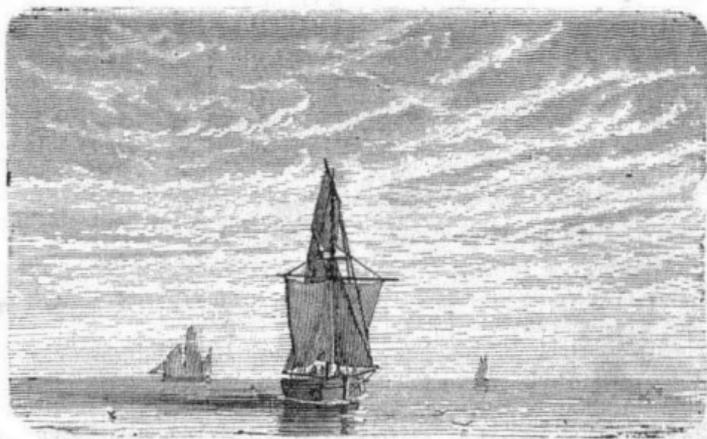


Fig. 117. Cirrus.

pendant l'été : l'air chaud et humide qui s'élève du sol produit les cumulus en se refroidissant à une certaine hauteur, d'ailleurs très-variable. Les cumulus montent

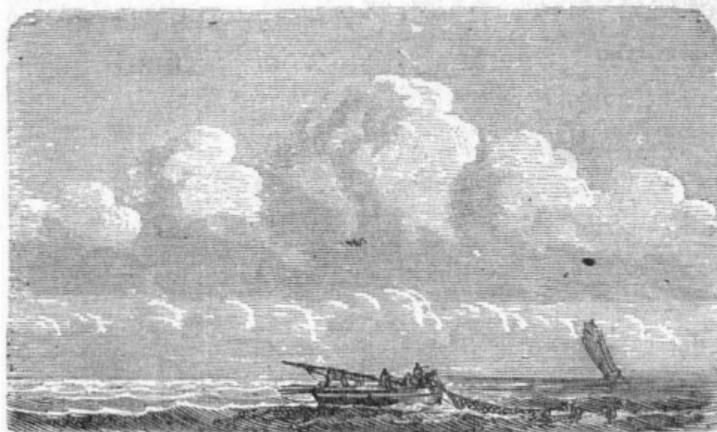


Fig. 118. Cumulus.

dans la journée, redescendent le soir. Dans nos pays, ils annoncent la probabilité du vent du sud et un temps incertain.

Les *stratus* (fig. 119) sont des bandes horizontales qui d'ordinaire se forment le soir quand le soleil se couche, et disparaissent le matin.

L'on trouve souvent les intermédiaires entre ces trois

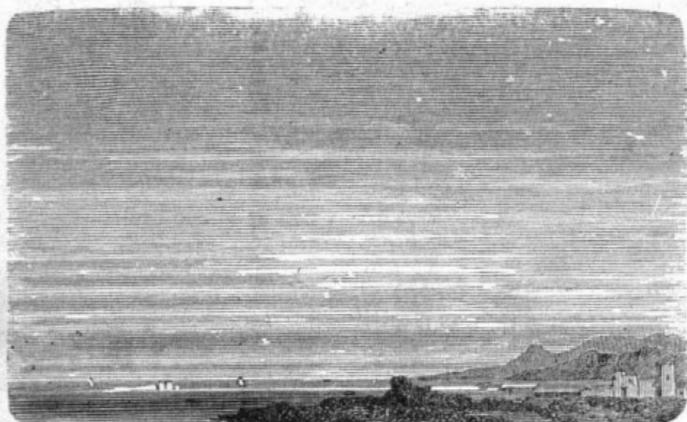


Fig. 119. Stratus

formes, par exemple : les *cirro-stratus*, qui se produisent à mesure que les vents de sud-ouest s'abaissent des régions élevées dans les régions moyennes de l'atmosphère; les *cirro-cumulus*, qui donnent au ciel un aspect pommelé



Fig. 120. Nimbus.

et qui annoncent souvent un abaissement de la température; les *cumulo-stratus*, précurseurs des pluies ou des orages.

Les *nimbus* (fig. 120) sont des nuages descendus assez

bas pour paraître noirs, et qui se résolvent en pluie; ils dérivent des précédents.

265. **Pluie.** — Quand la condensation devient trop active, les vésicules atteignent des proportions telles qu'elles ne peuvent plus rester suspendues; les nuages se résolvent en pluie, et les vésicules se soudant, dans leur chute, les unes aux autres, forment des gouttes de pluie. Dans un même lieu, il ne tombe pas la même quantité de pluie par tous les vents. Pour chercher, dans chaque lieu, la relation entre la pluie et le vent, on construit une rose des vents, et, sur chaque branche de cette rose, l'on porte, à partir du centre, des longueurs proportionnelles aux quotients que l'on obtient pour chaque vent en divisant les nombres de jours de pluie par le nombre total de jours pendant lesquels a soufflé le vent considéré; on joint, par un trait continu, les extrémités de ces lignes et l'on a une courbe représentative du phénomène. Pour représenter graphiquement les quantités de pluie correspondant aux divers mois, on partage une ligne droite en douze parties égales; par chacun des points de division, l'on élève des perpendiculaires auxquelles on donne des longueurs proportionnelles aux nombres de jours de pluie pour chaque mois de l'année; on joint tous les sommets de ces perpendiculaires par un trait continu.



Fig. 121.
Pluviomètre.

266. **Pluviomètre.** — On appelle *pluviomètres*, ou encore *udomètres*, des instruments destinés à évaluer la quantité d'eau tombée. Ils se composent d'un entonnoir B (fig. 121) qui reçoit l'eau et la conduit dans un réservoir A; chaque jour, l'on recueille, à l'aide du robinet *r*, la quantité d'eau tombée; on en mesure le volume et l'on calcule la hauteur qu'aurait ce volume s'il affectait la forme d'un

cylindre ayant même base que l'entonnoir ; on a ainsi la hauteur qu'occuperait à la surface du sol la masse d'eau tombée, s'il ne s'était produit d'écoulement d'aucune sorte.

267. **Neige.** — La neige n'est autre chose que de la pluie congelée ; les flocons de neige sont formés de petits cristaux enchevêtrés, qui se rapportent tous au type hexagonal, et peuvent affecter des formes très-diverses, dont les principales sont représentées dans la figure 122. Scoresby et Glaisher ont publié les dessins de plus de 200 cristaux de glace. Pour observer les cristaux de

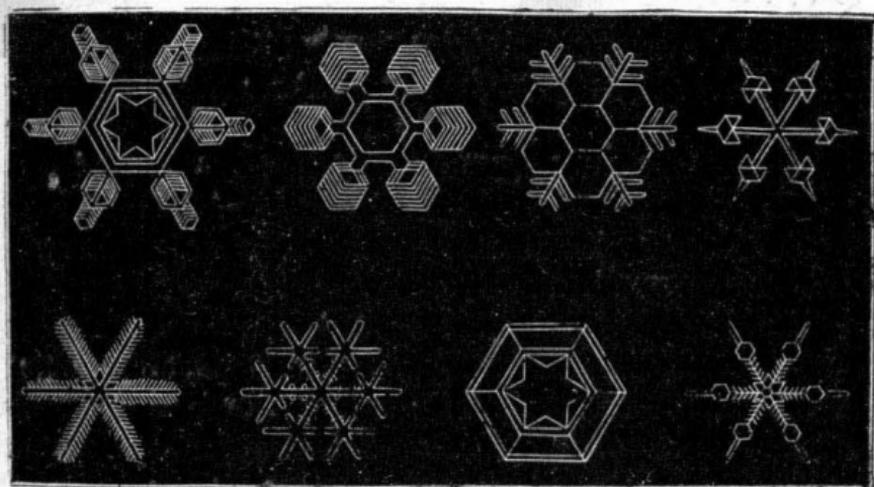


Fig. 122. Formes de la neige.

neige, on reçoit un flocon sur une lame de verre très-froide et enduite de noir de fumée, puis on examine immédiatement à la loupe.

268. **Verglas.** — Quand, à la suite d'un temps très-froid, les vents du sud arrivent dans les régions supérieures de l'atmosphère, il en résulte de la pluie souvent mélangée de neige à demi fondue ; le sol étant très-froid, la pluie se congèle et le sol se recouvre d'une sorte de glace unie jusqu'à ce que, le vent du sud ayant pris une intensité de plus en plus grande, une pluie abondante soit venue ré-

chauffer le sol. La couche de glace formée à la surface du sol est ce que l'on appelle le *verglas*.

269. **Rosée.** — La rosée est un dépôt de gouttelettes liquides se formant à la surface des corps du soir au matin. Pendant longtemps la cause de la rosée est restée inconnue, d'autant plus qu'elle se produisait surtout par un ciel sans nuages; pour les uns, elle s'élevait du sol; pour les autres, elle tombait du ciel. C'est le docteur Wells qui a donné le premier une théorie exacte de ce phénomène. Pendant la nuit, le sol rayonne de la chaleur dans l'espace et n'en reçoit point du soleil. Il y a donc refroidissement de la surface du sol; et, comme celui-ci n'est pas bon conducteur, sa surface ne peut recevoir de chaleur des couches plus profondes. Au contact du sol, l'air se refroidit et la vapeur qui s'y trouve mêlée se condense en partie, si toutefois elle s'y trouve en assez grande quantité pour que sa force élastique dépasse la tension maximum correspondant à la nouvelle température de l'air. Pour appuyer sa théorie sur des expériences précises, Wells se servait de petits flocons de laine blanche auxquels il donnait la forme d'un œuf et qu'il appelait *drosomètres*. Pour prouver que la rosée ne tombait pas du ciel et que le voisinage des corps rayonnants s'opposait à son dépôt, Wells plaçait verticalement sur l'herbe un cylindre de terre cuite ouvert à ses deux bouts; il disposait au centre de sa base inférieure un drosomètre; celui-ci ne se chargeait pendant la nuit que de très-peu d'humidité, tandis que pour un autre drosomètre placé tout à fait à découvert et à peu de distance, l'augmentation de poids était plus considérable. Si un drosomètre est abrité par un écran horizontal, il n'augmente pas sensiblement de poids, tandis qu'un autre drosomètre placé sur l'écran se charge de rosée, ce qui prouve que celle-ci ne s'élève pas du sol. Wells avait encore besoin de prouver que le refroidissement précédait et déterminait le dépôt de rosée; il lui suffit pour cela de substituer des thermomètres à ses

drosomètres; dans toutes les circonstances où les drosomètres se chargent de beaucoup de rosée, l'on voit la température des thermomètres s'abaisser considérablement. Enfin, c'est bien le rayonnement qui est la cause du phénomène; car si l'on expose à l'air différents corps pendant la nuit, l'on voit que le dépôt de rosée, très-abondant sur les corps dont le pouvoir émissif est très-grand, est presque nul sur les métaux qui ont tous un pouvoir émissif très-faible; deux plaques de bois identiques, l'une dorée, l'autre enduite de noir de fumée, sont excellentes pour montrer ce fait. Ceci explique encore pourquoi, en exposant dans la même couche d'air pendant la nuit deux thermomètres, l'un à boule dorée, l'autre à boule recouverte de noir de fumée, le dernier indique une température bien inférieure au premier. C'est pour cette raison que, dans les observations météorologiques, on ne devrait employer que des thermomètres à réservoir doré, qui, ne rayonnant que fort peu de chaleur et réfléchissant d'ailleurs presque toute celle qui leur parvient par rayonnement, indiquent exactement la température de la couche d'air avec laquelle ils sont en contact.



Fig. 123.

Appareil pour l'étude du rayonnement nocturne.

270. Après ces expériences de Wells, l'existence de la perte de chaleur par rayonnement nocturne n'était donc

plus douteuse, et la cause de la rosée était nettement indiquée; cependant il n'est pas inutile de citer, d'après M. Pouillet ¹, deux appareils de son invention. L'un d'eux consiste en une feuille *ab* (fig. 123) de plaqué d'argent formant un cône très-évasé, dont la base supérieure est plus élevée que la boule *e* d'un thermomètre; elle empêche que l'air refroidi ne tombe et ne se renouvelle, et en même temps elle arrête le rayonnement terrestre; *ef* est un fil de laiton fin et roide, courbé en un cercle dont *c* est le centre et sur lequel glisse le petit écran *g*; aussitôt que

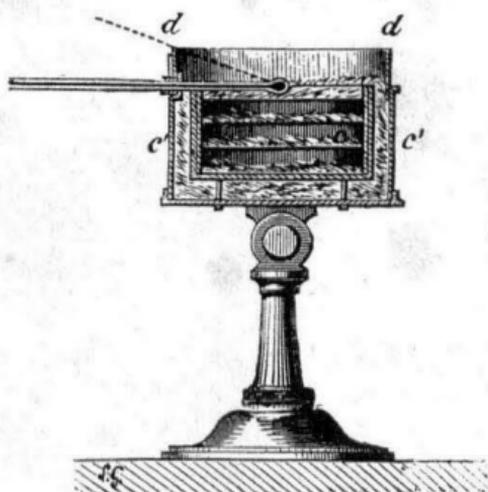


Fig. 124.

Actinomètre de M. Pouillet.

métal (fig. 124) à deux enveloppes qui sont séparées par du duvet de cygne; le cylindre intérieur contient quatre disques recouverts du même duvet; c'est au milieu de cet appareil que se trouve la boule d'un thermomètre soumis au rayonnement. Il importe que la surface supérieure soit bien horizontale, pour que l'air refroidi ne puisse pas glisser et se renouveler.

271. L'explication de Wells n'était cependant pas complète. Il résulte, en effet, d'observations diverses, que

1. Pouillet (Claude-Servais-Mathias), né à Cuzance (Doubs), membre de l'Académie des sciences. Il fut professeur de physique à la Sorbonne, et directeur du Conservatoire des Arts et Métiers.

l'on met cet écran près du zénith, le thermomètre remonte, et il s'abaisse d'autant plus que l'écran est plus rapproché des bords du cône. Non-seulement l'existence du rayonnement est ainsi prouvée, mais l'on voit en même temps qu'il a lieu surtout vers le zénith.

L'autre appareil est un actinomètre, c'est-à-dire qu'il est destiné à mesurer les effets du rayonnement nocturne. C'est un cylindre de

lorsqu'un corps rayonnant est exposé à un ciel clair, il tend à garder une certaine distance thermométrique entre sa température et celle de l'air environnant; cette distance, fixe pour un même corps, dépend de son pouvoir émissif et non de la température de l'air; c'est ainsi que, d'après les observations de M. Pouillet, la distance thermométrique du duvet de cygne et de l'air est de 7°; celle de l'herbe et de l'air est de 2°. Cette distance thermométrique fixe qu'un corps tend à garder vis-à-vis de l'air qui est en contact avec lui peut faire descendre considérablement sa température. M. Melloni ¹ a appelé l'attention sur les conséquences qui en résultent, relativement au dépôt de rosée. Le sol se refroidit par rayonnement; l'air en contact se refroidit à son tour; mais alors le sol se refroidit encore plus pour garder sa distance thermométrique avec l'air, d'où résulte un abaissement de température sans cesse croissant.

272. Certaines circonstances favorisent le dépôt de rosée; d'abord la nature des corps qui ont un pouvoir émissif différent et qui tendent à garder avec l'air une distance thermométrique différente; il y a aussi l'exposition des corps; s'ils sont abrités, ils reçoivent de la chaleur par suite du rayonnement des abris, et il y a compensation. Les nuages qui peuvent se trouver au ciel restituent de la chaleur par rayonnement ou par réflexion, ils empêchent le refroidissement nocturne. Si l'air est vivement agité, la rosée sera très-faible, parce que l'air n'aura pas le temps de se refroidir; si l'agitation n'est que légère, elle favorise le dépôt de rosée, l'air se renouvelant, et chaque couche, après avoir déposé son humidité, faisant place à une couche nouvelle, qui à son tour dépose la sienne. Il faut aussi considérer la saison; le maximum de rosée a lieu en automne et au printemps, parce que c'est alors qu'il existe la plus grande différence de température entre le jour et la nuit.

1. Melloni, savant physicien italien, né à Parme en 1801, mort à Naples en 1851, auteur de la théorie de la *thermoc'rose*.

273. **Gelée blanche.** — Lorsque la température s'abaisse suffisamment, la rosée se congèle et constitue alors la *gelée blanche* ou le *givre*; c'est surtout en mai et vers la fin d'avril que les gelées blanches sont fréquentes; il en résulte qu'à cette époque les jeunes pousses des plantes sont souvent gelées, ou, comme l'on dit, *roussies*; la gelée blanche ne se produisant qu'autant que le ciel est très-clair et que par suite la lune se montre, c'est à cet astre que le vulgaire attribue celles qui se produisent pendant la lunaison de mai ou de fin d'avril, c'est-à-dire pendant ce que l'on appelle la *lune rousse*.

Exercices. — 1° Pourquoi les jardiniers préservent-ils leurs plantes de la gelée blanche en les plaçant simplement auprès de haies d'arbustes ?

2° Pourquoi, en allumant dans les vignes des feux de paille humide donnant beaucoup de fumée, préserve-t-on les bourgeons de la gelée ?

3° Pourquoi obtient-on de la glace au Bengale en plaçant de l'eau dans des vases peu profonds placés sur de la paille sèche ? Plus l'air est sec, plus l'on a de glace.

CHAPITRE VII

CALORIMÉTRIE

274. **Sous le même poids, les corps exigent des quantités différentes de chaleur pour élever leur température d'un même nombre de degrés.** — Si une même source de chaleur agit, pendant des temps égaux, sur des corps de même poids, mais de nature diverse, les altérations produites dans l'état et la température de ces corps sont en général très-différentes. Supposons, par exemple, qu'au-dessus de becs de gaz identiques entre eux l'on place des sphères de métaux dissemblables, mais de même poids, et que, de plus, ces sphères soient chauffées pendant le même temps; si chacune d'elles contient en son centre la boule d'un thermomètre, on trouve qu'elles ont toutes des températures différentes, et cependant elles ont reçu la même quantité de chaleur. La sphère de plomb, par exemple, accusera une température bien supérieure à celle de la sphère de fer. Si donc le thermomètre nous donne une indication sur la température d'un corps, il ne nous renseigne en aucune façon sur la quantité de chaleur qu'il a fallu fournir à ce corps pour lui faire acquérir cette température.

275. **Calorie.** — Il est donc indispensable de définir la quantité de chaleur, ce que l'on ne peut faire qu'en choisissant une unité. On a adopté, d'après Fourier¹, pour

1. Fourier (Jean-Baptiste-Joseph), né à Auxerre le 21 mars 1768, mort le 16 mai 1830, mathématicien, physicien et administrateur distingué; secré-

cette unité la quantité nécessaire pour élever l'unité de poids d'eau, de la température de 0° à celle de 1° . On donne à cette unité le nom de *calorie* ; d'où celui de *calorimétrie*, qui s'applique à la partie de la physique qui s'occupe de la mesure des quantités de chaleur. La calorimétrie comprend d'ailleurs deux sujets : 1° l'évaluation des quantités de chaleur qui produisent des modifications dans la température des corps ; 2° la détermination des quantités de chaleur nécessaires pour faire passer les corps de l'état solide à l'état liquide, ou de l'état liquide à l'état gazeux. La calorimétrie est fondée sur ce principe : *Tout corps qui a absorbé de la chaleur en passant d'une température à une autre, ou d'un état à un autre, en restitue identiquement la même quantité, en revenant à son état primitif.* Ce principe n'est vrai, comme on le verra dans le cours de troisième année, qu'autant que le corps considéré n'a produit, en absorbant de la chaleur, aucun effet mécanique.

276. Une expérience de M. Tyndall¹, dans laquelle les corps restituent de la chaleur au lieu d'en acquérir, montre bien qu'il ne faut pas confondre les différences de température avec les différences de quantité de chaleur. On porte à une même température dans un bain d'huile des balles de même poids et de différents métaux : fer, cuivre, étain, plomb, bismuth. On pose ces balles sur un gâteau de cire d'une épaisseur uniforme, suspendu horizontalement. Chaque balle fait fondre la cire ; mais, tandis que la balle de fer fond et traverse rapidement le plateau, la balle de cuivre n'en fait autant que plus lentement, celle d'étain traverse incomplètement, et les deux autres s'enfoncent à peine dans la surface. Pour s'abaisser de la température de l'huile à celle de l'air ambiant, il a

taire de l'Institut d'Égypte, préfet de l'Isère pendant treize ans, secrétaire perpétuel de l'Académie des sciences, membre de l'Académie française.

1. Tyndall (John), membre de la Société royale de Londres, professeur de physique à Royal Institution. Il s'est fait remarquer autant par son enseignement brillant que par la grande valeur de ses recherches.

donc fallu que le fer et le cuivre perdissent plus de chaleur que l'étain et surtout que le plomb et le bismuth. Réciproquement, d'après le principe précédent, il faut fournir bien plus de chaleur au fer qu'au plomb pour élever leur température d'un même nombre de degrés.

277. **Chaleur spécifique.** — On énonce cette différence entre les corps en disant qu'ils ont des chaleurs spécifiques distinctes, et l'on appelle *chaleur spécifique* d'un corps la quantité de chaleur qu'il faut lui fournir pour élever d'un degré la température de l'unité de poids de ce corps. La calorie n'est autre chose que la chaleur spécifique de l'eau.

278. **Mélanges de corps inégalement chauds.** — L'existence d'une chaleur spécifique distincte pour chaque corps permet d'expliquer ce qui se passe quand l'on fait des mélanges de corps différents à des températures diverses. Ainsi 1 kilogramme d'eau à 0° et 1 kilogramme d'eau à 100° , mélangés, donnent 2 kilogrammes d'eau à 50° , tandis que 1 kilogramme d'eau à 0° et 1 kilogramme de mercure à 100° donnent un mélange dont la température est de 3° seulement. Ces deux expériences prouvent: la première, que 1 kilogramme d'eau s'abaissant de la température de 100° à celle de 50° perd autant de chaleur qu'il en acquiert en passant de 0° à 50° ; la seconde, que 1 kilogramme de mercure, en abaissant sa température de 100° à 3° , perd une quantité de chaleur qui ne peut élever que de 3° la température de 1 kilogramme d'eau. Ces résultats montrent que la capacité calorifique ou chaleur spécifique de l'eau est très-supérieure à celle du mercure; ils peuvent même servir, comme on le verra dans le cours de troisième année, à mesurer ces chaleurs spécifiques. Citons encore d'autres exemples. En portant 1 kilogramme de fer à 100° dans 1 kilogramme d'eau à 0° , la température du mélange est de 9 à 10° ; la chaleur spécifique du fer est donc notablement supérieure à celle du

mercure, tout en restant très-inférieure à celle de l'eau. On en tire cette conséquence qu'en mélangeant du fer et du mercure à des températures différentes, c'est la température du mercure qui variera le plus; en effet, 1 kilogramme de fer à 0°, et 1 kilogramme de mercure à 100° donnent un mélange à 23° environ.

279. Chaleur latente de fusion. — Dans les expériences précédentes, les corps absorbaient seulement assez de chaleur pour faire varier leur température; il peut arriver que cette absorption aille jusqu'à les faire changer d'état, et l'on reconnaît alors que chaque corps, en changeant d'état, absorbe une quantité considérable de chaleur qui semble disparaître et que pour cette raison l'on appelle chaleur latente. On désigne sous le nom de *chaleur latente de fusion* d'un corps la quantité de chaleur exprimée en calories, nécessaire pour faire passer l'unité de poids de ce corps, de l'état solide à l'état liquide, sans changement de température. Une expérience simple permet de mettre cette chaleur latente en évidence. Si l'on fait un mélange de 1 kilogramme d'eau à 0° et de 1 kilogramme d'eau à 79°, le mélange prend la température moyenne de 39°,5; mais si l'on mêle 1 kilogramme de glace à 0° et 1 kilogramme d'eau à 79°, on remarque qu'un thermomètre, primitivement plongé dans la glace, indique toujours la même température jusqu'à fusion complète de celle-ci. 1 kilogramme de glace, en se fondant, a donc exigé la quantité de chaleur nécessaire pour porter un poids égal d'eau de la température de 0° à celle de 79°; aussi dit-on que *la chaleur latente de fusion de la glace est égale à 79 calories.*

280. Constance de la température de fusion. — Le fait d'une absorption de chaleur pendant la fusion permet d'expliquer certains phénomènes. Elle justifie l'existence de cette loi déjà énoncée (226) : *Pendant tout le temps que mettent les corps à passer de l'état solide à l'état liquide,*

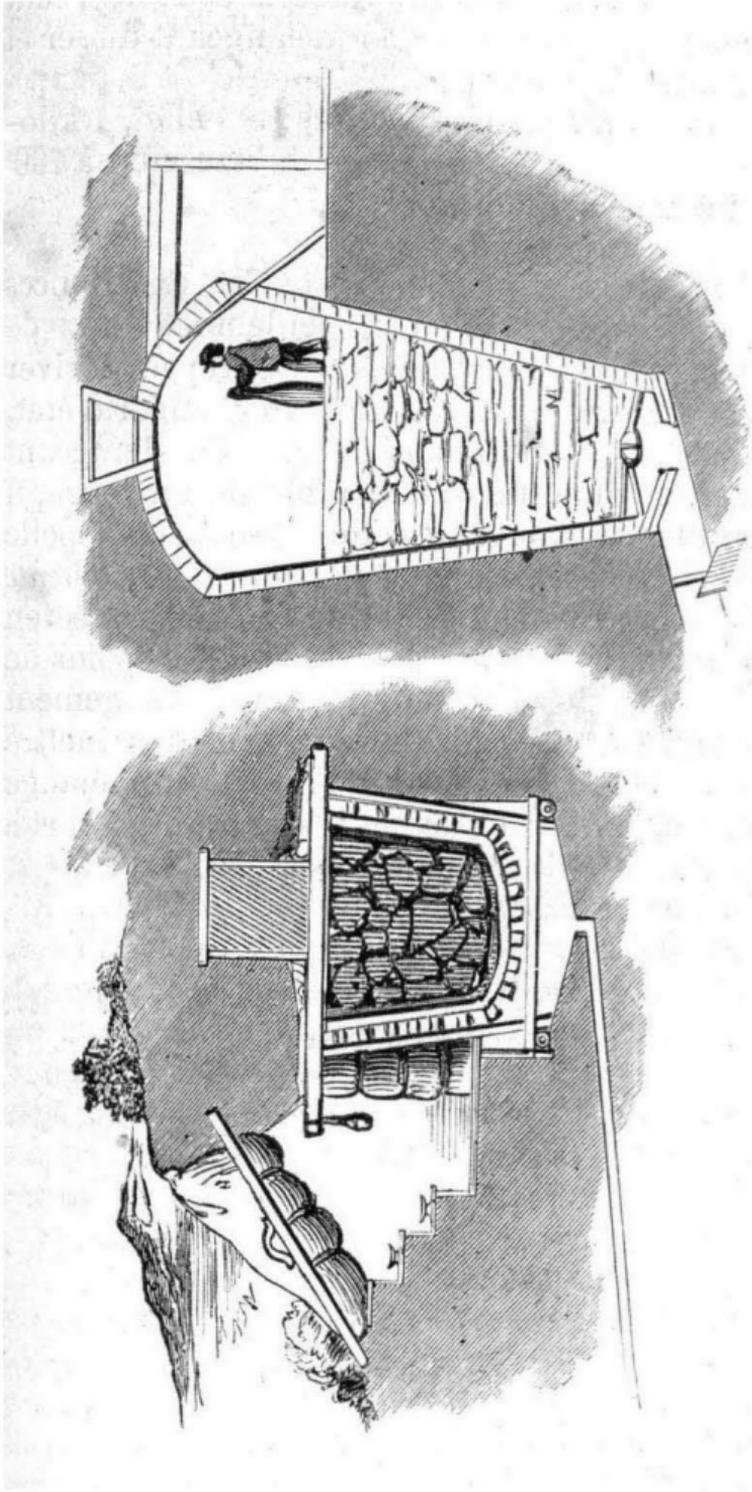


Fig. 125. Glacière artificielle.

leur température reste invariable. En effet, la chaleur fournie par le foyer, s'unissant à l'état de chaleur latente au corps solide pour le transformer en liquide, ne peut produire aucune variation de température.

281. **Glacières.** — Rappelons ici que dans les glacières (fig. 125), déjà décrites dans le cours de première année, on a soin d'éviter le contact de la glace avec tout corps susceptible de lui apporter de la chaleur; cette chaleur s'unirait à la glace pour la fondre, et en devenant latente produirait la fusion. Les glacières sont donc creusées dans le sol, revêtues de briques, qui conduisent fort mal la chaleur, et recouvertes d'une épaisse couverture de chaume qui repose sur une charpente en bois; de plus, la circulation de l'air est entravée autour de la glace. Toutes ces précautions n'ont d'autre but que d'empêcher l'afflux de chaleur.

282. **Mélanges réfrigérants.** — C'est l'absorption de chaleur passant à l'état latent qui permet d'obtenir des froids artificiels considérables. On mélange par exemple deux substances ayant l'une pour l'autre une affinité chimique qui les force à se combiner; si l'une au moins des deux substances est solide, et si le résultat de l'union des deux corps doit être liquide, il en résulte une absorption de chaleur latente. Ainsi, l'acide sulfurique est très-avide d'eau, et l'hydrate qui résulte de l'union de ces corps est toujours liquide; si l'on mélange 1 partie en poids d'acide sulfurique monohydraté et 4 parties de glace, on voit cette dernière fondre rapidement et la combinaison s'effectuer; mais la fusion de la glace entraîne une absorption de chaleur latente considérable et la température du mélange s'abaisse de 20 à 30 degrés au-dessous de celle que possédait primitivement chacun des corps mélangés. Il est vrai que la combinaison dégage de la chaleur et qu'il y a ainsi en jeu deux actions antagonistes; mais, dans l'expérience telle qu'elle a été décrite,

cette chaleur dégagée est insuffisante pour fondre toute la glace. Si l'on eût pris 4 parties d'acide pour 1 seulement de glace, on eût constaté une élévation de température considérable au lieu d'un abaissement. Il suffit de dissoudre un corps solide dans un liquide pour produire une absorption de chaleur. Souvent cette absorption est très-sensible; par exemple, quand l'on dissout dans l'eau certains sels ammoniacaux. Les mélanges réfrigérants les plus en usage sont les suivants :

SUBSTANCES MÉLANGÉES.	POIDS.	ABAISSEMENT DU THERMOMÈTRE.
Neige ou glace pilée.	2 parties.	de 10° à - 17°
Sel marin.	1 —	
Neige ou glace pilée.	3 —	de 0° à - 48°
Chlorure de calcium.	4 —	
Sulfate de soude.	8 —	de 10° à - 17°
Acide chlorhydrique.	5 —	
Sulfate de soude.	5 —	de 10° à - 8°
Acide sulfurique à 36°.	4 —	
Phosphate de soude.	9 —	de 10° à - 29°
Acide azotique.	4 —	
Azotate d'ammoniaque.	1 —	de 10° à - 15°
Eau.	1 —	
Sel ammoniac.	5 —	de 10° à - 15°
Salpêtre.	5 —	
Sulfate de soude.	8 —	de 0° à - 28°
Eau.	16 —	
Potasse.	4 —	
Neige.	3 —	

283. **Lenteur de la fusion de la neige et de la glace.** — La lenteur avec laquelle fondent la glace et la neige est une conséquence de ce que, pour opérer leur fusion, il faut fournir à ces substances une grande quantité de chaleur. Comme preuve de la lenteur de cette fusion, on peut citer le fait suivant. Pendant l'hiver de 1740, les rivières gelèrent en Russie à une profondeur telle, que l'on put extraire de la Néva des blocs de glace d'un mètre d'épaisseur; ces blocs furent taillés et superposés de manière à en construire un palais; pour maçonner les matériaux, il suffit de les arroser d'une couche d'eau qui, gelant à son tour, fit de l'ensemble une masse compacte; on se servit pour cela d'eaux diversement colorées, afin de donner aux colonnes l'aspect des marbres les plus divers et les mieux veinés. Dans ce palais, l'on donna des fêtes, et ni la chaleur que dégagèrent les nombreux invités, ni celle de la combustion des bougies ne fit sensiblement diminuer l'épaisseur des murs; le palais résista longtemps. Quand la glace ou la neige sont seulement exposées à l'air, la fusion est encore ralentie par ce fait que ces corps ne possèdent qu'un très-faible pouvoir absorbant; comme ils réfléchissent la plus grande partie de la chaleur qu'ils reçoivent, ils n'en font passer qu'une très-petite portion à l'état latent. Ceci explique comment, en jetant sur la neige de la poussière de charbon, on arrive à produire une fusion plus rapide, le charbon ayant un grand pouvoir absorbant. Quand un voyageur parcourt les glaciers qui se trouvent au sein des montagnes, il rencontre souvent des endroits où la glace a fondu jusqu'à une certaine profondeur formant ainsi un puits très-étroit. En examinant ces puits, l'on y trouve toujours un caillou, un fragment de bois ou de toute autre substance, dont le pouvoir absorbant est supérieur à celui de la glace; autour de ce corps, la glace fond pendant le jour; l'eau formée dans la cavité a joué le même rôle que le corps étranger, et dès qu'elle s'est trouvée en assez grande abondance, elle a cessé d'avoir en tous ses points la même température;

elle s'est échauffée à la surface; mais, augmentant ainsi de densité, elle est tombée alors au fond de la cavité, la creusant davantage, en venant fournir de la chaleur à la glace.

284. **Lenteur de la formation de la glace.** — Non-seulement la glace se fond lentement, mais elle se forme de même. Considérons une masse d'eau dont on abaisse la température; il semble que, arrivée à 0° , la masse devrait se congeler instantanément, mais il n'en est rien, car à peine certaines portions de l'eau se sont-elles solidifiées qu'elles restituent sous forme de chaleur sensible la chaleur latente qui les maintenait fluides; cette chaleur réchauffe les parties voisines, et ce n'est que quand elle est dissipée que la solidification continue. Ainsi s'explique cette loi (226) : *Tant que la solidification d'un corps n'est pas complète, la température du bain reste stationnaire, quelle que soit l'intensité de la cause refroidissante.* Il est curieux que la glace soit par le fait de sa formation une source de chaleur et employée comme telle. Si l'on veut pendant l'hiver préserver de la gelée certaines substances organiques, il suffit de les entourer de linges mouillés, la glace en se formant restitue de la chaleur, qui empêche la température de descendre au-dessous de 0° .

285. **Dégagement de chaleur au moment de la solidification mis en évidence par les phénomènes de surfusion et de sursaturation.** — On a vu (230) que l'on peut, dans certains cas, amener sans les congeler quelques liquides à une température inférieure au point de solidification; mais, dès que celle-ci se produit, la température remonte à celle du point de fusion. C'est encore une preuve et une conséquence du dégagement de chaleur latente. Il faut rapprocher de ce fait celui de la sursaturation : si l'on dissout du sulfate de soude jusqu'à refus, dans de l'eau chaude, et qu'on laisse refroidir lentement après avoir recouvert le vase d'une cloche, il arrive le plus souvent que la dissolution reste

chargée de tout le sel, bien qu'elle en contienne alors notablement plus qu'il ne devrait y en avoir de dissous à cette température. On dit qu'il y a *sursaturation* ; si l'on dépose alors sur le réservoir d'un thermomètre très-sensible un petit cristal de sulfate de soude et que l'on introduise le thermomètre et le cristal au sein de la dissolution sursaturée, le sulfate de soude dissous en excès retourne brusquement à l'état solide, et le thermomètre montre que la température s'élève par suite du passage de la chaleur latente à l'état de chaleur sensible. La même expérience peut se faire avec toutes les dissolutions susceptibles de se sursaturer, avec celle d'alun, par exemple.

286. **Chaleur latente de volatilisation.** — De même qu'il y a une chaleur latente de fusion, il y a une *chaleur latente de volatilisation*, ou de *vaporisation*. Pour passer, en effet, de l'état liquide à l'état de vapeur, chaque corps a besoin d'absorber une certaine quantité de chaleur qui devient latente. Cette quantité de chaleur est même fort considérable, puisque pour l'eau il faut 536 unités de chaleur pour faire passer l'unité du poids de ce corps de l'état liquide à 100° à l'état de gaz à la même température.

287. **Constance de la température pendant l'ébullition.** — L'existence de la chaleur latente de fusion ressort de la deuxième loi de la volatilisation établie dans le cours de première année : *La température d'un liquide reste constante pendant toute la durée de l'ébullition.* Comme le fit remarquer Black ¹, si le liquide cesse de s'échauffer, bien qu'on lui fournisse de la chaleur, c'est que celle-ci est employée à produire de la vapeur.

288. **Froid produit par l'évaporation.** — On trouve une autre preuve de l'existence de la chaleur latente de volatilisa-

1. Black (Joseph), chimiste et physicien, né en 1728, à Bordeaux, de parents écossais ; professeur de chimie à l'Université d'Édimbourg, il mourut dans cette ville en 1799.

tion, dans ce fait que l'évaporation produit du froid. C'est ce qui explique pourquoi, en sortant du bain, en été, on éprouve une sensation de froid, bien que la température ambiante soit supérieure à celle de l'eau. Tout le monde sait qu'en laissant évaporer sur la main quelques gouttes d'un liquide volatil, on éprouve une sensation de froid d'autant plus grande que le liquide est plus volatil. Si l'on entoure de mousseline la boule d'un thermomètre



Fig. 126. Congelation de l'eau par l'évaporation de l'éther.

et qu'on verse dessus de l'éther, on peut constater que l'évaporation de ce corps produit un abaissement de température ; avec le sulfure de carbone le même fait s'observe. On peut encore faire l'expérience autrement. On place dans un verre (fig. 126) de l'éther et un tube de verre fermé par le bas et contenant un peu d'eau. A l'aide d'un

soufflet on fait passer un courant d'air à travers l'éther; l'évaporation en est activée, la chaleur nécessaire pour faire passer l'éther à l'état de vapeur est prise à ce liquide et aux corps plongés dans son intérieur, si bien que l'eau se congèle.

289. Expérience de Leslie. — L'évaporation seule de l'eau peut servir à la congeler, comme on le voit par une expérience célèbre de Leslie¹ : sur les bords d'un cristalliseur en verre (fig. 127) repose, à l'aide d'un trépied, une petite capsule de liège noircie intérieurement. Dans cette capsule on place un peu d'eau, et de l'acide sulfurique concentré dans le cristalliseur. Le tout est disposé sous le récipient d'une machine pneumatique; on fait le vide, on tourne la clef de la machine de façon à isoler les pistons

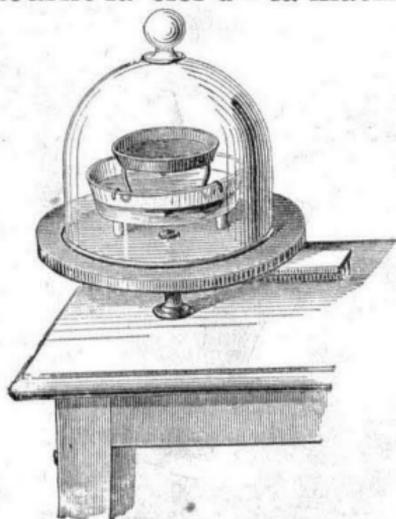


Fig. 127.
Expérience de Leslie.

du récipient et l'on attend quelques instants; l'eau se trouvant dans le vide s'évapore avec rapidité, et la vapeur étant constamment absorbée par l'acide sulfurique, le vide se maintient par cela même, sans qu'il soit nécessaire de continuer à manœuvrer la machine. Comme le liège est très-mauvais conducteur, la chaleur nécessaire à la production de la vapeur est prise à l'eau qui, au bout de quelque temps, se congèle. Cette expérience peut s'effectuer en grand dans des appareils dus à M. E. de Carré; il en résulte un procédé industriel de fabrication de la glace.

appareils dus à M. E. de Carré; il en résulte un procédé industriel de fabrication de la glace.

290. Glacière de Saint-Ouen. — La formation de la glace

1. Leslie (John), physicien écossais, né en 1766 dans le comté de Fife, mort en 1832, professeur à l'université d'Édimbourg.

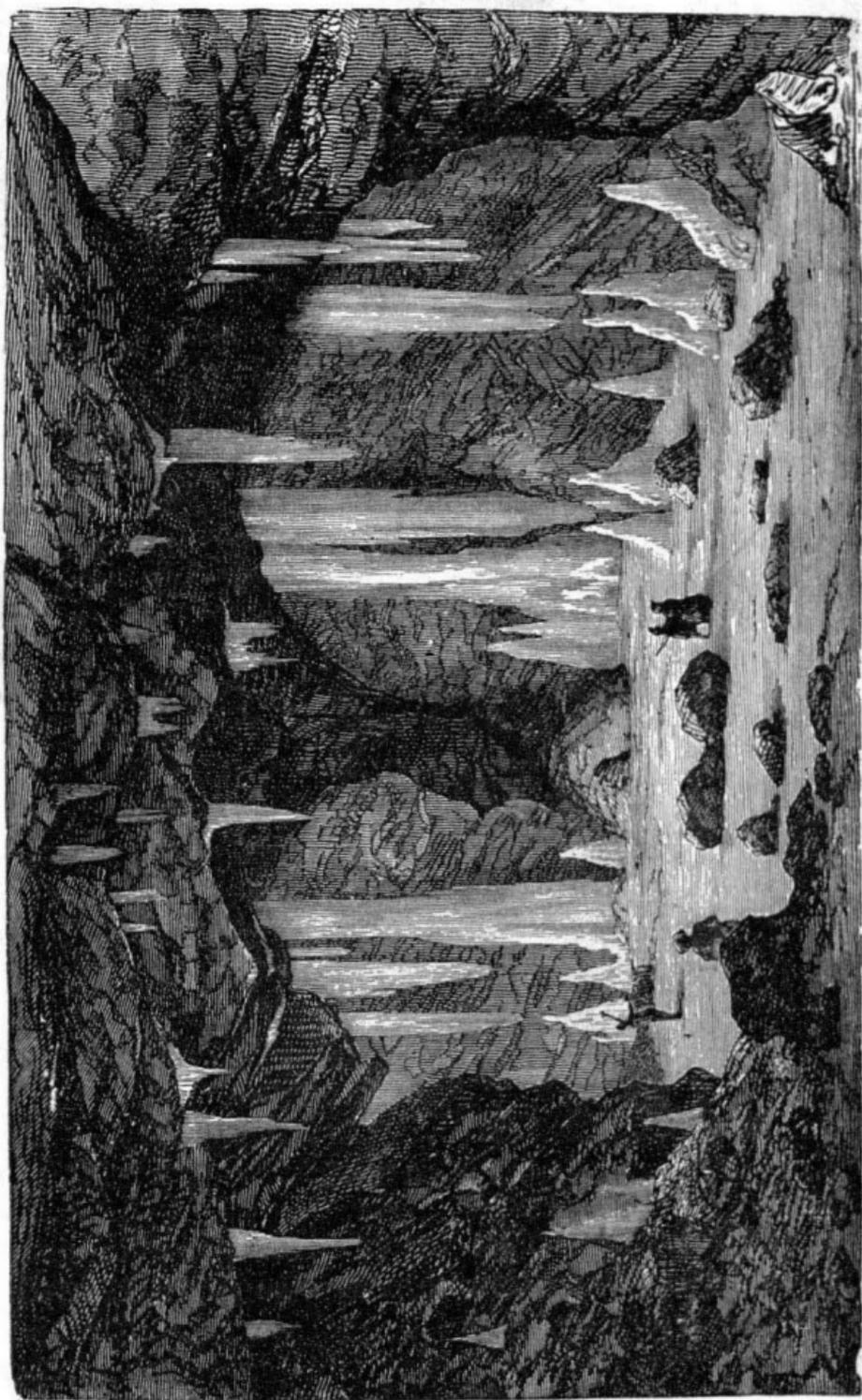


Fig. 128. Glacière naturelle de Vergy.

par évaporation de l'eau est pratiquée dans l'immense glacière de Saint-Ouen. L'eau, puisée par des pompes, est amenée au sommet de gradins en bois sur lesquels elle coule en cascade et s'évapore rapidement; elle arrive ainsi, considérablement refroidie, dans des cuves en bois où elle se répand sous une mince épaisseur, offrant à l'évaporation une vaste surface; la congélation se produit et la glace concassée est conservée dans une glacière ordinaire.

291. **Glacières naturelles.** — La nature offre le même phénomène dans les glacières naturelles. La figure 128 représente la glacière naturelle de Vergy; des colonnes de glace semblent supporter la voûte de la grotte; on en voit pendre du sommet ou s'élever du sol. L'eau arrive lentement en suintant à travers la voûte, et son évaporation, activée par les courants d'air, engendre la glace. Il

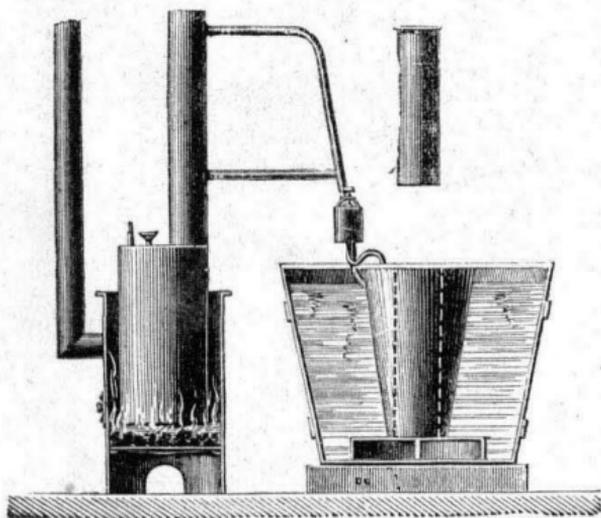


Fig. 129. Appareil Carre.

est à remarquer que ce n'est pas en hiver que celle-ci se produit, et que sa formation ne peut être attribuée à un refroidissement de l'air.

292. **Appareil Carré.** - C'est sur le froid produit par l'é-

vaporation qu'est fondé l'appareil de M. Carré pour la fabrication de la glace. Cet appareil se compose (fig. 129) d'un vase cylindrique qui communique, par un tube, avec un vase réfrigérant de forme annulaire. La chaudière contient une dissolution très-concentrée d'ammoniaque dans l'eau; on chauffe la chaudière et on maintient le réfrigérant dans un vase rempli d'eau froide. L'eau chaude ne pouvant plus dissoudre l'ammoniaque, ce gaz se dégage et se condense par l'action de sa propre pression. En vertu du principe de la paroi froide (241), la liquéfaction a lieu au point le plus froid de l'appareil, c'est-à-dire dans le réfrigérant. Quand toute l'ammoniaque a été dégagée et liquéfiée, on enlève l'appareil du feu, on met la chaudière dans l'eau froide, et dans la partie centrale du réfrigérant on introduit un vase plein d'eau à congeler. L'eau de la chaudière se refroidissant, devient susceptible de dissoudre de l'ammoniaque; ce qui est à l'état de gaz étant absorbé par l'eau, il se vaporise de l'ammoniaque liquide pour remplacer le gaz dissous. Cette évaporation continuelle produit un froid assez intense pour congeler l'eau placée à l'intérieur du réfrigérant.

293. **Échauffement produit par la condensation.** — Quand une vapeur repasse à l'état liquide, elle doit restituer la chaleur qu'elle contenait à l'état latent, de sorte qu'une condensation est toujours une cause de réchauffement. C'est ainsi que pendant l'hiver la pluie réchauffe l'atmosphère, au sein de laquelle elle s'est condensée. Dans les distillations, il faut entretenir un courant d'eau froide autour du serpentín, moins pour abaisser la température du liquide condensé que pour absorber la quantité considérable de chaleur qui passe de l'état latent à l'état sensible. Ce retour à l'état sensible a été employé non-seulement comme moyen de chauffage des appartements, ainsi qu'on le verra dans le chapitre suivant, mais encore pour amener dans l'industrie certains liquides à l'ébullition. Ainsi,

dans les ateliers de teinture, dans les papeteries, où il est nécessaire de porter des cuves à l'ébullition, on n'a qu'une seule chaudière qui produit de la vapeur; celle-ci vient se condenser (fig. 130) au fond de la cuve, cède sa chaleur latente et finit par porter toute la masse à 100° . Outre qu'un seul fourneau peut servir ainsi à chauffer plusieurs cuves, on a l'avantage de pouvoir arrêter le chauffage instantanément, et de pouvoir faire usage de simples cuves en bois.

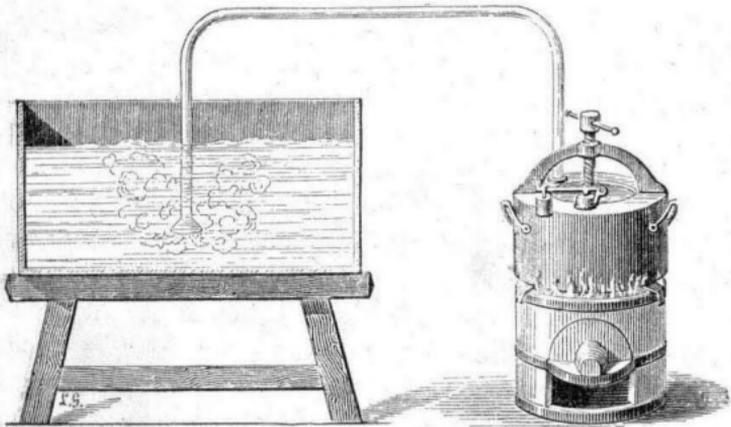


Fig. 130. Ébullition de l'eau par la vapeur condensée.

Exercices. — 1^o Pourquoi, pendant l'été, l'arrosage des rues rafraîchit-il l'air?

2^o D'où vient que le café versé dans une soucoupe se refroidit plus vite que dans une tasse?

3^o Dans certains pays chauds, on tend des toiles humides dans l'embrasure des fenêtres ouvertes. Quelle en est la raison?

4^o Pourquoi l'eau se maintient-elle fraîche dans les vases dits alcarazas, qui, étant poreux, laissent suinter l'eau à leur surface?

CHAPITRE VIII

CHAUFFAGE ET VENTILATION

294. **Chauffage et ventilation.** — L'étude du chauffage et celle de la ventilation ne peuvent être séparées, la ventilation se faisant généralement à l'aide des appareils de chauffage. Le renouvellement de l'air doit toujours être assuré dans les salles où un certain nombre de personnes se trouvent réunies, et où des lumières peuvent être allumées. On sait, en effet, que, par l'acte de la respiration, chaque personne détruit une portion de l'oxygène de l'air, et restitue à la place de l'acide carbonique et de la vapeur d'eau ; toute combustion en fait autant, et enfin la transpiration répand dans l'air de la vapeur d'eau chargée de matières animales, ce qui est une cause très-grande d'insalubrité ; de là vient la nécessité de ventiler. On admet, en général, qu'une personne peut vicier 6 mètres cubes d'air par heure, et que, par suite, il faut, dans un lieu habité, introduire par heure et par personne, 6 mètres cubes d'air à la place d'un égal volume de ce gaz expulsé ; il faut de plus tenir compte des lampes ou bougies que contient la pièce. Nous ne nous occuperons ici que de la ventilation produite par les appareils de chauffage ; ceux-ci sont de deux sortes : d'abord les appareils destinés à chauffer une pièce unique, ce sont les cheminées et les poêles, puis les calorifères, que l'on peut définir des appareils situés en dehors des pièces à chauffer et transportant dans ces pièces la chaleur qu'ils développent.

295. **Cheminées.** — Le plus répandu des modes de chauffage consiste dans l'emploi des cheminées; on en voit d'ailleurs de toute espèce. Les plus anciennes et les moins perfectionnées consistent en un simple tuyau, qui s'élève dans le mur jusqu'au haut de la maison et s'ouvre dans la chambre. Examinons ce qui se passe dans ce cas. Le bois brûle sur les chenets; l'air situé au-dessus s'échauffe, devient plus léger et s'élève dans la cheminée; il ne s'arrête même pas quand il en sort, car nous voyons, si le temps est calme, la fumée continuer sa route ascendante. Ce mouvement fait dans le foyer un vide partiel, aussitôt comblé par de l'air froid de l'appartement qui prend le même chemin. La circulation entretient la combustion en lui apportant l'oxygène qui lui est nécessaire, et réciproquement la combustion entretient la circulation. C'est ce phénomène que l'on désigne sous le nom de *tirage de la cheminée*. Le vide ne pouvant se faire dans la chambre, il faut que l'air qui s'échappe soit remplacé; or, si l'on met la main aux fissures et aux joints des portes et des fenêtres, on sent un vent froid: c'est le courant d'air qui remplace dans la chambre celui que le tirage du foyer enlève incessamment.

296. **Cheminées primitives.** — Dans les cheminées primitives le tuyau est très-large, sous leur manteau élevé toute une famille tient place; d'énormes masses d'air s'écoulent par cet orifice, entraînant avec elles la majeure partie de la chaleur du foyer; grâce à cette ventilation puissante, l'air de la chambre se trouve renouvelé avant de s'être échauffé; de plus, le bois se consume souvent mal. Pour nous rendre compte de ce dernier fait, remarquons que l'on peut assimiler l'écoulement de l'air à celui de l'eau dans une rivière; supposons qu'en un point le lit soit d'une grande largeur, que plus loin il soit resserré; dans l'un et dans l'autre endroit, la quantité d'eau qui s'écoule dans le même temps est la même; aussi se hâte-t-elle dans l'étroit passage et se précipite-

t-elle avec vitesse, tandis qu'elle coule lentement là où son lit est spacieux; ceci explique comment, tout en donnant passage à d'énormes masses d'air, les cheminées aux larges tuyaux et aux manteaux élevés n'activent que très-peu la combustion, l'air ne circulant que lentement autour du combustible, et passant d'ailleurs au-dessus en très-grande partie sans servir à l'alimentation du feu. Le chauffage par les anciennes cheminées n'utilise guère que 1 à 2 pour 100 de la chaleur produite, et n'a pu donner quelques résultats qu'à une époque où le bon marché du combustible permettait de brûler des troncs d'arbre tout entiers. On a cependant vanté ces cheminées au point de vue de la salubrité, l'on a fait remarquer que le courant d'air produit empêchait l'air de la chambre de se vicier, et c'est là, en effet, le grand avantage des cheminées en général; mais il ne faut pas oublier qu'une cheminée de la forme primitive, même quand elle est de petite dimension, enlève toujours une quantité d'air fort au-dessus de celle que nécessite la ventilation; que, de plus, si l'on se tient dans le trajet des courants d'air qui s'établissent directement entre les ouvertures et la cheminée, on ressent une impression de froid nuisible pour la santé. Cela n'empêche pas que l'on ne puisse, par des moyens qui seront exposés plus loin, faire servir les cheminées à une bonne et saine ventilation.

297. **Cheminées à la Rumford.** — Rumford améliora le premier la construction des cheminées; les figures 131, 132, 133, représentent l'élévation, la coupe verticale et la coupe horizontale d'une cheminée à la Rumford. L'ouverture du foyer est limitée par des parois inclinées qui conduisent l'air vers le combustible et l'empêchent de passer au-dessus en aussi grande abondance; de plus, l'orifice de communication avec la cheminée est de beaucoup diminué, ce qui accélère la vitesse en ce point, augmente par suite le tirage, et empêche un contre-courant de s'établir et de faire fumer. La profondeur du foyer est

diminuée, ce qui, joint au rétrécissement latéral produit par des murs inclinés, fait réfléchir la chaleur vers l'appartement et permet d'économiser le combustible.

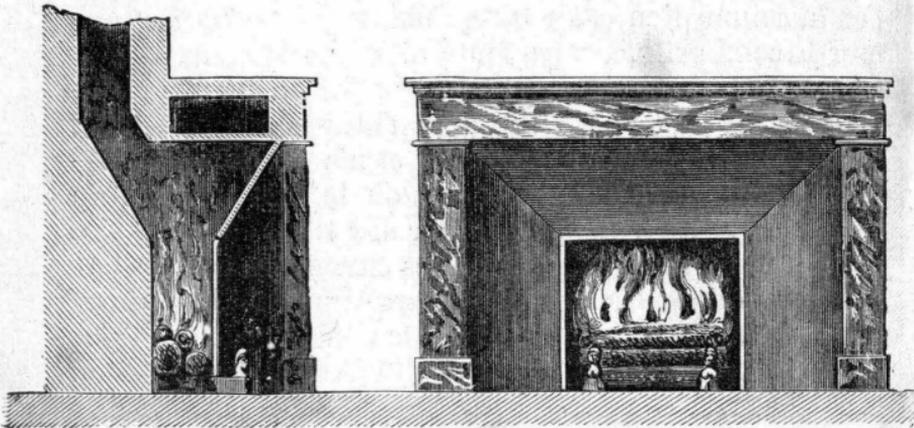


Fig. 132. Coupe verticale.

Fig. 131. Cheminée à la Rumford.

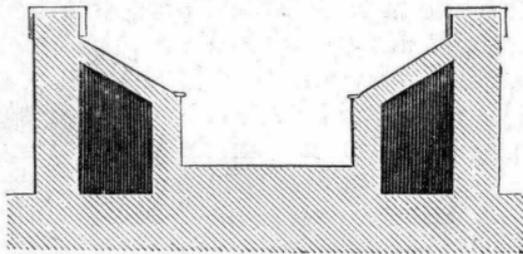


Fig. 133. Coupe horizontale.

208. **Cheminées à tablier de L'Homond.** — Un perfectionnement notable aux cheminées précédentes consiste dans l'emploi d'un tablier mobile (fig. 134 et 135), composé de deux plaques ou volets métalliques; celui qui est à la partie inférieure est soutenu par deux chaînes qui passent sur des poulies latérales et supportent des contre-poids. Ce volet a deux rebords: l'un en bas, l'autre en haut; le volet le plus élevé n'a qu'un rebord à sa partie inférieure. Quand on descend le premier volet, il découvre le second,

puis son rebord supérieur venant buter contre le rebord inférieur du second volet, celui-ci est forcé de descendre; si on relève le tablier, les deux rebords inférieurs viennent buter l'un sur l'autre, et à ce moment les deux volets remontent ensemble. L'avantage du tablier est d'activer le tirage quand l'on allume le feu, car

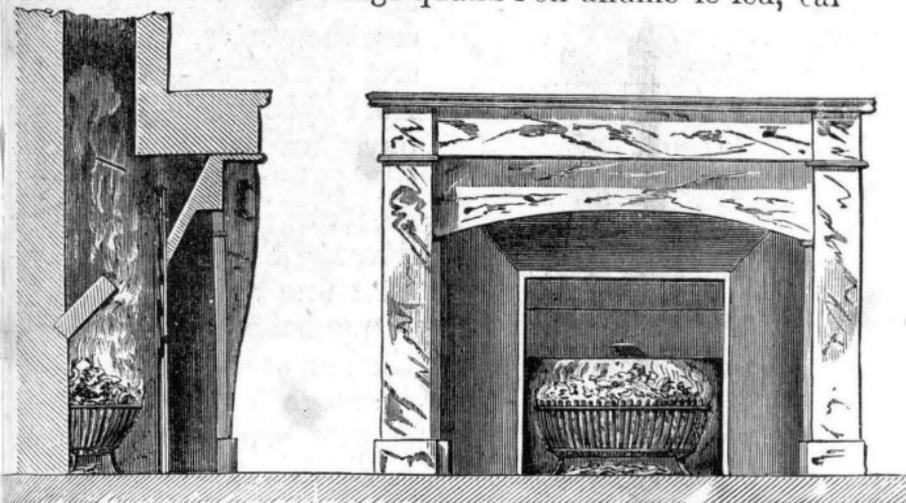


Fig. 134. Cheminée à tablier.

le rideau étant baissé, l'air n'a au-dessus de lui qu'une petite ouverture pour pénétrer dans la cheminée, il prend en ce point une grande vitesse, et, de plus, se trouve dirigé tout entier sur le combustible.

299. Cheminées à ventouses. —

Dans les appartements bien clos, les fissures et les joints des portes ou des fenêtres ne laissent passer que peu d'air; le tirage se fait mal, la cheminée fume, de là l'usage des ventouses: un tuyau traverse le mur et aboutit au dehors sur la face du bâtiment; l'air extérieur communique ainsi avec un es-

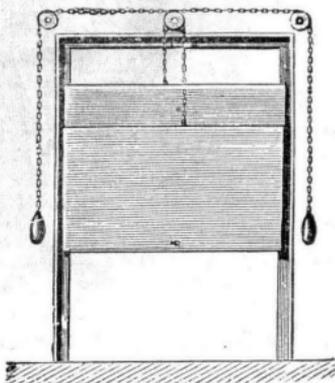


Fig. 135.
Tablier mobile.

pace ménagé entre le foyer et les parois de la cheminée. Cet espace s'ouvre au-dessus du foyer par une fente horizontale située à la place où s'attache le tablier dans la cheminée de L'Homond. L'air froid du dehors descend par cette fente sur le combustible et remonte dans le tuyau

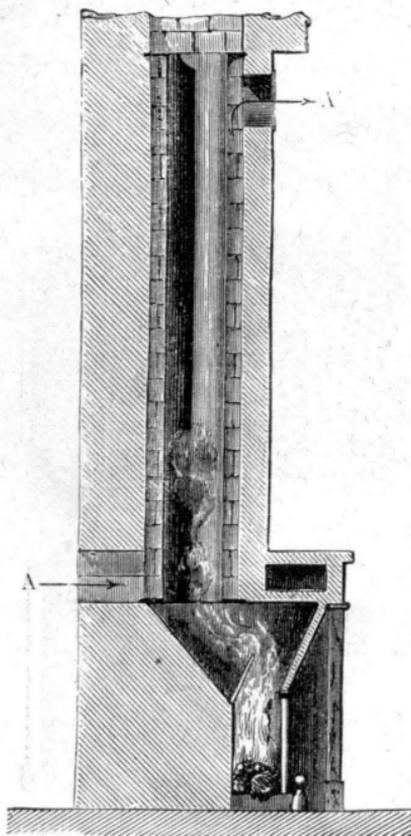


Fig. 136.
Cheminée perfectionnée.

après s'être échauffé. Dans ces cheminées, la fente qui sert à l'admission de l'air froid ayant, en général, une ouverture beaucoup trop petite, l'air possède en cet endroit une grande vitesse et se déverse devant le foyer suivant une nappe froide fort incommode. De plus, la ventilation, qui est le principal avantage des cheminées, se trouve supprimée presque complètement.

300. **Cheminées perfectionnées.** — On a perfectionné le système des ventouses de façon à obtenir une bonne ventilation, tout en évitant les courants d'air froid et en permettant les fermetures hermétiques; de plus, la chaleur perdue par le tuyau se trouve en partie utilisée. Parmi les procédés les plus simples

pour arriver à ce résultat, on peut citer le suivant : La ventouse prend l'air en A (fig. 136) en dehors du bâtiment; cet air s'élève dans un espace annulaire qui entoure le tuyau de la cheminée; il s'échauffe, monte et se déverse dans la chambre par une bouche A', remplaçant ainsi à chaque instant l'air qui sert à l'alimentation du foyer.

301. **Causes qui font fumer les cheminées.** — Il n'est pas rare de voir les cheminées dégager leur fumée dans l'appartement, si ce n'est d'une manière permanente, du moins par intermittences. Il peut y avoir à cela plusieurs causes, qui ont été énumérées par Franklin :

1° *Difficulté d'introduction de l'air dans l'appartement.* Si, à l'aide de bourrelets ou par tout autre moyen, on assure la clôture des portes et des fenêtres, la cheminée fume, si elle n'a pas de ventouse convenable, parce que l'appel d'air que le tirage produit dans la chambre détermine un vide, et que la différence de pression fait alors rentrer dans la chambre, par la cheminée, de l'air chargé de fumée.

2° *Tuyaux trop larges.* Si les tuyaux sont trop larges, les cheminées fument, parce qu'il se produit deux courants d'air dans le tuyau, l'un ascendant, qui est déterminé par l'air ayant servi à la combustion, l'autre descendant, venant de l'extérieur remplacer l'air du courant ascendant; or ces deux courants se mêlent toujours dans les points où ils se rencontrent, et le courant descendant ramène ainsi de la fumée dans l'appartement. En rétrécissant l'ouverture du conduit au-dessus du foyer, on remédie à cet inconvénient; la vitesse du courant ascendant, très-augmentée par ce rétrécissement, s'oppose à l'introduction dans la cheminée d'un courant descendant. Il faut détruire et rétablir ce rétrécissement avant et après le ramonage.

3° *Foyers trop ouverts.* Beaucoup d'air peut pénétrer dans la cheminée, au-dessus du combustible, et par suite sans s'échauffer. Cet air refroidit la fumée, diminue dès lors sa vitesse, et peut même la faire retomber dans l'appartement.

4° *Trop petite hauteur de la cheminée.* La hauteur du tuyau de la cheminée influe beaucoup sur le tirage, qui augmente avec cette hauteur.

5° *Action de plusieurs foyers les uns sur les autres.* Si deux pièces, communiquant entre elles, ont leurs chemi-

nées allumées, l'air, sollicité à se porter en deux points opposés, se rendra de préférence vers la cheminée qui a le plus fort tirage, et produira dans la seconde un appel d'air de l'extérieur vers la chambre, qui se remplit de fumée.

6° *Communication des tuyaux entre eux.* Souvent le canal d'une cheminée vient déboucher dans le conduit d'une autre; si alors l'une des deux cheminées est allumée depuis un certain temps quand on allume l'autre, il peut en résulter que la colonne d'air ascendant, qui passe devant l'orifice du tuyau de la cheminée que l'on allume, ferme en quelque sorte cet orifice et empêche le mouvement de l'air de s'y produire; il peut encore se faire que le conduit d'une cheminée, débouchant dans l'air froid d'un autre canal, s'y refroidisse assez pour retomber dans la pièce sans feu.

7° *Action du soleil.* Quand le soleil frappe les toits au-dessus d'un tuyau de cheminée, ces toits s'échauffent, et il se forme au-dessus d'eux un courant d'air ascendant; il doit en résulter un contre-courant descendant dans les parties plus froides, et par suite à l'intérieur de la cheminée, qui ne reçoit l'action du soleil qu'extérieurement. On empêche ce courant de s'établir en plaçant, au-dessus de l'orifice du tuyau, une sorte de mitre en tuiles.

8° *Influence des vents.* Le vent peut diminuer le tirage d'une cheminée, d'autant plus que ce tirage est plus faible, que la vitesse du vent est plus considérable, que sa direction est plus inclinée sur l'horizon dans le sens du haut en bas; cette dernière influence est la plus grande, et ce défaut d'horizontalité du vent est souvent le résultat de la présence d'un relief du sol. Quand une ville est à peu de distance d'une colline, il y a toujours une direction du vent pour laquelle les cheminées de la ville ont toutes plus de tendance à fumer. On remédie à l'influence du vent, en accélérant la vitesse de la fumée à l'orifice supérieur de la cheminée. A cet effet, on diminue cet orifice, et, mieux encore, on le munit de certains appareils en tôle

qui empêchent le vent de pénétrer dans la cheminée et qui peuvent même le faire servir à activer le tirage.

302. **Ventilation par les cheminées sans feu.** — Même quand elles ne contiennent pas de feu, les cheminées servent à la ventilation. En effet, toute pièce qui possède une cheminée, communique avec l'extérieur par les jointures des fenêtres et par l'orifice de la cheminée; ces deux sortes d'ouverture sont à des hauteurs très-différentes; l'air n'est pas à la même température dans toutes les parties de la pièce; il arrive nécessairement que des courants d'air doivent se produire et renouveler l'air de la chambre. Aux époques de l'année où l'on ne fait pas de feu, la température de l'air des appartements est moins élevée que celle du dehors pendant le jour, et l'est plus pendant la nuit; pendant le jour, l'air s'introduit par le point le plus élevé pour s'échapper par le plus bas, il y a un courant descendant dans la cheminée; c'est l'inverse qui a lieu pendant la nuit.

303. **Utilisation de la chaleur développée dans les cheminées.** — Le chauffage par les cheminées est le plus mauvais de tous au point de vue économique; c'est à peine si les meilleures utilisent le dixième de la chaleur produite; le reste s'écoule par le tuyau sans produire aucun effet utile.

304. **Poêles.** — Les poêles utilisent bien mieux la chaleur, mais ventilent peu. Ils dessèchent l'air, et rendent ainsi la respiration pénible. Ce sont, en général, des cylindres de faïence contenant à l'intérieur un foyer, dans lequel brûle le combustible; ils s'échauffent lentement, mais se refroidissent plus lentement encore; ils ont ainsi l'avantage d'entretenir une grande constance dans la température. On a introduit certains perfectionnements dans la construction de ces appareils; ainsi la figure 137 représente un de ces poêles souvent employés dans les antichambres ou les salles à manger; ils sont en terre cuite peinte.

On peut comprendre leur construction en examinant la figure 138 qui représente une coupe faite horizontalement à la hauteur du foyer. De chaque côté de la grille s'élèvent six colonnes verticales de fonte creuse, qui forment la paroi du foyer; ces colonnes débouchent à la

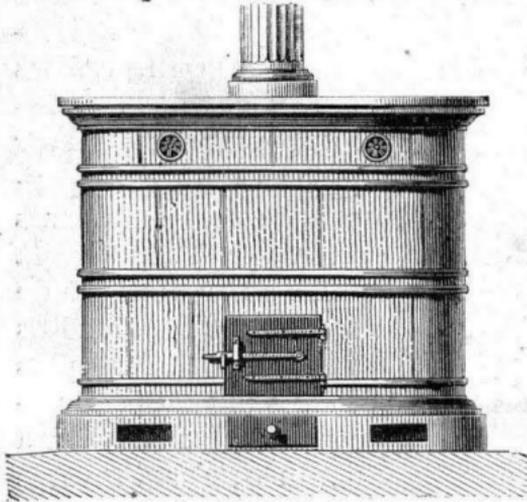


Fig. 137. Poêle de salle à manger.

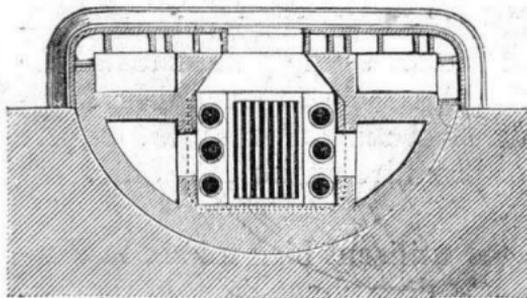


Fig. 138. Coupe du poêle.

partie inférieure dans un espace vide, qui communique avec la chambre par deux ouvertures pratiquées à droite et à gauche de la porte du cendrier. L'air de la salle pénètre par ces ouvertures, s'élève à l'intérieur des colonnes où il s'échauffe, puis se répand dans un espace situé au-dessus du foyer, d'où il s'échappe par des bouches de chaleur.

305. Calorifères-Poêles. — On a donné le nom de calorifères à des poêles particuliers. Sur une grille G (fig. 139) repose le combustible contenu

dans un foyer V; la fumée, se dégageant, remplit l'espace annulaire O et s'échappe par le tuyau T; la cendre tombe dans le cendrier F, dont la porte percée de trous sert à l'admission de l'air qui entretient la combustion. Un couvercle recouvre le foyer V et ferme l'orifice par lequel on introduit le combustible. Tout l'appareil est entouré d'une seconde enveloppe B, de sorte que l'air

limité dans l'espace L est fortement chauffé. Cet air se met en mouvement; il s'échappe par des bouches de chaleur pratiquées dans la région supérieure de l'enveloppe B, et il est remplacé par de l'air froid qui arrive par un canal A situé sous le calorifère, et en libre communication avec l'air extérieur à la chambre. Une clef P permet d'ouvrir ou de fermer ce canal.

306. Chauffage par circulation d'air chaud.

— L'air chaud était dans l'appareil précédent, avec le rayonnement direct du poêle, l'agent du chauffage. On peut le faire servir au même usage, tout en plaçant à distance le foyer de la combustion; il faut alors employer un véritable calorifère. Ces appareils sont de deux sortes : dans les uns, l'air qui a servi à alimenter le foyer, parcourt les tuyaux destinés au chauffage; dans les autres, l'air extérieur s'échauffe en traversant des tubes métalliques situés dans le

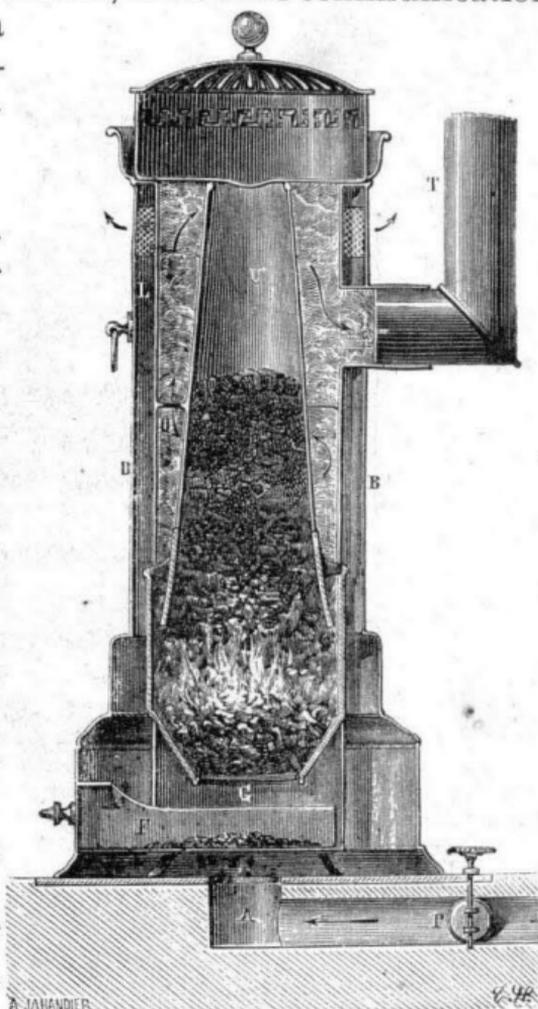


Fig. 139. Calorifère.

foyer. Il faut encore distinguer les appareils dans lesquels l'air est porté à une très-haute température, de ceux dans lesquels sa température est beaucoup moindre. Parmi les appareils nombreux qui ont été construits, nous citerons l'un des plus simples usité en Angleterre : Quatre gros tuyaux de fonte sont étagés horizontale-

ment, au-dessus du foyer F (fig. 140) ; ces tuyaux sont réunis par des coudes sortant du fourneau, mais entourés d'une chemise en brique, qui, par sa mauvaise conductibilité, s'oppose au refroidissement ; l'air extérieur entre par A et s'échappe par A' ; la fumée s'écoule par la che-

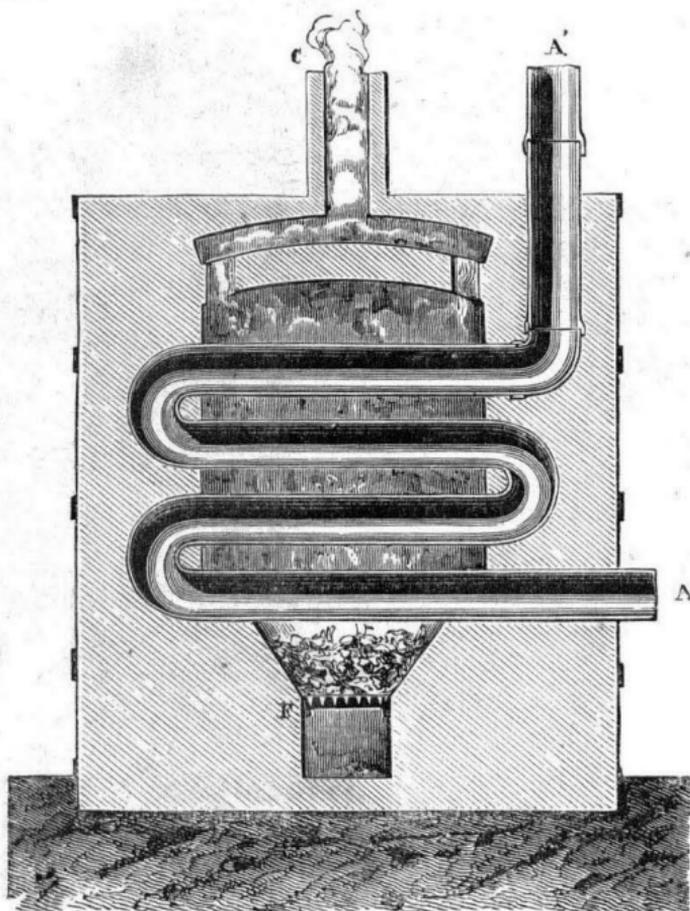


Fig. 140.

Chauffage par circulation d'air chaud. Appareil anglais.

minée C. L'air peut acquérir dans cet appareil une température très-élevée.

307. Emploi de l'air chaud pour alimenter les hauts fourneaux.

— Les calorifères à air chaud ne sont pas seulement usités pour le chauffage des appartements, mais quelquefois encore pour insuffler de l'air chaud dans les hauts

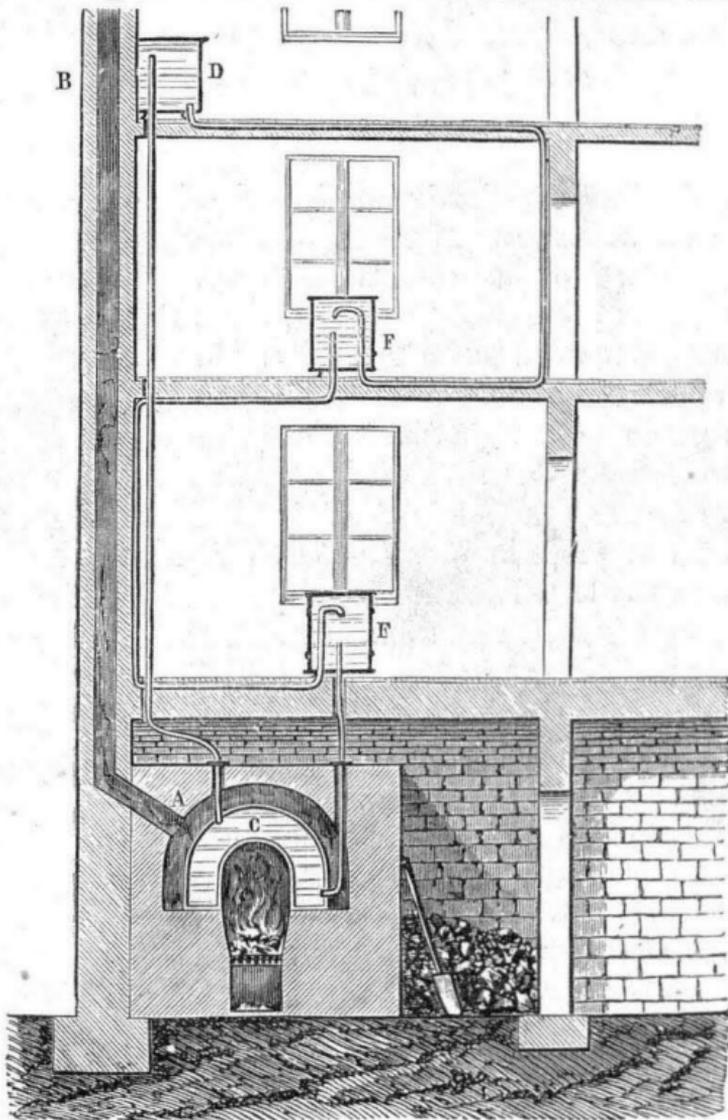


Fig. 141

Chauffage par circulation d'eau chaude. Appareil à basse pression.

fourneaux. L'appareil décrit précédemment (fig. 140) a été précisément employé à cet usage dans l'usine de Butterley-Iron-Works, près de Derby. L'air est alors injecté dans l'orifice A par une soufflerie, et il sort à la tem-

pérature de 180°. Quand les appareils à air chaud sont appliqués à cet usage, on doit utiliser pour le chauffage la chaleur perdue des gueulards. C'est dans le même but d'économie que, dans beaucoup d'usines, le calorifère à air chaud est chauffé par la fumée du foyer de la chaudière à vapeur.

308. **Chauffage par circulation d'eau chaude.** — Les appareils de chauffage par circulation d'eau chaude sont de deux sortes : dans les uns, dits à basse pression, la température du liquide n'est jamais supérieure à 100° ; dans les autres, elle dépasse cette limite. Un appareil à basse pression se compose d'une chaudière C (fig. 141), chauffée par un foyer dont la fumée s'échappe par la cheminée AB. Du sommet de la chaudière s'élève verticalement un tube qui arrive à la partie supérieure d'un réservoir D, situé dans la pièce la plus élevée de l'édifice ; le liquide redescend par la partie inférieure de ce réservoir pour se rendre à l'étage au dessous dans un autre réservoir E. L'eau descend ainsi d'étage en étage, et enfin elle est ramenée par un conduit, du réservoir le moins élevé F, jusqu'au fond de la chaudière. S'il y a plusieurs réservoirs à chaque étage, ils communiquent tous entre eux. L'appareil est complètement plein d'eau ; le liquide le plus chaud, étant aussi le moins dense, s'élève jusqu'en D et redescend en se refroidissant ; ainsi s'établit la circulation. On voit pourquoi ces appareils chauffent davantage les parties les plus élevées de l'édifice. Le réservoir supérieur D est muni d'un tube vertical, non figuré, qui s'élève au-dessus de lui ; ce tube sert à introduire l'eau dans l'appareil ; il se ferme à sa partie supérieure par une soupape de sûreté, et n'est jamais complètement rempli, afin de laisser un libre jeu à la dilatation de l'eau. Le principal défaut de ces appareils est que les tuyaux de conduite sont d'un grand poids et exercent une grande charge sur les planchers ; de plus, si une fuite se produisait, elle pourrait occasionner de graves accidents. Mais ces appareils sont

simples, n'exigent pas une grande surveillance, et la lenteur de leur refroidissement entretient une grande constance dans la température.

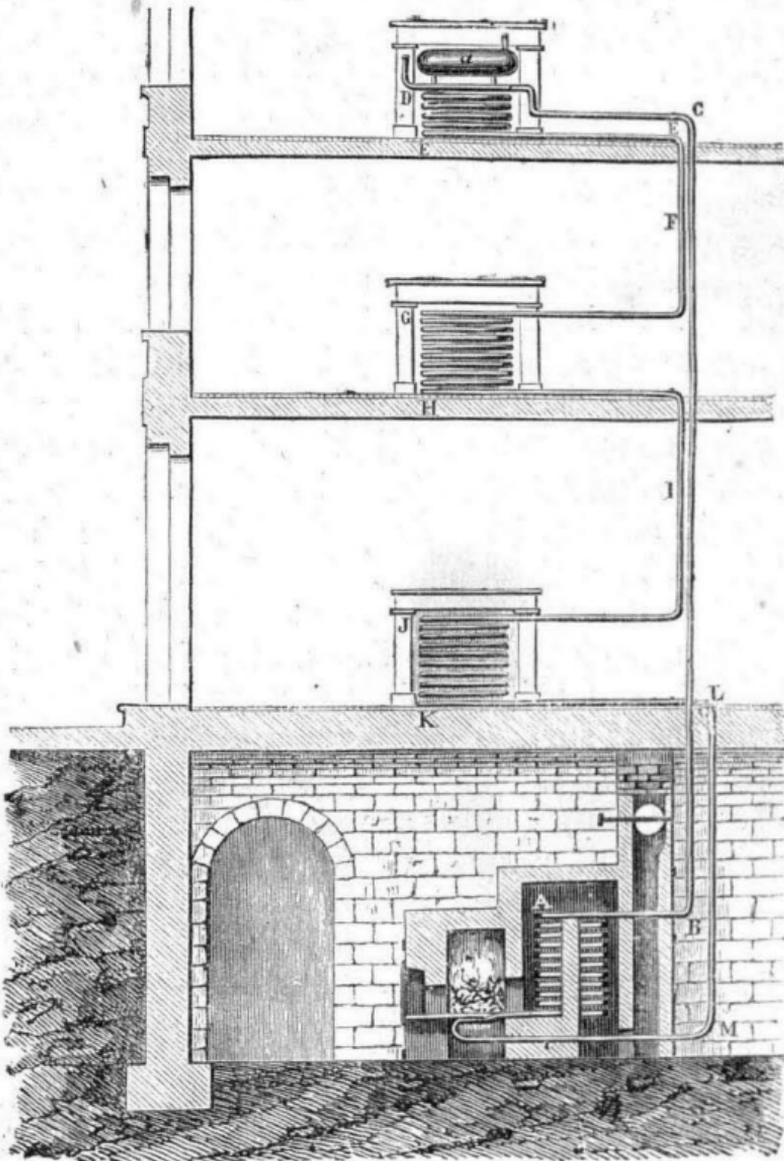


Fig. 142.

Appareil à haute pression.

309. Les appareils à haute pression consistent en un long tube, replié plusieurs fois sur lui-même, et servant à la fois de chaudière, de tuyau de conduite et de réservoir chauffeur. Près du foyer, en A (fig. 142), le tube est

contourné en spirale sur une longueur qui est environ le sixième de sa longueur totale ; la flamme sortant du foyer entoure la moitié de cette hélice, en montant le long du mur, derrière lequel elle descend ensuite pour chauffer la seconde moitié de l'hélice. Le tube s'élève alors suivant BC jusqu'en haut de l'édifice, se contourne encore en une spirale DE, entourée d'un massif de faïence, et appelée *calorifère à eau*. De là, suivant F, le tube descend dans le calorifère GH de l'étage inférieur. C'est du dernier JK de ces calorifères que l'eau se rend par la route LM jusqu'à la partie inférieure de la spirale chauffée. L'eau s'élève encore directement au point le plus haut, pour redescendre d'étage en étage. S'il y a plusieurs calorifères à eau à chaque étage, le liquide circule dans chacun d'eux avant de descendre à l'étage inférieur. Tout en haut de l'appareil, en *a*, se trouve le *vase d'expansion* : c'est un tube horizontal, court, d'un diamètre très-supérieur à celui du tube de circulation ; sa capacité est au moins les 5 centièmes de la capacité totale de l'appareil ; c'est par lui que l'on introduit l'eau, et il n'est jamais rempli. Ces appareils exigent moins de surface de chauffe que les précédents ; ils occupent moins de place ; mais les fortes pressions auxquelles ils sont soumis, à cause de la température très-élevée de l'eau, rendent très-dangereux les accidents résultant de leur rupture.

310. **Chauffage par la vapeur.** — On a essayé d'employer, pour le chauffage des appartements, la chaleur latente qu'abandonne la vapeur en se condensant. A cet effet, l'eau est évaporée dans une chaudière. La vapeur est dirigée verticalement, par un tuyau recouvert de matières non conductrices, jusque dans les appartements les plus élevés que l'on veut échauffer ; de là elle circule dans des conduits, qui la ramènent à la chaudière après avoir échauffé les salles dans lesquelles ils décrivent de nombreux circuits. Ce système de chauffage, d'un établissement difficile pour éviter les pertes de vapeur, et d'un

entretien coûteux, est aujourd'hui presque complètement abandonné.

311. Ventilation des salles d'étude. — Les lieux qui renferment un grand nombre de personnes nécessitent des précautions spéciales pour leur ventilation. Nous examinerons quelques cas particuliers, et d'abord celui des salles d'étude d'une maison d'éducation. La figure 143 représente un procédé employé avec succès. En A est la chaire du maître, en B les bancs et les tables des élèves. C est un calorifère de la forme décrite précédemment (305) ; D est le tuyau par lequel la fumée s'échappe et se rend dans une cheminée d'appel E. L'air arrive de l'extérieur par le conduit G dans le calorifère, s'échauffe dans celui-ci, et, sortant par les bouches de chaleur, s'élève jusqu'au plafond ; de là il se répand dans toute la salle, redescend lentement, et s'échappe par des ouvertures F pratiquées dans la cheminée d'appel. Pendant l'été, la ventilation se fait autrement ; on allume un petit fourneau au bas de la cheminée d'appel, on ferme les ouvertures F et l'on ouvre une porte placée sur la cheminée un peu au-dessous de l'orifice du tuyau D.

312. Ventilation des classes. — Le même mode de ventilation peut être employé pour les classes ; seulement la disposition des bancs en gradins nécessiterait que le calorifère et la cheminée d'appel fussent placés d'un même côté, c'est-à-dire près de la chaire du professeur.

313. Ventilation des dortoirs. — Pour les dortoirs, la ventilation est fort importante, parce que ces salles sont fort insalubres, le séjour des élèves y étant toujours d'au moins sept heures ; il faudrait, s'il n'y avait pas de ventilation, fournir dans le dortoir 42 mètres cubes d'air par élève, c'est-à-dire que pour une hauteur de 3 mètres, qui se rencontre rarement, il devrait y avoir par lit une superficie de 14 mètres carrés ; il est impossible

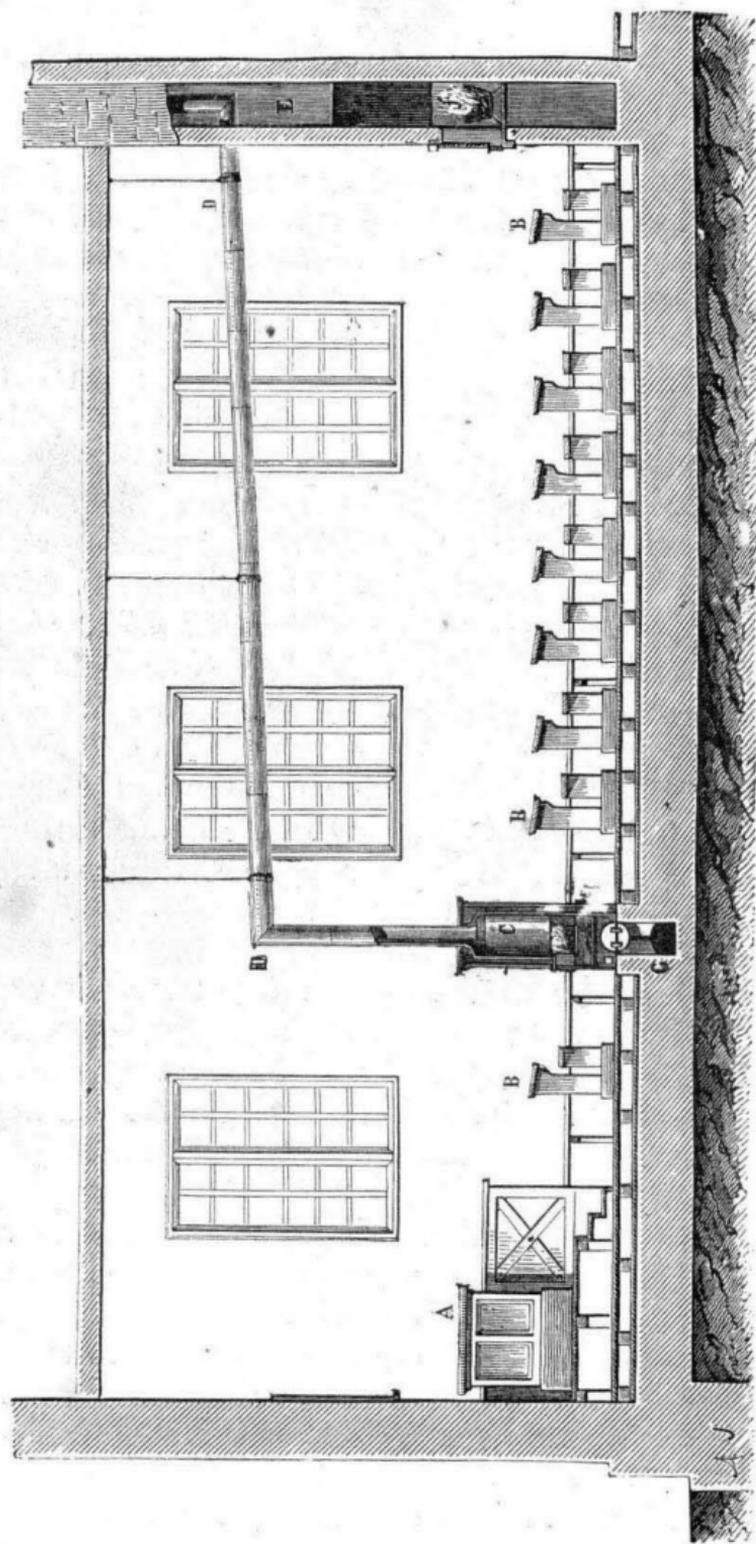


Fig. 143. Ventilation d'une salle d'étude.

de satisfaire à cette condition, et dès lors la ventilation devient indispensable. Pour l'obtenir l'été, on peut faire usage d'une cheminée d'appel comme dans les études et produire l'aspiration de l'air par un orifice placé à 1^m,50 ou 2^m du sol. Pendant l'hiver, un moyen commode consiste à installer de distance en distance des réservoirs cylindriques, pleins d'eau chaude, et autour desquels l'air extérieur circule en s'échauffant comme dans les calorifères; l'air vicié s'écoule par des orifices pratiqués de distance en distance près du plancher; l'eau se maintient assez chaude pendant toute la nuit pour assurer le renouvellement de l'air. On peut encore produire la ventilation d'hiver et d'été par le moyen des lampes. On place au-dessus de chacune d'elles un tuyau de zinc sortant par le plafond et s'élevant à 2 ou 3 mètres au-dessus. Une lampe, brûlant 40 grammes d'huile à l'heure, suffit à la ventilation exigée par dix lits.

314. **Ventilation des ateliers.** — Les ateliers ont besoin d'une ventilation énergique, non-seulement en raison de l'agglomération des ouvriers, mais encore à cause des émanations qui se dégagent par suite des opérations que l'on exécute. Il faut distinguer le cas où les dégagements de gaz ou de vapeurs insalubres n'ont lieu qu'en certains points de l'atelier, et celui où les émanations se produisent dans toute l'étendue de la salle. Dans le premier cas, il suffit souvent d'établir une cheminée d'appel terminée par une hotte, et au-dessous de laquelle s'effectuent les opérations; c'est le procédé employé dans les laboratoires et les ateliers de dorure. Dans le second cas, les procédés les plus divers peuvent être mis en usage; tantôt on se sert de vastes et nombreuses cheminées d'appel, tandis que des prises d'air sont effectuées à travers le plancher, tantôt des machines soufflantes injectent de l'air au-dessous du plancher. Cet air sort par des grilles, traverse l'atelier et est évacué par des ouvertures pratiquées dans les murs.

315. **Aérage des mines.** — Au fond des mines, l'air se vicie rapidement, car souvent des gaz asphyxiants se dégagent du sol. Le renouvellement de l'air se fait quelquefois naturellement : en effet, il y a dans chaque mine au moins deux puits qui mettent les galeries en communication avec l'atmosphère; rarement l'air de ces puits est à la même température; par suite, des courants s'établissent et la ventilation s'effectue. Cependant il est important d'assurer le tirage; pour

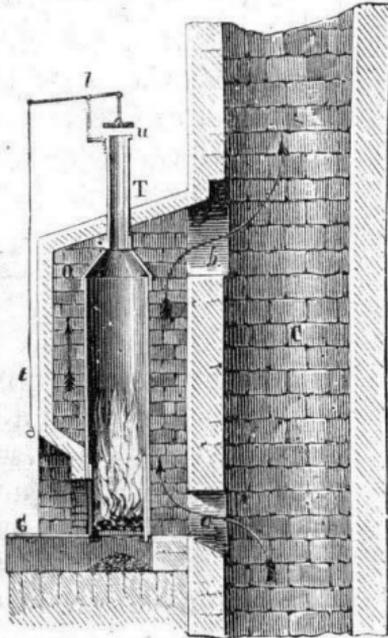


Fig. 144.

Aérage des mines

cela, on place dans l'un des puits un petit foyer qui chauffe l'air et en détermine la circulation. Dans les mines de houille, les gaz qui se dégagent peuvent être inflammables; il y a donc à craindre que le foyer n'amène leur combustion. Pour y remédier, l'on adopte la disposition suivante : au-dessus de l'orifice d'un des puits de la mine s'élève une haute cheminée C (fig. 144); dans une chambre O, établie latéralement, se trouve un calorifère alimenté par l'air de l'atmosphère. Les gaz de la mine pénètrent dans la chambre O, par *a*, s'échauffent, et s'échappent par *b*, déterminant ainsi dans la cheminée un tirage énergique. Le conduit T étant fort au-dessous de l'ouverture de la cheminée d'appel, il est impossible que les étincelles qui s'en échappent puissent s'élever jusqu'à cette ouverture et enflammer les gaz de la mine. Le disque *u* permet de régler le feu et par suite le tirage.

LIVRE IV

ÉLECTRICITÉ DYNAMIQUE

CHAPITRE I^{ER}

PRODUCTION DES COURANTS ÉLECTRIQUES

316. **Expérience de Galvani.** — Le 20 septembre 1786, Galvani ¹ reconnut que si l'on met une extrémité d'un arc

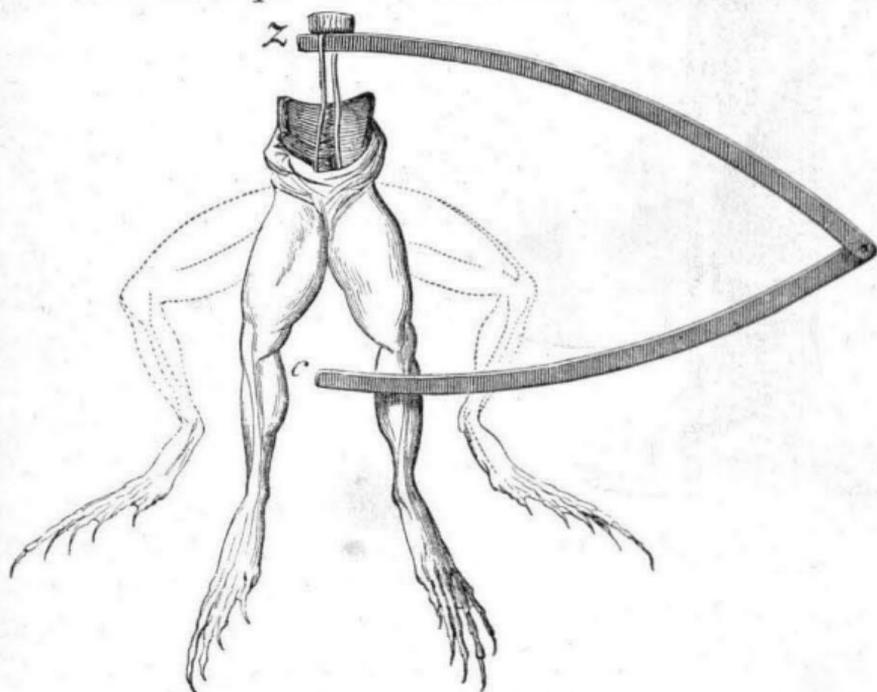


Fig. 145. Expérience de Galvan..

métallique en contact avec les nerfs lombaires d'une gre-

1. Galvani (Louis), professeur d'anatomie à l'université de Bologne, né dans cette ville en 1737, mort en 1795.

nouille, et qu'on vienne à toucher les muscles cruraux avec l'autre extrémité, la grenouille entre en convulsion (fig. 145). Le phénomène est surtout sensible quand l'arc métallique est formé d'un morceau de zinc réuni à un morceau de cuivre. Galvani, qui était un physiologiste, crut voir dans cet effet le résultat d'une action vitale. Volta, professeur de physique à Pavie, pensa qu'il y avait plutôt un effet électrique développé par le contact des métaux.

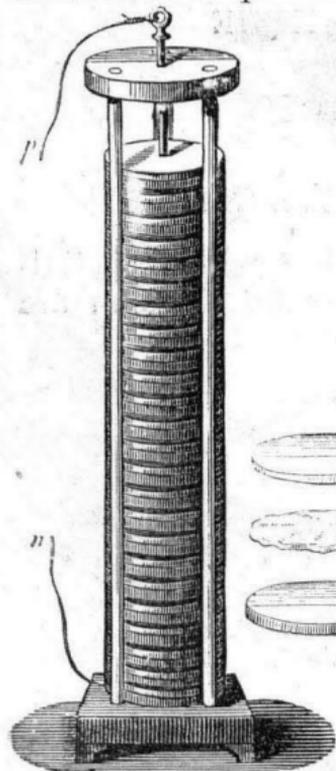


Fig. 146.
Pile de Volta.

317. **Pile à colonne de Volta.** — C'est guidé par son idée sur l'expérience de Galvani que Volta inventa sa pile. Elle se compose (fig. 146) d'une série de disques dont chacune est formée d'une rondelle de cuivre soudée à une rondelle de zinc. Ces disques, formés de deux métaux, ont été nommés *couples*; on les superpose sur une tablette isolante de manière à former une *pile*; des *colonnes* de verre les maintiennent. Les couples sont séparés les uns des autres par des rondelles de drap mouillé avec de l'eau légèrement aiguisée d'acide sulfurique; à chacune des extrémités de sa pile, Volta attachait un fil métallique : celui qui communiquait au zinc extrême

se chargeait de fluide positif, celui qui aboutissait au cuivre situé à l'autre extrémité était chargé de fluide négatif.

318. **Théorie de Volta.** — Pour expliquer les effets de son appareil, Volta admettait :

1° Qu'au contact de deux métaux se développe ce qu'il

appelle une *force électromotrice*, séparant les électricités du fluide neutre et les repoussant chacune dans un sens différent.

2^o Qu'il existe des corps conducteurs, mais non électromoteurs, c'est-à-dire des corps qui peuvent être mis en contact avec d'autres sans produire d'électricité, mais qui peuvent conduire facilement ce fluide. Les rondelles de drap humide étant dans ce cas, d'après Volta, avaient donc pour but de permettre à l'électricité de circuler dans tout l'appareil, et d'empêcher que le contact du zinc d'un couple avec le cuivre du couple suivant ne produisît une force électromotrice de sens contraire à celle qui se développe dans chaque couple.

3^o Que l'électricité produite par chaque couple se propageait tout entière dans la pile, sans pour cela être modifiée par l'électricité provenant des autres couples, et que, de cette façon, l'énergie de la pile était proportionnelle au nombre des couples.

319. Théorie véritable. — **L'électricité de la pile accompagne les actions chimiques.**—Volta faisait erreur sur le siège de la force électromotrice : c'est dans le contact du zinc et du drap humide qu'elle réside. Ce qui le prouve, c'est que si l'on considère l'action chimique qui a lieu au contact du zinc et du drap, on voit que plus elle est forte, plus la pile donne d'électricité, et si cette action chimique change de nature, les électricités peuvent se porter d'une façon inverse sur les métaux. Le siège de la force électromotrice étant dans le contact du liquide et du zinc, là où il y a action chimique, on en avait conclu que cette action était la cause du développement d'électricité; on sait aujourd'hui, d'après des expériences fort délicates de M. Gassiot ¹, qu'il n'en est rien; l'action chimique et l'électricité se produisent en même temps : au même point, ce sont deux effets corrélatifs d'une même cause encore inconnue.

1. Gassiot, physicien anglais.

320. **Définitions.** — Un *élément* de pile comprend un métal attaquable, le zinc; un corps conducteur inattaquable ou peu attaquable, qui est le cuivre dans la pile de Volta; un liquide attaquant.

Les *pôles* ou *électrodes* d'une pile sont les extrémités où les électricités s'accumulent. Le pôle chargé d'électricité positive, ou pôle positif, est aussi appelé *anode*, l'autre est le pôle négatif ou *cathode*.

Si l'on réunit les deux pôles entre eux, les deux électricités qui y sont accumulées se recombinent; mais aussitôt la force électromotrice en développe une nouvelle quantité qui vient se recombinaer à son tour, et ce fait se reproduit d'une façon incessante. L'électricité se trouvant sans cesse en mouvement dans la pile et dans le conducteur qui joint les deux pôles, on a donné au phénomène produit le nom de *courant électrique*.

Le fil qui réunit les deux pôles de la pile est dit le *rhéophore*.

Le mot courant vient de ce que l'on avait supposé au début que l'une des électricités, par exemple la positive, se propageait dans le rhéophore d'un pôle vers l'autre; d'après cela, on dit, et ceci est resté dans le langage, que *le courant va dans le rhéophore du pôle positif au pôle négatif, et du pôle négatif au positif à l'intérieur de la pile*.

321. **Inconvénients de la pile à colonnes.** — On a bien vite abandonné la pile à colonnes, parce que les rondelles de drap, pressées par le poids de la pile, laissent écouler le liquide qu'elles contiennent, ce qui arrête l'action. En cherchant à remédier à cet inconvénient dans les piles nouvelles, on a tenu compte aussi de ce que la force électromotrice, se développant au lieu où se trouve l'action chimique, les deux couples extrêmes n'avaient pas de raison d'être, et qu'il suffisait d'une rondelle de zinc à une extrémité et d'une rondelle de cuivre à l'autre; cette suppression d'un zinc et d'un cuivre fait que le pôle positif est sur le cuivre, le négatif sur le zinc.

322. **Pile à auge.** — Formons la pile à colonne, non plus de disques, mais de plaques rectangulaires, couchons-la horizontalement; si, de plus, nous formons avec chaque plaque une cloison dans une auge de bois, nous aurons la

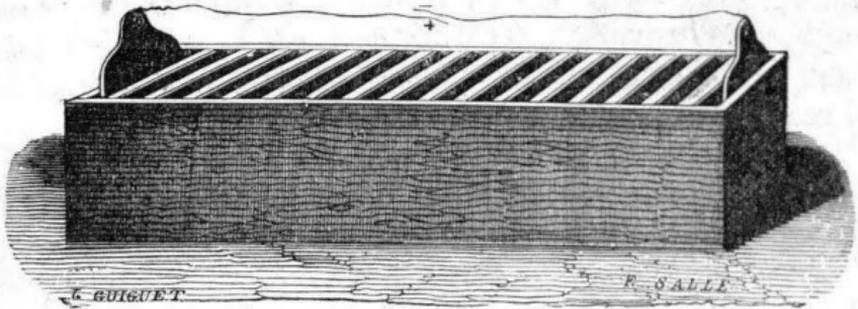


Fig 147. Pile à auge.

pile à auge (fig. 147). L'eau acidulée est placée entre chaque compartiment, et comme elle n'a plus besoin de support, les morceaux de drap sont supprimés.

323. **Pile de Wollaston.** — Les piles à auge ont été remplacées par celles de Wollaston¹. Un élément de cette pile se compose d'une lame de zinc *a* (fig. 148), entourée par une lame de cuivre *c*, qui ne la touche pas; de petits morceaux de bois isolants s'opposent au contact. On plonge l'élément dans un vase en cuivre, contenant de l'eau acidulée; le zinc s'attaque, la force électromotrice se développe au point où l'action chimique a lieu, le fluide négatif se répand sur le zinc, et le positif dans l'eau acidulée où il se trouve recueilli par la lame de cuivre qui devient l'électrode positive. Pour former une pile avec des

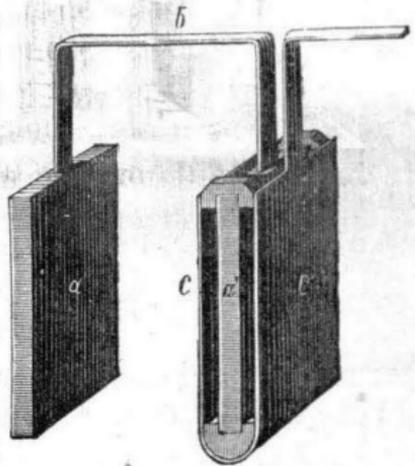


Fig. 148.

Éléments de Wollaston.

1. Wollaston, physicien anglais.

éléments de Wollaston, on réunit (fig. 149) le zinc d'un élément au cuivre du suivant; le cuivre et le zinc qui restent seuls deviennent les deux pôles. Toute la partie métallique est attachée à une traverse en bois; en soulevant cette traverse, on enlève la partie métallique de l'eau acidulée, et l'on fait cesser l'action; pour que celle-ci recommence, on abaisse la traverse.

324. **Sens du courant dans les piles.** — Dans toute pile où le corps attaqué est le zinc, et le corps attaquant l'eau acidulée ou simplement salée, le sens du courant est défini

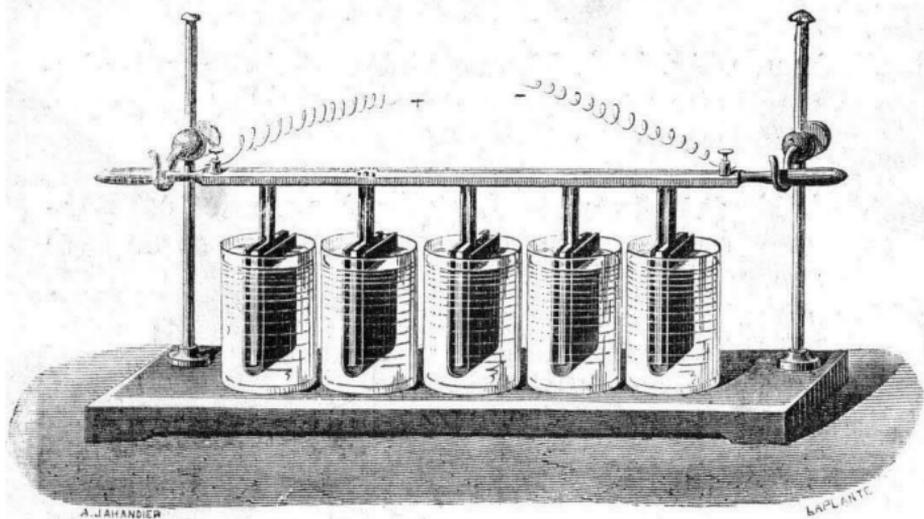


Fig. 149. Pile de Wollaston.

par ce fait que le courant marche à l'intérieur de la pile du corps attaqué vers le corps attaquant.

325. **Expérience d'Ørstedt.** — La présence d'un courant électrique dans un circuit se reconnaît à l'aide de l'aiguille aimantée. C'est Ørstedt qui montra que les courants agissaient sur les aimants mobiles et en modifiaient la direction. Cette action augmente quand le courant s'approche, et diminue quand il s'éloigne. Supposons une

aiguille aimantée *ab* (fig. 150), mobile au-dessus d'un cercle horizontal, sur lequel sont tracés les points cardinaux; l'aiguille étant dans la direction NS, on place au-dessus un fil traversé par un courant, et aussitôt l'aiguille est déviée; si l'on a eu soin de neutraliser l'action de la terre en plaçant à distance de l'aiguille un fort aimant agissant en sens inverse du globe terrestre, l'ai-

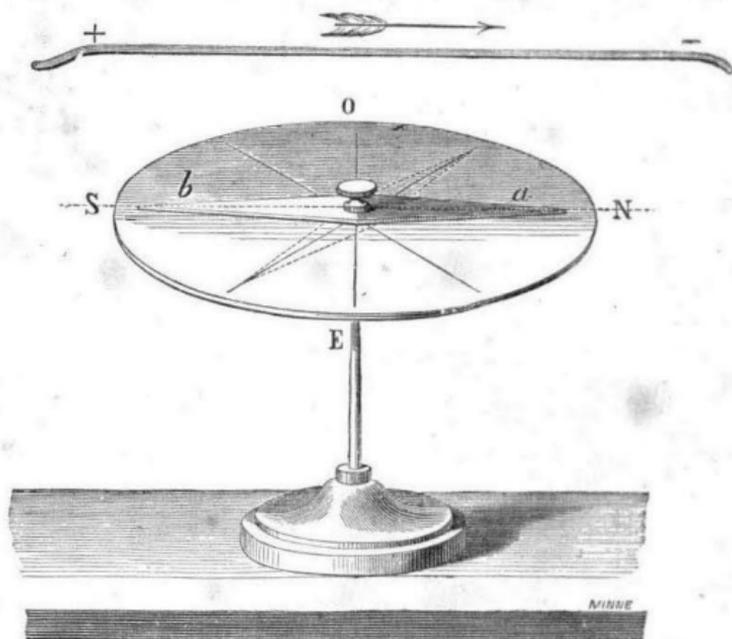


Fig. 150. Expérience d'Øerstedt.

guille se met rigoureusement en croix avec le courant. Si l'on change le sens du courant, la déviation change de même; si l'on place le courant au-dessous de l'aiguille, celle-ci subit une action contraire.

326. **Loi d'Ampère.** — Øerstedt avait énoncé d'une manière fort compliquée la loi du phénomène. Ampère ¹ a trouvé un énoncé simple et ingénieux qui satisfait à tous

1. Ampère (André-Marie), né en 1775 à Polémieux près de Lyon, mort en 1837, membre de l'Académie des sciences, professeur au Collège de France; l'un des hommes les plus éminents de notre siècle, il était physicien, mathématicien et philosophe.

les cas. Il suppose dans le rhéophore un observateur (fig. 151 et fig. 152) regardant l'aiguille aimantée, placé dans le courant qui va de ses pieds à sa tête; *cet observateur voit toujours le pôle austral de l'aiguille à sa gauche*. On définit donc la droite et la gauche d'un courant d'après la droite et la gauche de l'observateur d'Ampère.

327. **Galvanomètre.** — L'expérience d'OErstedt a conduit Schweigger à construire un instrument appelé *multiplicateur* ou *galvanomètre*. Soit *ab* une aiguille aimantée

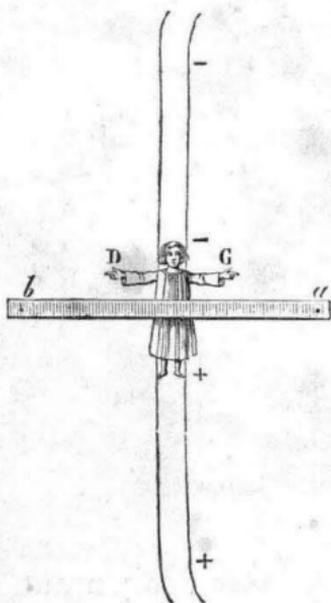


Fig. 151. Loi d'Ampère.

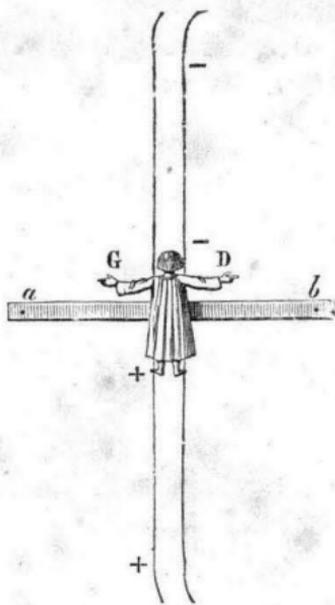


Fig. 152. Loi d'Ampère.

(fig. 153), *qxy*n le rhéophore d'un courant vertical contourné en rectangle; l'aiguille, étant suspendue par un fil, peut tourner autour de son centre dans un plan horizontal. Le rectangle *qxy*n a été, avant le passage du courant, placé dans le plan du méridien magnétique. Si on examine successivement les actions des quatre côtés du rectangle, on voit qu'elles tendent toutes à porter le pôle austral du même côté, c'est-à-dire en avant du papier. Il en sera de même si l'on fait faire au circuit plu-

sieurs tours sur un cadre rectangulaire en bois, entourant l'aiguille, pourvu que le courant circule de même dans chacune des spires. On a soin d'ailleurs de recouvrir le fil d'une substance isolante pour éviter la communication entre les diverses parties du circuit. L'on a ainsi le multiplicateur de Schweigger (fig. 154), qui tire son nom de ce que le nombre des spires multiplie en quelque sorte l'action du courant. Ampère avait d'ailleurs posé le principe du galvanomètre, seulement il ne se servait que d'un tour de fil.

328. **Galvanomètre de Nobili.** — L'appareil de Schweigger manquait de sensibilité, l'action de la terre étant par

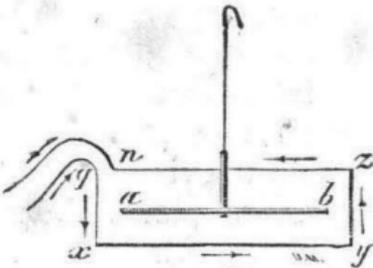


Fig. 153.

Principe du galvanomètre.

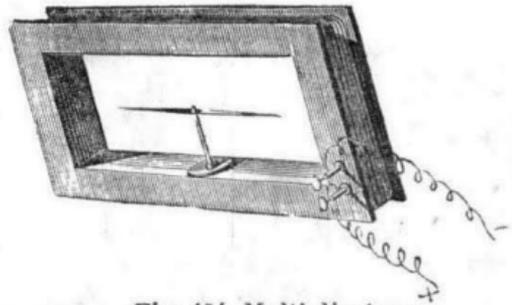


Fig. 154. Multiplicateur.

trop prépondérante. Nobili le perfectionna en remplaçant l'aiguille par ce que l'on appelle un système de deux *aiguilles astatiques*. Il consiste en deux aiguilles aimantées (fig. 155), l'une intérieure, l'autre extérieure au cadre; elles sont fixées en sens

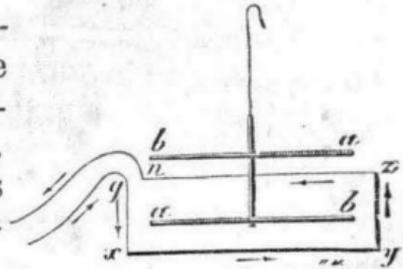


Fig. 155. Principe du galvanomètre de Nobili.

inverse et sur une même tige de bois ou de laiton, suspendues par un fil de soie sans torsion et aussi identiques que possible. On place le cadre dans le plan du méridien magnétique, il est alors dans celui des deux aiguilles; on fait ensuite passer le courant, le système est dévié. Les parties horizontales du cadre agissent en sens contraire sur l'aiguille supérieure,

mais l'action de la plus rapprochée prédomine et s'ajoute à celle qui est produite sur l'aiguille inférieure. Les courants verticaux *agissent en sens inverse sur l'aiguille supérieure et sur l'inférieure*; mais c'est l'action sur cette dernière qui l'emporte, parce qu'elle est la plus rapprochée, de sorte que l'action définitive est de même sens que si l'aiguille inférieure existait seule. Un cercle divisé OO (fig. 156) se trouve au-dessous de l'aiguille supérieure, et son diamètre 0-180° doit coïncider avec la direction du cadre *c*, et par suite avec le méridien magnétique, quand l'appareil est en expérience. Ce disque divisé est en cuivre et percé seulement d'un petit trou en son milieu. S'il était évidé au lieu d'être plein, l'expérience prouve que les oscillations de l'aiguille mettraient beaucoup plus de temps à s'amortir. L'appareil est recouvert d'un cylindre de verre pour préserver les aiguilles des agi-

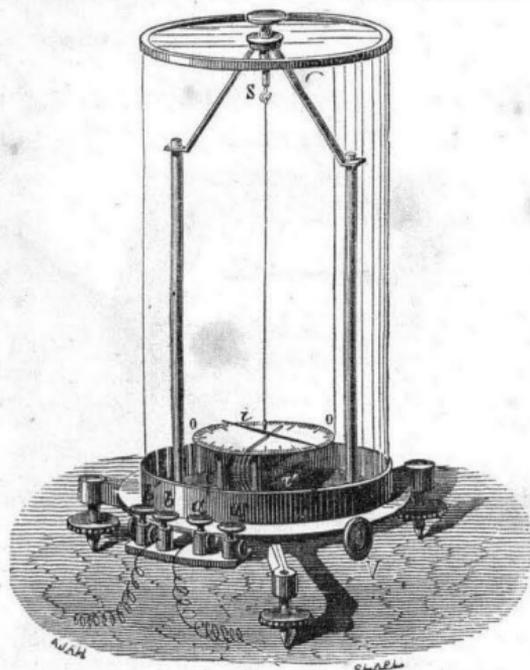


Fig. 156. Galvanomètre de Nobili.

tations de l'air. Le fil de suspension est attaché à un crochet S.

329. Usages du galvanomètre. — Le galvanomètre sert à reconnaître l'existence des courants faibles; il permet de constater quel est de deux courants le plus intense, la plus grande intensité du courant amenant une plus forte déviation de l'aiguille. On se sert de l'appareil de Schweigger si les courants ont une énergie sensible, et de

celui de Nobili dans le cas contraire; mais l'on conçoit qu'alors le système des aiguilles ne doit plus être rigoureusement astatique, parce qu'alors ces aiguilles se placeraient perpendiculairement au courant, quelle que soit son intensité. Les déviations ne sont d'ailleurs pas proportionnelles à l'intensité des courants, mais l'on peut construire une table permettant de déduire la valeur des intensités de celle des déviations.

330. **Galvanomètre différentiel.** — Quelquefois le cadre reçoit deux fils identiques enroulés côte à côte. Les extrémités de l'un sont attachées aux poupées *a* et *b*, tandis que celles de l'autre sont fixées à *a'* et *b'*. En faisant passer dans les deux fils deux courants en sens contraire, on constate que ces deux courants sont égaux quand il n'y a pas de déviation de l'aiguille. Cet appareil, à deux fils, a reçu le nom de galvanomètre différentiel.

331. **Piles à courant constant.** — En faisant passer dans un galvanomètre le courant d'une des piles précédemment décrites, on constate que ce courant, énergique au début, va sans cesse en s'affaiblissant; on a obtenu d'autres piles dites à courant constant qui ne présentent pas cet inconvénient; parmi elles, on peut citer les suivantes.

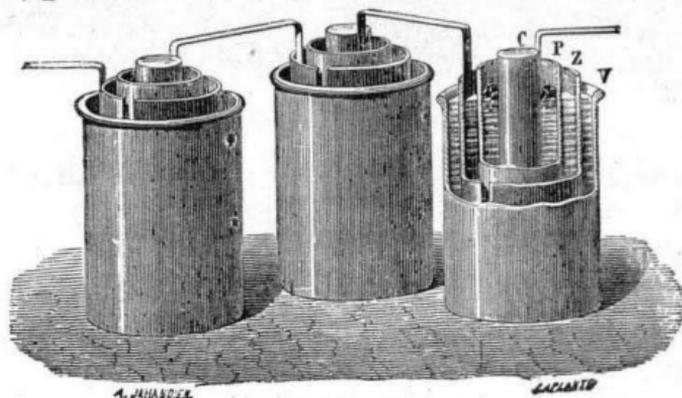


Fig. 157. Pile de Daniell.

332. **Pile de Daniell.** — Chaque couple de la pile de Daniell (fig. 157) est constitué de la manière suivante: Dans un vase

cylindrique de terre V se trouve de l'eau acidulée par l'acide sulfurique, dans laquelle plonge une lame de zinc Z. Un vase poreux P, plein d'une dissolution de sulfate de cuivre, sépare ce liquide de l'eau acidulée; un cylindre de cuivre C se trouve au centre de l'appareil. D'après la règle indiquée (324), le zinc est le pôle négatif, le cuivre le pôle positif. Les couples sont associés par les pôles de nom contraire. Cette pile donne des effets très-constants, pourvu que l'on maintienne saturée la dissolution de sulfate de cuivre, qui va sans cesse se décomposant. A cet effet, des cristaux de ce sel sont maintenus au sein de la dissolution.

333. **Pile de Bunsen.** — La pile de Bunsen n'a pas conservé sa forme primitive; on lui donne actuellement une forme

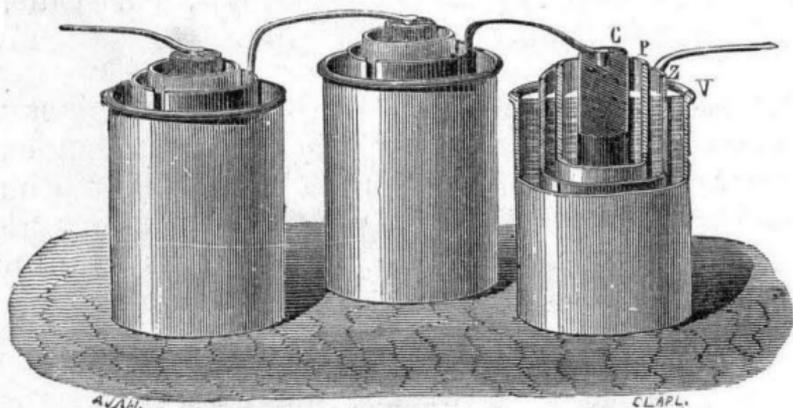


Fig. 158. Pile de Bunsen.

(fig. 158) qui reste connue en France sous le nom de Bunsen¹, bien qu'elle soit due à l'Anglais Grove², qui l'inventa avant que Bunsen eût conçu sa pile. L'appareil est tout semblable à celui de Daniell; la seule différence, c'est que le cylindre de cuivre est remplacé par un bâton de charbon

1. Bunsen (Robert-Guillaume-Éverard), chimiste éminent, professeur de chimie à Heidelberg, correspondant de l'Académie des sciences.

2. Grove (William-Robert), physicien anglais, vice-président de la Société royale de Londres, et conseiller de la reine, s'est adonné surtout à l'étude de l'électricité.

des cornues à gaz, et le sulfate de cuivre par de l'acide azotique marquant 40° à l'aréomètre de Baumé.

334. **Pile de Grove.** — En substituant une lame de platine au charbon dans la pile précédente, on obtient la pile de Grove telle qu'on l'emploie en Angleterre.

335. **Observations générales sur les piles. Amalgamation des zincs.** — On voit que, pour qu'un courant se produise, il faut la présence d'un métal attaquant, d'un liquide attaquant et d'un corps conducteur inattaqué, collecteur de l'électricité positive. Si l'on met du zinc ordinaire dans l'eau acidulée, toutes ces conditions se trouvent réalisées; les impuretés du métal formant le corps conducteur inattaqué. Une foule de courants circulent donc dans la liqueur, et en même temps il y a action chimique, c'est-à-dire dégagement d'hydrogène et dissolution du zinc. Si, au contraire, l'on emploie des matériaux purs, il manque un élément à la production du courant, le zinc ne s'attaque plus, l'hydrogène ne se dégage pas. Si l'on trempe dans la liqueur un fil de platine ou de tout autre métal inattaquable, l'action chimique, se produira, pourvu que ce métal touche le zinc; car alors le courant électrique pourra naître et circuler du zinc au liquide et au métal inattaqué pour revenir au zinc. En employant dans les piles du zinc impur, on détermine le développement de courants électriques partout où il y a des impuretés. Ces courants locaux sont produits en pure perte; ils occasionnent une dépense inutile de zinc et d'acide, et de plus, certains d'entre eux peuvent être inverses de celui de la pile et le détruire partiellement. L'emploi du zinc pur serait trop coûteux; l'on y remédie par l'usage du zinc amalgamé, qui se comporte comme un métal homogène. Quand dans une pile tous les zincs sont bien amalgamés, ceux-ci ne s'attaquent qu'autant que le circuit est fermé et que le courant circule; il n'y a plus de dépense perdue.

CHAPITRE II

ÉLECTROCHIMIE

336. **Définitions.** — Tous les corps composés, conducteurs de l'électricité, sont décomposés quand ils sont traversés par un courant électrique. Certains éléments de ces corps se portent au pôle positif, les autres au pôle négatif; on en a conclu que les premiers étaient attirés par l'électricité positive comme s'ils étaient eux-mêmes chargés d'électricité négative; pour cette raison, on les a appelés *corps électronégatifs*; de même, les autres ont reçu

le nom de *corps électropositifs*. Ces qualifications ont été conservées, bien qu'elles aient eu pour point de départ une hypothèse probablement fautive. On a appelé *électrolyte* le corps décomposé par la pile, et l'action de la décomposition a pris le nom d'*électrolyse*. Examinons successivement les cas les plus importants des décompositions effectuées par la pile.

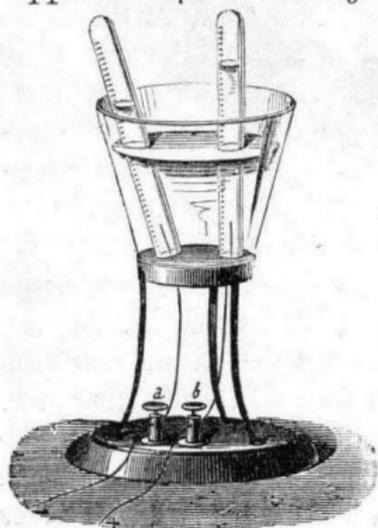


Fig. 159. Voltamètre.

337. **Électrolyse de l'eau.** — L'appareil que l'on emploie pour l'électrolyse de l'eau est dit *voltamètre* (fig. 159). C'est un verre dont le fond est traversé par deux fils de

platine qui y sont mastiqués et aboutissent aux bornes *a, b* que l'on met en communication avec les deux fils de la pile. On recouvre les deux électrodes de platine de deux éprouvettes graduées, et, quand le courant passe, l'hydrogène se dégage au pôle négatif, l'oxygène au pôle positif; chaque gaz vient se rendre dans l'une des éprouvettes. L'eau pure est peu conductrice, et la conductibilité du liquide est une condition nécessaire pour que le courant le traverse et qu'il y ait décomposition; aussi, quand on veut avoir un effet marqué, on ajoute à l'eau de l'acide sulfurique, qui, lui, ne se décompose pas dans ces circonstances; l'addition de $\frac{1}{10}$ de cet acide donne le maximum de conductibilité et rend la décomposition aussi active que possible. Nous avons supposé les électrodes en platine, c'est-à-dire inattaquables par les produits de l'électrolyse; s'il n'en est pas ainsi, il se produit des phénomènes secondaires; si, par exemple, le pôle positif était en zinc, l'oxygène, au lieu de se dégager, s'unirait à ce zinc pour former de l'oxyde de zinc qui se dissoudrait dans la liqueur à l'état de sulfate. Si l'électrode négative était, par exemple, de l'oxyde de cuivre, l'hydrogène serait absorbé et l'oxyde réduit. Ce sont là ce que l'on appelle des *actions secondaires*; il s'en produit souvent pendant les électrolyses. C'est ainsi, par exemple, que, dans la décomposition de l'eau, l'hydrogène dégagé se combine à l'oxygène dissous dans le liquide, et que si la température est suffisamment basse, une portion de l'oxygène produit se porte sur l'eau pour donner lieu à de l'eau oxygénée.

338. **Électrolyse des oxydes.** — L'électrolyse des oxydes métalliques est impossible quand ces corps sont anhydres, parce qu'alors ils ne sont pas conducteurs. Les hydrates, même solides, se décomposent plus aisément; le métal se porte au pôle négatif, l'oxygène au pôle positif, et ceci peut se graver facilement dans la mémoire en remarquant que les initiales M, N, O, P des mots *métal, négatif, oxygène, positif*, se succèdent dans l'alphabet,

dans un ordre qui indique à quel pôle se porte chaque corps. Ce procédé mnémotechnique peut s'appliquer à toutes les décompositions ; il suffit de se demander dans chaque

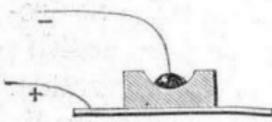


Fig. 160

Électrolyse des oxydes.

(fig. 160). Le moyen de l'effectuer dû à Davy¹, et perfectionné par Seebeck, est le suivant : Un fragment de potasse est placé sur une lame de platine ; et, dans une cavité pratiquée dans ce fragment, l'on a mis du mercure ; le pôle négatif d'une pile plonge dans le mercure ; le pôle positif est en communication avec la lame de platine ; le potassium se dégage au contact du mercure et se combine avec lui.

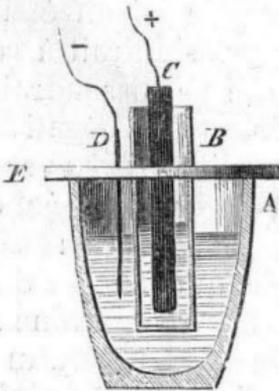


Fig. 161. Électrolyse des composés binaires.

339. Électrolyse des composés binaires.

— Quand le corps est conducteur, il y a décomposition : le métal se porte au pôle négatif, l'autre corps au pôle positif. Comme exemple, citons la préparation du magnésium par le procédé de Bunsen. Les électrodes D et C (fig. 161) sont en charbon de cornue, l'électrolyte est du chlorure de magnésium rendu conducteur par la fusion. Dans un creuset de porcelaine, l'on introduit un diaphragme en terre poreuse, qui maintient la séparation entre le chlore qui se dégage sur C, et le magnésium qui se porte en D. Ce dernier charbon présente des dents dirigées de haut en bas. Ces saillies retiennent le

1. Davy (Humphry), né à Penzance dans le comté de Cornouailles, le 17 décembre 1778, fut couronné en 1807 par l'Institut de France, pour ses travaux sur la décomposition des corps par la pile. et obtint un sauf-conduit spécial pour venir recevoir le prix qui lui était décerné. Davy est un des grands génies de son temps ; il mourut le 30 mai 1829.

magnésium qui, plus léger que le liquide, tend à se rendre à la surface où il se combinerait à l'oxygène de l'air. Un couvercle E supporte toutes ces pièces.

340. **Électrolyse des sels.** — Nous considérerons successivement le cas des sels métalliques proprement dits, puis celui des sels alcalins. Comme exemple du premier cas, examinons ce qui se passe quand le sulfate de cuivre est soumis à l'action d'un courant voltaïque. Sur le pôle négatif se dépose le métal ; au pôle positif, il se dégage de l'oxygène, et l'on trouve de l'acide libre. Tout se passe comme si le sel était un composé binaire, constitué par du cuivre qui se porte au pôle négatif, et, par un élément complexe, résultant de l'union de l'acide et de l'oxygène, qui se porte au pôle positif où il se dédouble à cause de son instabilité. Si l'électrode positive est attaquable, il n'y a plus de dégagement d'oxygène, ni d'acide libre, mais formation d'un sulfate ayant pour base l'oxyde de l'électrode. Si cette électrode, par exemple, est en cuivre, il s'en dissout à chaque instant une quantité égale à celle du cuivre qui se dépose sur l'électrode négative, de sorte que la composition de la liqueur reste constante et que le résultat est un transport de cuivre d'une électrode à l'autre.

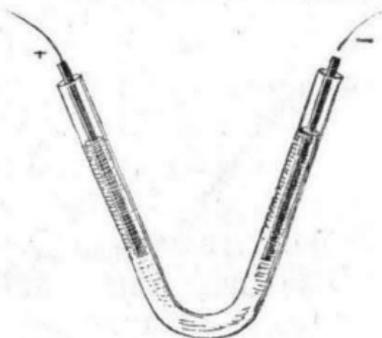


Fig. 162. Électrolyse des sels.

341. Soit maintenant le cas d'un sel alcalin, par exemple du sulfate de potasse. Faisons l'expérience dans un tube ayant la forme d'un siphon renversé (fig. 162) ; mélangeons à la dissolution du sulfate assez de sirop de violette pour donner à la liqueur une teinte très-appreciable. Quand le courant passe on voit des bulles d'oxygène se dégager au pôle positif, et de l'hydrogène se dégage en même temps au pôle négatif ; les quantités de ces gaz sont telles que, réunies, elles formeraient de l'eau. La liqueur

rougit au pôle positif où se rend l'acide sulfurique ; elle verdit à l'autre pôle, attestant ainsi la présence de la potasse. Au premier abord, l'on pourrait croire que la décomposition n'est pas la même pour les deux sulfates considérés. Il n'en est rien ; au pôle positif on trouve, en effet, les mêmes substances ; quant au pôle négatif, le potassium dégagé a immédiatement décomposé l'eau par action secondaire et engendré ainsi de la potasse et un dégagement d'hydrogène.

342. **Causes de la constance dans les piles à deux liquides.** — Il est facile maintenant de comprendre pourquoi les piles de Daniell, Bunsen, etc., dites *piles à deux liquides*, donnent des courants plus constants que les autres. Le courant électrique, en traversant le liquide de la pile, agit sur lui comme sur un électrolyte : il décompose l'eau acidulée. Ce courant marchant dans la pile du pôle négatif au pôle positif, et non pas du pôle positif au pôle négatif comme dans le rhéophore, il en résulte que l'hydrogène se dépose sur le corps collecteur de l'électricité positive, c'est-à-dire sur le cuivre dans la pile de Wollaston et ses analogues. Là il se forme une gaine peu conductrice que le courant ne traverse qu'avec peine, ce qui diminue son intensité. Pour prouver que telle est bien la cause de l'affaiblissement de la pile, il suffit de retirer les couples du liquide attaquant, pendant juste assez de temps pour que l'hydrogène qui s'est condensé sur le cuivre ait pu se dégager ; en remettant la pile en action, on voit qu'elle a repris son énergie première. Dans la pile de Daniell, l'hydrogène en se portant sur le cuivre rencontre le sulfate de cuivre, il se substitue au métal dans ce sel pour former de l'acide sulfurique hydraté, et c'est le cuivre ainsi produit qui se dépose sur le métal collecteur de l'électricité positive, ce qui ne peut en rien altérer la conductibilité du circuit. Dans les piles de Bunsen et de Grove, l'hydrogène naissant réduit l'acide azotique. Il y a production d'eau et d'acide hypoazotique qui se dissout dans l'acide azotique. C'est

quand cette dissolution est saturée, ce qui arrive rapidement, que ces piles donnent des émanations acides. Dans toutes les piles à courant constant, l'hydrogène est ainsi détruit avant d'avoir pu se dégager à l'état gazeux.

Exercice : Une pile est constituée comme la pile de Bunsen ; seulement, à la place de l'acide azotique, se trouve du sulfate de mercure assez humide pour être conducteur ; pourquoi cette pile, due à M. Marié-Davy, est-elle à courant constant ?

343. Argenture. — La décomposition des sels par la pile permet de déposer certains métaux sur d'autres moins précieux ; c'est le cas de l'argenture. La première précaution à prendre dans cette opération consiste à nettoyer la surface que l'on doit recouvrir d'argent ; cette précaution est tellement importante que, si elle n'est pas faite avec un grand soin, l'insuccès est certain. Deux procédés sont pour cela en usage, l'un par voie sèche, l'autre par voie humide. Dans le premier, l'on nettoie la surface à l'aide de ponce fine, et d'une brosse bien propre, exempte surtout de corps gras ; dans le second procédé, on plonge l'objet à argenter successivement dans une liqueur acide qui enlève les oxydes et dans une liqueur alcaline qui dissout les matières grasses. La liqueur acide peut, par exemple, être composée de :

Acide sulfurique.	320 gr.
Eau.	320
Acide azotique	160
Acide chlorhydrique.	5

On ne laisse guère qu'une ou deux secondes dans ce bain l'objet attaché à l'extrémité d'un fil, puis on le lave à grande eau. Si l'objet présente des détails un peu délicats, il faut étendre d'eau la liqueur et laisser séjourner plus longtemps. Le bain alcalin doit être employé bouillant ; c'est, par exemple, une dissolution de soude caustique. Il faut après l'action de tous ces bains procéder à des lavages prolongés, à l'eau distillée ou à l'eau de pluie. Après cette opération préliminaire, l'objet à argenter est immergé

dans une cuve (fig. 163) pleine d'une solution argentifère; il est suspendu par un fil de cuivre qui lui-même est soutenu par une tige métallique posée sur les bords du vase; cette tige communique par un fil conducteur avec le pôle zinc d'une pile à courant constant; le pôle positif de la même pile est relié à une lame d'argent qui plonge dans le bain. Par suite de la décomposition du sel, l'argent se dépose au pôle négatif; mais, en même temps, la lame du pôle positif se dissout, parce qu'elle se combine au corps électro-négatif que l'action du courant amène à son contact. La nature du sel d'argent n'est pas indifférente. Les sels qui contiennent un acide énergique, comme le nitrate

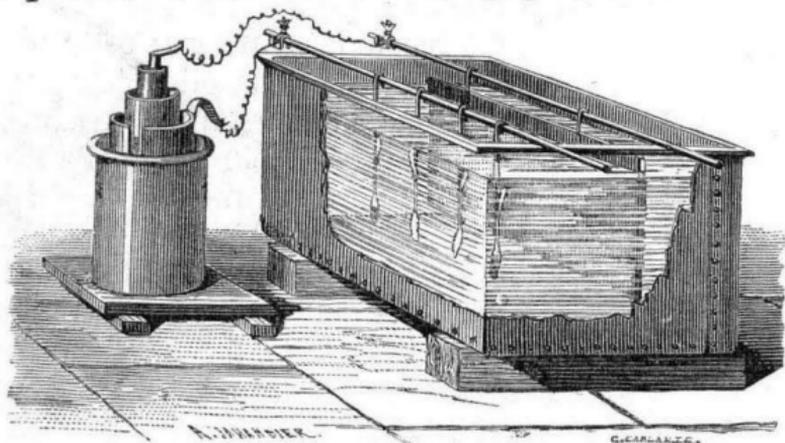


Fig. 163. Argenture par la pile.

d'argent, donneraient lieu à une action trop énergique, le dépôt ne serait ni régulier, ni solide, ni adhérent; il faut avoir recours à du cyanure double d'argent et de potassium préparé avec le nitrate d'argent et le cyanure de potassium. On obtient un excellent bain à argenter en dissolvant dans 1 kilogramme d'eau 20 grammes de cyanure de potassium, puis 10 grammes de cyanure d'argent.

344. **Dorure électrochimique.** — La dorure est fondée sur le même principe que l'argenture; il faut décaper les objets avec le même soin, et l'on se sert du même appareil. Quant au liquide à employer, c'est aussi une dissolution

de cyanure double de potassium et d'or. On emploie d'ordinaire une dissolution de 20 grammes de cyanure de potassium et 10 grammes de chlorure d'or dans 1 kilogramme d'eau. Si le cyanure était en trop grande quantité, il dissoudrait l'or à mesure que la précipitation aurait lieu. On active l'opération en maintenant la température à 60 ou 80 degrés, mais les bains s'altèrent alors plus rapidement. Le même bain peut donner au dépôt des colorations diverses. Plus l'intensité du courant est grande, plus la teinte de l'or est rouge; en ajoutant une petite quantité de cyanure d'argent dans le bain, la teinte devient pâle; elle passe à celle de l'or vert quand la proportion d'argent atteint le $\frac{1}{12}$ de celle de l'or.

345. **Cuivrage de la fonte.** — Beaucoup d'objets exposés à l'air, tels que les candélabres à gaz, les statues, les balcons, sont en fonte et s'altèrent rapidement par oxydation. Il faut, pour y remédier, les recouvrir de peintures toujours fort laides et qui doivent être renouvelées fréquemment. Argenter ou dorer cette fonte pour la préserver serait un moyen trop coûteux; on se borne à recouvrir ces objets d'une couche de cuivre; c'est à M. Oudry que l'on doit cette nouvelle industrie qui fonctionne en grand dans l'usine d'Auteuil. Les candélabres de la ville de Paris, la fontaine de la place Louvois, toutes celles des Champs-Élysées et de la place de la Concorde ont été ainsi revêtues d'une couche protectrice de cuivre; ce dernier métal se conserve à l'air d'une façon presque indéfinie, surtout quand il est à l'état de dépôt galvanique. Une difficulté était à vaincre dans cette opération; si l'on dépose le cuivre sur la fonte directement, ou même après avoir eu soin de recouvrir celle-ci d'une couche de plombagine, il s'établit rapidement une action intérieure entre les deux couches de métal, la fonte s'oxyde, le cuivre se désagrège et se présente sous forme d'une bouillie épaisse. M. Oudry commence par recouvrir les points à cuivrer d'un enduit isolant à la benzine, on plombagine ensuite,

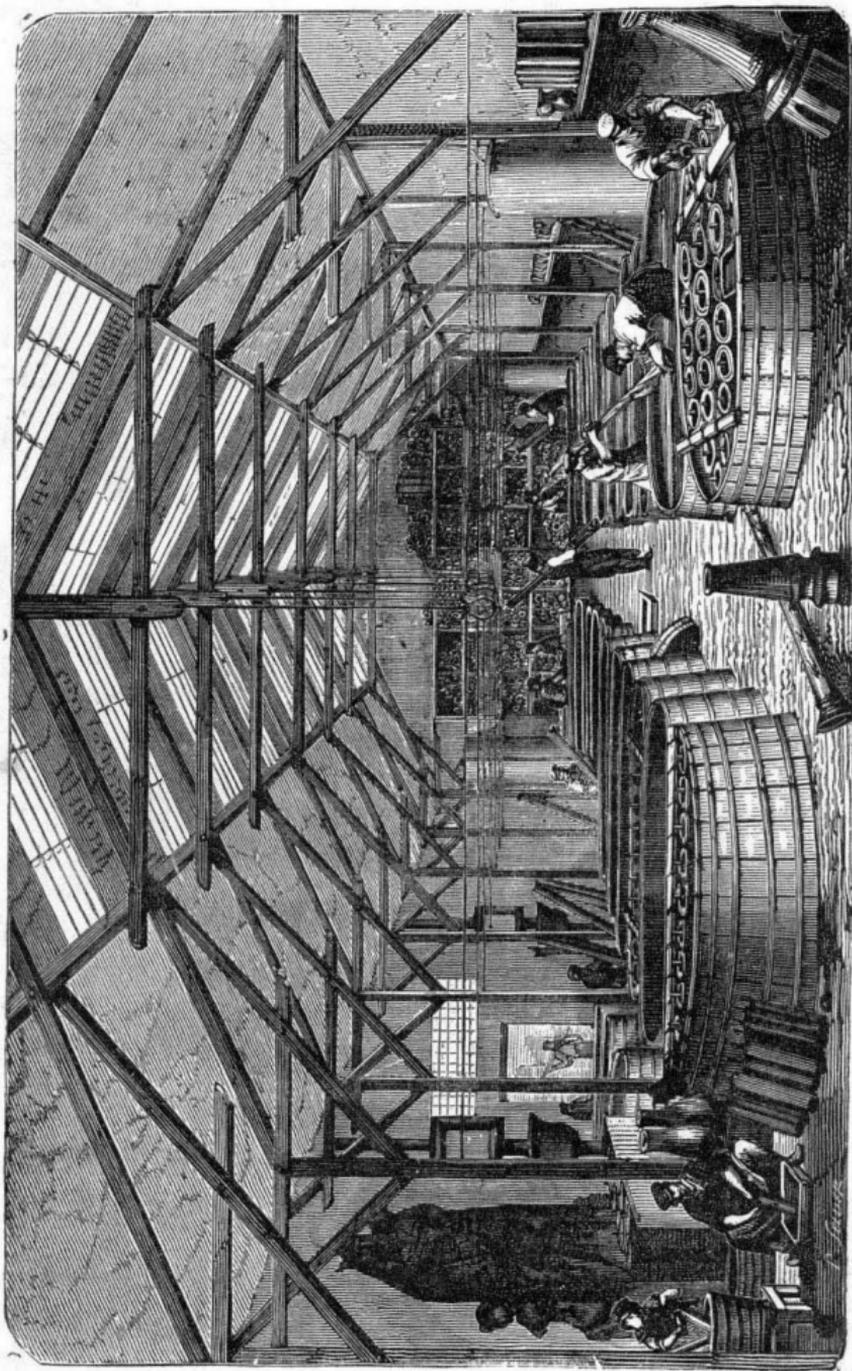


Fig. 164. Atelier de cuivrage.

puis on place l'objet dans un bain de sulfate de cuivre et on soumet à l'action de la pile. Retiré du bain, le cuivre a un aspect rose qui se modifie à l'air; on accélère ce changement de teinte en frottant à la brosse avec une liqueur composée principalement d'ammoniaque et d'acétate de cuivre; cette liqueur attaque légèrement la surface du cuivre et il se forme une patine verdâtre fort agréable à l'œil et d'une parfaite durée. La figure 164 représente un atelier de cuivrage de la fonte.

346. **Galvanoplastie.** — On appelle *galvanoplastie* l'art de reproduire en cuivre certains objets. On commence par mouler ces objets. Parmi les matériaux propres à faire des moules, on emploie principalement la cire, la stéarine, la gutta-percha, le plâtre, certains alliages fusibles. Supposons que l'on veuille reproduire une médaille métallique; on prend de la cire blanche ordinaire, on la fait fondre dans un vase de terre que l'on maintient sur le feu encore quelques instants après fusion complète. La médaille à reproduire est chauffée assez pour que la cire que l'on versera sur elle ne puisse se figer subitement. On entoure cette médaille d'un rebord formé avec un morceau de fort papier autour duquel on enroule un fil, afin de le maintenir. On enduit la surface de la médaille d'une très légère couche d'huile d'olive destinée à empêcher l'adhérence; on verse alors la cire fondue et on laisse refroidir pendant cinq ou six heures avant de chercher à détacher le moule, car, sans cette précaution, on s'expose à le voir se fendre. Il est quelquefois difficile d'effectuer cette séparation, il faut alors chauffer légèrement la médaille, de manière à la dilater quelque peu; on enlève le moule en tirant perpendiculairement à la surface de la médaille. Les moules de stéarine s'obtiennent de même. Pour ceux en gutta-percha (fig. 165), on ramollit cette substance dans l'eau chaude, puis on prend une empreinte en pétrissant sur l'objet à reproduire que l'on a préalablement frotté de savon, pour prévenir l'adhérence.

On peut faire aussi des moules en plâtre, mais il faut les imprégner de cire pour qu'ils puissent être recouverts de métal sans que celui-ci pénètre dans leurs pores. L'objet à reproduire, au lieu d'être une médaille métallique, peut être une médaille de plâtre; dans ce cas, on verse de l'eau bouillante dans une assiette, on y place le modèle de façon que la face à reproduire soit tournée vers la partie supérieure et que l'eau ne puisse l'atteindre. Au bout de quelques minutes, le plâtre est complètement imprégné d'eau, alors on se hâte d'entourer la médaille d'un ruban de pa-



Fig. 165. Moule d'une médaille en gutta-percha pour galvanoplastie.

pier fort et on y verse immédiatement la matière fondue destinée à servir de moule. Pour donner à la cire, à la stéarine, à la gutta-percha, etc., la conductibilité qui leur manque, on recouvre leur surface de plombagine, à l'aide d'une brosse très-souple. On continue l'opération jusqu'à ce que, par l'effet de la friction, le moule présente unifor-

mément le brillant de la mine de plomb ; il faut avoir soin de frotter également toutes les parties. On sertit le moule avec un fil de métal, et on étend sur ce fil de la plombagine de manière à le mettre en bonne communication électrique avec la surface du moule. Le fil est fixé au pôle négatif d'une pile et le moule plonge dans un bain de sulfate de cuivre en dissolution concentrée ; en regard et dans le même bain se trouve une lame de cuivre communiquant avec le pôle positif. Lorsque le moule présente des cavités trop prononcées, on doit faire usage de *guides métalliques* ; ce sont des fils de cuivre qui s'attachent au fil sertisseur et qui pénètrent au fond des cavités. Ces guides sont encore nécessaires quand les moules ont de grandes dimensions.

347. *Électrotypie*. — On appelle *électrotypie* la reproduction galvanoplastique des planches gravées. Il y a deux sortes de gravure : dans l'une, le trait est en relief, c'est le cas de la gravure sur bois ou typographie ; dans l'autre, le trait est en creux, c'est le cas de la gravure en taille-douce pratiquée sur des planches de cuivre ou d'acier. Dans la typographie, le bois s'écrase après un certain nombre de tirages ; dans la gravure en taille-douce, il y a usure de la planche, et l'épreuve obtenue au bout d'un certain temps manque de netteté ; de là le haut prix des gravures en taille-douce, principalement des premières tirées, ou gravures avant la lettre. Aujourd'hui, la galvanoplastie permet de reproduire autant de fac-simile que l'on veut de la planche originale ; ce résultat a été promptement atteint pour la typographie, mais avec beaucoup plus de peine dans le cas de la gravure en taille-douce. On avait d'abord cherché à faire des moules en gélatine ou en gutta-percha, mais il a fallu y renoncer ; on reproduit par galvanoplastie et en relief la planche elle-même placée pour cela dans le bain, on obtient ainsi ce que l'on appelle une *coquille* ; la coquille, à son tour, sert à recevoir un dépôt électrochimique, et l'on

a le *cliché*, en tout semblable à la gravure. L'électrotypie n'en est pas moins un art très-délicat; il faut éviter, en reproduisant la coquille, que celle-ci s'attache à la planche gravée qui serait ainsi perdue; il faut, en outre, préserver cette planche de l'action corrosive des bains.

CHAPITRE III

ÉLECTRODYNAMIQUE

348. **Découverte d'Ampère.** — Après qu'OErstedt eut indiqué l'action du courant électrique sur l'aiguille aimantée, Ampère pensa que, réciproquement, un aimant fixe devait diriger un courant mobile; il fut ainsi amené à découvrir une branche de la physique qui porte le nom d'*électromagnétisme*. Il lui fallut, dans ces recherches, obtenir des courants mobiles, et il reconnut que ces courants réagissaient les uns sur les autres par attraction et répulsion. L'étude de ces actions constitue l'*électrodynamique*.

349. **Moyen d'obtenir des courants mobiles.** — Les conducteurs mobiles d'Ampère ont été, depuis, avantageusement modifiés; nous allons décrire ceux de M. Obelliane qui sont les plus commodes à employer.

Une tige métallique (fig. 166) porte, à sa partie supérieure, une petite capsule en métal, au fond de laquelle est mas-

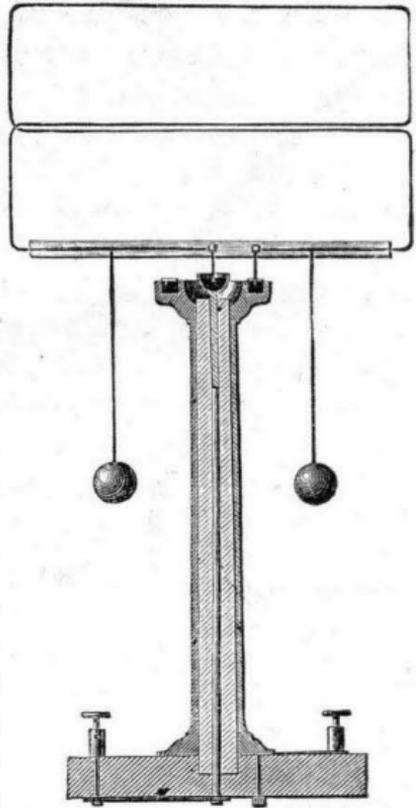


Fig. 166. Support d'Obelliane.

tiquée une plaque de verre horizontale et que l'on remplit de mercure; cette tige est entourée d'une substance isolante, et est située dans l'axe d'une enveloppe métallique. Sur cette enveloppe s'applique un curseur formant une capsule annulaire, dans laquelle on met de l'eau acidulée; un fil contourné repose sur cet appareil au moyen d'une pointe d'acier qui porte sur la plaque de verre; cette pointe fait passer le courant du mercure dans le fil mobile dont l'autre extrémité plonge dans l'eau acidulée du curseur. Une petite lame de bois soutient le fil, et des contre-poids en plomb le maintiennent en équilibre stable. Supposons que l'on fasse arriver le courant par la tige centrale; après avoir traversé le conducteur mobile, il retournera à la pile par l'enveloppe métallique. Dans cet appareil, la partie mobile peut, sans buter contre aucun obstacle et sans que le courant cesse de la traverser, tourner d'une manière continue autour d'un axe vertical. Dans les appareils primitifs d'Ampère, le conducteur mobile ne pouvait faire un tour complet.

350. **Commutateur.** — Il est souvent utile de changer le sens du courant dans le conducteur mobile; on y arrive à l'aide d'appareils appelés *commutateurs*. Ces appareils ont des formes très-diverses: l'un des plus simples consiste (fig. 167) en une planchette sur laquelle sont fixées quatre bornes, 1, 2, 3, 4, communiquant, 1 et 3 avec la pile, 2 et 4 avec le circuit dans lequel on lance le courant. Au centre de la plaque est un cylindre vertical sur lequel sont fixés deux demi-anneaux métalliques mis en relation par quatre ressorts avec les quatre bornes. Dans la position de la figure, le courant passe de la borne 1 à la borne 4, revient à 2, puis à 3, et de là à la pile. Mais tour-

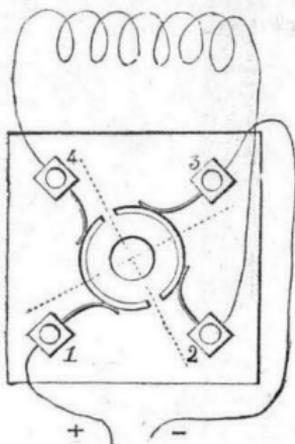


Fig. 167. Commutateur.

nous le cylindre autour de son axe de 90° , et le courant, entrant dans 1, passera à 2, puis à 4 et à 3; le sens du courant aura donc été renversé dans le fil qui s'attache aux bornes 2 et 4.

351. Loi des courants parallèles. — Deux courants paral-

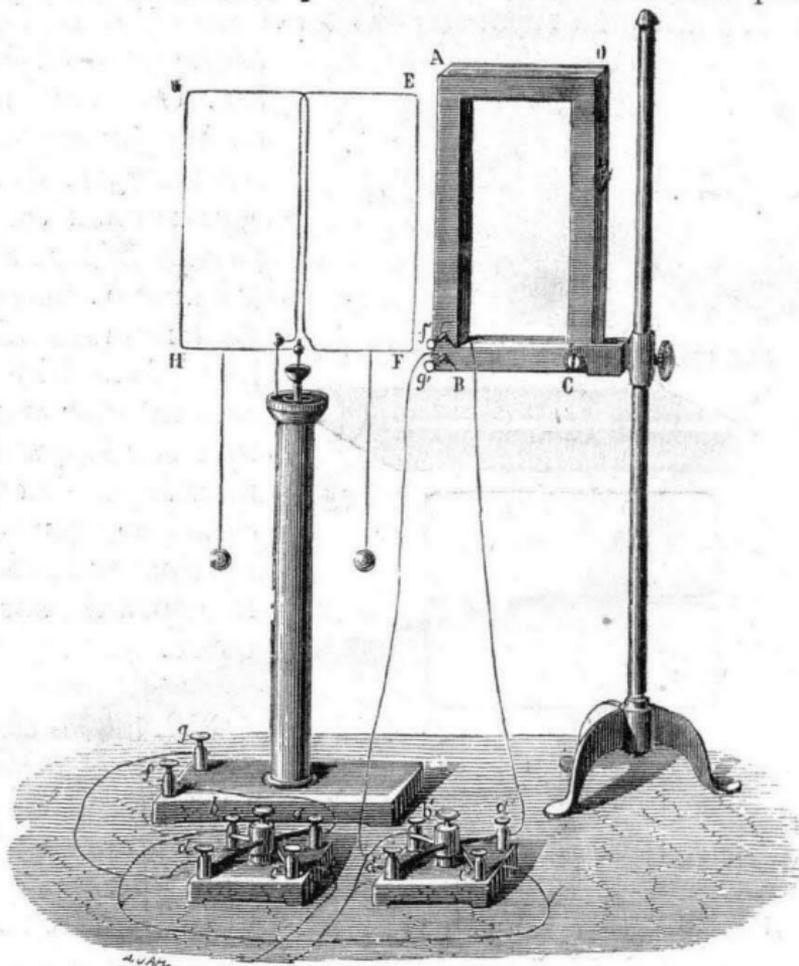


Fig. 168. Loi des courants parallèles.

lèles s'attirent quand ils vont dans le même sens, ils se repoussent quand ils vont en sens contraire. Pour le prouver, on se sert d'un cadre ABCD (fig. 168), assez semblable à celui d'un multiplicateur, et sur lequel est enroulé un fil conducteur isolé, dans lequel passe le courant de la

pile; le même courant est ensuite amené dans le circuit mobile EFGH. Deux commutateurs $abcd$ et $a'b'c'd'$ permettent de changer à volonté le sens du courant, soit dans ABCD, soit dans EFGH. Lorsque les deux courants AB et EF ne sont pas dans le même plan vertical avec l'axe de rotation, l'équilibre n'existe pas, et, suivant les cas, AB attire ou repousse EF. On reconnaît ainsi l'exac-

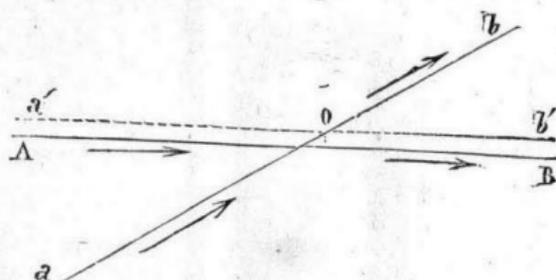


Fig. 169. Loi des courants angulaires.

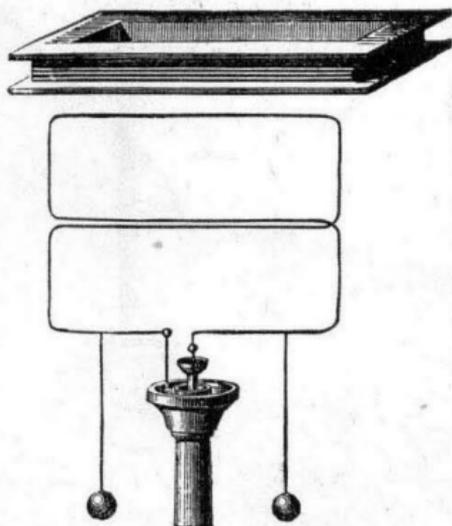


Fig. 170. Démonstration de la loi des courants angulaires.

titude de la loi énoncée. On peut noter en même temps que Schweigger, dans la construction de son galvanomètre, a pris à Ampère, non-seulement l'idée d'évaluer l'intensité des courants par leur action sur l'aiguille aimantée, mais encore celle de multiplier l'action, en enroulant le courant sur un cadre.

352. Loi des courants angulaires.— *Deux courants faisant entre eux un certain angle s'attirent, si tous deux s'approchent ou s'éloignent du sommet de*

l'angle; ils se repoussent quand l'un d'eux s'approchant de ce sommet, l'autre s'en éloigne. Si par exemple AB (fig. 169) est un courant fixe, ab un courant mobile, les portions Ob OB s'attirent suivant la loi, et il en est de même des portions aO , AO , par suite de cette attraction, si le courant ab est mobile autour de O , il viendra se placer sur $a'b'$.

Pour réaliser l'expérience, on place le cadre fixe (fig. 170) de l'expérience précédente au-dessus du courant mobile qui a une forme un peu différente, et les mouvements que l'on observe, suivant le sens du courant dans les deux conducteurs, vérifient la loi.

353. Loi de l'égalité de l'attraction et de la répulsion. — *Il y a égalité entre la force attractive et la force répulsive qu'un courant fixe peut exercer sur un même courant mobile, suivant le sens de ce courant.* Pour le démontrer, l'on a recours à l'appareil qui sert à établir la loi des courants parallèles. Sur le cadre fixe, l'on enroule côte à côte deux fils dans lesquels passe le même courant; l'action sur le courant mobile devient alors rigoureusement nulle, ce qui prouve que l'action attractive, développée par le courant dans l'un des fils, est égale à l'action répulsive qu'exerce le courant dans l'autre fil.

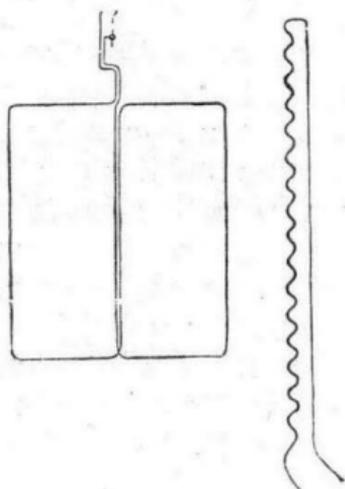


Fig. 171.

Loi des courants sinueux.

354. Loi des courants sinueux. — *L'action attractive ou répulsive que peut exercer un courant rectiligne est égale à celle qu'exercerait un courant sinueux, s'écartant peu du courant rectiligne et terminé aux mêmes extrémités.* Pour le démontrer, un courant (fig. 171), mobile autour d'un axe vertical, est disposé, près d'un rhéophore vertical, formé d'une portion rectiligne que le courant parcourt par exemple en montant, et d'une partie sinueuse que suit le courant en descendant. Le courant mobile reste insensible devant le courant fixe, parce que l'action de la partie sinueuse est rigoureusement égale et contraire à celle de la partie rectiligne.

CHAPITRE IV

ÉLECTROMAGNÉTISME

355. **Action directrice des aimants sur les courants.** — Le fait de la direction des courants mobiles par les aimants fixes est une conséquence nécessaire de la direction des aimants mobiles par les courants fixes. Ampère en obtint la vérification expérimentale en présentant un aimant fixe à un conducteur mobile ayant la forme d'un rectangle. Ce conducteur, traversé par le courant, se plaça en croix avec l'aimant, de façon que le pôle austral de l'aimant fût à la gauche du courant; les positions relatives se trouvaient ainsi les mêmes que dans l'expérience d'OErstedt.

356. **Action directrice de la terre sur les courants.** — La terre, agissant sur les aimants à la manière d'un autre aimant, doit avoir une action sur les courants; c'est ce qu'Ampère constate avec un conducteur mobile rectangulaire, qui vient se placer dans un plan perpendiculaire au plan du méridien magnétique, *le courant étant descendant dans la branche tournée vers l'est*. Dans ce circuit rectangulaire, l'action de la terre sur les portions horizontales doit se détruire, car ces portions sont traversées en sens contraire par le courant, et par suite soumises à des actions égales et contraires de la part de l'aimant terrestre. C'est donc sur les branches verticales que

s'exerce l'influence directrice; mais ici il est difficile de se rendre compte de la droite et de la gauche du courant; l'observateur d'Ampère, ayant l'aimant terrestre au-dessous de ses pieds, ne peut lui faire face, et la règle est en défaut.

357. **Action de la terre sur un courant vertical mobile autour d'un axe vertical.** — L'étude de l'action de la terre sur les courants verticaux est due à M. Pouillet. Son appareil (fig. 172) se compose d'une colonne métallique AB, à la partie supérieure de laquelle est fixée une cuvette de cuivre CC pleine d'eau acidulée. L'extrémité de la tige porte une capsule B à fond de verre. Sur ce fond s'appuie une pointed'acier, servant de pivot à une mince tige de bois; celle-ci porte à une extrémité un lest K, et à l'autre un fil *mno*p, dont la branche *op*, de beaucoup la plus longue, vient plonger dans une autre cuvette annulaire DD, isolée de l'axe AB. Le courant, dirigé dans la barre *f*, est amené par un fil métallique à la couronne AB, il passe dans la cuvette EC, suit le fil *mno*p, et, traversant le liquide de la cuvette DD, retourne à la pile par un fil relié à la borne *g*. On a ainsi un conducteur vertical *op* mobile autour de l'axe AB; les portions *mn*, *no*, doivent être assez petites pour qu'on puisse négliger leur influence devant celle de *op*. Dans ces conditions, l'on voit *op* se porter à l'est dans le plan vertical passant par AB, et perpendiculaire au plan du méridien magnétique. C'est la seule position d'équilibre stable. Si, à l'aide d'un

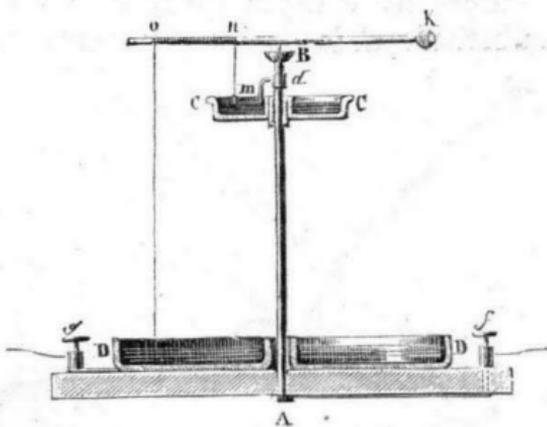


Fig. 172.

Action de la terre sur les courants verticaux.

commutateur, on changeait le sens du courant, de manière à le rendre ascendant dans la tranche op , on verrait cette branche se porter à l'ouest; ce serait la seule position d'équilibre stable.

358. **Action de la terre sur un courant circulaire vertical mobile autour d'un axe vertical passant par son centre.** — Quand on remplace le courant rectangulaire mobile par un autre de forme circulaire, on voit celui-ci se disposer encore perpendiculairement au plan du méridien magnétique, de façon que la demi-circonférence que parcourt le courant en descendant soit tournée vers l'est. On se rend facilement compte qu'il doit en être ainsi quand on substitue par la pensée, au courant circulaire (fig. 173), un

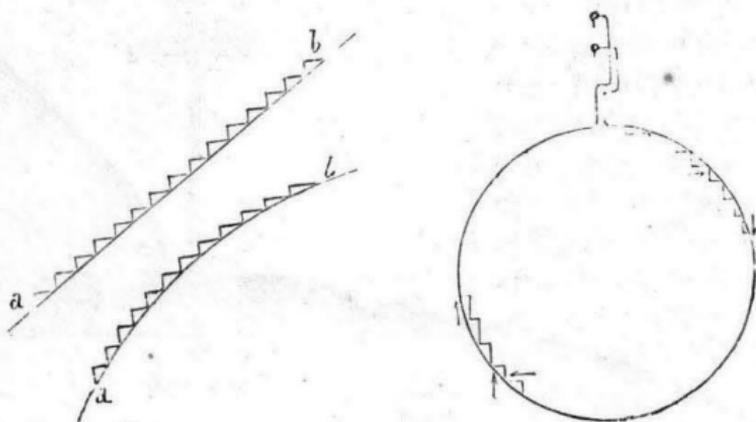


Fig. 173. Courants sinueux.

courant sinueux formé de parties rectilignes très-petites, alternativement horizontales et verticales; l'action de la terre sur les parties horizontales est nulle comme composée d'actions égales et contraires, il reste l'action sur les portions verticales qui doit produire le résultat donné par l'expérience.

359. **Solénoïdes.** — Supposons que l'on ait une série de courants circulaires tous égaux entre eux, parallèles, et réunis de façon que leurs centres soient sur une même

ligne droite, tous ces courants étant d'ailleurs de même sens; ce système se nomme un *solénoïde*. Si on l'abandonne à lui-même, chaque cercle se place (358) perpendiculairement au plan du méridien magnétique, et la ligne des centres se trouve avoir la direction même de l'aiguille aimantée. Il y a donc là une analogie entre les aimants et les solénoïdes; ce n'est pas d'ailleurs la seule qui existe. Pour s'en rendre compte, il faudrait construire des solénoïdes, ce qui présente quelques difficultés. Ampère imagina pour cela diverses dispositions (fig. 174). D'abord il forma avec un fil métallique des cercles, dans lesquels circulait le courant, en passant successivement d'un cercle à l'autre, par une portion rectiligne du fil telle que *ab*, *cd*, *ef*, etc.;

pour détruire l'influence de ces parties rectilignes, le fil était ramené sur lui-même suivant *gh*, et parcouru alors par un courant de sens contraire à celui qui va d'un cercle à l'autre. La dernière disposition est la plus employée. Un fil vertical par lequel arrive le

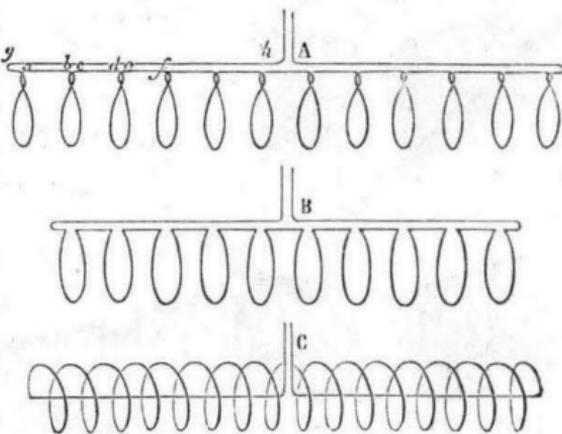


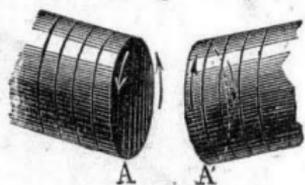
Fig. 174. Solénoïdes

courant est recourbé horizontalement sur une certaine longueur, puis il se contourne suivant la spire d'une hélice, revient ensuite sur lui-même, et son extrémité se ramène verticalement auprès de la première. Chaque spire équivaut à un cercle coupé en un point et dont les deux extrémités ont été légèrement écartées, de sorte qu'en suivant la spire le courant produit le même effet (354) que si, après avoir parcouru un cercle vertical, il avait suivi un fil horizontal joignant les deux extrémités de la spire. Le courant parcourant l'ensemble des spires

est donc assimilable à la réunion d'une série de courants circulaires, ayant dans la position d'équilibre leur branche descendante à l'est, et d'un courant rectiligne allant du nord au sud ; et comme, en ramenant le fil le long des spires, on obtient un courant rectiligne allant du sud au nord, les actions se détruisent, et il ne reste plus que les actions des courants circulaires, c'est-à-dire celles d'un solénoïde.

360. Analogie des aimants et des solénoïdes. — Pour démontrer l'analogie des aimants et des solénoïdes, on emploie plusieurs procédés :

1° On fait réagir l'un sur l'autre deux solénoïdes, et l'on voit qu'il y a attraction quand on présente l'un à



l'autre deux pôles de sens contraire, c'est-à-dire un pôle qui se dirige vers le nord et un pôle qui se dirige vers le sud (fig. 175). Cette attraction des pôles A et B est d'ailleurs justifiée par la loi des courants parallèles. Dans le cas où l'on approche l'un de l'autre deux pôles A et A' (fig. 176) de même nature, il y a répulsion, comme cela résulte encore de la même loi de l'électrodynamique.

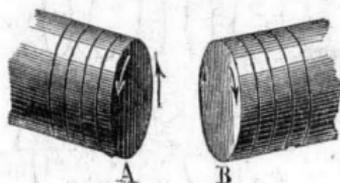


Fig. 175 et 176.

Actions réciproques
des solénoïdes.

2° Si l'on fait agir des aimants sur des solénoïdes, on constate que les pôles de même nom se repoussent, et que les pôles de nom contraire s'attirent. La loi d'Ampère sur l'expérience d'OErstedt peut à elle seule faire prévoir ce résultat.

3° Si l'on fait agir un courant sur un solénoïde, celui-ci se place en croix avec le courant. C'est une conséquence de la loi des courants angulaires.

4° Si un solénoïde est mobile dans un plan horizontal, il se place dans le plan du méridien magnétique, faisant

ainsi avec la méridienne géographique un angle égal à la *déclinaison magnétique*. Si ce solénoïde est mobile autour d'un axe horizontal, et susceptible de se déplacer dans le plan même du méridien magnétique, le plus petit angle que fait l'axe de ce solénoïde avec le plan horizontal a précisément pour valeur l'*inclinaison* de l'aiguille aimantée.

361. **Théorie du magnétisme d'Ampère.** — Des analogies précédentes Ampère conclut une théorie de la constitution des aimants; il suppose qu'autour de chaque molécule d'un corps magnétique existe un petit courant circulaire; ces petits courants ont des directions quelconques; ils sont faciles à déplacer dans le fer doux, où ils changent à chaque instant de situation; mais dans l'acier la force coercitive s'oppose à ces déplacements. Lorsqu'un

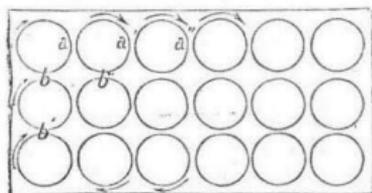


Fig. 177.

Constitution des aimants.

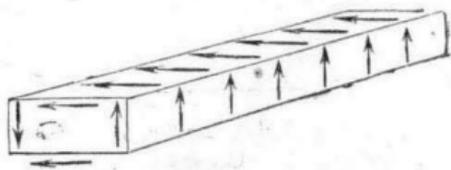


Fig. 178.

Constitution des aimants.

barreau est aimanté, c'est que tous les petits courants sont orientés parallèlement entre eux, qu'ils ont tous le même sens, et que leur plan est perpendiculaire à la ligne des pôles. Considérons une section (fig. 177), faite dans un aimant normalement à la ligne des pôles et l'action de cette tranche sur un corps extérieur; on voit que les portions de courant qui se trouvent sur le contour sont seules efficaces; les autres se détruisent deux à deux, comme on le voit en $a, a', a'', b, b', b'',$ etc. L'ensemble des courants particuliers équivaut d'après cela à une série de courants (fig. 178), circulant sur le contour extérieur de l'aimant qui devient alors un solénoïde. Les propriétés des aimants s'expliquent ainsi parfaitement au moyen

des lois de l'électrodynamique, à commencer par ce fait (fig. 179), que l'aimant se met en croix avec un courant rectiligne.

362. **Aimantation par les courants.** — De sa théorie, Ampère déduisit qu'on pouvait aimanter par l'action des courants, ce qu'Arago¹ avait entrevu ; il se servit pour cela d'un appareil appelé *hélice magnétisante*, composé d'un fil revêtu d'une matière isolante et contourné sur un tube de verre. A l'intérieur, on met le corps à aimanter ; on fait passer le courant dans l'hélice ; celui-ci agit sur les courants particuliers et les amène à être parallèles à lui-même, c'est-à-dire parallèles entre eux, et de même sens. On voit donc qu'un aimant doit se produire, aimant durable si le corps pos-

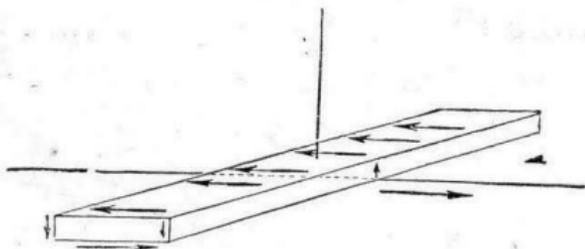


Fig. 179. Constitution de l'aimant.

sède une force coercitive. Les hélices employées sont dextrorsum (fig. 180), quand, en les plaçant verticalement devant soi, l'on voit le fil s'enrouler de droite à gauche en descendant. Les hélices sinistrorsum (fig. 181) sont celles dans lesquelles le fil s'enroule de gauche à droite dans les mêmes circonstances. Si l'on suppose un observateur couché dans le courant de l'hélice, il verra à sa gauche le pôle austral développé ; le pôle austral *a* et le pôle boréal *b* ont ainsi des positions prévues d'avance. Puisque le sens de l'aimantation varie avec le sens de

1. Arago (François-Dominique), astronome et physicien, né le 26 février 1786 à Estagel (Pyrénées-Orientales), mort le 2 octobre 1853, secrétaire perpétuel de l'Académie des sciences, membre, en 1818, du gouvernement provisoire, directeur de l'Observatoire de Paris.

l'enroulement de l'hélice, à chaque inversion du sens hélicoïdal, correspond un point conséquent (fig. 182).

363. **Electro-aimant.** — L'aimantation se produit dans le fer doux comme dans l'acier ; seulement elle ne persiste que pendant le passage du courant. On a construit d'après ce principe des instruments appelés *électro-aimants*. Ils ont généralement la forme d'un fer à cheval (fig. 183), ou bien sont constitués de deux cylindres de fer doux implantés perpendiculairement à une barre aussi en fer.

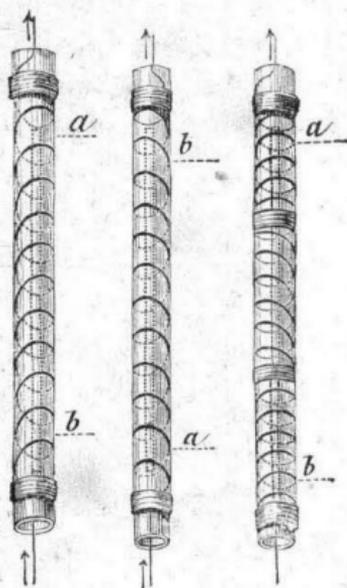


Fig. 180, 181, 182.
Aimantation par les courants.

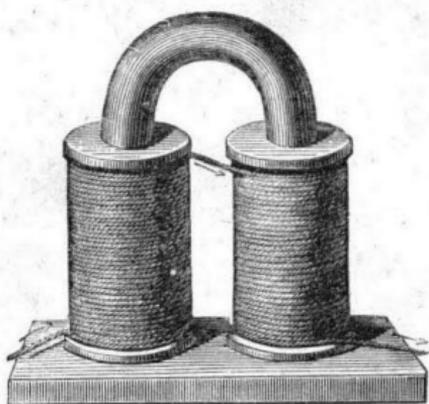


Fig. 183.
Électro-aimant.

Chacun des cylindres est entouré d'une hélice dextrorsum pour l'un, sinistrorsum pour l'autre, c'est-à-dire, comme on le voit sur la figure, que l'enroulement est inverse dans les deux bobines. Cela est nécessaire pour que l'appareil présente à ses extrémités deux pôles de nom contraire. En effet, si l'on suppose par la pensée que l'électro-aimant est ramené en ligne droite, l'enroulement se trouvera alors le même sur les deux branches. Un électro-aimant jouit de propriétés attractives bien plus énergiques que

celles des aimants. Si, au-dessous d'un électro-aimant, on approche un *contact* de fer doux, celui-ci est vivement attiré et peut supporter des poids considérables. Pour faire cette expérience, on soutient l'électro-aimant par un bâti de bois (fig. 184). Si, pendant que l'électro-aimant fonctionne et que son contact est adhérent, l'on vient à faire cesser le courant, le contact conserve une certaine adhé-

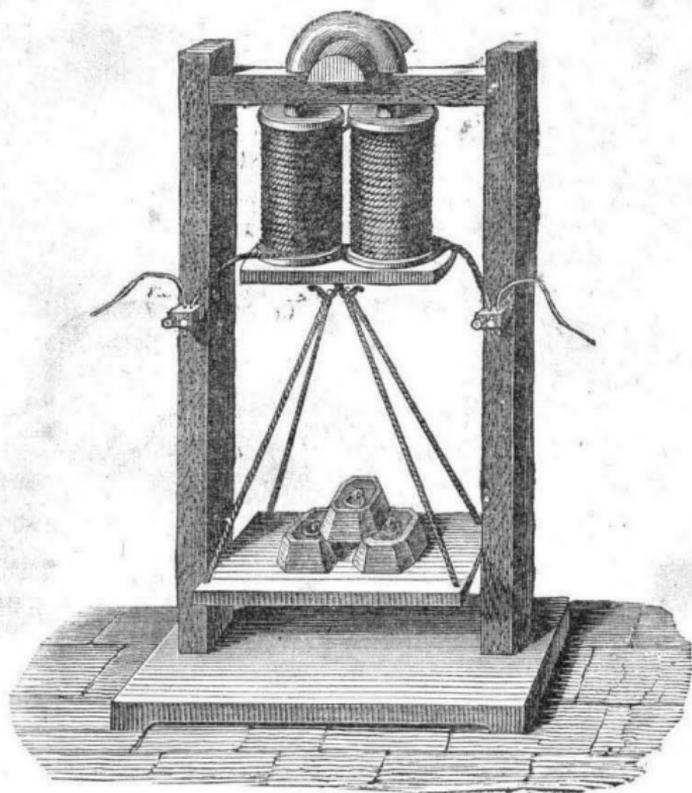


Fig. 184. Électro-aimant.

rence ; si on arrache ce dernier, l'adhérence ne peut plus être obtenue qu'au moyen d'un nouveau passage du courant. Le magnétisme qui reste dans l'électro-aimant après la rupture du courant, mais à la condition que le contact reste en place, s'appelle *magnétisme rémanent* ; il faut tenir compte de son existence dans la plupart des applications des électro-aimants.

364. **Diamagnétisme.** — Une première application consiste dans l'étude de l'action du magnétisme sur tous les corps. C'est à l'aide des électro-aimants que l'on a reconnu qu'outre les corps qui, comme le fer, le chrome, le nickel, etc., sont attirés par les aimants, il y en a qui subissent des répulsions. En 1778, Brugmann reconnut le premier qu'une aiguille de bismuth était repoussée par les deux pôles d'un aimant; jusqu'à Faraday, l'on n'ob-

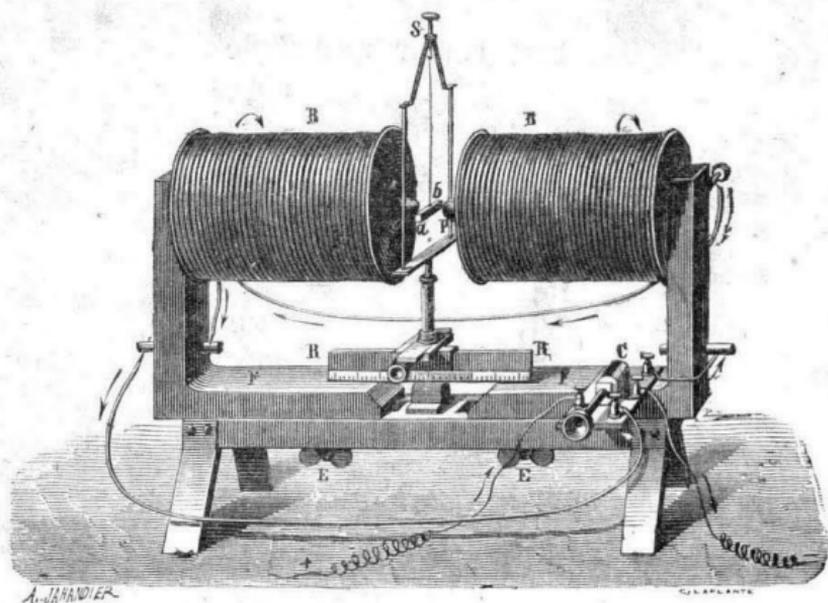


Fig. 185.

tint que des résultats à peine sensibles, mais ce savant fit usage d'un électro-aimant, et, sous l'influence du magnétisme intense qui se trouvait développé, on put reconnaître chez beaucoup de corps les mêmes propriétés qu'au bismuth. On a appelé *corps diamagnétiques* ceux que les aimants repoussent, et *corps paramagnétiques* ou simplement *corps magnétiques* ceux qui se trouvent attirés.

365. M. Ruhmkorff a construit pour ces recherches un appareil analogue à celui de M. Faraday (fig. 185). Deux bobines B ont leurs noyaux en fer doux; ces noyaux sont

réunis par des masses de fer doux FF , maintenues par des écrous E sur une table aussi en fer. Les masses FF peuvent glisser sur la table et être fixées par les écrous à des distances diverses, ce qui permet d'approcher ou d'éloigner l'un de l'autre les deux pôles PP . A son arrivée dans l'appareil, le courant traverse un commutateur particulier C , qui peut, ou l'interrompre complètement, ou le faire changer de sens; il suit le chemin indiqué par les flèches, passe d'une bobine dans l'autre en circulant toujours dans le même sens, et retourne à la pile par le commutateur. Sur une règle R on installe un

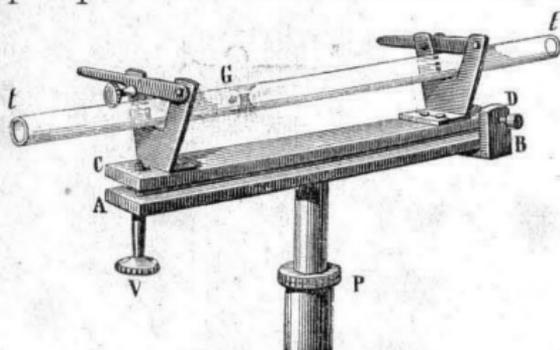


Fig. 186.

support vertical; au crochet S de ce support s'attache un fil de soie sans torsion, auquel est suspendue, par une petite chape, une aiguille ab du corps solide sur lequel on opère. Si ce corps est attiré, l'ai-

guille se place axialement, c'est-à-dire suivant l'axe de la bobine; quand il y a répulsion, l'aiguille se place dans la direction perpendiculaire. M. Faraday a reconnu que tous les corps solides sur lesquels il a opéré sont diamagnétiques ou paramagnétiques, quoique à des degrés fort divers.

366. On doit principalement à MM. Quet¹ et Plucker² l'étude du diamagnétisme des corps liquides. Le procédé employé par le premier de ces savants est fort simple. Un pied (fig. 186) est fixé à la place du support S dans l'appareil précédent. Sur ce pied est une table métallique AB , sensiblement horizontale, au-dessus de laquelle se trouve

1. Quet (Jean-Antoine), physicien français, né à Nîmes, auteur de travaux remarquables de physique expérimentale et de physique mathématique. Il est inspecteur général de l'enseignement secondaire.

2. Plucker, professeur de physique à l'université de Bonn, mathématicien et physicien distingué.

un tube *t*, mobile autour de la charnière D; l'une des extrémités peut être élevée ou abaissée, grâce à la vis V. Une goutte du liquide à expérimenter est en G. Dans le cas du diamagnétisme, le tube étant légèrement relevé avec la vis V, la goutte chassée par le pôle P remonte dans le tube, malgré la pesanteur. Si le liquide est paramagnétique, on abaisse la vis V, et, malgré la pesanteur, la goutte se dirige le plus près possible des pôles.

Les gaz eux-mêmes sont diamagnétiques ou paramagnétiques; mais ici les expériences sont d'une exécution fort délicate.

367. Notions sur les télégraphes électriques.

— Les télégraphes électriques sont fondés sur l'emploi des électro-aimants. Pour que la correspondance puisse s'établir entre deux localités au moyen du télégraphe électrique, il faut :

1° Un circuit isolé;
2° Une pile lançant un courant dans le circuit;

3° Un manipulateur envoyant la dépêche;
4° Un récepteur qui enregistre.

368. **Circuit.** — Le circuit peut être aérien, souterrain ou sous-marin. Le circuit aérien se compose de fils de fer galvanisé, d'un diamètre de 3 millimètres, soutenus de 100 mètres en 100 mètres par des crochets implantés dans des supports en porcelaine (fig. 187) en forme de

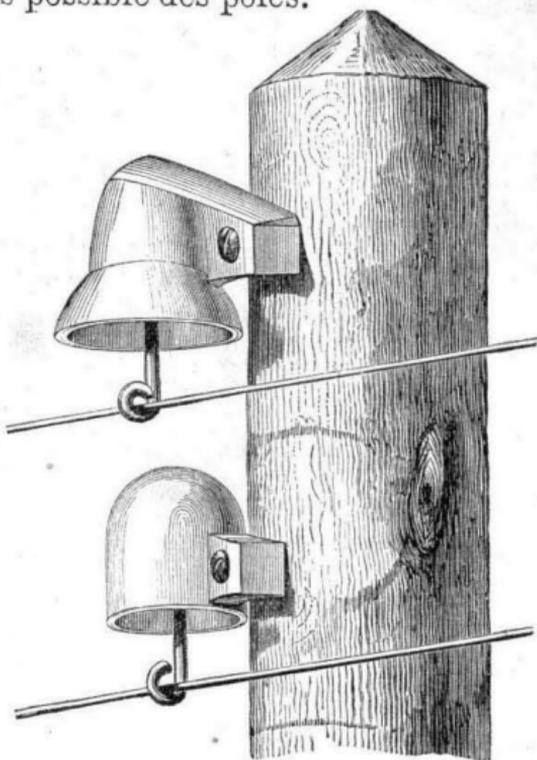


Fig. 187.

Crochets et supports en porcelaine.

cloche, fixés eux-mêmes à des poteaux. De kilomètre en kilomètre des crics tenseurs (fig. 188), isolés ensuite par de la porcelaine et fixés à des poteaux, permettent de tendre les fils et de mettre leurs extrémités en communication.

Dans les circuits souterrains, dont on ne fait usage que dans des cas très-rares, les fils sont revêtus de gutta-

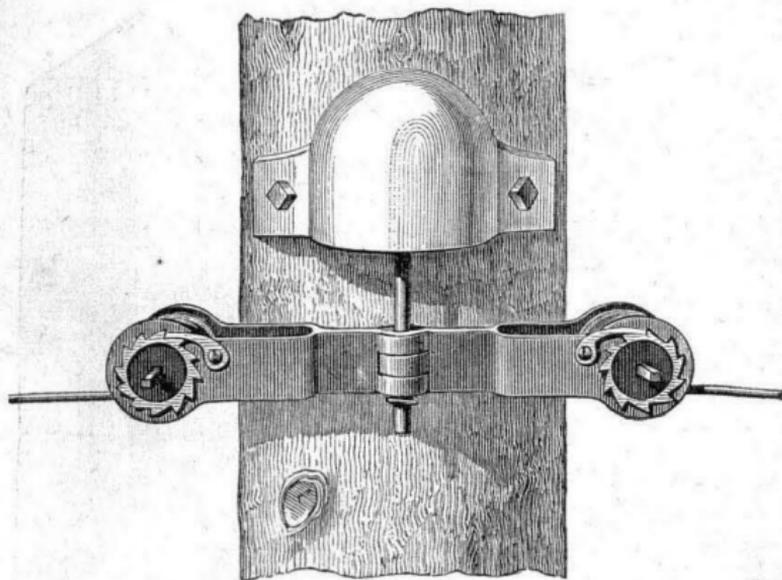


Fig. 188. Crics tenseurs.

percha, puis noyés dans le bitume ou la glu marine, ce qui ne parvient pas à empêcher une détérioration rapide.

Les conducteurs des lignes sous-marines ont reçu des formes diverses ; il faut ici obvier à la corrosion produite par l'eau de mer. Les premiers câbles que l'on posa furent mis hors de service en fort peu de temps ; il fallut songer à les préserver ; la figure 189 représente un fragment du câble qui relie la France à l'Angleterre ; la figure 190 en montre une coupe ; quatre fils de cuivre sont noyés dans un câble en gutta-percha que protège une enveloppe de fils de fer tordus.

369. **Suppression du fil de retour.** — La pile est formée

d'éléments de Daniell ou de M. Marié-Davy¹, ces derniers ayant l'avantage d'avoir moins souvent besoin d'être rechargés. Les deux pôles devraient être réunis par un fil

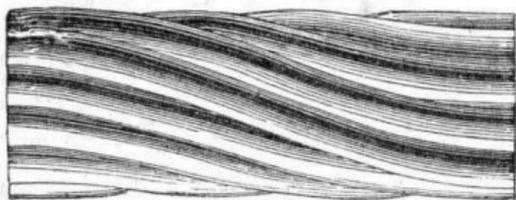


Fig. 189.

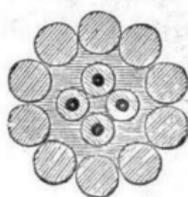


Fig. 190.

allant à la deuxième station, puis revenant à la première. On évite le retour en mettant les deux pôles en communication avec le sol. Le courant parti de la pile A (fig. 191) traverse le manipulateur, parcourt le fil de la ligne, arrive au récepteur, et de là à une large plaque de mé-

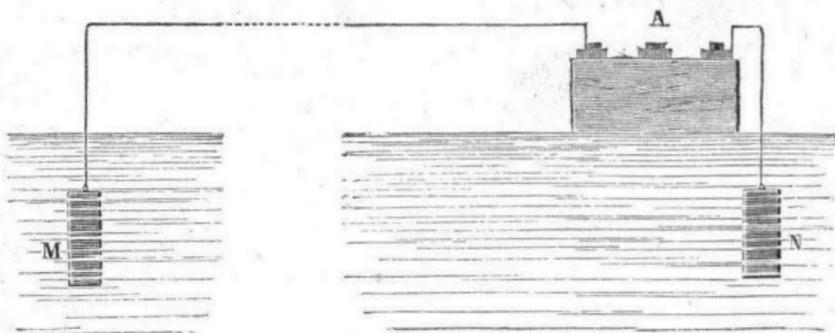


Fig. 191. Suppression du fil de retour.

tal M, plongeant dans le sol humide. L'autre pôle est relié à une plaque semblable N. Les deux électricités que fournit la pile ne se combinent plus entre elles, mais elles trouvent dans la terre un absorbant indéfini, ce qui fait qu'elles s'écoulent sans cesse, et se produisent de même tout aussi facilement que si elles étaient détruites par leur recombinaison mutuelle.

1. Marié-Davy, physicien français, né à Clamecy, directeur du service météorologique à l'Observatoire de Paris.

370. **Usage d'une seule pile pour plusieurs lignes.** — Souvent une pile établie dans un poste télégraphique est en relation avec toutes les lignes qui aboutissent à ce poste ; mais, parmi ces lignes, l'une peut être beaucoup plus

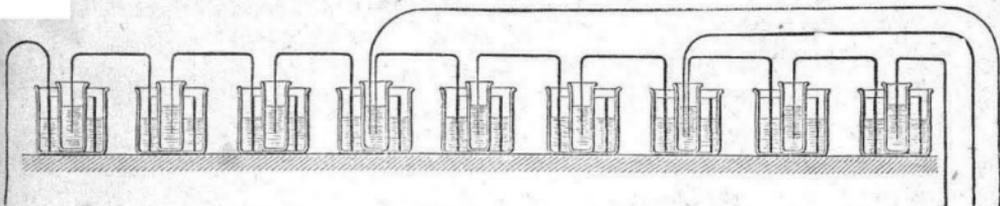


Fig. 192.

Usage d'une seule pile pour plusieurs lignes.

courte que les autres ; donnant alors à l'électricité un passage plus facile, presque tout ce fluide s'écoulerait par son intermédiaire, et les autres lignes ne recevraient qu'un courant insuffisant.

Pour remédier à cet inconvénient, on n'emploie qu'une portion de la pile pour les lignes trop courtes. Ainsi (fig. 192) le pôle négatif de la pile étant en communication avec le sol, on met le fil de chaque ligne en communication avec les cuivres d'éléments différents, proportionnant le nombre des éléments employés à la longueur des circuits à parcourir.

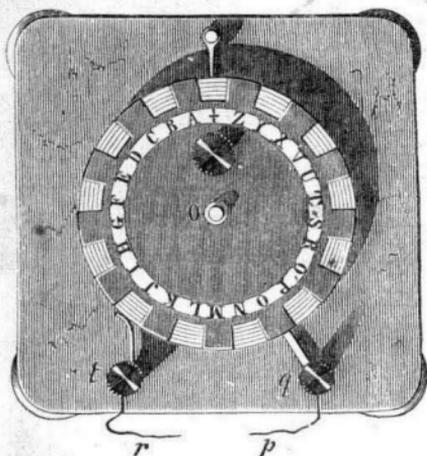


Fig. 193. Manipulateur.

371. **Manipulateur.** — Le manipulateur est très-variable avec l'espèce de télégraphe. Voici un modèle fort simple : Un cadran (fig. 193) porte 25 lettres, et, en outre, un 26^e signe final qui a la forme +. Ces signes sont tracés sur une roue dentée métallique en communication, par un axe *o*,

et une borne q , avec le fil p qui vient de la pile. Cette roue porte un nombre de dents saillantes égal à la moitié du nombre des signes. Elle est fixée sur une roue pleine en bois, d'égal diamètre. Un ressort métallique t est en communication avec le fil v de la ligne se rendant au récepteur. Ce ressort appuie sur l'ensemble des deux roues, fermant le courant quand il rencontre une dent saillante de la roue de métal, et le rompant quand il se trouve en face de l'intervalle de deux dents, parce qu'alors, et c'est le cas de la figure, il n'appuie que sur la roue de bois. Un bouton permet de faire tourner le ca-

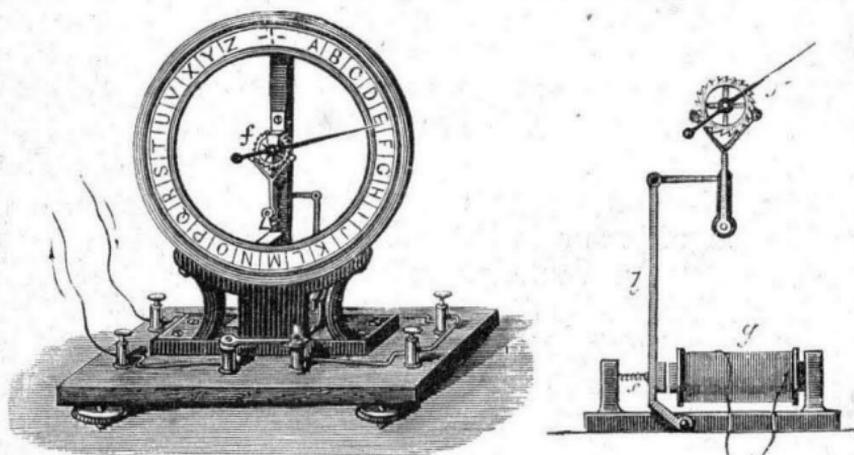


Fig. 194. Récepteur.

dran, et chaque lettre passe ainsi devant un index qui, dans la figure, est en face du signe $+$. Chaque fois qu'un signe passe devant l'index, il y a cessation ou rétablissement du courant.

372. Récepteur. — On peut employer comme récepteur un électro-aimant g (fig. 194) dans lequel se meut le courant lancé par le manipulateur. Il y a aimantation quand le courant circule, et désaimantation quand il cesse. Le passage d'une première lettre du manipulateur devant l'index aimante, le passage d'une seconde désaimante, celui d'une troisième réaimante, et ainsi de suite. Pour qu'il en résulte une désignation convenable des lettres, il existe,

dans le récepteur, une roue dentée f , dont le nombre des dents égale celui de la moitié des signes; cette roue mène une aiguille, et est elle-même le plus souvent sollicitée à tourner par un mouvement d'horlogerie. Elle est arrêtée dans ce mouvement par l'une ou l'autre branche d'une ancre ou d'une fourchette; lesquelles, à chaque oscillation, laissent échapper un demi-intervalle de dent et font passer l'aiguille sur une lettre. L'oscillation est produite par un levier l , terminé par une palette de fer doux placée en regard d'un électro-aimant. Cette palette est tour à tour attirée par l'électro-aimant, ou ramenée par un ressort s destiné à vaincre le magnétisme rémanent (363).

373. En résumé, une lettre passant au manipulateur ferme le circuit, aimante l'électro-aimant du récepteur, attire la palette de fer doux, fait faire une oscillation à l'ancre, laisse échapper un demi-intervalle de dent, et amène l'aiguille sur la lettre correspondante du récepteur. La lettre suivante, passant au manipulateur, ouvre le circuit, désaimante l'électro-aimant, le ressort s éloigne la palette, fait faire à l'ancre une oscillation contraire à la première, laisse passer un demi-intervalle de dent, et l'aiguille vient se placer sur la lettre suivante du récepteur.

On part toujours du final $+$ pour commencer un mot, on passe rapidement sur les lettres inutiles, on s'arrête un instant sur les lettres nécessaires du mot.

TABLE DES MATIÈRES

LIVRE I.

PROPRIÉTÉS GÉNÉRALES DE LA MATIÈRE.

	Pages.
CHAPITRE PREMIER. — MESURE DE L'ÉTENDUE.	1
Mètre.	2
Comparateur.	2
Vernier.	4
Compas d'épaisseur; pied-à-bec.	6
Vis micrométrique; sphéromètre.	7
Machine à diviser.	8
CHAPITRE II. — COMPRESSIBILITÉ ET ÉLASTICITÉ DES CORPS SOLIDES.	11
Compressibilité.	11
Élasticité.	11
Élasticité de traction.	13
Élasticité de flexion.	14
Ténacité.	15
Ductilité.	16
Malléabilité.	17
Recuit; trempé.	18
Résistance des matériaux.	19
CHAPITRE III. — COMPRESSIBILITÉ ET ÉLASTICITÉ DES LIQUIDES.	22
Compressibilité de l'eau.	22
Piézomètre d'Ørstedt.	22
Coefficients de compressibilité.	24

LIVRE II.

PESANTEUR.

CHAPITRE I. — MESURE DES POIDS.	27
Théorie du levier.	27
Théorie de la balance.	28

	Pages
Conditions de justesse	30
Conditions de sensibilité.	31
Position des trois couteaux.	31
Détails de construction.	32
Double pesée de Borda.	33
Exécution des pesées de précision.	34
CHAPITRE II. — PRESSIONS EXERCÉES PAR LES LIQUIDES.	36
Pression hydrostatique.	37
Transmission égale des pressions.	37
Principe de l'égalité de pression	37
Pressions exercées sur le fond des vases	38
Pressions latérales.	39
Pressions de bas en haut.	40
Surface de niveau.	41
Presse hydraulique	42
Applications de la presse hydraulique.	45
Équilibre des liquides superposés.	47
Vases communicants	47
Tunnels-siphons.	49
Canaux de Versailles.	49
Puits artésiens	51
Sources jaillissantes.	52
Jets d'eau.	53
Phénomènes capillaires.	53
CHAPITRE III. — DES CORPS PLONGÉS DANS LES LIQUIDES.	55
Principe d'Archimède.	55
Corps flottants.	57
Flotteur d'alarme	58
* Régulateur à eau.	59
CHAPITRE IV. — MESURE DES DENSITÉS DES CORPS.	62
Densités; poids spécifiques.	62
Détermination de la densité des solides.	62
Détermination de la densité des liquides	67
Aréomètre à poids constant.	69
Densité des gaz.	73
Tableau des densités des corps.	75
CHAPITRE V. — PRESSION ATMOSPHÉRIQUE, BAROMÈTRE.	78
Pression atmosphérique.	78
Construction des baromètres.	80
Baromètre de Fortin.	82
Observations du baromètre	85
Baromètre de Gay-Lussac.	87
Usages du baromètre.	88
CHAPITRE VI. — MESURE ET LOIS DE L'ÉLASTICITÉ DES GAZ.	92
Élasticité des gaz.	92
Manomètres à air libre.	93

	Pages.
Loi de Mariotte.	95
Manomètre à air comprimé.	98
Manomètre métallique.	99
Lois du mélange des gaz.	100
CHAPITRE VII. — MACHINE PNEUMATIQUE.	102
Machine d'Otto de Guéricke.	102
Machine à deux corps de pompe.	104
Machine de Saint-Germain.	108
Machine de Bianchi.	112
Applications de la machine pneumatique.	114
Hémisphères de Magdebourg.	116
CHAPITRE VIII. — ÉCOULEMENT DES LIQUIDES ET DES GAZ.	118
Siphon.	118
Vase de Tantale.	121
Fontaine intermittente naturelle.	121
Vase de Mariotte.	123
Lampe d'Argand.	125
Gazomètres.	126
Loi de Toricelli.	127

LIVRE III.

DE LA CHALEUR.

CHAPITRE I. — THERMOMÈTRES.	131
Température.	131
Choix d'un corps thermométrique.	132
Thermomètre à mercure, sa construction.	133
Graduation du thermomètre.	136
Thermomètres à échelles arbitraires.	138
Thermomètres à alcool.	140
Échelles thermométriques diverscs.	141
CHAPITRE II. — CHALEUR RAYONNANTE.	143
Rayonnement calorifique.	143
Rayonnement dans le vide.	143
Réflexion de la chaleur, miroirs ardents.	145
Corps diathermanes et athermanes.	149
Pouvoir émissif.	149
Pouvoir réflecteur.	150
Pouvoir absorbant.	151
CHAPITRE III. — DILATATION DES CORPS.	152
Dilatation linéaire.	152
Dilatation cubique.	154
Détermination des coefficients de dilatation des solides	156

	Pages.
Dilatation des liquides.	158
Dilatation des gaz.	164
Corrections barométriques.	165
Pendules compensateurs.	166
Thermomètre de Bréguet.	168
Pyromètre de Brongniart	169
Tableau des coefficients de dilatation.	170
CHAPITRE IV. — FUSION ET SOLIDIFICATION	172
Lois de la fusion.	173
Lois de la solidification.	175
Surfusion.	175
CHAPITRE V. — DES VAPEURS.	177
Force élastique des vapeurs.	177
Tension maximum des vapeurs.	179
Identité des gaz et des vapeurs.	180
Relation entre la température et la tension maximum.	181
Principe de la paroi froide.	182
Mesure de la tension maximum des vapeurs.	183
Tableau des forces élastiques maximum de la vapeur d'eau.	186
Principe de la machine à vapeur.	186
Mélange des gaz et des vapeurs.	192
Densité des vapeurs.	194
CHAPITRE VI. — HYGROMÉTRIE ET MÉTÉORES AQUEUX.	197
État hygrométrique.	197
Hygromètre chimique.	197
Hygromètre à cheveu	198
Hygromètres de condensation	200
Psychromètre.	202
Brouillards.	203
Nuages.	204
Pluie.	208
Neige.	209
Rosée.	210
Gelée blanche.	214
CHAPITRE VII. — CALORIMÉTRIE.	215
Calorie.	215
Chaleur spécifique.	217
Chaleur latente de fusion.	218
Mélanges réfringérants.	220
Lenteur de la fusion de la neige.	222
Chaleur latente de volatilisation.	224
Froid produit par l'évaporation.	224
Appareil Carré.	228
Echauffement produit par la condensation.	229
CHAPITRE VIII. — CHAUFFAGE ET VENTILATION.	231
Cheminées.	232

	Pages.
Causes qui font fumer les cheminées.	237
Poêles.	239
Calorifères.	240
Chauffage par circulation d'air chaud.	241
Chauffage par circulation d'eau chaude.	244
Chauffage par la vapeur.	246
Ventilation.	247
Aérage des mines.	250

LIVRE IV

ÉLECTRICITÉ DYNAMIQUE

CHAPITRE I. — PRODUCTION DES COURANTS ÉLECTRIQUES.	251
Expérience de Galvani.	251
Pile de Volta.	252
Théorie de la pile.	253
Pile à auge.	255
Pile de Wollaston.	255
Expérience d'Erstedt.	256
Loi d'Ampère.	257
Galvanomètre.	258
Pile de Daniell.	261
Pile de Bunsen.	262
Pile de Grove.	263
Observations générales sur les piles.	263
CHAPITRE II. — ÉLECTROCHIMIE.	264
Électrolyse de l'eau.	264
Électrolyse des oxydes.	265
Électrolyse des composés binaires.	266
Électrolyse des sels.	267
Causes de la constance dans les piles à deux liquides.	268
Argenture.	269
Dorure.	270
Cuivrage.	271
Galvanoplastie.	273
Électrotypie.	275
CHAPITRE III. — ÉLECTRODYNAMIQUE.	277
Découverte d'Ampère.	277
Loi des courants parallèles.	279
Loi des courants angulaires.	280
Loi de l'égalité de l'attraction et de la répulsion.	281
Loi des courants sinueux.	281
CHAPITRE IV. — ÉLECTROMAGNÉTISME.	282
Action directrice des aimants sur les courants.	282

	Pages.
Action de la terre sur les courants.	282
Solénoïdes.	284
Théorie du magnétisme d'Ampère.	287
Aimantation par les courants.	288
Electro-aimants.	289
Diamagnétisme.	291
Notions sur les télégraphes électriques.	293

FIN DE LA TABLE.

NOUVELLES PUBLICATIONS

RÉDIGÉES CONFORMÉMENT AUX PROGRAMMES OFFICIELS DE 1866

POUR L'ENSEIGNEMENT SECONDAIRE SPÉCIAL

(Tous les volumes ci-après sont imprimés dans le format in-18 jésus et cartonnés)

LANGUE FRANÇAISE.

- Grammaire de l'enseignement secondaire spécial*, par M. Sommer. 1 vol. 1 fr. 50.
Lectures ou dictées, par M. Lelion-Damiens, économiste du collège Rollin (année préparatoire et 1^{re} année). 3 vol. :
 Tome I, contrées agricoles. 1 fr. 50.
 Tome II, contrées commerciales. 1 fr. 50.
 Tome III, contrées industrielles.
Premiers principes de style et de composition, par M. Pellissier, professeur au collège Chaptal (2^e année). 1 vol. 1 fr. 50 c.
Morceaux choisis des classiques français (prose et vers), adaptés au précédent ouvrage. 1 vol. 1 fr. 50 c.
Principes de rhétorique française, par M. Pellissier (3^e année). 1 vol. 3 fr.
Morceaux choisis des classiques français (prose et vers), adaptés au précédent ouvrage. 1 vol. 2 fr. 50 c.
Textes classiques de la littérature française, extraits des grands écrivains français, avec notices biographiques et bibliographiques, appréciations littéraires et notes explicatives, par M. Demogeot (3^e année). 2 vol. 6 fr.

GÉOGRAPHIE ET HISTOIRE.

- Géographie de la France*, par M. Richard Cortambert (année préparatoire). 1 vol. 1 fr.
Atlas correspondant. Grand in-8°.
Géographie des cinq parties du monde, par M. E. Cortambert (1^{re} année). 1 vol. 1 fr. 80 c.
Atlas correspondant. Grand in-8°.
Géographie agricole, industrielle, commerciale et administrative de la France et de ses colonies, par le même auteur (2^e année). 1 vol. 2 fr.
Atlas correspondant. Grand in-8°.
Géographie commerciale des cinq parties du monde, par M. Richard Cortambert (3^e année). 1 vol.
Atlas correspondant. Grand in-8°.
Simple récit d'histoire de France, par MM. Ducoudray et Feillet (année préparatoire). 1 vol. avec gravures. 2 fr. 50 c.
Simple récit des histoires anciennes, grecque, romaine et du moyen âge, par les mêmes (1^{re} année). 1 vol. 3 fr. 50 c.
Histoire de la France depuis l'origine jusqu'à la Révolution française, et grands faits de l'histoire moderne de 1553 à 1789, par M. Ducoudray (2^e année). 1 vol. 3 fr. 50 c.
Histoire de France et histoire générale depuis 1789 jusqu'à nos jours, par le même auteur (3^e année). 1 vol. 3 fr. 50 c.
Histoire moderne et contemporaine, depuis 1643 jusqu'à nos jours (4^e année). 1 vol. 4 fr. 50 c.

ARITHMÉTIQUE ET COMPTABILITÉ.

- Éléments d'arithmétique*, par M. Pichot, professeur au lycée Louis-le-Grand (année préparatoire et 1^{re} année). 1 vol. 2 fr. 50 c.
Arithmétique élémentaire, par M. Bovier-Lapierre, professeur à l'École normale de Cluny (année préparatoire et 1^{re} année). 1 vol.
Cours d'arithmétique commerciale, par M. E. Jeanne, professeur à l'École supérieure du Commerce (2^e année). 1 vol. 3 fr.
Cours de comptabilité, par M. Courcelle-Seneuil (1^{re}, 2^e, 3^e et 4^e années). 4 vol. Chaque volume, 1 fr. 50.

GÉOMÉTRIE, TRIGONOMÉTRIE, ALGÈBRE, GÉOMÉTRIE DESCRIPTIVE.

- Géométrie*, par M. Saint-Loup, professeur à la Faculté des sciences de Strasbourg :
 Année préparatoire (géométrie plane). 1 fr.
 Première année (géométrie plane). 2 fr.
 Deuxième année (géom. dans l'espace). 1 fr. 50
Principes d'algèbre, par MM. H. Sonnet et E. Joanne (3^e et 4^e années). 1 vol. 2 fr. 50 c.
Cours élémentaire de géométrie descriptive, par M. Kéris (3^e et 4^e années). 2 vol. 5 fr.
Traité élémentaire de trigonométrie rectiligne, par M. Bovier-Lapierre, professeur à l'École normale de Cluny (4^e année). 1 vol. 2 fr. 50.
Notions élémentaires de trigonométrie rectiligne, par M. Bezods (4^e année). 1 vol. 1 fr. 50 c.
Notions élémentaires sur les courbes usuelles, par le même (4^e année). 1 vol. 2 fr.

HISTOIRE NATURELLE, PHYSIQUE, CHIMIE, MÉCANIQUE, COSMOGRAPHIE

- Éléments de zoologie*, par M. Gervais, professeur à la Faculté des sciences de Paris :
Notions préliminaires (1^{re} année, 1^{re} partie). 1 vol. 2 fr. 10.
Mammifères (année préparatoire et 1^{re} année, 2^e partie). 1 vol.
Oiseaux, Reptiles, Batraciens, Poissons et Animaux sans vertèbres (2^e année). 1 vol.
Anatomie et physiologie des animaux (3^e année). 1 vol.
Zoologie appliquée à l'agriculture, à l'industrie et à l'hygiène (4^e année). 1 vol.
Éléments de botanique, 3 volumes :
 Année préparatoire, 1^{re} et 2^e années. 2 vol.
 Troisième et quatrième années (classification et usages des plantes). 1 vol. 3 fr.
Éléments de géologie, par M. Raulin (année préparatoire, 1^{re}, 2^e, 3^e et 4^e années).
Cours élémentaire de physique, par M. Gossin, professeur au lycée de La Flèche :
 Première année. 1 vol. 3 fr.
 Deuxième année. 1 vol. 3 fr.
 Troisième année. 1 vol. 3 fr.
 Quatrième année. 1 vol.
Éléments de chimie, par MM. Dehérain et Tissandier :
 Première année. 1 vol. 1 fr. 50.
 Deuxième année. 1 vol. 2 fr. 50.
 Troisième année. 1 vol. 3 fr.
 Quatrième année. 1 vol.
Cours de mécanique, par M. Ed. Collignon, répétiteur à l'École polytechnique :
 Troisième année. 1 vol.
 Quatrième année. 1 vol.
Éléments de cosmographie, par M. Amédée Guillemin (3^e année). 1 vol. 3 fr. 50.
- LÉGISLATION, MORALE, INDUSTRIE, ÉCONOMIE POLITIQUE.**
- Éléments de législation usuelle*, par M. Delacourtié, avocat, docteur en droit (3^e année). 1 vol.
Éléments de législation commerciale et industrielle, par le même auteur (4^e année). 1 vol. 3 fr.
Éléments de morale, par M. A. Franck, membre de l'Institut (3^e et 4^e années). 1 vol.
Les grandes inventions scientifiques et industrielles, par M. L. Figuier (4^e année). 1 vol. 1 fr. 50 c.
Cours d'économie rurale, industrielle et commerciale, précédée de *Notions d'économie politique*, par M. Levasseur (4^e année). 1 vol.