

Exercice 1

compléter le tableau suivant :

composition de l'air sec : réponse

composant	%
O ₂	21% (20,95)
CO ₂	<0,1% (0,05)
N ₂	78 % (78,09)
autres gaz	< 1 % (0,93)

Calculer la PIO_2 (a) pour un individu respirant de l'air et (b) pour un individu respirant un mélange à 50 % d'O₂ et 50 % de N₂.

réponse : La PIO_2 est égale à la fraction d'O₂ dans le gaz respiré, multipliée par la pression en air sec, c'est-à-dire la pression atmosphérique moins la pression de vapeur saturante à 37 °C, soit 47 mm Hg.

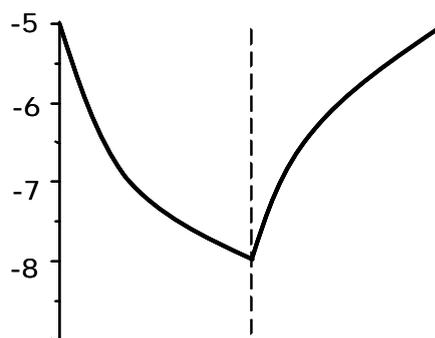
La PIO_2 est donc de $0,21 \times (760-47) = 150$ mm Hg lorsque l'on respire de l'air, et de $0,5 \times (760-47) = 356$ mm Hg lorsqu'on respire un mélange à 50 % d'O₂.

NB : quelque soit la pression partielle en vapeur du mélange gazeux extérieur, l'air inspiré est saturé en vapeur d'eau.

Exercice 2

On mesure chez un individu la variation de la pression intrapleurale lors d'un cycle respiratoire. On obtient la courbe suivante :

pression intrapleurale (cm H₂O)



a) Indiquer quelles parties de la courbe de variation de pression correspondent à l'inspiration, et à l'expiration.

réponse : Le système ventilatoire étant une pompe aspirante, l'inspiration correspond à la diminution de la pression intrapleurale, c'est-à-dire la 1^{re} partie, descendante, de la courbe. L'expiration est passive, et correspond à la 2^e partie, ascendante, de la courbe.

La compliance pulmonaire statique moyenne est de 200 mL / cm H₂O.

b) Calculer la variation de volume pulmonaire lors de la respiration.

réponse : La variation de volume est égale à la variation de pression multipliée par la compliance. La variation de pression intrapleurale est de 3 cm H₂O. Pour une compliance de 200 mL / cm H₂O, la variation de volume pulmonaire est de 600 mL, ce qui correspond à la valeur moyenne du volume courant, de l'ordre de 0,5 L.

c) Quelle sera la variation de volume pulmonaire si la compliance est diminuée de 20 % ?

réponse : Si la compliance est diminuée de 20 %, la variation de volume pulmonaire ne sera que de 480 mL.

d) Quelle conséquence cette diminution aura sur la ventilation ?

réponse : Etant donné que la variation de volume pulmonaire est responsable de la diminution de pression alvéolaire et donc du débit de ventilation, une diminution de la compliance se traduira par une diminution de la ventilation. C'est ce qui se passe dans certains cas de syndrome de détresse respiratoire aiguë (SDRA).

Exercice 3

Donner la relation existant entre le débit, la pression et la résistance.

a) Calculer quelle est la conséquence d'une diminution de 10 % du diamètre des voies aériennes sur la ventilation alvéolaire.

(Pour un écoulement laminaire, la résistance est inversement proportionnelle au rayon à la puissance 4. On considèrera que tous les écoulements sont laminaires.)

réponse :

principe :

Le débit est proportionnel à la différence de pression et inversement proportionnel à la résistance.

La résistance est inversement proportionnelle, pour un flux laminaire, au diamètre, ou au rayon, à la puissance 4.

Donc, le débit ventilatoire est proportionnel au diamètre à la puissance 4.

Une diminution de diamètre des voies aériennes entraîne une diminution de la ventilation supérieure à 10%.

calcul :

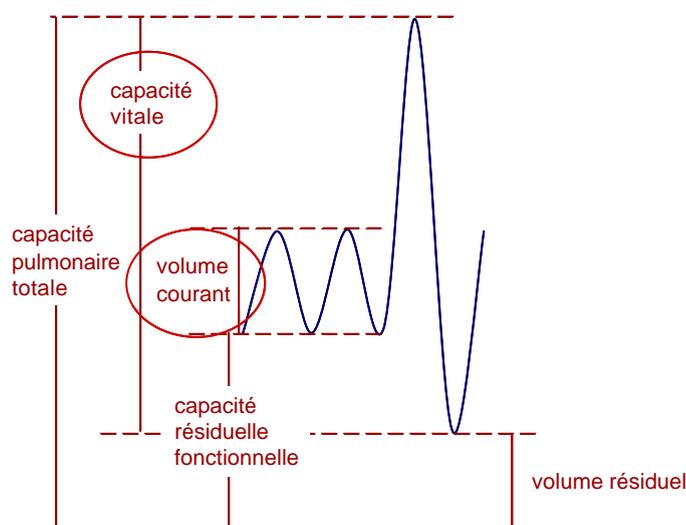
Une diminution de 10 % du diamètre correspond à un diamètre égal à 0,9 du diamètre initial. Ceci entraîne une augmentation de la résistance, la résistance finale étant égale de $1/(0,9)^4$ - soit $1/0,66$ - de la résistance initiale. La ventilation, inversement proportionnelle à la résistance, est donc égale à 0,66 (66%) de la ventilation initiale, soit une diminution de 34 %.

b) Quelles en sont les conséquences sur la $PACO_2$ et la PAO_2 .

réponse : La diminution de la ventilation entraîne une diminution de l'élimination pulmonaire du CO_2 , et donc une augmentation de la $PACO_2$. elle entraîne une diminution de l'apport d' O_2 au niveau alvéolaire, et donc une diminution de la PAO_2 .

Exercice 4

a) Donner les définitions des différents volumes respiratoires mesurables en spirométrie.



réponse : Les volumes mesurables en spirométrie sont la capacité vitale et le volume courant. Le VR et les volumes qui lui sont liés (capacité pulmonaire totale, capacité résiduelle fonctionnelle) ne sont pas mesurables en spirométrie.

b) Donner les valeurs normales du volume courant et de l'espace mort.

réponse : Le volume courant est de 500 mL, et l'espace mort (volume résiduel) de 150mL.

c) Pour ces valeurs, et pour une PIO_2 égale à celle calculée lors de l'exercice 1 a), quelle est la PO_2 de l'air expiré (PEO_2) lorsque la PAO_2 est de 100 mmHg.

réponse :

principe : l'air inspiré ne participe pas en totalité aux échanges gazeux. En effet, l'espace mort anatomique est ventilé, mais sans échange de gaz. La composition du gaz alvéolaire est modifiée par rapport à celle de l'air inspiré, à cause des échanges gazeux. Par contre, la composition du gaz de l'espace mort (volume résiduel) est égale à celle de l'air inspiré. L'air expiré est le mélange de l'air qui a participé aux échanges alvéolaires et de l'air de l'espace mort ; sa composition est donc intermédiaire entre les deux. La PEO_2 est donc intermédiaire entre la PIO_2 et la PAO_2 .

calcul : L'air expiré est le mélange de l'air qui a participé aux échanges gazeux alvéolaires (V_A) et de l'air du volume résiduel (V_R), qui ne participe pas aux échanges gazeux, la somme de ces deux volumes correspondant au volume courant (V_C). La PEO_2 est la moyenne de la PO_2 de l'air de chacun de ces 2 volumes, pondérée par leur participation respective au volume courant. La PO_2 du gaz alvéolaire est la PAO_2 . La PO_2 du gaz du volume résiduel est celle de l'air inspiré (PIO_2), puisqu'il n'y a pas d'échange gazeux dans l'espace mort. La PEO_2 est donc donnée par l'équation :

$$PEO_2 = [PAO_2 \times (V_A / V_C)] + [PIO_2 \times (V_R / V_C)], \text{ avec } V_A = V_C - V_R$$

$$PAO_2 = 100 \text{ mmHg} ; V_A / V_C = 350/500 + PIO_2 = 150 \text{ mmHg} ; V_R / V_C = 150/500$$

$$PEO_2 = [100 \times 0,7] + [150 \times 0,3] = 120 \text{ mmHg. (soit } 120/713 = 16,8 \% \text{ de l'air sec)}$$

d) calculer la capacité d'extraction de l' O_2 du poumon humain, c'est-à-dire le pourcentage d' O_2 qui est extrait par la respiration.

réponse : la PIO_2 est de 150mmHg, soit 21% de l'air sec. La PEO_2 est de 120 mmHg, soit 17 % de l'air sec. La différence est de 4 %. La respiration extrait donc 4/21 % de l' O_2 contenu dans l'air sec, soit 19 %.

Exercice 5

a) Quelle est la loi qui définit le débit de diffusion d'un gaz entre deux compartiments ? De quels paramètres dépend le débit de diffusion ?

réponse : Il s'agit de la loi de Fick : le débit de diffusion (dV/dt) est proportionnel à la différence de pression partielle en gaz entre les deux compartiments ($P_1 - P_2$), au coefficient de diffusion du gaz (D), à la surface de la zone d'échange (S), et inversement proportionnel à son épaisseur (E).

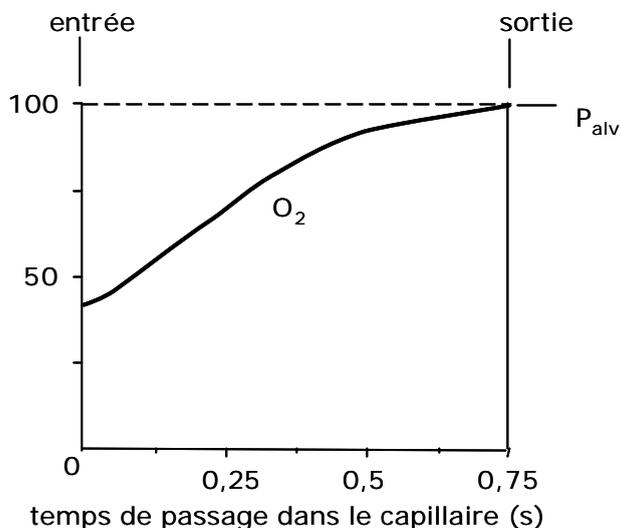
$$dV/dt = (P_1 - P_2) \times (S/E) \times D$$

b) Pourquoi cette loi est-elle importante pour comprendre le fonctionnement d'un système respiratoire ? À quel(s) niveau(x) du système respiratoire les phénomènes décrits par cette loi jouent-ils ?

réponse : Un système respiratoire étant un système facilitant des échanges gazeux entre le milieu extérieur et le milieu intérieur, la loi de Fick s'applique au passage des gaz au niveau de la zone d'interface animal-milieu : barrière alvéolocapillaire, pour des poumons alvéolaires. Elle s'applique aussi aux échanges gazeux à l'intérieur de l'animal, lors de la diffusion des gaz entre les capillaires et les tissus.

Exercice 6

On mesure la diffusion alvéolo-capillaire chez un individu et on obtient le résultat suivant :



a) La diffusion alvéolo-capillaire est-elle normale ?

réponse : La courbe présente pas un aspect normal ; l'équilibre des pressions ne s'obtient qu'au bout de 75 ms au lieu de 25 ms pour une diffusion normale. il y a donc une diminution de la capacité de diffusion de l'O₂. La réserve de diffusion est nulle. (voir courbe normale présentée en cours)

b) Quelles en sont les conséquences sur la concentration en oxygène du sang ?

réponse : Au repos, il n'y a pas de modification de la captation d'O₂ par le capillaire. Par contre, dès que la vitesse de passage du sang dans les capillaires augmente, l'équilibre des pressions ne peut pas être atteint, et le passage d'O₂ est limité par la diffusion. La PaO₂ est alors inférieure à 100 mmHg et, compte tenu de la courbe de saturation de l'hémoglobine, l'hémoglobine n'est pas saturée en O₂, et la concentration en O₂ du sang diminue (voir la courbe de saturation de l'hémoglobine, présentée en cours et dans l'exercice 9).

c) la respiration d'un mélange enrichi en O₂ modifierait-elle le profil de la courbe ? Quelles en seraient les conséquences sur la concentration en O₂ du sang ?

réponse : La respiration d'un mélange hyperoxique aura comme conséquence d'augmenter la PAO₂, et donc d'augmenter le gradient de pression partielle entre les compartiments alvéolaires et capillaires. Selon la loi de Fick, le débit de diffusion sera plus rapide, et la pente de la courbe plus prononcée. L'équilibre des pressions sera atteint plus rapidement, ce qui donnera une légère réserve de diffusion. d'O₂ par le capillaire. Cela aura comme conséquence d'augmenter la PaO₂. Au repos, l'effet sur la concentration en O₂ sera très faible, car, avec une respiration d'air normale, la PaO₂ au repos (100 mmHg) correspond au quasi maximum de la courbe de saturation de l'hémoglobine. À l'effort, par contre, la chute de la PaO₂ sera limitée, ce qui évitera la diminution de la concentration en O₂ du sang.

Exercice 7

Valeur moyenne de la barrière de diffusion chez le rat et chez la chauve-souris
Phyllostomus hastatus

paramètre	unités	rat	chauve-souris
barrière de diffusion	µm	0,38	0,12

En prenant comme hypothèse que les autres paramètres responsables de la diffusion alvéolo-capillaire sont identiques chez le rat et la chauve-souris, lequel des deux animaux a la réserve de diffusion la plus importante.

réponse : Selon la loi de Fick, le débit de diffusion à travers la paroi alvéolo-capillaire et d'autant plus grand que la barrière est mince. Ce débit est donc, toute chose étant égale par ailleurs, plus rapide chez la chauve-souris que chez le rat. L'équilibre des pressions partielles entre le gaz alvéolaire et le sang capillaire est donc plus rapide chez la chauve-souris. Pour un temps de passage du sang dans le capillaire identique, la chauve-souris a une réserve de diffusion plus importante que le rat.

Exercice 8

a) Quelle est la loi physique qui définit la concentration en gaz dissous dans un liquide, en fonction de la pression partielle en gaz ? De quels paramètres dépend cette concentration ?

réponse : il s'agit de la loi de Henry. La concentration en gaz dissous (C) est proportionnelle à la pression partielle en gaz (P), et la solubilité du gaz dans le liquide (Sol). $C = P \times \text{Sol}$

b) Pourquoi cette loi est-elle importante pour comprendre le fonctionnement d'un système respiratoire ? À quel(s) niveau(x) du système respiratoire les phénomènes décrits par cette loi jouent-ils ?

réponse : La loi de Henry détermine, à l'équilibre, la quantité d'O₂ dissous dans l'eau, et donc la quantité d'O₂ disponible. Chez les animaux à respiration aérienne, la loi de Fick intervient dans la quantité d'O₂ et de CO₂ dissous en fonction de la pression partielle en gaz au niveau de la zone d'échange gazeux.

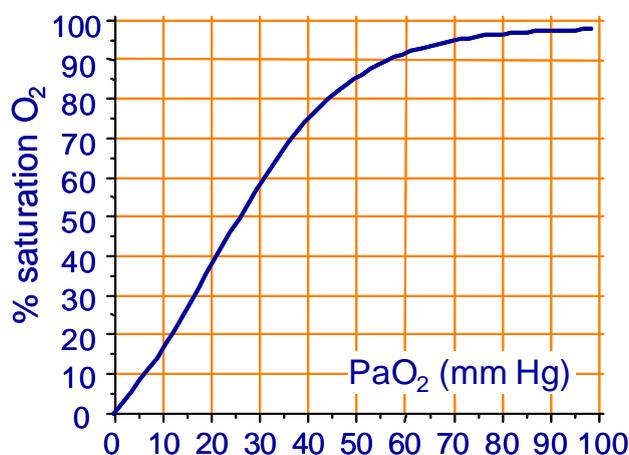
NB : En milieu aquatique, la loi de Fick intervient dans la quantité d'O₂ disponible dans la milieu extérieur. (par exemple, la solubilité de l'O₂ dépend de la température, de la salinité..., paramètres qui influencent la quantité l'O₂ disponible pour la respiration aquatique.)

Le coefficient de solubilité de l'O₂ dans le sang est de $3 \cdot 10^{-5} \text{ L}_{\text{O}_2} \times (\text{L}_{\text{sang}} \times \text{mmHg})^{-1}$

c) Calculer le volume d'O₂ dissous par litre de sang, pour une pression partielle en O₂ de 100 mmHg.

réponse : le volume est le produit de la pression partielle par le coefficient de solubilité, soit $3 \cdot 10^{-5} \times 10^2 = 3 \cdot 10^{-3} \times \text{L}_{\text{O}_2} \times (\text{L}_{\text{sang}})^{-1}$ (3 mL par L)

Exercice 9



Le diagramme ci-contre représente le pourcentage de saturation de l'hémoglobine (Hb) en O₂, en fonction de la pression partielle en O₂.

La capacité maximale de fixation d'O₂ sur l'hémoglobine, correspondant à 100% de saturation, est de $1,39 \cdot 10^{-3} \text{ L}$ par g d'Hb. La concentration normale du sang en Hg est de 150 g par litre.

a) Quelle est la quantité d'O₂ fixée sur l'Hb pour une pression partielle en O₂ de 100 mmHg. Comparer avec la quantité d'O₂ dissous (exercice 8).

réponse : la quantité d'O₂ fixée sur l'Hb dépend (i) de la capacité maximale de fixation de l'hémoglobine, (ii) de la concentration en hémoglobine dans le sang, et (iii) du pourcentage de saturation de l'hémoglobine, qui est donné, en fonction de la PO₂, par la courbe de saturation.

Pour une PO₂ de 100 mmHg, le pourcentage de saturation est d'environ 100 %. La quantité d'O₂ est donc : $1,39 \cdot 10^{-3} \times 150 \times (100/100) = 0,2085 \text{ L}_{\text{O}_2} \times (\text{L}_{\text{sang}})^{-1}$ (208 mL par L). Comparée à la quantité d'O₂ dissous (exercice 6), la quantité d'O₂ fixée à l'Hb est beaucoup plus importante.

b) Les avions de ligne volent à une altitude de croisière supérieure à 10 000 m, où la pression partielle en O₂ est trop faible pour la vie humaine. Les cabines d'avions sont donc pressurisées. Cependant, la pression dans la cabine est inférieure à la pression atmosphérique au niveau de la mer, et l'altitude fictive de la cabine est maintenue entre 1500 et 2450 m. Pour ces deux altitudes, les pressions partielles en O₂ dans le sang sont 90 et 70 mmHg, respectivement. Quelles sont les conséquences de ces deux valeurs sur la quantité d'O₂ présente dans le sang ?

réponse : Pour une PO₂ de 90 mmHg (1500 m), selon la courbe de saturation, il n'y a pas de diminution de la concentration en O₂. Cette altitude est dans la « zone d'indifférence », pour laquelle la diminution de pression partielle en O₂ n'a pas de conséquence sur sa concentration sanguine.

Pour une PO₂ de 70 mmHg (2450 m), selon la courbe de saturation, il y a diminution de la concentration en O₂ (95 % de saturation). La concentration en O₂ est de $0,95 \times 0,2085 = 0,198 \text{ L}_{\text{O}_2} \times (\text{L}_{\text{sang}})^{-1}$ (198 mL par L). La diminution reste faible, bien qu'effective. (en général, l'organisme compense cette légère diminution. Cependant, pour certaines personnes souffrant de problèmes respiratoires – l'organisme n'est pas toujours capable de compenser les effets de la diminution de la PO₂.)

Exercice 10

chémorécepteurs

variables régulées	capteurs	effecteurs
PCO ₂ pH	chémorécepteurs centraux	ventilation
PO ₂ PCO ₂ pH	chémorécepteurs périphériques	ventilation débit sanguin résistances vasculaires
PO ₂ concentration en O ₂	capteurs rénaux	érythropoïèse

a) Une augmentation de la PCO₂ se traduit-elle par une augmentation ou une diminution du pH ? Par quel mécanisme ?

réponse : Une augmentation de la PCO₂ (hypercapnie) se traduit par une diminution du pH (acidose). En effet, le principal système tampon de l'organisme est le système bicarbonate, correspondant à la réaction suivante :



Lors de l'augmentation de la PCO₂, la réaction est déplacée vers la droite, avec une augmentation des ions H⁺ et donc une diminution du pH.

b) Une augmentation de la PCO_2 se traduit-elle par :

- une augmentation de la PO_2 ?
- une diminution de la PO_2 ?
- une absence d'effet sur PO_2 ?

Pourquoi ?

réponse : Une augmentation de la PCO_2 se traduit par une diminution de la PO_2 . En effet, l'augmentation de la PCO_2 est due à une augmentation du métabolisme (augmentation de la production de CO_2) et/ou à une diminution de la ventilation (diminution de l'élimination du CO_2). Or, l'augmentation du métabolisme entraîne une consommation d' O_2 et une diminution de la ventilation entraîne une diminution de l'apport d' O_2 . Donc, dans tous les cas, l'augmentation de PCO_2 correspond à une diminution de PO_2 . (L'augmentation de la PCO_2 , par la mise en jeu des chémorécepteurs, entraînera une augmentation de la ventilation qui se traduira par une diminution de la PCO_2 et une augmentation de la PO_2).

c) Une diminution de la $PaCO_2$ a quel effet sur la ventilation ? Par quel(s) mécanisme(s) ?

réponse : Une diminution de la $PaCO_2$, par l'intermédiaire des chémorécepteurs sensibles à la PCO_2 et au pH, entraîne une modulation négative des centres nerveux qui contrôlent les muscles inspiratoires, ce qui a pour effet une diminution de la ventilation.

Exercice 11

On mesure l'activité électrique des neurones des chémorécepteurs centraux sur des tranches de tissus.

a) Ces tissus sont prélevés :

- au niveau du pont ?
- au niveau du bulbe rachidien ?
- au niveau des corpuscules aortiques ?

réponse : Les chémorécepteurs centraux, sensibles au pH et à la PCO_2 , sont situés sur la face ventrale du bulbe rachidien. C'est donc sur des tissus prélevés au niveau du bulbe que l'on peut les étudier.

b) On fait varier expérimentalement la PO_2 , la PCO_2 , ou le pH. On note une augmentation de la fréquence des potentiels d'action lorsqu'on :

- diminue la PO_2 ?
- diminue la PCO_2 ?
- diminue le pH ?

réponse : Les chémorécepteurs centraux sont activés par une diminution du pH et une augmentation de la PCO_2 (au niveau moléculaire, l'inhibition de canaux potassiques par une augmentation des ions H^+ génère une dépolarisation qui peut entraîner des potentiels d'action). Une augmentation de la fréquence des potentiels d'action est donc déclenchée par une diminution du pH. (La diminution de la PCO_2 a l'effet inverse. La diminution de la PO_2 n'a pas d'effet.)