

UE 12 Pneumologie - Fiche n°11 : Adaptations ventilatoires à l'exercice

I – Introduction

Cascade d'adaptations à l'exercice :

- Cardiovasculaires : augmentation de débit cardiaque, modification de la circulation.
- Respiratoires : modification du volume courant VT et de la fréquence respiratoire FR

A l'exercice, le débit ventilatoire augmente par augmentation du **volume courant** et de la **fréquence respiratoire**.

On a ainsi : $\boxed{VE = FR \times VT}$ et $\boxed{VE = VA + VD}$

avec **VE**, la ventilation externe ; **VA**, la ventilation alvéolaire et **VD**, le volume mort

La Ventilation alvéolaire VA : la ventilation efficace pour les échanges gazeux.

Le **volume mort VD** : volume de conduction dans les voies aériennes dans lesquelles il n'y a pas d'échanges gazeux.

Pour **augmenter la ventilation alvéolaire**, il faut **augmenter le volume courant** plutôt que la fréquence respiratoire.

II – Le transport d'O2

a. La consommation d'oxygène VO2

L'équation de la consommation d'oxygène VO2 peut être écrite de différentes façons :

<p>La convection ventilatoire $\dot{V}O_2 = \dot{V}_I \times F_I O_2 - \dot{V}_E \times F_E O_2$</p>	<p>La consommation d'oxygène correspond à ce qu'on a inspiré moins ce qu'on a expiré. Avec : V_I = volume inspiré $F_I O_2$ = fraction inspiré en oxygène V_E = volume expiré $F_E O_2$ = fraction expiré en oxygène</p>
<p>La diffusion alvéolo-capillaire $\dot{V}O_2 = D_L O_2 \times (P_A O_2 - P_C O_2)$</p>	<p>Elle correspond à la diffusion d'oxygène $D_L O_2$ multipliée par la différence de pression entre l'alvéole $P_A O_2$ et le capillaire pulmonaire $P_C O_2$.</p>
<p>La convection circulatoire $\dot{V}O_2 = \dot{Q}_C \times (C_A O_2 - C_V O_2)$</p>	<p>Elle correspond au débit cardiaque Q_C multiplié par la différence entre la concentration artérielle $C_A O_2$ et la concentration veineuse en oxygène $C_V O_2$. C'est l'équation de Fick.</p>
<p>La diffusion capillaro-tissulaire $\dot{V}O_2 = D_T O_2 \times (P_C O_2 - P_T O_2)$</p>	

On voit que la VO2 est liée au métabolisme tissulaire MO_2 au niveau des tissus périphériques.

b. Voies métaboliques de l'exercice

Type d'exercice	Voie métabolique	Caractéristiques
Au début	Voie anaérobie alactique	Utilise la phosphocréatine, immédiatement disponible en très petite quantité
Exercice de puissance modérée	Voie aérobie alactique	On commence à augmenter sa consommation d'oxygène Utilise des glucides et du pyruvate au niveau de la mitochondrie qui forme de l'ATP
Exercice de puissance ou durée trop importante	Voie anaérobie lactique	Produit de l'acide lactique ce qui entraîne une acidose du muscle. La contraction musculaire est moins efficace et douloureuse, on ne pourra plus soutenir l'exercice très longtemps.

c. Conséquences sur la ventilation

L'adaptation ventilatoire : permet d'apporter l'O₂ nécessaire au métabolisme des muscles et d'éliminer le CO₂ produit. Le maintien des pressions alvéolaires P_AO₂ et P_ACO₂ constantes exige une ventilation adaptée aux besoins. On a P_AO₂ = 100mmHg et P_ACO₂ = 40mmHg.

III – Les trois aspects de l'adaptation à l'exercice

<p>Aspect quantitatif = évolution en fonction de l'intensité (exercice en rampe)</p>	<p>La VO₂ augmente de façon linéaire avec l'intensité de l'exercice jusqu'au maximum qui est la VO₂ max La VE (ventilation externe), la VCO₂ et la VO₂ évoluent parallèlement jusqu'à un point où la VO₂ augmente plus faiblement. A ce moment là, la quantité de CO₂ produite n'est plus égale à la quantité d'oxygène consommée. Le quotient respiratoire (rapport VCO₂/VO₂) n'est plus égal à 1 mais augmente : il y a un passage en anaérobie, on parle de seuil anaérobie. L'augmentation de la production de CO₂ entraîne une augmentation de la production d'ions acides, le pH diminue. ⇒ Ainsi, l'augmentation de ventilation externe VE est liée à la production de CO₂ et à l'acidose au cours de l'exercice lorsque le métabolisme devient anaérobie. En fin d'exercice, la PaCO₂ sera inférieure à celle de repos : l'organisme rééquilibre par l'hyperventilation entraîne ainsi une hypocapnie. L'adaptation en fonction du temps sera différente au début et à la fin de l'exercice que ce soit pour un exercice modéré ou pour un exercice intense.</p> <p><u>Notion de seuil anaérobie</u> Le seuil anaérobie correspond à la production d'acide lactique et au passage de VO₂ = VCO₂ à VCO₂>VO₂. Au-delà de ce seuil anaérobie, il n'y a plus d'état stable de la VO₂ qui va continuer à augmenter. <u>Consommation d'oxygène maximale</u> La VO₂ max est habituellement plus élevée chez l'homme que chez la femme, du à la différence de masse musculaire.</p> <p><u>Lactate et exercice</u> La production de lactate est différente selon la puissance et la durée de l'exercice.</p>
<p>Aspect cinétique = délais d'adaptation et de récupération : la ventilation augmente et diminue progressivement</p>	<p>Pour un <u>exercice modéré</u> (en plateau) : la consommation d'O₂ va très rapidement se stabiliser en plateau. La dette en O₂ au début de l'exercice correspond au stock de phosphocréatine qui sera renouvelé à la fin pendant la phase de récupération.</p> <p>Lors d'un <u>exercice intense</u>, on n'arrive jamais à un plateau de consommation d'O₂, la dette en O₂ est beaucoup plus importante car on passe par la voie anaérobie. La récupération sera beaucoup plus lente.</p>
<p>Aspect qualitatif = le rendement ventilatoire</p>	<p>Rappel : VE = V_T x FR Avec VE, la ventilation externe ; VT, le volume courant et FR, la fréquence respiratoire Pour des exercices modérés, on augmente préférentiellement le volume courant. Cette augmentation est limitée à 50-60% de la capacité vitale. On n'atteint jamais sa capacité vitale au cours de l'exercice. On a ainsi une réserve ventilatoire. La fréquence respiratoire ne dépasse jamais 35 à 40/mn.</p>

La **ventilation alvéolaire** efficace VA correspond environ à deux tiers de la ventilation externe VE et du volume courant V_T:

$$VA = \frac{2}{3} V_T \quad \dot{V}_A = \frac{2}{3} \dot{V}_E$$

L'augmentation du volume courant améliore le rendement ventilatoire. En hypocapnie, le rendement ventilatoire est moins bon.

En augmentant, le volume courant, on entraîne une variation de pression. A fort volume, les variations de pressions sont plus importantes.

IV – Limitation ventilatoire

a. Existe-t-il une limitation ventilatoire à l'exercice ?

❖ **Hyperventilation à l'exercice maximal**

- Pas réellement une limitation ventilatoire dans la mesure où on continue à augmenter encore sa ventilation après avoir atteint la VO_2 max pour des raisons métaboliques (réponse à l'acidose lors d'un exercice de forte intensité).
- Il existe une **réserve ventilatoire** et quand on mesure la ventilation maximale à l'exercice, on est loin de la ventilation maximale théorique (qui dépend de la capacité vitale et de la fréquence respiratoire)
- Il n'y a pas de désaturation artérielle, la concentration artérielle en O_2 reste maximale.

❖ **Débits et pression nettement infra-maximaux**

- Au cours de l'exercice, on a une augmentation des débits inspiratoires et expiratoires mais on n'atteint jamais les débits maximaux. On a une réserve ventilatoire de l'ordre de 50 à 60% des capacités théoriques, on n'atteint pas de limite. .

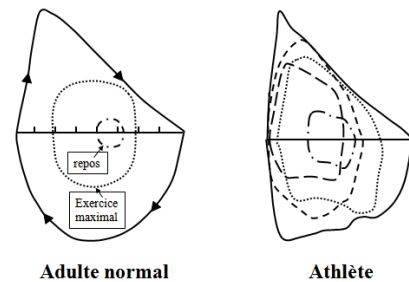
- ❖ Il n'y a pas de signes à l'électromyogramme de fatigue des muscles ventilatoires.

Effets de l'entraînement :

Sur le **plan cardiaque** : permet de diminuer la FC et d'augmenter le VES.

Sur le **plan de la respiration** : permet **d'augmenter la VO_2 max, et le seuil anaérobie.**

Les débits inspiratoires ou expiratoires d'un athlète sont **proches des débits maximaux**



b. Limitation ventilatoire en pathologie

Pour le sujet normal : la courbe à l'exercice s'inscrit dans la courbe débit-volume maximum (il n'y a **pas de limitation en débit**)

En cas d'obstruction bronchique : le débit expiratoire est très limité. On a très rapidement **une limitation en débit ventilatoire** due aux bronches qui sont plus malléables, ce qui va l'obliger à ventiler à **plus haut volume pulmonaire** et le fatiguer. Ceci va **diminuer l'efficacité de la ventilation.**

c. Diffusion alvéolo-artérielle : est-ce qu'il y a une limitation des échanges alvéolo-capillaires ?

Les échanges alvéolo-capillaires sont liés à la diffusion de l' O_2 et du CO_2 . C'est un **mécanisme passif** nécessitant un **temps de contact suffisant.**

- Le CO_2 diffuse 20 fois plus vite que l' O_2 donc il n'y a **pas de limitation en diffusion du CO_2 .**
- Concernant l' **O_2** , le facteur limitant pourrait être le **temps de passage des globules rouges dans le capillaire.** Le débit sanguin peut devenir trop important pour la capacité de diffusion locale : **la vitesse de circulation augmente et l'extraction d' O_2 diminue.**

On peut le voir dans la formule de Fick :

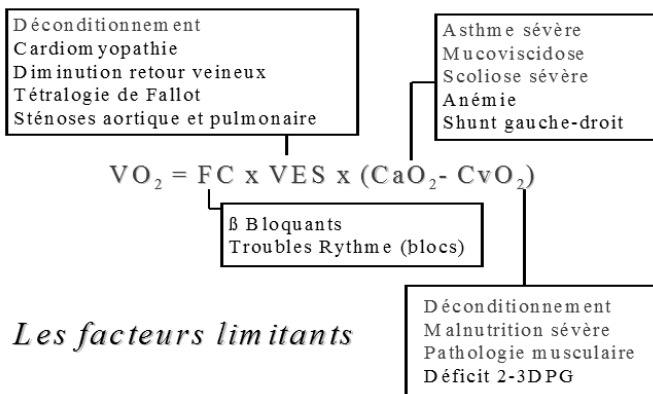
$$\dot{V}O_2 = \dot{Q}_c \times (C_a O_2 - C_v O_2)$$

= ↗ ↘

Théoriquement, il n'y a **pas d'hypoxémie notable ni de diminution du contenu en oxygène**

Cependant, **chez certains athlètes entraînés**, on observe une **hypoxémie induite par l'exercice.** La pression artérielle en oxygène diminue d'autant plus que la VO_2 est élevée.

V - Les facteurs limitants à l'exercice



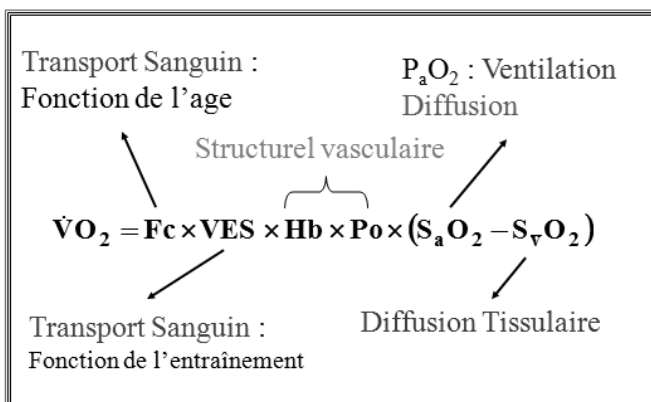
Il y a des **facteurs cardio-vasculaires** (volume d'éjection systolique, fréquence cardiaque) et des **facteurs liés à la ventilation**.

La pression artérielle en oxygène et le contenu artériel en oxygène peuvent être diminués à cause d'une obstruction bronchique, d'une pathologie alvéolaire, d'une anémie (limitation des apports en O_2).

Le **déconditionnement musculaire** correspond à une **fonte musculaire** au cours d'un **allègement prolongé**.

La **malnutrition** aboutit à une diminution des protéines dont les protéines musculaires.

Les facteurs limitants potentiels :



- **Transport sanguin en fonction de l'âge** : la fréquence cardiaque peut varier avec l'âge.

- **Transport sanguin en fonction de l'entraînement** : le volume d'éjection systolique augmente avec l'entraînement.

- La **diffusion tissulaire** et la **ventilation** varie en fonction des différentes pathologies.

Interprétation des résultats d'une épreuve d'effort maximale :

Une limitation de la VO_2 peut s'expliquer soit par une **limitation cardio-vasculaire** soit par une **limitation respiratoire** soit par une **limitation périphérique ou corticale**.

Limitation cardio-vasculaire	<ul style="list-style-type: none"> - La réserve ventilatoire persiste. - La fréquence cardiaque maximale est rapidement atteinte. - Le pouls en O_2 diminue. Il correspond à la quantité d'oxygène délivrée à chaque battement cardiaque. - Le seuil ventilatoire = seuil anaérobie est abaissé.
Limitation respiratoire	<ul style="list-style-type: none"> - La réserve ventilatoire est épuisée - La réserve cardiaque persiste. - Les équivalents respiratoires de l'O_2 sont élevés. - Le seuil ventilatoire est abaissé.
Limitation périphérique ou corticale	<ul style="list-style-type: none"> - La réserve ventilatoire persiste. - La réserve cardiaque persiste - Il n'y a pas d'acidose métabolique

Il y a différentes causes possibles à la limitation ventilatoire :

- ❖ **Origine obstructive** (exemple : BPCO)

- ❖ **Origine restrictive** :

- le volume courant s'approche de la capacité inspiratoire.
- La fréquence respiratoire est très élevée ($FR > 50$)

La limitation ventilatoire se traduit également par une **hypoventilation alvéolaire** avec une hypoventilation à l'exercice avec une hypoxémie. Elle est observée en cas d'obstruction majeure ou de fatigue importante des muscles respiratoires.

Il peut également avoir des **troubles échangeurs pulmonaires associés** avec des troubles de diffusion ou des anomalies liées à une hétérogénéité des rapports ventilation/perfusion.