

## LIVRE III AÉROSTATIQUE

---

### CHAPITRE I

#### **Pesanteur des gaz. Pression atmosphérique.**

##### § I. — TOUS LES GAZ SONT PESANTS. PRINCIPE D'ARCHIMÈDE APPLIQUÉ AUX GAZ.

Si nous suspendons au plateau d'une balance un ballon de verre, nous pouvons constater que son poids change et diminue quand, au moyen d'une machine pneumatique, on y fait le vide ; inversement, si on laisse l'air rentrer, nous verrons le plateau qui supporte le ballon s'alourdir. On constate que l'air pris dans l'atmosphère pèse environ 1 gr. 293 par litre.

L'air pesant qui nous entoure jouit des propriétés déjà énoncées pour les liquides, au sujet des pressions exercées sur les corps. En particulier, le principe d'Archimède est applicable aux corps placés dans l'atmosphère : ils perdent de leur poids, un poids égal au poids du volume d'air déplacé.

C'est ce principe qui est appliqué dans les aérostats : si  $d'$  est la densité, par rapport à l'eau, d'un corps de volume  $v$ , son poids est  $vd'$  ;  $d$  étant la densité de l'air,  $vd$  est la poussée qu'il subit de la part de l'air. Le poids résultant est donc :

$$vd' - vd = v(d' - d).$$

Si  $d'$  est plus grand que  $d$ , le corps tombera ; si  $d'$  est plus petit que  $d$ , il montera ; en remplissant donc un ballon

d'un gaz plus léger que l'air (gaz d'éclairage, hydrogène), on donne à l'ensemble une force ascensionnelle ; c'est le cas des ballons.

Une autre conséquence est que les corps pesés dans l'atmosphère n'accusent pas dans la balance leur poids exact, mais leur poids diminué de la poussée de l'air ; dans les mesures de Physique très précises, on est obligé d'en tenir compte et de n'opérer que sur les poids absolus, c'est-à-dire tels qu'on les aurait dans un espace vide d'air.

## § II. — PRESSION ATMOSPHÉRIQUE. BAROMÈTRE.

L'air qui entoure le globe, étant pesant, exerce sur toute la surface terrestre une certaine pression ; c'est la pression atmosphérique. Ce phénomène ne fut découvert qu'au <sup>xvii</sup><sup>e</sup> siècle, à la suite des théories de Galilée, des expériences de Torricelli en Italie, des vérifications de Pascal en France.

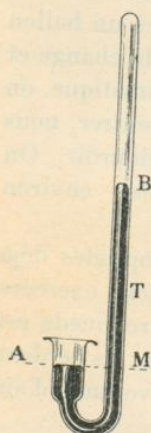


Fig. 48.

On peut mesurer la valeur de cette pression au moyen du baromètre ; un tube T, recourbé à sa partie inférieure, présente une branche B fermée à sa partie supérieure et l'autre A ouverte à l'air libre. Si on a pris les précautions suffisantes pour qu'il n'y ait pas d'air dans la branche B, le poids de la colonne de mercure de la branche B fait équilibre à la pression atmosphérique qui s'exerce sur la surface libre A.

Considérons un plan horizontal passant par la surface libre, soit A M ; à ce plan situé dans le mercure nous pouvons faire application des principes établis en Hydrostatique : la pression est la même en tous ses points, puisqu'il est situé dans le même liquide, qui est ici le mercure.

On constate que la hauteur de la surface libre dans la branche vide d'air B, au-dessus de AM, est d'environ 0<sup>m</sup>76 ;

la pression est en M, la densité du mercure étant 13,59 :

$$76^{\text{cm}} \times 13,59 = 1033 \text{ grammes.}$$

Donc la pression en A, qui est équivalente à celle en M, est 1.033 grammes ou 1 kilog. 033 par centimètre carré.

### § III. — BAROMÈTRES. CONSTRUCTION.

On nomme « Baromètres » des appareils destinés à mesurer la pression atmosphérique ; on distingue deux classes principales de baromètres : les baromètres à mercure, qui ne sont que des perfectionnements du premier appareil de ce genre, celui de Torricelli ; les baromètres anéroïdes ou métalliques, qui ne comportent pas de mercure.

1. *Baromètre à cuvette.* — Il se compose d'un simple tube A renversé sur une cuvette C. La différence des niveaux  $h$  donne la valeur de la pression atmosphérique.

C'est l'appareil même de Torricelli ; seulement on prend plus de précautions dans sa construction : Torricelli remplissait simplement le tube de mercure, puis, le fermant avec le doigt, le renversait dans la cuvette contenant déjà du mercure.

Pour construire un baromètre, on commence par se procurer du mercure bien pur ; on le lave à l'acide azotique pour le débarrasser de tous les métaux étrangers ; puis, le tube étant disposé suivant l'inclinaison indiquée (fig. 50) et muni d'une boule de verre  $a$ , on fait bouillir le mercure 4 ou 5 minutes. On chasse ainsi l'air et l'humidité du tube. Ensuite on détache la boule  $a$  et on renverse le tube dans sa cuvette en maintenant le mercure avec le doigt pour l'empêcher de tomber.

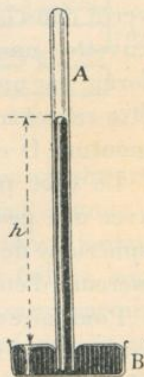


Fig. 49.

Cet appareil a le défaut d'être peu transportable ; un appareil à mercure transportable a été imaginé par le constructeur Fortin.

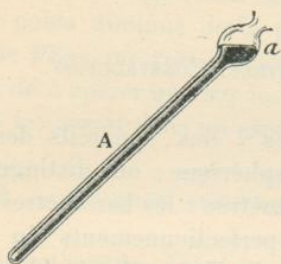


Fig. 50.

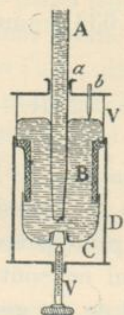


Fig. 51.

2. *Baromètre de Fortin.* — Le principe du baromètre est toujours le même, mais la cuvette est très particulière ; elle se compose de trois parties (fig. 51) : une partie V en verre dans laquelle se trouve le niveau du mercure dans la cuvette ; une partie B en bois, sur laquelle se fixe le fond C formé par une peau de chamois ; ce fond est mobile et peut être relevé au moyen d'une vis *v* qui prend appui sur une monture D en cuivre.

Le tube pénètre en *a* dans la cuvette par un joint fait avec une peau de chamois qui permet à la pression atmosphérique de s'établir dans la cuvette, tout en empêchant le mercure d'en sortir.

Pour faire une lecture, on amène le mercure dans la cuvette à un niveau bien déterminé, au moyen d'un repère *b* constitué par une pointe d'ivoire. Ainsi, au lieu de mesurer chaque fois la distance des niveaux de la cuvette et du tube, il suffit de lire la hauteur du niveau dans le tube au moyen d'une graduation portée par une enveloppe en laiton qui entoure le tube de verre.

Pour transporter l'appareil, on remonte le fond C de la cuvette, de façon que le mercure remplisse complètement la

cuvette et le tube : il forme alors un bloc qui, ne pouvant se déplacer, ne peut briser l'appareil par ses chocs ; en même temps, l'air ne peut rentrer.

Ces appareils sont souvent suspendus sur un support par un système à la Cardan, ce qui permet d'en faire des baromètres de voyage ou de bord.

3. *Baromètre à siphon*. — C'est le genre d'appareils qui a été décrit au § II. Tous ne sont pas transportables ; ils sont généralement adoptés comme baromètres d'appartement.

4. *Baromètres anéroïdes*. — Ces baromètres sont constitués par des boîtes métalliques à parois élastiques, vides d'air et soigneusement fermées. Sous l'action des variations de la pression atmosphérique, ces boîtes sont plus ou moins aplaties, et leurs déformations indiquent les variations de pression.

Les formes fréquemment employées sont indiquées sur la figure 52. En (a) on voit une boîte unique de forme cylindrique, mais ses parois A et B, au lieu d'être planes, sont munies de rainures circulaires de façon à être plus élastiques.

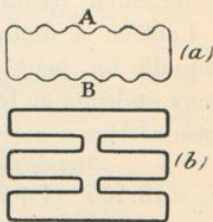


Fig. 52.

La forme (b), employée dans les appareils enregistreurs, consiste en un empilage de boîtes cylindriques réunies à leur centre par des bouts de tubes ; ces boîtes ajoutent leurs déformations. Celles-ci, en général, très faibles, sont amplifiées par des systèmes de leviers qui agissent sur une aiguille ; les déplacements de l'aiguille se font devant un cadran qui doit être gradué par comparaison avec un baromètre à mercure.

#### § IV. — INDICATIONS DU BAROMÈTRE.

En un même point, l'observation du baromètre montre que la hauteur du mercure varie ; l'étude de ces variations,

*Physique et chimie.* — GILLE.

en intensité et en rapidité, peut fournir des prévisions du temps (cf. Météorologie). La hauteur moyenne dans nos climats est 758<sup>mm</sup>.

Si on change de poste d'observation, les variations dues à l'état de l'atmosphère étant supposées défalquées de nos observations, on remarque que la hauteur barométrique varie avec la latitude et avec l'altitude à laquelle on se place.

La pression atmosphérique diminue quand on s'élève dans l'atmosphère; c'était à prévoir, en effet, puisque la couche d'air qui donne la pression diminue au fur et à mesure qu'on s'élève. Cette propriété peut servir à mesurer la distance qui sépare verticalement un lieu, de la surface de la mer; cette opération géodésique est parfois appelée Nivellement barométrique.

Laplace a donné la formule suivante, au moyen de laquelle on peut calculer la différence d'altitude  $r$  entre deux endroits où les températures sont  $t$  et  $t'$ , les hauteurs barométriques corrigées  $H$  et  $H'$ , la latitude  $\lambda$ :

$$r = 18.405^m (1 + 0,002552 \cos 2\lambda) \left[ 1 + 2 \frac{t + t'}{1.000} \right] \log \frac{H}{H'};$$

cette formule ne donne d'ailleurs que des résultats approchés. Pour des hauteurs inférieures à 1.000 mètres, Babinet donne la formule :

$$r = 16.000^m \left( \frac{H' - H}{H' + H} \right) \left[ 1 + 2 \frac{t + t'}{1000} \right],$$

qui ne contient pas de logarithme.

Nous avons dit que les hauteurs portées dans ces formules doivent être les hauteurs corrigées; en effet, suivant la température, la densité du mercure varie; suivant la latitude, son poids varie; enfin, suivant les diamètres des tubes employés, les dépressions capillaires ont des valeurs diverses. Les mesures barométriques précises exigent les corrections des erreurs dues à ces divers phénomènes.

## CHAPITRE II

### Compressibilité des gaz.

#### § I. — LOI DE MARIOTTE.

On sait que les gaz soumis à une compression subissent une diminution de volume ; la loi de Mariotte relie la pression supportée par un gaz à son volume :

*Les volumes occupés par une masse donnée de gaz, à température constante, sont inversement proportionnels aux pressions qu'elle supporte.*

Si  $V$  est le volume correspondant à la pression  $P$ ,  $V'$  le volume correspondant à la pression  $P'$  sera donné par la relation :  $\frac{V}{V'} = \frac{P'}{P}$ , ce qu'on peut écrire autrement :

$$P V = P' V'.$$

Si donc nous avons une masse de gaz déterminée, à température constante, que l'on soumet à des pressions différentes, le produit  $PV$  du volume occupé par le gaz et de la pression sera constant.

#### § II. — VÉRIFICATIONS DE LA LOI DE MARIOTTE.

1. *Vérifications avec les tubes de Mariotte et de Torricelli.* — Le tube de Mariotte permet la vérification pour les pressions supérieures à une atmosphère ; c'est un tube recourbé à deux branches verticales  $A$ ,  $B$  (fig. 53) ; l'une,  $A$ , est courte et fermée, l'autre,  $B$ , est longue et ouverte.

On introduit du mercure qui isole dans la branche  $A$  un certain volume de gaz ; le niveau étant le même dans les

deux branches (fig. 53 a), on constate que le gaz, qui peut être de l'air ou tout autre gaz, occupe un volume  $V$ . Le niveau étant le même des deux côtés, c'est que le gaz étudié est à la pression atmosphérique extérieure.

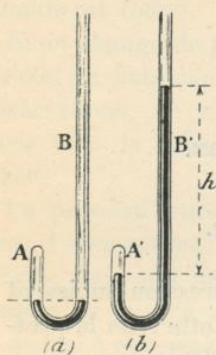


Fig. 53.

Si, maintenant, nous introduisons dans la branche ouverte du mercure de façon que la différence entre les niveaux des deux chambres soit  $h$  correspondant à la hauteur barométrique, on fait supporter au gaz en A' une pression égale à la pression atmosphérique plus une autre fois la pression atmosphérique.

On constate que le volume de gaz en A' est devenu  $\frac{V}{2}$ .

On a donc pour la pression A le volume  $V$ .

$$\frac{V}{2A} = \frac{V}{2A}$$

En opérant sur les pressions croissantes  $3A$ ,  $4A$ , etc. on obtient les volumes  $\frac{V}{3}$ ,  $\frac{V}{4}$  etc., comme le prévoyait la loi de Mariotte.

Le tube de Torricelli permet la vérification dans le cas de pressions inférieures à la pression atmosphérique. Un tube A (fig. 54) plonge dans une cuve profonde C; on fait plonger le tube de façon à isoler une certaine masse de gaz au fond du tube: quand le niveau est le même dans la cuve et dans le tube (fig. 54 a), le gaz contenu dans le tube est à la pression extérieure, donc à la pression atmosphérique. On constate qu'il occupe un certain volume  $V$ .

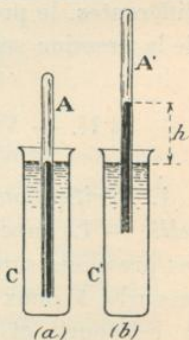


Fig. 54.

Si on soulève le tube, le mercure monte dans le tube; si on a soulevé de façon à obtenir une différence de niveau  $h$  (fig. 54 b) correspondant

à la moitié de la hauteur barométrique, la pression en A' sera : 1 atmosphère —  $1/2$  atmosphère =  $1/2$  de la pression atmosphérique.

On constate alors que le volume est devenu  $2V$ ; de même, sous des pressions plus faibles, on obtient des volumes croissants. Le gaz, soumis aux pressions  $A, \frac{A}{2}, \frac{A}{3}$ , etc., prend les volumes  $V, 2V, 3V$ , etc.

La loi de Mariotte se trouve donc vérifiée pour les pressions supérieures et inférieures à la pression atmosphérique.

2. *Vérifications plus précises de la loi de Mariotte.* — Un grand nombre d'expériences furent faites au XIX<sup>e</sup> siècle, qui montrèrent que la loi de Mariotte n'était qu'approchée. Regnault publia, en 1847, les résultats d'expériences montrant qu'aucun gaz ne suivait exactement la loi de Mariotte.

Des expériences subséquentes (Natterer, MM. Cailletet et Amagat) montrèrent les variations du produit  $AV^1$ ; ces essais portaient sur des pressions allant jusqu'à 3.000 atmosphères, accusant alors des divergences très considérables avec la loi de Mariotte.

Mais on peut admettre qu'en pratique la loi de Mariotte permet, pour les gaz éloignés de leur point de liquéfaction à la température ordinaire (air, oxygène, azote, hydrogène), de résoudre avec une approximation suffisante tous les problèmes jusqu'à 150 atmosphères.

### § III. — MESURE DES PRESSIONS. MANOMÈTRES.

Les Manomètres, qui sont les appareils servant à mesurer les pressions, peuvent se classer en trois groupes :

1. Ce produit est plus souvent désigné sous la forme  $PV$ ;  $V$  étant le volume occupé par une certaine masse de gaz sous la pression  $P$ .

Manomètres à air libre ; Manomètres à air comprimé ; Manomètres métalliques.

L'unité de mesure ordinairement employée pour les mesures de pression est l'*atmosphère*, c'est-à-dire la pression donnée par l'air à la surface du sol ; soit 1 kg. 033 par centimètre carré. Dans les applications diverses aux machines on emploie plus fréquemment le kilogramme par centimètre carré. On voit immédiatement que si  $P$  est la pression en kilogrammes,  $p$  celle en atmosphères :

$$P = 1,033 p.$$

1. *Manomètre à air libre.* — Ce manomètre comporte une branche verticale ouverte à la partie supérieure A (fig. 55). Le gaz dont on veut mesurer la pression est mis en communication avec l'autre branche par le tuyau B. La différence des niveaux  $h$  indique la pression supportée par le gaz en B, en outre de la pression atmosphérique.

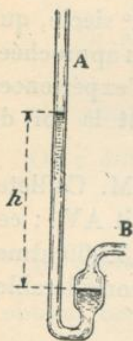


Fig. 55.

On voit immédiatement que pour mesurer les pressions de 10 atmosphères, par exemple, il faut un tube de  $10 \times 76 \text{ cm.} = 7^m 60$  de longueur.

Aussi cet appareil très précis n'est-il guère commode ; M. Amagat, pour obtenir une pression de 430 atmosphères, dut donner à la colonne une hauteur verticale de 327 mètres (les expériences étaient faites dans un puits de mine).

Un artifice imaginé par Desgoffe permet de réduire la hauteur de la colonne libre ; c'est en quelque sorte une presse hydraulique renversée.

La pression à mesurer est établie en B sur un petit piston  $p$  (fig. 56) de section  $s$  ; ce piston fait corps avec un grand piston qui appuie sur le mercure communiquant avec le tube vertical ouvert A.

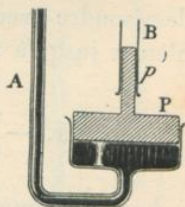


Fig. 56.

Si  $P$  est la pression en B, l'effort produit sur le piston  $p$  est :  $Ps$ . Cet effort est réparti sur la surface  $S$  du piston  $P$ , donc la pression sous  $P$  est  $\frac{Ps}{S}$  ; au lieu de mesurer la pression  $P$  on mesure la pression réduite dans le rapport  $\frac{s}{S}$ . Si  $\frac{s}{S} = \frac{1}{100}$ , on mesurera le centième seulement de  $P$ .

Cet appareil, perfectionné par M. Amagat, lui a servi dans ses expériences et permis de mesurer les pressions jusqu'à 3.000 atmosphères.

2. *Manomètres à air comprimé.* — La branche verticale A, au lieu d'être ouverte à l'air libre, est fermée à sa partie supérieure, et contient de l'air ; la pression établie en B est contrebalancée par la différence des niveaux du mercure, mais surtout par la pression de l'air comprimé en A.

Cet appareil est gradué par comparaison avec un manomètre à air libre ; il offre l'inconvénient d'être peu précis pour les fortes pressions, car les variations de compression sont alors peu considérables ; en outre le verre supporte difficilement les fortes pressions.

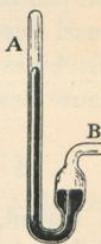


Fig. 57.

3. *Manomètres métalliques.* — Tous les appareils précédemment décrits sont très fragiles ; il ne faut pas songer à les employer sur les machines à vapeur, surtout les machines mobiles, locomotives, locomobiles, vaisseaux, etc. On emploie alors des appareils construits entièrement en métal, par suite moins chers et peu fragiles.

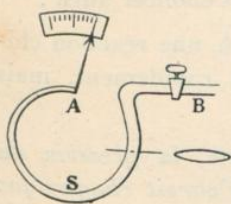


Fig. 58.

Ces appareils se composent d'une spire  $S$  en métal, fermée à l'extrémité  $A$  et recevant le gaz ou la vapeur sous pression par  $B$ . Ce tube peut être enroulé suivant une spire incomplète comme sur la figure 58, ou une spire complète et même plus.

La section du tube est aplatie et forme une ellipse dont le grand axe serait perpendiculaire au plan de la figure 58. Ce tube ainsi rendu flexible offre la propriété que sous l'action d'une pression intérieure, il tend à se dérouler; son extrémité A subit un déplacement que l'on peut noter sur un cadran au moyen d'une aiguille.

Souvent ces déplacements sont amplifiés par un système de leviers.

L'appareil est gradué par comparaison et contenu à l'intérieur d'une boîte en métal.

On voit donc que, par suite de sa construction, l'appareil est peu fragile et peut être placé dans toutes les positions; aussi est-il universellement employé sur toutes les machines; il faut cependant le vérifier de temps à autre à cause des variations de l'élasticité du métal.

#### § IV. — MÉLANGE DES GAZ. LOI DE DALTON.

Quand, dans un même récipient, on introduit des gaz différents, il se produit un mélange et il s'établit une pression uniforme. Berthollet étudia les lois qui régissent ce phénomène en mettant en communication des ballons contenant des gaz différents à des pressions différentes.

Il constata que le mélange se faisait (en supposant des gaz qui ne donnent pas lieu à une réaction chimique) intimement au bout d'un certain temps. En mesurant la pression, il put établir une autre loi relative à la pression.

Les lois du mélange des gaz peuvent s'énoncer ainsi :

1. — Les gaz, ne donnant pas lieu à une réaction chimique, se mélangent plus ou moins rapidement, mais d'une manière intime et permanente.

2. — *La température étant constante, la pression du mélange est la somme des pressions qu'aurait chaque gaz s'il occupait seul le volume total.*

On peut donner une expression analytique de cette seconde loi :

Soient des gaz occupant les volumes  $v$ ,  $v'$ ,  $v''$  sous les pressions  $p$ ,  $p'$ ,  $p''$ .

Soit  $V$  le volume du récipient où l'on fait le mélange.

Les gaz occupant seuls ce volume prendraient, suivant la loi de Mariotte, respectivement les pressions :

$$p_1 = \frac{pv}{V}$$

$$p_2 = \frac{p'v'}{V}$$

$$p_3 = \frac{p''v''}{V}$$

La pression totale  $P$  cherchée est donc, suivant la 2<sup>e</sup> loi de Berthollet :

$$P = p_1 + p_2 + p_3 = \frac{pv}{V} + \frac{p'v'}{V} + \frac{p''v''}{V} = \frac{pv + p'v' + p''v''}{V}$$

ou encore :

$$PV = pv + p'v' + p''v''.$$

On obtient une expression analytique rappelant la loi de Mariotte.

*Remarque.* — La loi de Berthollet n'est exacte que dans les mêmes conditions que celle de Mariotte; elle n'est applicable que dans les limites et avec la précision que l'on a signalées.

## CHAPITRE III

### Appareils à faire le vide. — Pompes.

Un certain nombre d'appareils fonctionnent d'après des principes découlant de la loi de Mariotte ; les uns servent à faire le vide dans un récipient, d'autres au contraire à comprimer l'air ; enfin les pompes destinées soit à élever, soit à refouler l'eau peuvent être expliquées par des théories analogues. On décrira donc successivement le fonctionnement des machines à faire le vide ou machines pneumatiques, des machines à comprimer l'air, et des pompes hydrauliques.

#### § I. — MACHINE PNEUMATIQUE.

1. *Fonctionnement.* — La machine se compose d'un ou deux corps de pompe tels que A (fig. 58) communiquant par un conduit B avec le récipient C où on veut faire le vide ; fréquemment dans les appareils de laboratoire et de démonstration ce récipient est constitué par une cloche posée sur un plateau ; ses bords sont bien rodés et graissés de façon qu'il ne puisse se faire aucune rentrée d'air entre eux et le plateau.

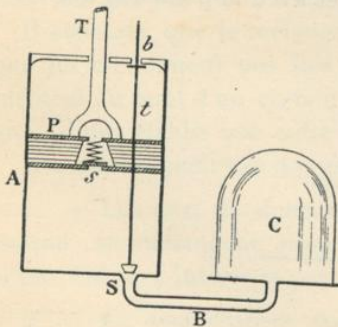


Fig. 59.

Dans le corps de pompe A se déplace un piston P constitué par des rondelles de cuir graissé serrées entre deux disques de métal ; de cette façon on a une étanchéité parfaite le long du cylindre.

Au centre, une soupape  $s$  sert à l'expulsion de l'air.

La soupape  $S$  est manœuvrée par une tige  $t$  passant à frottement dur dans le piston.

Étudions le fonctionnement de l'appareil ; supposons que le piston en bas de course monte ; il entraîne la tige  $t$  qui ouvre  $S$  et établit la communication avec  $C$  ;  $t$  est d'ailleurs arrêté par le butoir  $b$  qui limite sa levée. L'air contenu dans  $C$  et qui ne peut sortir puisque  $s$  est fermé, se répand dans un espace plus grand ; sa pression diminue ; quand  $P$  redescend, il ferme  $S$  et comprime l'air sous lui ; mais quand la pression devient supérieure à la pression atmosphérique, elle soulève  $s$  et l'air passe au-dessus de  $P$  : le piston redescend ainsi jusqu'au bas de course.

2. *Vide.* — On peut évaluer la diminution de pression en  $C$  au bout de  $n$  coups de piston ; soit  $V$  le volume de  $C$  et  $B$  jusqu'à la soupape  $S$  ;  $v$  le volume compris entre  $S$  et le piston en haut de course.

Au premier coup de pompe l'air compris au début dans le volume  $V$  à la pression  $P$  se répand dans le volume  $V + v$  ; d'après la loi de Mariotte, il prend la pression :

$$P_1 = \frac{V}{V + v} P,$$

dans le récipient  $C$  et la conserve pendant la descente.

Au deuxième coup, il prendra la pression :

$$P_2 = \frac{V}{V + v} P_1,$$

$$\text{ou : } P_2 = \left( \frac{V}{V + v} \right)^2 P.$$

$$\text{Au } n^{\text{ème}} \text{ coup : } P_n = \left( \frac{V}{V + v} \right)^n P.$$

On voit que la pression ne sera jamais nulle ; il faudrait un nombre de coups de piston infini pour la réduire à zéro.

3. *Limite du vide.* — Il y a une autre cause qui empêche

d'atteindre le vide ; quand le piston est en bas de course, il existe un certain volume, appelé espace mort <sup>1</sup>, où l'air se comprime sous le piston.

Il arrive un moment où l'air est comprimé sous  $P$  jusqu'en bas de course sans arriver, avant la fin de la course, à soulever  $s$  : il n'y a donc plus expulsion d'air, par suite on ne diminue plus la pression.

Quelle est cette pression-limite ? Soit  $p$  la pression-limite cherchée,  $u$  le volume de l'espace mort,  $P$  la pression atmosphérique. Quand on arrive à la limite, l'air contenu dans le corps de pompe, soit le volume  $v$  à la pression  $p$ , une fois comprimé dans le volume  $u$ , a une pression égale ou inférieure à  $P$  :

Il faut donc pour être à la limite :

$$P \geq \frac{p v}{u}; \text{ la limite est } p = \frac{u P}{v};$$

plus  $u$  sera petit et  $v$  grand, plus on approchera du vide absolu. En fait, on ne peut, pour des causes diverses, rentrées d'air, etc., tomber au-dessous d'une pression de 2 ou 3 millimètres de mercure.

4. *Appareils industriels.* — Ils sont basés sur des principes analogues, mais munis de plusieurs cylindres. On peut signaler également les appareils à mercure basés sur le principe du baromètre : au-dessus de la colonne mercurielle il existe un vide presque absolu ; en remplissant de mercure un récipient et en le vidant alternativement, par ascension et descente du mercure, on en fait une pompe sans espaces morts. On arrive ainsi à obtenir un vide bien plus parfait qu'avec les appareils à piston.

Ces appareils à mercure sont plutôt des appareils de laboratoire ; dans la pratique industrielle, on cherche à produire, non pas un vide parfait, mais des diminutions de pression, faciles à obtenir avec des pompes.

1. On l'appelle aussi espace nuisible ; en machine à vapeur le nom d'espace mort est le plus communément employé.

§ II. — COMPRESSEURS D'AIR.

1. *Fonctionnement.* — Un corps de pompe A contient un piston P ; en levant le piston, il y a diminution de pression sous le piston et l'air extérieur, refoulant la soupape  $s_1$ , pénètre en dessous. Quand le piston redescend, l'air se comprime ;  $s_1$  se ferme,  $s_2$  est ouvert par la pression et l'air contenu sous le piston est refoulé dans le récipient R.

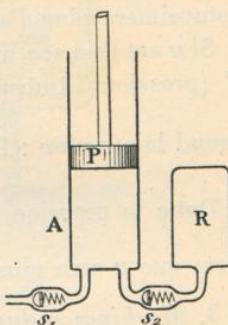


Fig. 60.

On peut trouver, comme pour la machine pneumatique, la pression obtenue dans R après  $n$  coups de piston.

Soit  $P_0$  la pression initiale dans R ;  $P$  la pression atmosphérique ;  $V$  le volume de R jusqu'à la soupape  $s_2$  ;  $v$  le volume du corps de pompe compris sous le piston P et jusqu'aux soupapes,  $s_1, s_2$ .

Si l'on suppose qu'il n'y a pas d'espace mort, tout l'air compris sous le piston sera refoulé dans R.

On a donc dans R un mélange de deux volumes : l'un déjà dans le récipient V à la pression  $P_0$ , l'autre  $v$  à la pression  $P$  ; en appliquant la loi de Berthollet :

$$P_1 = P_0 + P \frac{v}{V} ;$$

car  $P_0$  est la pression du 1<sup>er</sup> volume occupant seul le volume  $v$  ;  $P \frac{v}{V}$  est la pression du volume d'air envoyé par la pompe s'il était seul dans le volume V.

Au deuxième coup de piston :

$$P_2 = P_0 + P \frac{v}{V} + P \frac{v}{V} = P_0 + 2 P \frac{v}{V} .$$

Au  $n^{\text{ème}}$

$$P_n = P_0 + n P \frac{v}{V} .$$

2. *Limite de la pression.* — Il ne semble pas qu'il y ait de limite à la pression qu'on peut établir dans R ; en donnant à  $n$  une valeur très grande,  $P_n$  sera très grand. Mais la machine cessera de fonctionner à une certaine valeur de  $P_n$ , à cause de l'espace mort. Quand l'air comprimé par le piston dans cet espace ne pourra plus refouler  $s_2$ , on ne comprimera plus d'air dans R.

Si  $u$  est l'espace nuisible, l'air de volume  $v$  et de pression  $P$  (pression atmosphérique) comprimé dans cet espace prend la pression :  $P_1 = P \frac{v}{u}$

Donc la pression limite est  $P_1 = P \frac{v}{u}$ , d'autant plus forte que  $u$  sera plus petit et  $v$  plus grand.

3. *Machines industrielles.* — Elles sont basées sur les mêmes principes, mais à plusieurs cylindres ; de plus pour obtenir de très fortes pressions (plusieurs centaines d'atmosphères), l'air comprimé dans un premier cylindre est envoyé ensuite dans un second qui le comprime à son tour, parfois même dans un troisième.

On arrive ainsi à diminuer l'influence des espaces morts et à obtenir des pressions considérables.

### § III. — POMPES HYDRAULIQUES.

1. *Classification.* — On laissera de côté tous les appareils élévateurs d'eau basés sur l'emploi de norias ou chapelets de récipients, de seaux équilibrés, etc., pour ne considérer que des appareils munis de pistons, dont la théorie se rattache à la loi de Mariotte et à la pression atmosphérique.

Parmi ceux-ci on distingue les pompes aspirantes, les pompes foulantes, les pompes aspirantes et foulantes. Leurs formes diffèrent un peu, mais il est toujours facile de les classer par les définitions suivantes :

Le corps de la pompe aspirante est placé à une certaine

hauteur au-dessus du niveau de l'eau, et l'eau sort au niveau du corps de pompe (fig. 61 a).

Le corps de la pompe foulante est placé au niveau de

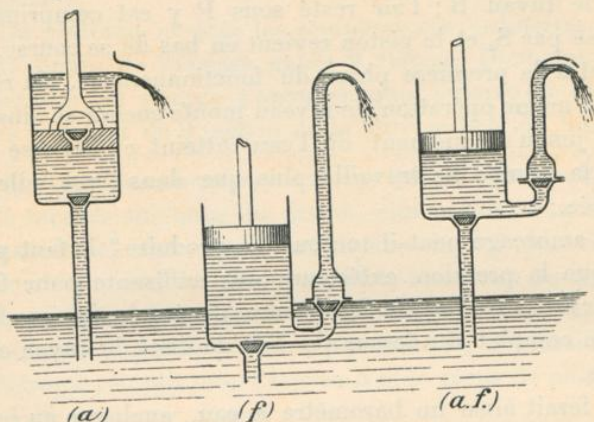


Fig. 61.

l'eau, et l'eau refoulée sort à un niveau plus élevé (fig. 61 f).

Enfin, la pompe aspirante et foulante, qui participe des deux précédentes, a son corps placé au-dessus du niveau de l'eau et refoule l'eau à un niveau plus élevé.

2. *Pompes aspirantes.* — Au début du fonctionnement, l'air occupe l'intérieur du corps de pompe, A, le tuyau B, de telle sorte que le niveau de l'eau est à la même hauteur MN, à la surface extérieure et dans le tuyau B. On dit que la pompe est désamorçée. Il faut l'amorcer.

a) *Amorçage de la pompe aspirante.* — Le piston P étant supposé en bas de sa course est soulevé, l'air compris dans le tuyau B soulève  $S_1$  et se répand dans le volume formé par la pompe et le tuyau B. Il y a donc diminution de pression à l'intérieur; par suite, sous l'action de la pression atmosphérique

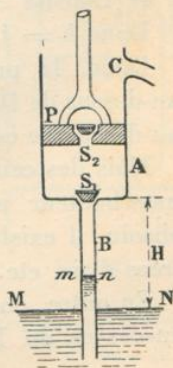


Fig. 62.

agissant sur MN, l'eau monte dans le tuyau B, jusqu'à un niveau *mn*.

Quand le piston P redescend, le clapet  $S_1$  retombe et isole le tuyau B; l'air resté sous P y est comprimé et expulsé par  $S_2$  et le piston revient en bas de sa course. On revient à la première phase du fonctionnement. En répétant la même opération, le niveau monte encore et ainsi de suite jusqu'au moment où l'eau atteint et dépasse  $S_1$ ; alors la pompe ne travaille plus que dans l'eau, elle est amorcée.

Cet amorçage peut-il toujours se produire? Il faut pour cela que la pression extérieure soit suffisante pour faire monter le niveau jusqu'à  $S_1$ , en admettant qu'on puisse faire le vide complet du dessus du liquide dans le tuyau et la pompe.

On ferait ainsi un baromètre à eau, analogue au baromètre à mercure mais où la colonne mercurielle serait remplacée par une colonne d'eau.

A quelle hauteur s'élève cette colonne? Elle fait équilibre à la pression atmosphérique qui est de 1 kg. 033 par centimètre carré; il y aura donc une hauteur  $h$  en centimètres telle que :  $h \times 1 \text{ cm}^2 = 1.033$  grammes, en supposant l'eau à 4° (Densité = 1).

Donc  $h = 1.033$  centimètres ou 10<sup>m</sup> 33.

Donc, la pression atmosphérique ne peut élever l'eau au-dessus de 10<sup>m</sup> 33; la soupape  $S_1$  ne devra pas être placée au-dessus de cette hauteur<sup>1</sup>.

Mais des causes diverses empêchent le fonctionnement à une hauteur moindre; la pompe ne peut faire le vide absolu, il existe des espaces morts, il se produit des rentrées d'air, etc.

En outre, on verra au Chapitre de la Vaporisation que, au-dessus du liquide, il s'établit une pression due à la

1. C'est à la suite de l'observation de l'impossibilité qu'avaient des fontainiers de Florence de pomper l'eau à plus de 10 mètres de profondeur que Galilée découvrit la pesanteur de l'air et la pression atmosphérique.

vapeur saturée, pression qui croît avec la température et qui diminue encore la hauteur à laquelle on peut pomper; on ne peut pas *pomper de l'eau chaude* avec une pompe aspirante.

En pratique, et pour les températures ordinaires, la hauteur limite ne dépasse guère 9 mètres. Donc une pompe aspirante ne pourra s'amorcer que lorsque le clapet  $S_1$  sera à moins de 9 mètres de la surface MN du liquide.

b) *Fonctionnement normal.* — Quand l'eau a atteint  $S_1$ , à la montée suivante du piston, elle le suit; à la descente consécutive, l'eau passe au-dessus de lui par  $S_2$ . A la seconde montée le piston soulève cette eau au-dessus de lui, et elle se déverse par C; pendant ce temps, le vide se faisant sous le piston, l'eau, par suite de la pression atmosphérique remplit tout l'espace B et le corps de pompe sous le piston.

Le fonctionnement se fait alors d'une manière continue.

3. *Pompes foulante et aspirante foulante.* — Quand on veut monter de l'eau à une hauteur supérieure à 10 mètres, il faut employer un autre appareil; on peut employer soit la pompe foulante, soit la pompe aspirante et foulante. En se reportant à la figure 61, on voit que la pompe foulante est toujours dans le liquide et par suite toujours amorcée.

Elle peut élever l'eau à n'importe quelle hauteur, à condition qu'on exerce sur le piston un effort suffisant.

La pompe aspirante et foulante participe des deux précédentes; elle exige un amorçage préalable, mais permet le refoulement à toute hauteur.

Souvent les pompes employées en pratique sont à double effet, c'est-à-dire que l'aspiration est faite par les deux

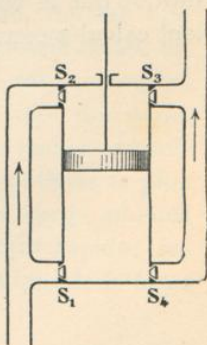


Fig. 63.

faces du piston ; les deux courses, montante et descendante, servent à faire sortir l'eau dont le jet est ainsi plus continu ; la figure 63 montre la disposition d'une telle pompe du type aspirant et foulant.

Les clapets  $S_1$ ,  $S_2$  sont les clapets d'aspiration,  $S_3$ ,  $S_4$  de refoulement ; ces clapets sont contretenus par des ressorts qui les appliquent normalement sur leur siège.

4. *Réservoir d'air.* — On n'obtient pas encore, avec le dispositif à double effet, un jet très continu ; aux extrémités de course, dans le renversement de

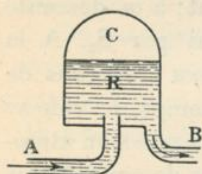


Fig. 64.

tés de course, dans le renversement de marche du piston, il n'y a pas d'eau refoulée et, par suite, il y a interruption du jet ; pour obtenir un jet continu, on met un réservoir d'air intermédiaire  $R$  ; l'eau refoulée par la pompe en  $A$  arrive dans  $R$  et comprime l'air dans le fond  $C$  ; au moment où l'eau arrive en quantité moindre par  $A$ , l'air comprimé en  $C$  refoule en  $B$  l'eau qui se trouve en  $R$ .

Ce récipient  $R$  sert de volant au débit et le régularise à condition que le volume d'air et les débits des tuyaux  $A$ ,  $B$  soient calculés convenablement.