

## EXERCICES 5 JEUDI 1 MAI 2025

**1) Imaginons que 1/14 du volume total des poumons soient réellement utilisés en condition de repos pour la respiration. A : Si l'on considère un volume courant ( $V_T$ ) de 450 ml, quelle est la fréquence respiratoire ( $\text{min}^{-1}$ ) permettant de ventiler 350 l/h ? B : En gardant cette même fréquence respiratoire, que devient le débit respiratoire (l/min) si tout le volume des poumons est alors mobilisé, sachant que 1.3 l ne seront pas exploitable ? Ce scénario vous semble-t-il plausible ? C : A la faveur de quel phénomène peut-il avoir lieu ? D : Quelle est l'augmentation de la fonction respiratoire obtenue ?**

Réponse A : Soit les équations suivantes

$$\text{Le débit respiratoire } \dot{V}_E = \text{volume courant } (V_T) \cdot \text{fréquence respiratoire } (f_{\text{resp}}) \quad (1)$$

$$\text{La capacité pulmonaire totale} = \text{Capacité vitale} + \text{Volume résiduel} \quad (2)$$

$$\text{On connaît la ventilation horaire de 350 [l/h]} \quad (3)$$

$$\text{Le débit respiratoire minute } (\dot{V}_E) \text{ est donc } \frac{350 \left[\frac{\text{l}}{\text{h}}\right]}{60 [\text{min}]} = 5.83 [\text{l/min}] \quad (4)$$

$$\text{De (1) l'on obtient la fréquence respiratoire } \frac{5.83 \left[\frac{\text{l}}{\text{min}}\right]}{0.45 [\text{l}]} = \mathbf{12.96 \text{ min}^{-1}} \quad (5)$$

Réponse B :

Si 1/14<sup>ème</sup> de la capacité pulmonaire totale représente le volume courant ( $V_T$ ),

alors avec (2) l'on peut calculer la capacité vitale comme suit :

$$(V_T) 0.45 [\text{l}] \cdot 14 = 6.3 [\text{l}] \text{ (Capacité pulmonaire totale)} \quad (6)$$

$$6.3 \text{ l (Capacité pulmonaire totale)} - 1.3 \text{ l (Volume résiduel)} = 5 \text{ l (Capacité vitale)} \quad (7)$$

Enfin en reprenant (1) avec (5) et (7) il en résulte

$$12.96 [\text{min}^{-1}] \cdot 5 [\text{l}] = \mathbf{64.8 \text{ l/min}} \quad (8)$$

Oui à la condition de ventiler à la capacité vitale de 5 l à raison de 12x/min, c'est à dire avec un débit ventilatoire dans les 60 l/min, ou de ventiler beaucoup plus vite un volume courant.

Réponse C :

L'effort et le travail requis pour parvenir à augmenter le débit respiratoire sont très importants, extrêmes même. Les muscles impliqués dans la respiration, en particulier le diaphragme, les muscles du cou (SCM et scalène), vont consommer une partie de l' $\text{O}_2$  fournit, et produire une grande quantité de  $\text{CO}_2$ . A la limite, ils devront travailler en régime anaérobie pendant un certain temps, en produisant de l'acide lactique, avec le risque de provoquer une crampe (le fameux « point respiratoire »). L'augmentation massive de la respiration peut être provoqué soit par un stimulus hypoxique (montée en altitude avec diminution de la pression partielle en  $\text{O}_2$ ), soit par un stimulus hypercapnique, résultant d'un

effort physique important avec production conséquente de CO<sub>2</sub>. La combinaison des deux stimuli peut avoir lieu, également à la faveur d'un effort ou d'une demande métabolique accrue.

Réponse D :

En reprenant les valeurs de (8) et de (4) l'on obtient  $\frac{64.8 \left[\frac{1}{\text{min}}\right]}{5.83 \left[\frac{1}{\text{min}}\right]} = \mathbf{11.1 \times}$  plus important

**2) Un jeune sportif court un marathon. Ses fréquences cardiaque et respiratoire augmentent notablement pour s'adapter à l'effort. A : Quel est le débit respiratoire, sachant que le volume courant de base de 525 ml quadruple, qu'il expire toutes les 2 secondes, que le rapport  $\dot{V}_A/Q = 4$ , que le cœur bat à 150 min<sup>-1</sup>, et éjecte 85 ml à chaque battement ? B : Quel est le volume de l'espace mort ? C : Que devient ce dernier si le  $\dot{V}_A/Q$  change à 3 avec une fréquence respiratoire de 20 min<sup>-1</sup> ? D : Est-ce favorable pour la respiration adaptée à l'effort ?**

Réponse A :

Le débit respiratoire  $\dot{V}_E = \text{volume courant } (V_T) \cdot \text{fréquence respiratoire } (f_{\text{resp}})$  (1)

Le volume courant  $V_T$  à l'effort devient : 525 [ml] · 4 = 2100 [ml] (2)

La fréquence respiratoire est de 30 [min<sup>-1</sup>] (3)

Le débit respiratoire à l'effort est donc de 2100[ml] · 30 [min<sup>-1</sup>] = **63.0 [l/min]** (4)

Réponse B :

Le débit cardiaque  $Q = V_{\text{Ejec}} \cdot \text{Freq}_{\text{card}} = 0.085 \text{ [ml]} \cdot 150 \text{ [min}^{-1}] = 12.75 \text{ [l/min]}$  (5)

Le rapport  $\dot{V}_A/Q$  permet de calculer la ventilation alvéolaire  $\dot{V}_A = Q \cdot 4$ , soit avec (5)

$\dot{V}_A = 12.75 \text{ [l/min]} \cdot 4 = 51 \text{ [l/min]}$  (6)

La ventilation alvéolaire  $\dot{V}_A = \text{volume alvéolaire } (V_A) \cdot \text{fréquence respiratoire } (f_{\text{resp}})$  (7)

et donc le volume alvéolaire est  $\frac{51.0 \left[\frac{1}{\text{min}}\right]}{30 \text{ [min}^{-1}]} = 1700 \text{ [ml]}$  (8)

Le Volume alvéolaire + Volume espace mort = Volume courant  $V_A + V_D = V_T$  (9)

ainsi le volume de l'espace mort vaut 2100 [ml] - 1700 [ml] = **400 [ml]** (10)

Réponse C :

Le rapport  $\dot{V}_A/Q = 3$  réduit la ventilation alvéolaire  $\dot{V}_A$  à

$\dot{V}_A = 12.75 \text{ [l/min]} \cdot 3 = 38.25 \text{ [l/min]}$  (11)

avec le volume alvéolaire qui devient  $\frac{38.25 \left[\frac{1}{\text{min}}\right]}{20 \text{ [min}^{-1}]} = 1912 \text{ [ml]}$  (12)

et le volume de l'espace mort qui vaut 2100 [ml] - 1912 [ml] = **188 [ml]** (13)

Réponse D :

La diminution du rapport  $\dot{V}_A/Q$  permet de favoriser la partie circulation (Q) de ce rapport, avec une meilleure distribution du sang oxygéné, en diminuant l'effort de ventilation. Ceci est marqué par la réduction de la fréquence respiratoire, et un volume de l'espace mort physiologique qui est plus petit. Ainsi le volume mobilisé lors de la ventilation est davantage un volume utile et exploitable, avec valorisation du  $V_A$ , alors que le  $V_D$  ne joue plus un rôle si important dans le volume total  $V_E$  mis en jeu lors de l'adaptation à l'effort.

**3) Un sujet de 24 ans de grande taille (1.98 m) ventile avec les caractéristiques suivantes : sa capacité pulmonaire vaut 8 l ; il reste 25% de ce volume qui est inexploitable en fin d'expiration forcée ; 8% du volume réel des poumons sont utilisés lors de la respiration au repos. L'espace mort des voies respiratoires hautes vaut 1/10<sup>ème</sup> du volume inexploitable. A : Quelle est la ventilation alvéolaire si le sujet respire à 10 min<sup>-1</sup> ? B : Quelle serait cette dernière s'il ventilait à 25 min<sup>-1</sup> avec le même débit respiratoire ? C : Quel est le meilleur rendement pour la respiration entre ces deux régimes de ventilation ?**

Réponse A :

On sait que la Capacité pulmonaire totale = Capacité vitale + Volume résiduel (1)

et que le Volume alvéolaire + Volume espace mort = Volume courant  $V_A + V_D = V_T$  (2)

Capacité pulmonaire totale  $\cdot (1 - 0.25) =$  Capacité vitale (3)

ce qui donne  $8 \text{ [l]} \cdot (1 - 0.25) = 6 \text{ [l]}$  (4)

On sait aussi que : Capacité pulmonaire totale  $8 \text{ [l]} \cdot 8\% = 640 \text{ ml} (= V_T)$  (5)

De (1) et (3) l'on déduit que le Volume résiduel qui vaut :  $25\% \text{ de } 8 \text{ [l]} = 2 \text{ [l]}$  (6)

On sait également avec (6) que le volume mort  $V_D = 0.1 \cdot 2 \text{ [l]} = 200 \text{ ml}$  (7)

Avec (2) et (7) l'on calcule le volume alvéolaire  $V_A = V_T - V_D \Rightarrow 640 - 200 = 440 \text{ ml}$  (8)

On définit également  $\dot{V}_A = V_A \cdot f_{\text{resp}}$  (9)

et  $\dot{V}_E = V_T \cdot f_{\text{resp}}$  (10)

soit avec (8) et (9) une ventilation alvéolaire  $\dot{V}_A$  de

$440 \text{ [ml]} \cdot 10 \text{ [min}^{-1}] = 4.4 \text{ [l/min]}$  (11)

et un débit respiratoire  $\dot{V}_E$  de  $640 \text{ [ml]} \cdot 10 \text{ [min}^{-1}] = 6.4 \text{ [l/min]}$  (12)

Réponse B :

En prenant (12) avec la nouvelle donnée l'on obtient le nouveau volume courant  $V_T$

$$\frac{6.4 \left[ \frac{1}{\text{min}} \right]}{25 \text{ [min}^{-1}]} = 256 \text{ ml} \quad (13)$$

Avec (2) (7) et (13) l'on calcule le nouveau volume alvéolaire  $256 - 200 = 56 \text{ [ml]}$  (14)

enfin (9) permet de connaître la nouvelle ventilation alvéolaire  $\dot{V}_A$

$$56 \text{ [ml]} \cdot 25 \text{ [min}^{-1}\text{]} = \mathbf{1.4 \text{ l/min}} \quad (15)$$

Réponse C :

L'on constate que lorsque le sujet respire lentement mais profondément, comme l'espace mort reste le même, l'espace alvéolaire est mieux exploité. La ventilation est donc meilleure que si le sujet se met à respirer rapidement mais superficiellement, le même espace mort prenant, relativement, plus de place dans la mobilisation des volumes respiratoires. C'est à la faveur de cette diminution de performance de la respiration que le phénomène d'hyperventilation, dont l'origine est essentiellement psychogène, se maintient, la personne victime d'une crise d'hyperventilation se mettant à respirer très vite mais à petit volume. Cela entretient la gêne respiratoire, avec les conséquences sur la chute de  $\text{CO}_2$  et la montée du pH sanguin.

**4) On fait respirer dans un sac de 10 l remplis d' $\text{O}_2$  pur un sujet au repos en circuit fermé. A : Au bout de combien de cycles respiratoires la concentration de  $\text{CO}_2$  dans le sac vaudra-t-elle 10% du volume du sac, avec un volume courant de 540 ml, une fréquence respiratoire de  $13 \text{ min}^{-1}$  et une concentration de  $\text{CO}_2$  de 2.85% dans l'air expiré ? B : Quel est l'appauvrissement du sac en gaz au cours du temps si la consommation d' $\text{O}_2$  vaut  $250 \text{ ml/min}$  et que, par toute hypothèse théorique, l'entier de l' $\text{O}_2$  peut être utilisé, et que l'on néglige totalement l'effet du  $\text{CO}_2$ . La concentration de  $\text{CO}_2$  reste 2.85% dans l'air expiré. C : Dans la réalité, est-ce que ce scénario est réaliste ? D : Dans quelle situation (historiquement connue) une équipe de scientifiques et de techniciens a-t-elle du travailler dans l'urgence pour trouver une solution élégante au problème de  $\text{CO}_2$  croissant dans un espace clos ?**

Réponse A :

En utilisant  $\dot{V}_E = V_T \cdot f_{\text{resp}}$  l'on peut calculer le débit respiratoire  $\dot{V}_E$  (1)

$$540 \text{ [ml]} (= V_T) \cdot 13 \text{ [min}^{-1}\text{]} = 7.02 \text{ [l/min]} \quad (2)$$

En définissant que le débit de production d'un  $\dot{V}_{\text{GAZ}} = \dot{V}_E \cdot \text{conc}_{\text{GAZ}}$  (3)

en utilisant (2) et (3) l'on obtient  $7.02 \text{ [l/min]} \cdot 2.85\% \text{ CO}_2 = 200.0 \text{ [ml/min]}$  (4)

de  $\text{CO}_2$  produit par minute de respiration dans le sac

Enfin sachant que 10% de 10 l de  $\text{CO}_2 = 1 \text{ [l]}$  (5)

et en connaissant (4) l'on peut calculer le temps et le nombre de cycles respiratoires nécessaires pour arriver à cette concentration, soit

$$\frac{1 \text{ [l]}}{0.2 \text{ [min}^{-1}\text{]}} = 5 \text{ min} ; \text{ et le nombre de cycles : } 5 \text{ [min]} \cdot 13 \text{ [cycles/min}^{-1}\text{]} = \mathbf{65 \text{ cycles}} \quad (6)$$

Réponse B :

On sait que  $\dot{V}_E = V_T \cdot f_{\text{resp}}$  (7)

et que le Volume alvéolaire + Volume espace mort = Volume courant  $V_A + V_D = V_T$  (8)

On sait que 0.25 [l] d'O<sub>2</sub> sont consommés par minute. Donc si tout l'oxygène pouvait être consommé, le sac serait vidé d'O<sub>2</sub> en  $\frac{10 \text{ [l]}}{0.25 \text{ } \left[ \frac{\text{l}}{\text{min}} \right]} = 40 \text{ [min]}$  (9)

Dans le même temps 0.2 [l] de CO<sub>2</sub> s'accumulent chaque minute dans le sac ce qui donne un volume résiduel de 0.2 [l] · 40 [min] = **8 [l]** de CO<sub>2</sub> (10)

### Réponse C :

Non dans la réalité l'entier de l'oxygène ne pourra pas être exploité dans ce sac, car au fur et à mesure que l'O<sub>2</sub> est consommé, le CO<sub>2</sub> s'accumule à un taux rapidement toxique. L'inspiration de CO<sub>2</sub> augmente la P<sub>a</sub>CO<sub>2</sub>, diminue le pH sanguin artériel, et ensemble, ces deux stimuli vont conduire à une augmentation massive du débit respiratoire, dans le but d'améliorer l'élimination de CO<sub>2</sub>. Comme ce dernier reste dans le sac, l'on entre dans un cercle vicieux. Au-delà de 13-14% de CO<sub>2</sub>, les conditions sont délétères et la mort survient ensuite par suffocation.

### Réponse D :

C'est lors de la mission Apollo 13 que, suite à l'explosion d'un réservoir d'O<sub>2</sub> liquide, l'équipage d'Aquarius a dû se réfugier dans le LEM. Comme les circuits de recyclage du CO<sub>2</sub> ne fonctionnaient plus, il a fallu confectionner à bord un système de secours permettant de connecter correctement les filtres épurant le CO<sub>2</sub>.

**5) Sachant que l'hémoglobine saturée à 97% dans les poumons peut fixer 19 ml d'O<sub>2</sub>/100 ml de sang, et que cette fixation d'O<sub>2</sub> tombe à 14.5 ml O<sub>2</sub>/100 ml sang dans les tissus périphériques, quelle est la fréquence cardiaque permettant de délivrer 350 l d'O<sub>2</sub>/j avec un volume télédiastolique du ventricule droit de 130 ml et une fraction d'éjection de 65.4% ? B : En quoi la qualité du sang joue-t-elle un rôle dans l'oxygénation des tissus ? C : Quelle serait la conséquence d'une anémie sur la fréquence cardiaque ?**

### Réponse A :

On sait que  $\frac{V_{Ejec}}{VTD} = \text{fraction éjection}$  (1)

et que le débit cardiaque  $Q = V_{Ejec} \cdot \text{Freq}_{card}$  (2)

La consommation d'oxygène  $\dot{V}_{O_2}$  est de  $\frac{350 \text{ [l]}}{1440 \text{ [min]}} = 0.243 \text{ [l/min]} = 243 \text{ ml/min}$  (3)

La quantité d'oxygène contenu dans le sang et délivré aux tissus vaut

$19.0 \text{ [ml]} - 14.5 \text{ [ml]} = 4.5 \text{ [ml]} \text{ O}_2/100 \text{ [ml]} \text{ sang}$  (4)

Pour fournir un apport d'oxygène des poumons équivalent à la consommation des tissus, en connaissant (3) et (4), il faut un débit cardiaque de

$\frac{243 \text{ } \left[ \frac{\text{ml}}{\text{min}} \right]}{4.5 \text{ } \left[ \frac{\text{ml O}_2}{100 \text{ ml}} \right]} = 54 \cdot 100 \text{ ml/min} = 5.4 \text{ l/min}$  (5)

$$\text{En utilisant (1) } V_{\text{Ejec}} = V_{\text{TD}} \cdot \text{fract éjec} = 130 \cdot 0.654 = 85 \text{ [ml]} \quad (6)$$

$$\text{et (2) } \frac{5.4 \left[ \frac{1}{\text{min}} \right]}{85 \text{ [ml]}} = 63.5 \text{ min}^{-1} \quad (7)$$

#### Réponse B :

L'hémoglobine transporte l'O<sub>2</sub> et le CO<sub>2</sub> dans le sang, en apportant le premier des poumons vers les tissus périphériques, et en ramenant le second des tissus vers les poumons. Si du monoxyde de carbone, CO, est inhalé, ce dernier déplace la courbe de saturation de l'hémoglobine et entre en compétition avec celle-ci pour fixer l'O<sub>2</sub>. Une intoxication au CO a donc des conséquences graves pour la fonction respiratoire et la bonne oxygénation des tissus.

#### Réponse C :

De même manière, une anémie, avec la diminution des transporteurs d'O<sub>2</sub> que sont les globules rouges, et la diminution d'hémoglobine que cela implique, amoindrit la capacité de transport d'O<sub>2</sub> du sang, et la fonction cardiaque doit compenser, par une augmentation du débit cardiaque, la moindre efficacité des transports dont le nombre est réduit.

**6) Un patient souffrant d'asthme se promène dans un pré en floraison et développe une crise aiguë. Quelle est la diminution de sa ventilation si, avant la crise, il pouvait éliminer sans problème le CO<sub>2</sub> produit (200 ml/min), et que lors de la crise, le CO<sub>2</sub> expiré augmente de 80%, à cause de la résistance augmentée des voies aériennes ? Sa capacité vitale vaut 4.5 l, son volume courant est 12% de sa capacité vitale, et il respire initialement toutes les 3.5 secondes. Cette diminution est-elle importante (en % de la ventilation de base) ? B : Comment y remédier, en connaissant les bases anatomiques et les lois des gaz ? C : Quelle serait la nouvelle fréquence respiratoire pour éliminer ce CO<sub>2</sub> excédentaire si la réponse respiratoire augmente de 50% le débit respiratoire, mais réduit de 25% le volume courant ?**

#### Réponse A :

La fréquence respiratoire se calcule comme ceci :

$$\frac{60 \text{ [sec]}}{3.5 \text{ [sec]}} = 17.14 \text{ nombre de cycles respiratoire / minute (fréq resp = min}^{-1}) \quad (1)$$

Le volume courant V<sub>T</sub> s'obtient comme ceci :

$$4.5 \text{ [l]} \cdot 12\% = 540 \text{ [ml]} \quad (2)$$

et le débit respiratoire  $\dot{V}_E$  comme cela :

$$540 \text{ [ml]} \cdot 17.14 \text{ [min}^{-1}] = 9.25 \text{ [l/min]} \quad (3)$$

La concentration de CO<sub>2</sub> dans l'air expiré ( $\dot{V}_{\text{GAZ}} = \dot{V}_E \cdot \text{conc}_{\text{GAZ}}$ ) avant la crise se calcule de cette manière :

$$\frac{200 \left[ \frac{\text{ml}}{\text{min}} \right]}{9.25 \left[ \frac{\text{l}}{\text{min}} \right]} = 2.16\% \quad (4)$$

La concentration de CO<sub>2</sub> dans l'air expiré pendant la crise devient :

$$2.16\% \text{ CO}_2 \text{ avant crise} \cdot (1 + 80\%) = 2.16\% \cdot 1.8 = 3.88\% \quad (5)$$

et le débit respiratoire de crise  $\dot{V}_E$  s'abaisse à :

$$\frac{200 \left[ \frac{\text{ml}}{\text{min}} \right]}{3.88\%} = 5.14 \text{ [l/min]} \quad (6)$$

Le nouveau débit s'exprime comme :

$$\frac{5.14 \left[ \frac{\text{l}}{\text{min}} \right]}{9.25 \left[ \frac{\text{l}}{\text{min}} \right]} = \mathbf{55.6\%} \text{ du débit de base, soit une } \mathbf{\text{baisse de } 44.4\%} \quad (7)$$

### Réponse B :

C'est une diminution importante, près de la moitié du débit respiratoire initial. La fonction respiratoire est donc fortement entravée lors d'une crise d'asthme, dont l'origine peut être les particules aériennes respirées, dont les allergènes stimulent les cellules de défense situées dans les bronches. Ces dernières libèrent des médiateurs de l'inflammation et des substances qui vont stimuler l'activité des muscles lisses des voies aériennes, la trachée et les bronches principales. La contraction de la musculature lisse des voies aériennes entraîne une diminution du diamètre des bronches, et la résistance augmente comme la puissance 4 de la réduction de rayon ( $R^{-4}$ ) avec un bras de levier très important pour un petit changement de largeur de tubulure. L'utilisation de substances qui bloquent la contraction des muscles lisses, comme les bêta agonistes (Ventolin®) sont utilisés lors de crise d'asthme. La réponse respiratoire vise, elle, à augmenter la fréquence, mais peut entraîner une diminution du volume courant, par le biais d'une respiration superficielle où l'espace mort est davantage mobilisé (cf. 3).

### Réponse C :

Le nouveau volume courant  $V_T$  est :

$$540 \text{ [ml]} \cdot (1 - 25\%) = 405 \text{ [ml]} \quad (8)$$

Le nouveau débit respiratoire  $\dot{V}_E$  est :

$$9.25 \text{ [l/min]} \cdot (1 + 50\%) = 13.875 \text{ [l/min]} \quad (9)$$

Enfin la nouvelle fréquence respiratoire  $f_{\text{resp}}$  s'obtient comme cela (8) et (9):

$$\frac{13.875 \left[ \frac{\text{l}}{\text{min}} \right]}{405 \text{ [ml]}} = \mathbf{34 \text{ min}^{-1}} \quad (10)$$