

Physio 6

TRANSPORT DES GAZ PAR LE SANG

Respiration:

- Etape de ventilation: muscles inspiratoires qui apportent O₂ par **CONVECTION** car aucun échange gazeux
- Etape de **DIFFUSION** alvéolocapillaire
- **CONVECTION** pour la circulation
- Etape de **DIFFUSION** vers les tissus et les cellules

La pression partielle d'un gaz = fraction F_G (%) x pression barométrique P_B

Soit P_B la pression totale qui règne dans un milieu gazeux : P_B = somme des pressions partielles des gaz constituant le mélange à T° ambiante et air sec.

Lorsque le **mélange gazeux n'est pas sec**, il faut prendre en compte la pression partielle de H₂O avec **P_{H₂O} = 47 mmHg**.

$$P_B = \sum P_p + P_{H_2O} \times F_G = (P_B - 47) \times F_G$$

Composition de l'air dans les conditions normales :

1. Pression barométrique

Fraction inspirée (FI) 21% de O₂ et 79% de N₂ avec P_B = 760 mmHg

Et P_B = P_{O₂} + P_{N₂} + P_{H₂O}

$$760 \text{ mmHg} = 150 + 563 + 47 \text{ mmHg}$$

2. Pression barométrique diminuée (altitude) ou augmentée (plongée), FI sont normales

- **Les échanges entre 2 mélanges gazeux aboutissent à une égalité entre les pressions partielles.**
- **Les échanges entre un milieu gazeux et un milieu liquide** sont fonction de la solubilité du gaz dans le liquide: par exemple, la diffusion de O₂ de l'air alvéolaire vers le sang capillaire doit tenir compte de la solubilité du gaz dans le sang.

Pressions :

Air inspiré:

- | | |
|--------------------------|------------------------------|
| ➤ FIO ₂ = 21% | PIO ₂ = 150 mmHg |
| ➤ FICO ₂ = 0% | PICO ₂ = 0 mmHg |
| ➤ FIN ₂ = 79% | PIN ₂ = 563 mmHg |
| | PIH ₂ O = 47 mmHg |

Air expiré

- | | |
|--------------------------|-------------------------------|
| ➤ FIO ₂ = 16% | Pe O ₂ = 115 mmHg |
| ➤ FICO ₂ = 5% | Pe CO ₂ = 35 mmHg |
| ➤ FIN ₂ = 79% | Pe N ₂ = 563 mmHg |
| | Pe H ₂ O = 47 mmHg |

Air alvéolaire

- Pa O₂ = 110 mmHg
- Pa CO₂ = 40 mmHg
- Pa N₂ = 563 mmHg
- Pa H₂O = 40 mmHg

Composition de l'air alvéolaire différente de celle de l'air expiré.

On distingue deux espaces :

- Zone de conduction = espace mort VD = 150 mL : de la trachée aux bronchioles terminales → pas d'échange gazeux
- Zone d'échange = espace alvéolaire VA = 300 mL

La ventilation alvéolaire:

- Volume inspiré de 500 mL : air qui passe dans l'espace alvéolaire et air à P_B qui se retrouve dans la zone de conduction
- Dans l'espace alvéolaire: échange : air inspiré se transforme en air alvéolaire
- A l'expiration: d'abord expiration du gaz contenu dans la zone de conduction qui a la même composition que l'air inspiré, puis expiration de l'air alvéolaire plus pauvre en O₂ et plus riche en CO₂

Analyse instantanée du gaz :

- 1) Expiration de l'air de la zone de conduction de même composition que l'air inspiré: PO₂ = 150 mmHg
- 2) Expiration de l'air alvéolaire pauvre en O₂ : PO₂ = 100 mmHg
- 3) Retour à PO₂ = 150 mmHg

Donc gaz expiré = mélange de gaz inspiré et de gaz alvéolaire

Ventilation:

Volume courant = 500 mL

Ventilation moyenne = volume courant x fréquence respiratoire
= 500 x 12 = 6000 mL/min

Ventilation de l'espace mort = 150 x 12 = 1,8 L/min

Ventilation de l'espace alvéolaire = 300 x 12 = 4,2 L/min

❖ Echanges entre gaz alvéolaire et sang = diffusion alvéolo-capillaire

- Echange de gaz O₂ et de CO₂ à travers la membrane alvéolo-capillaire car pressions équivalentes en N₂ et H₂O entre le capillaire et l'alvéole
- **Phénomène passif**, lié à l'agitation des molécules qui se déplacent des zones de haute pression partielle vers les zones de basse pression partielle (lorsque les pressions partielles s'équilibrent, il n'y a plus d'échange), lié également à la solubilité du gaz dans le liquide.

Composition de l'air alvéolaire:

- P O₂ = 100 mmHg
- P CO₂ = 40 mmHg
- P N₂ = 563 mmHg
- P H₂O = 47 mmHg

Composition du sang capillaire:

- $P_c O_2 = 100$ mmHg
- $P_c CO_2 = 40$ mmHg
- $P N_2 = 563$ mmHg
- $P H_2O = 47$ mmHg

Composition du sang artériel:

- $P_a O_2 = 95$ mmHg
- $P_a CO_2 = 40$ mmHg
- $P_a N_2 = 563$ mmHg
- $P_a H_2O = 47$ mmHg

Différence entre sang artériel et sang capillaire car admission de 5% de sang veineux dans le sang artériel qui provoque une diminution de la $P_a O_2$.

Composition du sang veineux :

- $P_v O_2 = 40$ mmHg
- $P_v CO_2 = 45$ mmHg
- $P_v N_2 = 563$ mmHg
- $P_v H_2O = 47$ mmHg

Donc :

- Transfert de O_2 du système alvéolaire vers les capillaires
- Transfert de CO_2 des capillaires vers le système alvéolaire

Membrane alvéolo-capillaire est très fine.

Le débit de gaz est dû à la différence des pressions partielles des gaz.

$V^\circ \text{ gaz} = K (P \text{ alvéolaire gaz} - P \text{ veine pulmonaire gaz})$

K dépend de la solubilité, de l'épaisseur et de la surface et de $\sqrt{\text{poids moléculaire}}$

Comme la différence de pression partielle de O_2 est beaucoup plus importante que celle de CO_2 (variation de 60 mmHg pour O_2 et 5 mmHg pour CO_2), on aurait tendance à croire que le débit de O_2 est beaucoup plus important que celui de CO_2 . Or, la solubilité de CO_2 est 20 fois plus élevée que celle de O_2 , donc les débits sont égaux.

Analyse de la diffusion de O_2 à travers la membrane alvéolo-capillaire:

- Dans les conditions normales : transport d'un GR en 0,75 s
 - 0,25 secondes pour obtenir l'équilibre
 - Les 2/3 de temps restant = temps de réserve
- Si épaissement de la membrane : utilisation du temps de réserve mais l'équilibre n'est pas atteint
- Si épaissement+++ de la membrane : le temps de réserve ne suffit pas, la $P_{\text{capillaire}} O_2$ est alors plus basse

Analyse de la diffusion de CO_2 à travers la membrane alvéolo-capillaire:

- 1/3 de temps de passage pour atteindre l'équilibre
- 2/3 de temps de réserve

★ Transport de l'O₂

Une fois que l'O₂ est passé du gaz alvéolaire vers le capillaire, l'O₂ a deux destinées :

- Se dissout dans le plasma pour donner une pression partielle qui détermine les échanges entre gaz alvéolaire et sang capillaire
- Rentre dans un GR pour se fixer sur l'hémoglobine : moyen de transport de l'O₂ (99%), car la solubilité de l'O₂ est basse.
Dès que l'O₂ passe de l'alvéole au plasma, il se dissout puis se fixe très rapidement sur l'Hb.

↻ O₂ dissous

O₂ dissous = α PO₂ avec $\alpha = 0,003$

Dans le sang artériel : O₂ dissous = $0,003 \times 95 = 0,28 \text{ mL}/100 \text{ mL}$ de plasma

Dans le sang veineux : O₂ dissous = $0,003 \times 40 = 0,12 \text{ mL}/100 \text{ mL}$ de plasma

► Transport sous forme dissoute très basse

↻ Hémoglobine

Association de 2 molécules : structure d'hème + structure protéique de nature globulaire = 4 ss : 2 α et 2 β à l'âge adulte.

Dans chaque replis des sous-unités :

- 4 valences pour les noyaux pyroles
- 1 valence pour l'histidine proximale F8
- 1 valence pour O₂

Le fer se fixe de manière réversible sur l'hémoglobine

Concentration en hémoglobine = 15 g / 100 mL de sang

Pouvoir oxydant de l'hémoglobine :

- 1 g de Hb fixe 1,34 mL d'O₂ } pour O₂ dissous, on avait pour une pression artérielle
- 1 mmole de Hb fixe 1 mmole d'O₂ de 95 mmHg, 0,28 mL/100 mL de plasma d'O₂ transporté

► O₂ combiné à Hb = [Hb] x saturation x Pouvoir Oxydant

★ Contenu en O₂ :

Contenu en O₂ = O₂ dissous + O₂ combiné à Hb

$$\begin{aligned} &= \alpha \text{ PO}_2 + [\text{Hb}] \times \text{PO}_2 \times \text{saturation} \\ &= (0,003 \times 95) + (15 \times 1,34 \times 98) \\ &= 0,28 + 19,70 = 20 \text{ mL}/100 \text{ mL} \end{aligned}$$

► dépend de PO₂ et de Hb

★ Capacité en O₂ :

Capacité en O₂ = quantité maximale d'O₂ que le sujet pourrait transporter

$$\begin{aligned} \text{A } 150 \text{ mmHg, à } 37^\circ\text{C et à pH} = 7,4 : \text{capacité en O}_2 &= \text{O}_2 \text{ dissous} + \text{O}_2 \text{ combiné à Hb} \\ &= (0,003 \times 150) + (15 \times 1,34 \times 100) \\ &= 20,5 \text{ mL}/100 \text{ mL} \end{aligned}$$

★ Saturation en O₂ :

Saturation en O₂ = $\frac{\text{contenu en O}_2 - \text{O}_2 \text{ dissous}}{\text{contenu en O}_2 - \text{O}_2 \text{ dissous dans des conditions imposées } P_{O_2} = 150 \text{ mmHg}}$

► dépend uniquement de P O₂

- Pour faible P_p de O₂, Hb commence à fixer O₂ → modification allostérique de la protéine → ouverture des sites de fixation avec capacité de fixation de plus en plus importante
- Arrivée à capacité maximale de fixation de l'Q = plateau

Paramètres que l'on peut faire varier:

- Affinité de Hb pour O₂ : plus l'hémoglobine est affine pour O₂ moins elle a la capacité de relarguer O₂ et inversement : moins l'hémoglobine est affine pour O₂, plus elle a la capacité de relarguer O₂.

► P₅₀ = pression partielle en O₂ pour laquelle 50% de l'Hb est saturée.

P₅₀ = 27 mmHg

Si P₅₀ faible → Hb très affine pour O₂

Si P₅₀ forte → Hb peu affine pour O₂

Modification de la saturation, du contenu et de l'affinité

A. Modification de l'affinité

- Pression partielle en CO₂ : si PCO₂ augmente, P₅₀ augmente → ↓ affinité
- T°
- pH (lié à la PCO₂ : ↑ PCO₂ → ↓ pH) : HCO₃⁻ + H⁺ = CO₂ + H₂O donc si beaucoup de CO₂, selon la Loi de Le Chatelier, consommation de CO₂ avec formation de H⁺ donc diminution du pH
- 2,3 DPG : augmentation de la concentration en 2,3 BPG → augmentation de la P₅₀ et diminution de l'affinité pour O₂

Ex : effort musculaire : T° ↑, PCO₂ ↑, pH ↓ avec besoin important O₂ donc ↓ affinité Hb pour O₂ → ↑ P₅₀

- Hb fœtale et myoglobine :

Hb fœtale a plus d'affinité pour O₂ que Hb adulte (a une affinité beaucoup plus faible pour le 2,3 BPG)

Myoglobine a P₅₀ très faible donc extrêmement affine pour O₂

B. Modification du contenu O₂ (quantité transportée) et situation d'intoxication au monoxyde de carbone CO.

CO est très affin pour Hb : il utilise la liaison de coordination liée au fer et se fixe sur Hb à la place d'O₂ de manière irréversible. Il va y avoir **↓ du contenu d'O₂**.

De plus, **l'Hb devient plus affine avec O₂** : va le détacher moins facilement, donc **diminution de P₅₀**.

On va donc avoir moins d'O₂ dans le sang et l'Q fixé sur l'Hb sera difficilement relâché au niveau des tissus → anémie.

★ Transport du CO₂ :

- Solubilité du CO₂ 20 fois plus importante que celle d'O₂ → la quantité de CO₂ dissous transportée est 10 fois plus importante que la quantité d'O₂ dissous transportée. (5%)

CO₂ dissous = α PCO₂ avec $\alpha = 0,065 = 2,7 \text{ mL} / 100 \text{ mL}$ de sang

- Carbaminohémoglobine : le CO₂ est transporté par Hb mais pas sur le même site qu'O₂ (5%)
- Bicarbonates : 90% du transport de CO₂

Sang artériel :

- CO₂ dissous = 1,2 mmol/L (5,6%)
- HbCO₂ = 0,4 mmol/L (2,2%)
- HCO₃⁻ = 19 mmol/L (92,2%)
- CO₂ total = 20,6 mmol/L

Sang veineux :

- CO₂ dissous = 1,5 mmol/L (6%)
- HbCO₂ = 0,6 mmol/L (3%)
- HCO₃⁻ = 20,5 mmol/L (91%)
- CO₂ total = 22,6 mmol/L

Toute élévation du CO₂ entraîne une diminution du pH.

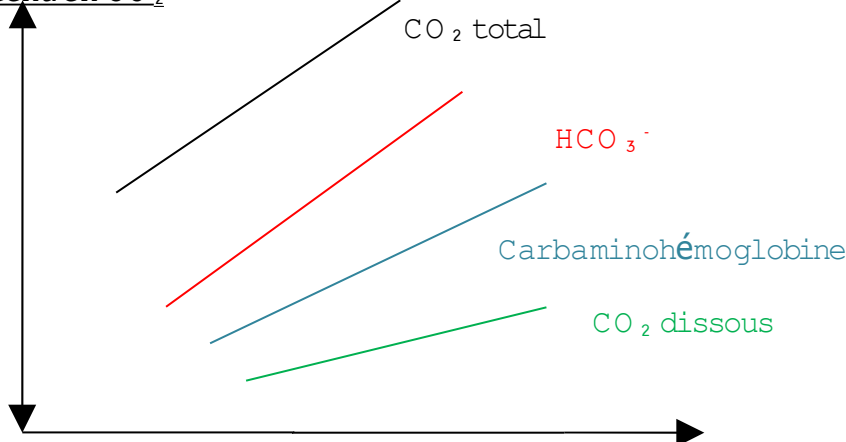
Existence de systèmes tampon pour équilibrer

- Système protéine
- Hémoglobine

Le système tampon lié à l'hémoglobine est très important car :

- Prend en charge O₂
- Prend en charge CO₂ sur un autre site qu'O₂
- Assure une absence de variation de pH liée à l'apport de CO₂ au niveau du capillaire

Contenu en CO₂



Les transferts de CO₂ :

CO₂ passe librement la membrane alvéolocapillaire: diffusion par agitation moléculaire.

Il est d'abord dissout puis sous l'action de la loi de l'action de masse, il se hydrate puis se dissocie en ions H⁺ et HCO₃⁻.

a) Forme métabolisée



L'anhydrase carbonique accélère la transformation du CO₂ hydraté en HCO₃⁻.

⇒ **L'effet Hamburger** : le CO₂ (qui rentre dans les hématies par diffusion passive) est métabolisé en bicarbonates par une enzyme présente dans les GR = l'anhydrase carbonique. Ces bicarbonates ressortent ensuite des hématies contre des ions chlorures (**Effet Hamburger**) pour retrouver la circulation sanguine et pour atteindre l'équilibre osmotique.

b) CarbaminoHb

La fixation de CO₂ sur l'hémoglobine augmente la PCO₂ donc diminue l'affinité de Hb pour O₂.

⇒ **Effet Haldane** : La désoxygénation de l'hémoglobine entraîne une augmentation de l'affinité pour le CO₂ à pression partielle en CO₂ constante, et dans les mêmes circonstances, la synthèse de bicarbonates est accrue. Autrement dit, le désoxyHb forme nettement plus de carbaminoHb que l'oxyHb. Ceci permet le couplage du transport par l'hémoglobine du CO₂ et de l'Q.

- Variation du contenu en CO₂ en fonction de la pression partielle: pour PO₂ fort, contenu en CO₂ diminué
- Pour une PO₂ à 40 mmHg et une PCO₂ à 45 mmHg, contenu en CO₂ augmente

Le contenu en CO₂ = CO₂ dissous + carbaminoHb + bicarbonates

Contenu artériel et veineux en O₂

	Artère	Veine
[Hb]	15 g / 100 mL	15 g / 100 mL
Saturation en O ₂	98 %	75 %
P O ₂	100 mmHg	40 mmHg
Contenu en O ₂	20 mL / 100 mL	15 mL / 100 mL

Ce cours ainsi que l'intégralité des documents nécessaires à la PCEM1 sont disponibles gratuitement à l'adresse suivante : <http://www.coursP1bichat-lariboisiere.weebly.com>