

Sommaire

I.	INTRODUCTION A LA PHYSIOLOGIE DE L'EXERCICE.....	1
II.	LE SYSTEME RESPIRATOIRE.....	1
A.	ANATOMIE DU SYSTEME RESPIRATOIRE.....	1
B.	MECANIQUE DE LA VENTILATION PULMONAIRE.....	1
C.	ECHANGES GAZEUX	1
D.	TRANSPORT DES GAZ DANS LE SANG	1
1.	Transport de l'O ₂	1
2.	Transport du CO ₂	3
E.	REGULATION DE LA VENTILATION AU REPOS	5

I. Introduction à la physiologie de l'exercice.

II. Le système respiratoire

A. Anatomie du système respiratoire

B. Mécanique de la ventilation pulmonaire

C. Echanges gazeux

D. Transport des gaz dans le sang

Le transport des gaz échangés au niveau de l'appareil respiratoire ou au niveau des tissus est assuré par le sang.

1. Transport de l'O₂

Dans le sang, l'oxygène est transporté de manière dissoute dans le plasma. Cette forme de transport est minime (1.5%), l'O₂ étant peu soluble dans l'eau. La quasi-totalité de l'O₂ (98.5%) est transportée, liée à une protéine, l'hémoglobine contenue dans les globules rouges.

Les globules rouges (**diapo 21**) sont des petites cellules (2µm d'épaisseur, et 7µm de diamètre) en suspension dans le sang qui présentent des caractéristiques particulières sur le plan morphologique. Elles n'ont pas de noyaux (il n'y a donc pas de possibilité de synthèse protéique, de croissance ou de division cellulaire), de rares organistes, une capacité de déformation importante et une durée de vie limitée (120 jours). D'un point de vue métabolique, les globules rouges produisent leur ATP par le métabolisme anaérobie (pas de mitochondries). Leur renouvellement est assuré par le processus d'érythropoïèse sous contrôle hormonal. Lorsque les cellules du rein qui sécrètent l'EPO (Erythropoïétine) détectent une

hypoxie (une diminution de la concentration d'O₂ dans le sang artériel), elles secrètent l'EPO dans le sang. Celle-ci agit sur la moëlle osseuse et stimule la production de globules rouges. La fonction des globules rouges est de transporter l'oxygène. Pour cela, les globules rouges renferment des molécules d'hémoglobine. L'hémoglobine (**diapo 22**) est une molécule constituée d'une protéine, la globine formée de 4 sous-unités protéiques. Chaque sous-unité est associée à une structure en forme d'anneau appelée Hème. Chaque hème possède en son centre un atome de fer susceptible de se fixer à une molécule d'O₂. Chaque hémoglobine peut donc transporter jusqu'à 4 molécules¹. La concentration d' hémoglobine est de 14-18 g/dl de sang chez l'homme et de 12 à 16g/dl de sang chez la femme.

L'hémoglobine est une protéine qui se lie de manière réversible à l'oxygène (**diapo 22 et 23**). Lorsque le sang, pauvre en oxygène, passe dans les poumons, l'O₂ diffuse de l'alvéole vers les capillaires pulmonaires. Il pénètre dans le globule rouge et se lie aux molécules d'hémoglobine. Au cours de sa liaison à l'atome de fer, l'hémoglobine change de forme ce qui facilite l'association de la molécule d'oxygène suivante sur les autres sous-unités. Il se forme alors le complexe appelé oxyhémoglobine (HbO₂) qui se colore en rouge vif. Quand 4 molécules d'O₂ sont fixées à l'hémoglobine, on dit que l'hémoglobine est saturée.

Au niveau des tissus, le processus est inversé. Le sang en provenance des poumons, riche en O₂, va distribuer l'O₂ aux tissus en fonction des besoins. L'O₂ se dissocie alors du fer, on parle de dissociation de l'hémoglobine. Elle reprend alors sa forme initiale, passe dans sa configuration désoxyhémoglobine (HHb, forme libre de tout O₂) et prend une couleur rouge sombre.

La saturation et la dissociation de l'hémoglobine dépendent de plusieurs facteurs physico-chimiques (**diapo 24 et 25**):

- Pression partielle en O₂ (ppO₂)
- Pression partielle en CO₂ (ppCO₂)
- Température
- pH

	Saturation de Hb	Dissociation de Hb
ppO ₂	S'élève avec ↗ de ppO ₂	S'élève avec ↘ de ppO ₂
ppCO ₂	S'élève avec ↘ de ppCO ₂	S'élève avec ↗ de ppCO ₂

¹ Un globule rouge contient 250 millions de molécules d'hémoglobine et donc un milliard de molécules d'O₂

température	S'élève avec ↘ de T°	S'élève avec ↗ de T°
pH	S'élève avec ↗ du pH	S'élève avec ↘ du pH

Au cours de l'exercice, la courbe de saturation de l'hémoglobine est déplacée vers la droite (pour une même valeur de ppO₂, la saturation de Hb est moins importante à l'effort qu'au repos autrement dit pour une même valeur de ppO₂, la dissociation de Hb est plus grande à l'effort qu'au repos) (Diapo 26). L'augmentation de la température à proximité des tissus actifs et la diminution du pH dans certains types d'exercice² sont responsables de ce décalage de la courbe. En effet, l'augmentation de la température et la diminution du pH favorisent la dissociation de Hb (Diapo 25). Par ailleurs, au cours de l'exercice intense, la pO₂ atteint des niveaux très bas dans les tissus et la ppCO₂ des niveaux élevés, une grande quantité d'O₂ peut alors se dissocier et satisfaire les besoins des tissus actifs.

Toutefois, pour des valeurs supérieures à 100mmHg, la courbe de saturation de Hb à l'exercice se superpose à celle du repos. Au niveau des poumons, la ppO₂ élevée et le pH généralement élevé favorisent la saturation qui reste maximale même au cours de l'exercice. Cela permet à l'Hb de « sortir » des poumons saturée en O₂.

2. Transport du CO₂

Les molécules de CO₂ sont transportées dans le sang sous 3 formes (**diapo 28**):

- dissoutes dans le plasma (représente 7% du transport total)
- combinées à l'hémoglobine (représente 23% du transport total)
- sous forme d'ions bicarbonates (représente 70% du transport total)

Transport du CO₂ lié à l'hémoglobine

Le CO₂ formé dans les cellules, diffuse vers les liquides interstitiels puis pénètre dans le compartiment sanguin (**diapo 29**). Le CO₂ rentre dans le globule rouge et se lie à l'hémoglobine. L'association du CO₂ à l'hémoglobine (dans sa configuration

² Les efforts qui conduisent à une baisse de pH sont les efforts où la voie glycolytique est fortement sollicitée pour produire l'énergie au cours de l'exercice. Les efforts sous-maximaux menés à épuisement de même que les efforts maximaux continus ou intermittents sollicitent cette voie énergétique. La dégradation anaérobie du glucose conduit à la production importante d'acide lactique. Cet acide, lorsqu'il est produit par la cellule musculaire se dissocie en ions H⁺ et en ions lactates au contact de l'environnement aqueux de la cellule. C'est la diffusion de cet ion dans le sang et son accumulation qui est responsable de la diminution du pH de la cellule musculaire et dans le sang (**diapo 27**).

désoxyhémoglobine) forme la carbhémoglobine. Il est à noter que le site de fixation du CO₂ sur l'hémoglobine n'est pas le même que celui sur lequel se fixe l'oxygène. En effet, le CO₂ se fixe sur les sous-unités protéiques de la globine et non pas sur les hèmes.³

La formation de carbhémoglobine au niveau des tissus est favorisée par des concentrations faibles de ppO₂ (effet Haldane) et des concentrations élevées de ppCO₂.

Au niveau des capillaires pulmonaires (**diapo 30**), la carbhémoglobine se dissocie pour libérer le CO₂. Le CO₂ quitte alors le globule rouge et le compartiment sanguin, traverse la membrane alvéolo-capillaire, et intègre le compartiment alvéolaire. Cette dissociation est favorisée par de faibles niveaux de ppCO₂ et des niveaux élevés de ppO₂ (effet Haldane).

Transport du CO₂ sous forme d'ions bicarbonates

Le CO₂ formé dans les cellules, diffuse vers les liquides interstitiels puis pénètre dans le compartiment sanguin (**diapo 31**). Le CO₂ rentre dans le globule rouge et se lie à une molécule d'eau. La réaction chimique se réalise très rapidement car elle est catalysée par une enzyme, présente au niveau des globules rouges : l'anhydrase carbonique. Il se forme alors un acide instable, l'acide carbonique (H₂CO₃) qui se dissocie en un ions H⁺ et en un ion bicarbonate (HCO₃⁻). Les ions HCO₃⁻ diffusent alors dans le plasma (ils sortent du globule rouge) et circule dans le plasma jusqu'aux poumons. Pour compenser la perte de charge négative au niveau du globule rouge (les ions HCO₃⁻ sont chargés négativement), un ion chlore entre le globule rouge chaque fois qu'un ion HCO₃⁻ en sort. Cette compensation constitue le phénomène d'Hamburger.

Il est à noter que la formation d'ions HCO₃⁻ se produit aussi directement dans le plasma. La réaction est toutefois beaucoup plus lente car il n'y a pas d'anhydrase carbonique à ce niveau pour catalyser la réaction.

Au niveau poumon (**diapo 32**), les ions HCO₃⁻ présents dans les capillaires pulmonaires, vont pénétrer dans les globules rouges (pour chaque ion HCO₃⁻ qui entre dans le globule rouge, un

³ Alors que le CO₂ et l'O₂ se fixent sur des sites différents de l'hémoglobine, le monoxyde de carbone (gaz qui émane notamment des chauffages défectueux) est un gaz qui se fixe au niveau des hèmes. L'hémoglobine a d'ailleurs une plus grande affinité pour ce gaz que pour l'oxygène. Cela explique pourquoi les sujets exposés à ce gaz peuvent décéder d'une asphyxie (mort par manque d'oxygène).

⁴ Le proton formé (H⁺) agit sur l'oxyhémoglobine en favorisant sa dissociation.

ion Cl^- va sortir pour équilibrer les charges dans le globule rouge, phénomène de Hamburger). Les ions HCO_3^- vont s'associer aux ions H^+ et former de l'acide carbonique. Ce dernier va se dissocier à son tour (l'anhydrase carbonique catalyse la réaction) ce qui contribue à former de l'eau et du CO_2 . Le CO_2 quitte alors le globule rouge et le compartiment sanguin, traverse la membrane alvéolo-capillaire, et intègre le compartiment alvéolaire.

E. Régulation de la ventilation au repos

La ventilation pulmonaire peut être évaluée (**diapo 33**) au travers d'un paramètre : la ventilation minute. La ventilation minute est la quantité totale de gaz inspiré (ou expiré) en une minute. Elle se mesure donc en l/mn. Deux paramètres déterminent la ventilation minute :

- Le volume courant (V_c). Il correspond à la quantité d'air qui entre (ou sort) des poumons sur une inspiration non forcée (ou une expiration non forcée). En moyenne, le volume courant s'élève à 500ml.
- La fréquence respiratoire (Fr). Elle correspond au nombre de fois où nous respirons en une minute. Chez le sujet au repos, la fréquence respiratoire est en moyenne de 12 respirations.

Au repos, la ventilation minute se calcule en multipliant le volume courant et la fréquence respiratoire. En moyenne, la ventilation minute est donc de $0,5\text{l} \times 12 = 6$ l/mn. Pendant l'exercice, cette ventilation s'élève de manière importante (cf. TD respiration).

La ventilation, le rythme respiratoire et le volume courant sont déterminés par les centres respiratoires localisés dans le tronc cérébral au niveau du bulbe rachidien (**diapo 34**). En effet, les centres respiratoires contrôlent, par le biais du nerf phrénique, l'activité du principal muscle inspirateur : le diaphragme. Les centres respiratoires, sensibles à différentes influences, peuvent modifier le rythme respiratoire et l'amplitude de la respiration en modifiant la fréquence et la force de contraction du diaphragme. La modulation de la contraction du diaphragme permet de moduler la ventilation (cf. mécanique ventilatoire).

Les principaux facteurs auxquels sont sensibles les centres respiratoires sont des facteurs chimiques ⁵:

- $\Delta p\text{CO}_2$ artérielle
- $\Delta p\text{O}_2$ artérielle

⁵ Il est à noter que les centres respiratoires sont sensibles à d'autres influences (Cf. TD respiration).

- Δ pH artériel

Si l'un de ces paramètres homéostatiques est perturbé, la ventilation s'adapte immédiatement de manière réflexe pour réguler le paramètre qui a été déstabilisé (**diapo 34**). Ainsi, une augmentation du pH, une augmentation de la ppO₂ ou une diminution de la ppCO₂ impliquent une diminution réflexe de la ventilation. A l'inverse, une diminution du pH, une diminution de la ppO₂ ou une augmentation de la ppCO₂ impliquent une augmentation réflexe de la ventilation. Les variations de ppO₂ sont perçues par des chémorécepteurs périphériques, localisés au niveau de l'artère aorte et des artères carotides (**diapo 35**). Les variations de ppCO₂ et de pH sont perçues, en plus de ces récepteurs périphériques, par des chémorécepteurs centraux, localisés dans le bulbe rachidien. Lorsque ces chémorécepteurs perçoivent des variations de ppO₂, ppCO₂ ou pH, ils envoient l'information aux centres respiratoires par des voies nerveuses afférentes. Les centres respiratoires ajustent alors la commande du diaphragme afin de moduler les caractéristiques de la contraction de ce muscle inspirateur ce qui module la ventilation.

Ventilation et Régulation du pH

Le pH est un indice qui reflète l'acidité d'une solution, déterminée par la concentration des ions hydrogènes (H⁺). Ainsi, plus la concentration des ions H⁺ est élevée dans une solution, plus le pH est petit (il varie alors de 0 à 7⁶). Inversement, plus la concentration des ions H⁺ est faible dans une solution, plus le pH de la solution est élevée (il varie alors de 7 à 14). Les espèces chimiques qui sont génératrices d'ions H⁺ sont les acides (**diapo 36**).

Au sein de l'organisme (**diapo 36**), les valeurs de pH varie entre 7 et 7,4. Le pH artériel constitue un paramètre homéostatique. Il est donc régulé de manière précise dans les artères. Quand le pH artériel passe en dessous de 7,35, on parle d'une situation d'acidose. Quand le pH artériel passe en dessus de 7,45, on parle d'une situation d'alcalose. Les deux situations conduisent immédiatement à une régulation du pH par des adaptations réflexes de la ventilation (**diapo 32 et diapo 37**).

Cas de l'acidose

La diminution du pH induit une augmentation réflexe de la ventilation. L'hyperventilation va accroître l'évacuation de CO₂ dans les alvéoles. Il va en résulter une diminution de la ppCO₂

⁶ Quand une solution est neutre (ni acide, ni basique), le pH est de 7.

artérielle. Or, la $ppCO_2$ est un paramètre homéostasique qui est régulé chaque fois qu'il est déstabilisé. Pour rétablir la $ppCO_2$, des ions H^+ et des ions HCO_3^- vont s'associer dans le plasma pour former dans un premier temps de l'acide carbonique puis du CO_2 et de l'eau. La formation de CO_2 permet alors de rétablir la $ppCO_2$ dans les artères. Parallèlement, des ions H^+ ayant été supprimés du plasma, le pH s'élève dans le sang.

Cas de l'alcalose

L'augmentation du pH induit une diminution réflexe de la ventilation. L'hypoventilation va réduire l'évacuation de CO_2 dans les alvéoles. Il va en résulter une augmentation de la $ppCO_2$ dans les artères. Or, la $ppCO_2$ est un paramètre homéostasique qui est régulé chaque fois qu'il est déstabilisé. Pour rétablir la $ppCO_2$, le CO_2 va être associé à de l'eau pour dans le plasma pour former dans un premier temps de l'acide carbonique puis des ions H^+ et des ions HCO_3^- . La disparition de molécules de CO_2 dans les artères permet alors de rétablir la $ppCO_2$. Parallèlement, des ions H^+ ayant été formés dans le plasma, le pH diminue dans le sang.