

aura le coefficient de ventilation :  $\frac{230}{2500} = 0,43$ . Ce coefficient varie naturellement avec la capacité pulmonaire et le volume de l'air inspiré. A ce dernier point de vue, GRÉHANT a remarqué qu'une forte inspiration produit une ventilation plus efficace que deux inspirations plus petites apportant cependant le même volume d'air.

c. *Murmure vésiculaire*. — En appliquant l'oreille contre les parois thoraciques on perçoit, pendant toute la durée de l'inspiration et au début de l'expiration, un souffle doux, moelleux, appelé *bruit* ou *murmure vésiculaire*. Au niveau de la trachée et de la bifurcation des grosses bronches, ce bruit est plus fort et plus rude (*souffle bronchique*). Le murmure vésiculaire ne provient pas seulement de la propagation des bruits laryngiens et trachéaux à la masse gazeuse des poumons; mais il doit être attribué au frottement de l'air contre les parois des petites bronches et au déplissement des alvéoles. CHAUVÉAU et BONDET ont observé qu'après la section transversale de la trachée faite de manière à permettre la libre entrée et sortie de l'air, le bruit bronchique disparaît, tandis que le murmure vésiculaire persiste; et que, par contre, la section des pneumogastriques (qui paralyse les petits muscles des bronches et dilate leurs anneaux) abolit le murmure vésiculaire et laisse intact le bruit trachéal.

2° **Effets produits par les mouvements respiratoires sur les organes autres que le poumon**. — Les mouvements d'inspiration et d'expiration font sentir leurs effets sur tous les organes contenus dans le thorax et l'abdomen. Nous avons déjà fait remarquer qu'ils exercent leur influence sur la circulation intracardiaque et sur la circulation des veines voisines du cœur et du thorax. L'effet de l'aspiration thoracique est non seulement d'attirer l'air dans le poumon, mais aussi le sang dans les cavités cardiaques. Si après avoir fait une expiration forcée, on dilate le thorax en maintenant la bouche et le nez fermés (*expérience* de MÜLLER), l'air ne pouvant entrer dans le poumon, le vide intrathoracique est comblé seulement par l'afflux du sang dans le cœur et les gros vaisseaux qui se dis-

tendent; la circulation veineuse est ainsi favorisée, mais la circulation artérielle est au contraire gênée, et la pression sanguine baisse dans les artères périphériques. Inversement, si après une profonde inspiration, on fait une forte expiration en fermant la glotte comme dans l'effort, ou en se bouchant les narines (*expérience* de VALSALVA), la masse gazeuse comprimée dans le poumon transmet cette compression au cœur et aux vaisseaux intrathoraciques; ceux-ci se vident alors plus ou moins du sang qu'ils contiennent, une stase veineuse se produit, et la pression sanguine augmente dans les vaisseaux périphériques. Si la compression du thorax est très forte et se prolonge, le cœur peut même s'arrêter et le pouls disparaître, d'où syncope.

Les mouvements respiratoires font sentir aussi leur influence sur les organes abdominaux. Pendant l'inspiration calme, le diaphragme en diminuant sa voussure abaisse le foie et comprime la masse intestinale, d'où projection en avant de la paroi antérieure de l'abdomen. L'augmentation de pression intra-abdominale favorise la circulation dans les branches de la veine porte et dans la veine cave. Lorsque le diaphragme remonte dans l'expiration calme, le foie suit ce mouvement d'ascension, et les autres viscères subissent une décompression. Dans l'expiration forcée, dans l'effort, les viscères abdominaux sont par contre fortement comprimés par la contraction énergique des muscles expirateurs qui entrent dans la composition des parois du ventre.

## ARTICLE II

## PHÉNOMÈNES CHIMIQUES DE LA RESPIRATION

Les phénomènes chimiques de la respiration envisagés dans leurs rapports avec la fonction pulmonaire, consistent dans l'absorption de l'oxygène de l'air et l'exhalation d'acide carbonique et de vapeur d'eau. C'est LAVOISIER qui établit le premier la vraie théorie de la respiration; il découvrit le rôle de l'oxygène et montra que la respiration est une combustion qui résulte prin-

ciplement de la combinaison de l'oxygène avec le carbone, de telle sorte que l'animal est comparable à une bougie qui brûle. Mais le siège de cette combustion n'est pas, comme il le pensait, dans le poumon. La respiration pulmonaire n'est qu'une partie de la fonction respiratoire; elle a pour but de fournir au sang l'oxygène et d'en éliminer l'acide carbonique. Le véritable siège des combustions est dans les tissus; ce sont les éléments anatomiques qui consomment l'oxygène et produisent  $\text{CO}^2$ ; ce sont eux qui respirent par conséquent, et le sang n'est que le véhicule chargé de leur porter l'oxygène et d'en rapporter l'acide carbonique. L'oxydation des tissus se fait avec dégagement de chaleur (réaction exothermique), et parmi les produits de combustion, les uns, l'acide carbonique et l'eau, sont éliminés en partie par le poumon, en partie par la peau, les autres (urée, acide urique, etc.) sont rejetés hors de l'organisme par les reins.

De ce que nous venons de dire découle une division toute naturelle dans l'exposé des phénomènes chimiques de la respiration; nous étudierons d'abord les échanges gazeux dans le poumon, puis le rôle du sang et des tissus dans la respiration. Un troisième paragraphe sera consacré aux variations que subissent les échanges gazeux dans diverses conditions.

#### § 1. — ÉCHANGES GAZEUX DANS LE POUMON

L'air que nous respirons subit des modifications dans le poumon. Il ne suffit pas de le constater; il faut encore se rendre compte de l'activité des échanges gazeux et pour cela les mesurer à l'aide d'appareils spéciaux.

**1° Modifications de l'air respiré.** — En comparant l'air inspiré à l'air expiré, on s'aperçoit qu'il subit dans le poumon certaines modifications d'ordre physique et d'ordre chimique.

**A. MODIFICATIONS PHYSIQUES.** — Elles se rapportent au volume de l'air, à sa température et à son état hygrométrique.

a. *Volume.* — Le volume de l'air expiré paraît plus grand que celui de l'air inspiré; mais cela provient de ce qu'il est plus chaud et par conséquent plus dilaté; si on le ramène à la température et

à la pression de l'air atmosphérique, on constate au contraire que l'air qui sort du poumon occupe un volume moindre que celui de l'air inspiré. Ce fait remarquable tient à ce que l'oxygène absorbé ne reparaît pas tout entier dans les produits d'oxydation exhalés par le poumon, comme nous le démontrerons plus loin.

b. *Température.* — L'air s'échauffe dans les voies respiratoires au contact des muqueuses richement vascularisées des fosses nasales, de la trachée, des bronches et des alvéoles pulmonaires; aussi la température de l'air expiré se maintient-elle toujours à peu près au même chiffre, 33 à 36°, quelle que soit celle de l'air ambiant (lorsque du moins celle-ci n'oscille qu'entre 10 et 25°).

c. *État hygrométrique.* — Tandis que l'état hygrométrique de l'air atmosphérique peut varier du point de sécheresse absolue au point de saturation, celui de l'air expiré est invariable: l'air sort du poumon saturé de vapeur d'eau à la température qui lui est propre, parce qu'il a été en contact avec une vaste surface continuellement humectée. Il est facile dès lors, connaissant l'état hygrométrique et la température de l'air inspiré et de l'air expiré, de calculer la quantité d'eau qui est éliminée par le poumon. Cette quantité subira évidemment de grandes variations suivant les différences de l'état hygrométrique de l'air atmosphérique. Mais on peut admettre, en se basant sur des calculs exécutés par DALTON, qu'un homme adulte exhale en moyenne par la surface pulmonaire 500 grammes d'eau en vingt-quatre heures.

**B. MODIFICATIONS CHIMIQUES.** — L'air atmosphérique a une composition remarquablement fixe; il contient pour 100 volumes 20,8 d'oxygène et 79,2 d'azote (y compris l'argon récemment découvert). Quand à l'acide carbonique, on n'en trouve que des traces dans un air pur. L'air expiré ne contient plus que 16 d'oxygène, et il renferme 4,4 d'acide carbonique pour 100 volumes. On se rend facilement compte de la présence de  $\text{CO}^2$  dans l'air expiré en soufflant à l'aide d'un tube dans de l'eau de chaux; cette eau se trouble immédiatement par formation de carbonate de chaux.

**2° Mesure de l'activité des échanges gazeux.** — Cette mesure consiste dans le dosage de l'oxygène consommé et de l'acide carbonique produit par un animal pendant un temps donné. Pour effectuer ce dosage on se sert d'appareils assez compliqués que nous décrirons tout d'abord.

a. *Méthodes et appareils.* — Dans l'appareil d'ANDRAL et GAVARRET on se borne à recueillir l'air expiré dans trois grands ballons où l'on a préalablement fait le vide. Mais la composition de l'air expiré ne peut nous renseigner sur la valeur des échanges

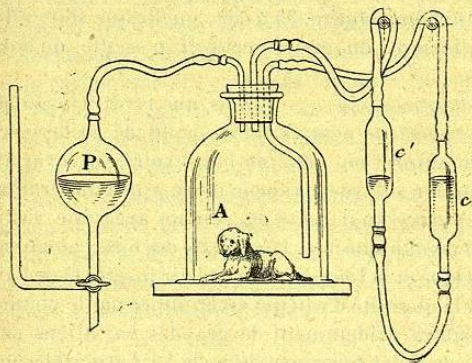


Fig. 90.

Schéma de l'appareil de REGNAULT et REISET (d'après L. FRÉDÉRICQ).

gazeux qu'autant que l'on connaît aussi la quantité d'air qui passe dans les poumons. Aussi est-ce la méthode de LAVOISIER perfectionnée par REGNAULT et REISET qui donne les résultats les plus importants. Elle repose sur ce principe : si un animal respire dans un espace clos de volume connu, la composition de l'air de cet espace confiné va être modifiée, et par une analyse il sera facile de connaître la quantité d'oxygène qui aura disparu et la quantité de  $\text{CO}_2$  qui aura été produite. Mais un animal ne peut pas respirer longtemps d'une façon normale dans un espace confiné étroit ; car l'air s'y trouve rapidement vicié et impropre aux combustions. Pour que l'expérience soit prolongée pendant un

certain temps, il faut donc pouvoir maintenir normale la composition de l'air de l'espace confiné, et pour cela absorber l'acide carbonique au fur et à mesure qu'il est produit et restituer l'oxygène consommé. C'est là le perfectionnement qu'apportèrent à la méthode REGNAULT et REISET. Dans ce but, ils firent communiquer d'une part la cloche A (fig. 90) où respire l'animal avec un système de deux pipettes  $cc'$  reliées entre elles par un tube de caoutchouc et contenant de la potasse ; ces deux pipettes étaient animées d'un mouvement alternatif d'abaissement et d'élévation, destiné à aspirer l'air de la cloche et à l'y refouler, après l'avoir débarrassé de son acide carbonique par le contact avec la potasse. D'autre part, la cloche A fut aussi mise en communication par un tube avec un ballon jaugé P contenant de l'oxygène, de manière à remplacer l'oxygène absorbé par l'animal. De la sorte la quantité d'oxygène consommée pendant la durée de l'expérience était évaluée directement, la quantité de  $\text{CO}_2$  produite était déterminée par le titrage de la potasse ; enfin l'analyse de l'air de la cloche indiquait les variations qu'avait pu subir l'azote.

Cet appareil présentait cependant certaines imperfections ; la principale était que les pipettes à potasse n'absorbaient pas assez activement l'acide carbonique et que l'air de la cloche pouvait contenir à la fin d'une expérience jusqu'à 2 p. 100 de  $\text{CO}_2$ , de sorte que l'animal ne respirait pas un air de composition normale. Aussi les modifications que JOLYET et REGNARD apportèrent à cet appareil sont-elles d'une grande importance. Ces auteurs évitèrent d'abord de loger l'animal dans l'espace confiné, et se bornèrent à lui faire respirer l'air de la cloche au moyen d'une muselière hermétique, afin d'être sûrs de ne recueillir que les gaz provenant de la respiration pulmonaire ; en second lieu, ils augmentèrent considérablement l'absorption de  $\text{CO}_2$  par la potasse en annexant à l'appareil un manchon à deux tubulures à demi rempli de potasse dans lequel ils firent circuler l'air de la cloche. Ce manchon fut animé d'un mouvement de va-et-vient rapide et saccadé, de manière à brasser et pulvériser la solution de potasse et à multiplier ses points de contact avec l'air : de cette façon, l'absorption de  $\text{CO}_2$  fut rendue beaucoup plus rapide.

PETTENKOFFER et VOIT ont fait construire un appareil de très

grandes dimensions pour étudier les échanges gazeux chez l'homme. Dans cet appareil l'espace confiné est représenté par une chambre spacieuse dans laquelle un homme peut se loger et se livrer même à certaines occupations. Cette chambre est ventilée par aspiration de l'air au moyen d'une pompe à vapeur, et la quantité d'air qui la traverse est mesurée par un compteur à gaz. Tout l'air qui sort de l'appareil n'est pas soumis à l'analyse ; on en prélève seulement un échantillon pour le dosage de  $\text{CO}^2$  et de la vapeur d'eau ; c'est là le point faible de la méthode ; car les erreurs de l'analyse, insignifiantes pour la quantité d'air prélevée, deviennent considérables quand elles sont multipliées par la masse d'air qui a traversé l'appareil. De plus, cette méthode ne permet pas de doser directement l'oxygène consommé.

b. *Résultats, quotient respiratoire.* — L'intensité des échanges gazeux varie suivant un grand nombre de conditions que nous exposons plus loin. Pour l'instant nous rechercherons seulement quelle est la moyenne de l'oxygène consommé et du  $\text{CO}^2$  produit par un homme adulte dans l'état ordinaire. Pour la calculer d'une façon approximative, point n'est besoin de retenir une foule de chiffres. Il suffit de connaître la composition de l'air expiré. Comme nous l'avons dit quelques lignes plus haut, l'air expiré contient pour 100 centimètres cubes, 16 centimètres cubes d'oxygène (par conséquent 4,8 de moins que l'air inspiré) et 4,4 de  $\text{CO}^2$  (par conséquent 4,4 de plus que l'air inspiré, car nous pouvons négliger la quantité minime de  $\text{CO}^2$  contenue dans l'air atmosphérique). Or nous savons que la quantité d'air introduite dans le poumon par l'inspiration et rejetée par l'expiration est de 500 centimètres cubes (c'est l'air courant). Pour connaître la quantité d'oxygène qui est absorbée à chaque mouvement respiratoire, il suffit donc de multiplier 4<sup>cc</sup>,8 par 5 ; de même la quantité de  $\text{CO}^2$  contenue dans l'air rejeté par une expiration est de  $4,4 \times 5$ . Le nombre des mouvements respiratoires étant de 16 par minute, il suffira de multiplier les produits obtenus par 16, puis par 60, puis par 24 pour connaître la quantité d'O consommée et de  $\text{CO}^2$  exhalée par minute, par heure et par jour. On trouve ainsi que le volume de l'oxygène absorbé s'élève à 23 litres et celui du  $\text{CO}^2$  rejeté à 21 litres *par heure*. Ces chiffres représentent

à peu de chose près la valeur des échanges respiratoires que l'on obtient dans le dosage direct des gaz au moyen des appareils que nous avons décrits. Quant à l'azote, il ne paraît subir aucune modification dans la respiration ; le volume de ce gaz est le même dans l'air expiré et dans l'air inspiré. Cependant, d'après REGNAULT et REISET, l'air expiré contiendrait un excès d'azote, mais cette quantité d'azote ainsi exhalée, est dans tous les cas extrêmement minime.

On trouve en outre dans l'air expiré des traces d'hydrogène, de gaz des marais, d'ammoniaque qui pour la plus grande part paraissent émaner d'autres voies que la voie pulmonaire. Certaines substances volatiles absorbées par le sang peuvent être aussi éliminées par la voie pulmonaire (telles qu'éther, chloroforme, musc, essence d'ail, etc.).

Il résulte de ce qui vient d'être exposé que la quantité de l'air expiré est moins grande que celle de l'air inspiré, car l'azote ne varie pas sensiblement, et la quantité de  $\text{CO}^2$  exhalée est moins grande que la quantité d'oxygène consommée. En d'autres termes, tout l'oxygène consommé ne reparaît pas dans l'acide carbonique expiré ; d'où il découle qu'une partie de l'oxygène doit être employée à d'autres combustions que celles qui donnent naissance au  $\text{CO}^2$  de la respiration.

Le rapport de l'acide carbonique produit à l'oxygène disparu est ce que PFLÜGER a nommé le *quotient respiratoire* ; ce quotient est plus petit que l'unité, puisque la valeur de  $\text{CO}^2$  est moins grande que celle de O. On l'exprime ainsi :  $\frac{\text{CO}^2}{\text{O}} < 1$ . Si nous remplaçons  $\text{CO}^2$  et O par leurs valeurs données plus haut nous avons  $\frac{21}{23} = 0,9$ . En admettant donc que 23 litres d'oxygène aient été consommés et 21 litres de  $\text{CO}^2$  exhalés pendant une heure, le quotient respiratoire sera égal à 0,9. La valeur du quotient respiratoire varie du reste suivant diverses circonstances, mais en particulier suivant l'alimentation. Après une alimentation riche en hydrates de carbone (féculents et sucres), le quotient respiratoire s'élève et se rapproche de l'unité, c'est-à-dire que les quantités d'oxygène consommé et d'oxygène contenu dans  $\text{CO}^2$  tendent à s'égaliser ; au contraire, après l'ingestion de corps gras

le quotient respiratoire s'abaisse; après une nourriture exclusivement animale, il descend jusqu'à 0,62. Pour comprendre ces faits, il faut admettre que l'oxygène qui ne reparait pas dans la respiration sous forme de  $\text{CO}^2$  est employé à brûler d'autres corps, en particulier l'hydrogène pour former de l'eau; ainsi le quotient respiratoire s'abaisse ou s'élève suivant la plus ou moins grande quantité d'oxygène qui sert à la combustion de l'hydrogène. Or, les hydrates de carbone contiennent par eux-mêmes assez d'oxygène pour brûler tout leur hydrogène, comme le montre leur formule (féculé =  $\text{C}^6 \text{H}^{10} \text{O}^5$ ); il en résulte que lorsqu'ils brûlent à l'air libre, tout l'oxygène qu'ils consomment est employé à oxyder leur carbone et reparait sous forme de  $\text{CO}^2$ . Leur quotient de combustion, comme on peut l'appeler, est égal à 1. (L'acide carbonique renfermant, on le sait, son propre volume d'oxygène.) Il en est de même dans l'organisme, et voilà pourquoi  $\frac{\text{CO}^2}{\text{O}}$  tend vers l'unité après l'ingestion d'hydrates de carbone. Au contraire, les graisses ne contiennent que peu d'oxygène à côté d'une quantité énorme d'hydrogène (par exemple : oléine =  $\text{C}^{57} \text{H}^{104} \text{O}^2$ ); pour les brûler il faudra donc une quantité d'oxygène bien supérieure à celle qui est nécessaire pour l'oxydation de leur carbone; aussi leur quotient de combustion (ou de respiration) s'abaisse-t-il notablement au-dessous de l'unité :  $\frac{\text{CO}^2}{\text{O}} = 0,33$ .

## § 2. — RÔLE DU SANG ET DES TISSUS DANS LES ÉCHANGES GAZEUX

Dans le poumon le sang se charge d'oxygène et se débarrasse de son acide carbonique. Un phénomène inverse se passe au niveau des capillaires généraux; le sang cède aux tissus son oxygène et se charge de  $\text{CO}^2$ .

**1° Rôle du sang.** — Le sang est l'intermédiaire entre l'air extérieur et les éléments anatomiques. Son rôle ne put être bien compris que lorsque MAGNUS en 1838 en eut extrait les gaz qu'il renferme. Étudions d'abord les gaz du sang; nous analyserons

ensuite le mécanisme par lequel se font les échanges gazeux entre l'air et le sang dans le poumon.

**A. GAZ DU SANG.** — On extrait les gaz du sang par le vide barométrique, au moyen de la pompe à mercure. A l'aide de cet appareil, pour la description duquel je renvoie aux traités de physique, on fait le vide dans un ballon. Puis, quand le vide est parfait, on introduit dans ce ballon une certaine quantité du sang dont on veut recueillir les gaz; sous l'influence du vide, les gaz se séparent du sang; mais pour les obtenir en totalité il faut de plus chauffer légèrement le sang; par le jeu de la pompe, on fait ensuite passer les gaz du ballon dans une éprouvette graduée; celle-ci étant alors portée sur la cuve à mercure, on y dose les gaz en absorbant  $\text{CO}^2$  par la potasse, O par l'acide pyrogallique ou le phosphore; Az est estimé par différence.

En opérant de la sorte on retire de 100 centimètres cubes de sang environ 60 centimètres cubes de gaz à 0° et 760 millimètres de pression. Ces gaz se répartissent de la façon suivante pour le sang artériel et le sang veineux :

	O	$\text{CO}^2$	Az
100 cc. de sang artériel contiennent	20 à 24 cc.	39 cc.	1 cc.,5
100 cc. — veineux —	8 à 12 cc.	46 cc.	1 cc.,5

On voit par là que les deux sortes de sang, artériel et veineux, contiennent de l'oxygène et de l'acide carbonique; mais le premier de ces gaz est en plus grande quantité dans le sang artériel que dans le sang veineux, tandis que pour  $\text{CO}^2$ , c'est l'inverse. Quant à l'azote, il se trouve en faible quantité et dans les mêmes proportions pour les deux espèces de sang.

On a extrait aussi les gaz de la lymphe. Ce liquide est remarquable en ce qu'il ne renferme pas d'oxygène ou seulement des traces de ce gaz. 100 centimètres cubes de lymphe ont donné 0<sup>cc</sup>,1 d'oxygène, 40 centimètres cubes de  $\text{CO}^2$  et 1<sup>cc</sup>,5 d'azote.

**B. MÉCANISME DES ÉCHANGES GAZEUX ENTRE L'AIR ET LE SANG.** — Le sang veineux arrivé dans les capillaires du poumon est mis en présence de l'air atmosphérique sur une large surface que