

Echanges gazeux pulmonaires et systémiques

Démarrer le module

Objectifs

Décrire le principe de Fick appliqué à la diffusion des gaz

Citer la liste des composants de la barrière de diffusion pulmonaire

Décrire la cinétique du transfert de l'oxygène à travers la membrane alvéolocapillaire

Différencier les spécificités du transfert du CO_2

Etablir le lien entre la méthode de mesure de la capacité de transfert pulmonaire et son intérêt clinique

Introduction

L'oxygène puisé par le système ventilatoire dans son réservoir qui est l'atmosphère doit :

- traverser les membranes alvéolaires vers les capillaires pulmonaires;

- être transporté par le sang dans les tissus,

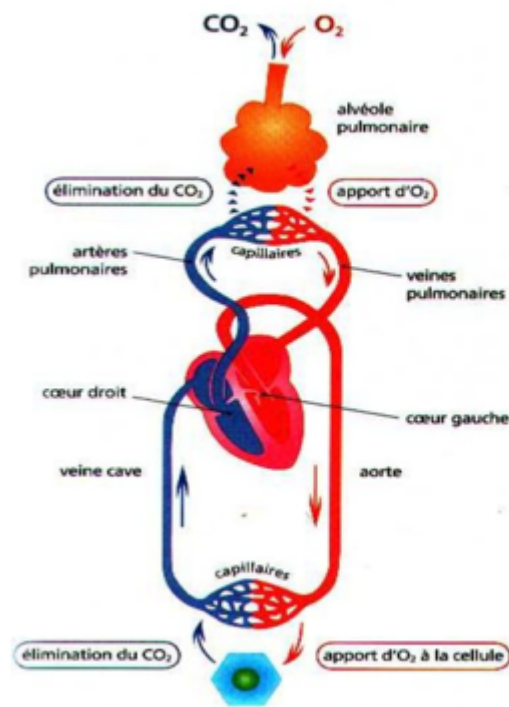
- quitter les capillaires tissulaires;

- et finalement traverser les membranes plasmiques pour pénétrer dans les cellules où il est utilisé pour la fabrication d'énergie dans le cadre de la combustion oxydative des nutriments.

L'un des déchets de cette réaction est le CO_2 qui doit suivre le chemin similaire, mais en sens inverse, et être éliminé par voie pulmonaire.

Circulation pulmonaire

circulation
fonctionnelle
à basse
pression



I-Principes physiques

1-Notion de pression partielle

2-Diffusion des gaz dans les liquides

1-Notion de pression partielle

- L'air atmosphérique est un mélange de gaz.
- Normalement l'air contient 79% d'azote (N₂), 21% d'O₂, un pourcentage négligeable de CO₂, de gaz rares, de polluants atmosphériques et de vapeur d'eau.
- Tous ensemble, ces gaz exercent une pression totale atmosphérique (P_{atm}) de 760mmHg en moyenne au niveau de la mer.
- La pression totale est la somme de la pression partielle exercée par chacun des gaz constituant le mélange.
- Puisqu'il y a 79% de molécules de N₂ dans l'air, 79% des 760mmHg de P_{atm} sont dus aux molécules de N₂ et 21% des 760mmHg de P_{atm} soit 160 mmHg sont dus aux molécules de O₂.
- La pression partielle est la pression exercée individuellement par chaque gaz (P_{gaz}).

Définition

Selon la loi des pressions partielles de Dalton, la pression totale exercée par un mélange de gaz est égale à la somme des pressions exercées par chacun des gaz constituants et peut s'exprimer par l'équation suivante :

Pression partielle d'un gaz = pression totale(PA) X concentration fractionnelle du gaz dans le mélange.

- Dans l'air, la PO₂ = 160 mm Hg et la PCO₂ = 0,23 mm Hg (négligeable)
- La PO₂ diminue en altitude car la P_{atm} diminue.

2-Diffusion des gaz dans les liquides

Définition

Selon la loi de Henry, quand un liquide est exposé à un mélange gazeux, chaque gaz se dissout dans le liquide en proportion de sa pression partielle.

Par conséquent, plus un gaz est concentré dans le mélange gazeux, plus il se dissout en grande quantité et rapidement dans le liquide.

Au point d'équilibre, les pressions partielles des gaz sont les mêmes dans les deux phases.

- Toutefois, si la pression partielle d'un gaz est plus forte dans le liquide que dans le mélange gazeux adjacent, une partie des molécules de gaz dissoutes réintègrent la phase gazeuse.
- Il existe une différence de pression partielle entre le sang capillaire pulmonaire et le gaz alvéolaire d'une part et entre le sang capillaire systémique et les tissus d'autre part.
- Un gaz diffuse toujours d'une zone de forte pression partielle vers une zone de faible pression partielle.

II- Pressions des gaz alvéolaires : PO₂ et PCO₂ alvéolaires

Introduction

1-PO₂ alvéolaire

2-PCO₂ alvéolaire

Introduction

L'air atmosphérique est réchauffé à 37°C et saturé en vapeur d'eau au passage dans les voies aériennes. Cette vapeur exerce une pression partielle de 47 mm Hg qui réduit la pression partielle initiale des composantes de l'air inspiré.

D'où : $P_{\text{gaz}} = (P_{\text{atm}} - P_{\text{H}_2\text{O}}) \times F_{\text{gaz}}$

Exemple : $PO_2 = (760 - 47) \times 0,21$

$PO_2 \approx 150 \text{ mmHg}$

L'air frais inspiré se mélange au gaz restant dans les alvéoles et l'espace mort à la fin de l'expiration.

1-PO2 alvéolaire

L'humidification de l'air frais inspiré combinée au renouvellement partiel du gaz alvéolaire (une partie de l'oxygène de l'air qui entre dans les alvéoles les quitte pour gagner les capillaires pulmonaires) est à l'origine d'une baisse de la PO₂ alvéolaire qui est alors, à peu près de 105 mm Hg.

La PO₂ alvéolaire varie peu pendant le cycle respiratoire et est en équilibre avec la PO₂ du sang quittant les capillaires pulmonaires. Il s'ensuit que la PO₂ du sang artériel reste, elle aussi, invariable de telle sorte que la quantité d'O₂ sortant des capillaires pulmonaires varie peu avec le cycle respiratoire.

2-PCO₂ alvéolaire

Dans les poumons, le CO₂ diffuse du sang vers le gaz alvéolaire du fait de la différence de pression partielle et est rejeté dans l'environnement lors de l'expiration.

La PCO₂ alvéolaire varie peu au cours du cycle respiratoire et est de 40 mm Hg.

III- Echanges gazeux dans les capillaires pulmonaires: échanges alvéolocapillaires des gaz

Introduction

A- Membrane alvéolocapillaire :

B-Différences de PO₂ et de CO₂ au niveau des capillaires pulmonaires

C-Lois de la diffusion

D-Diffusion de l'O₂ et du CO₂ :

E- Mesure de la capacité de diffusion

F-Efficacité des échanges alvéolocapillaires:

Introduction

Dans les poumons, l'O₂ et le CO₂ passent à travers la membrane alvéolocapillaire de façon passive, par diffusion en phase liquide par différence de pression partielle.

A- Membrane alvéolocapillaire :

La membrane alvéolocapillaire: très fine de 0,3 à 0,5 μ , constituée de couches suivantes:

- le film liquidien alvéolaire et le surfactant;
- l'épithélium alvéolaire;
- la membrane basale des cellules épithéliales;
- l'espace interstitiel;
- la membrane basale capillaire;
- l'endothélium capillaire.

C'est cette membrane que les gaz doivent traverser.

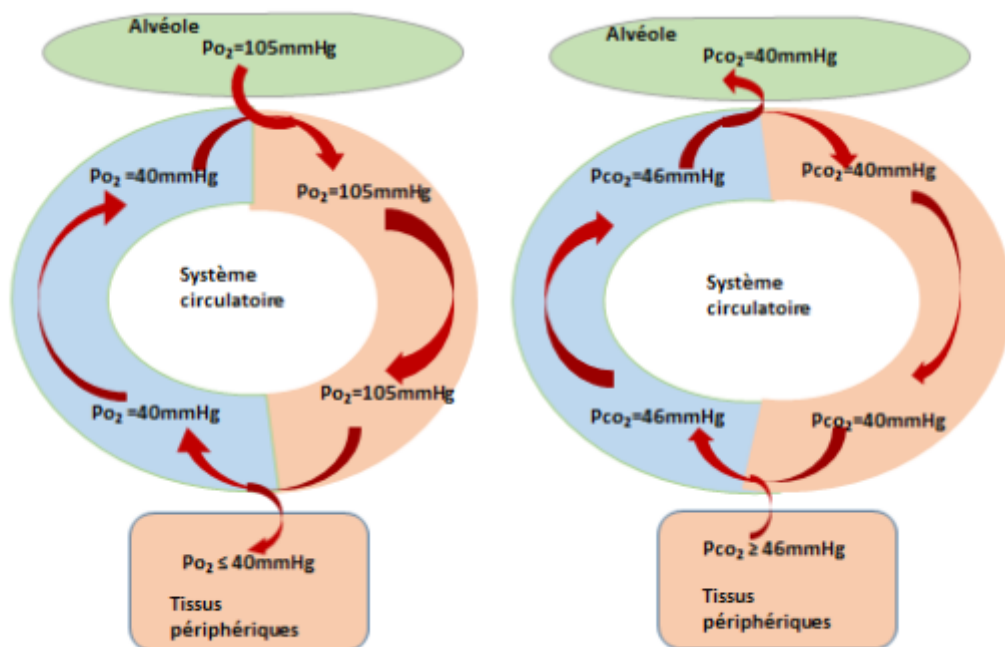


B-Différences de PO₂ et de CO₂ au niveau des capillaires pulmonaires

Dans les poumons, le sang gagne de l'O₂ et perd du CO₂ par simple diffusion du fait de la différence des pressions partielles.

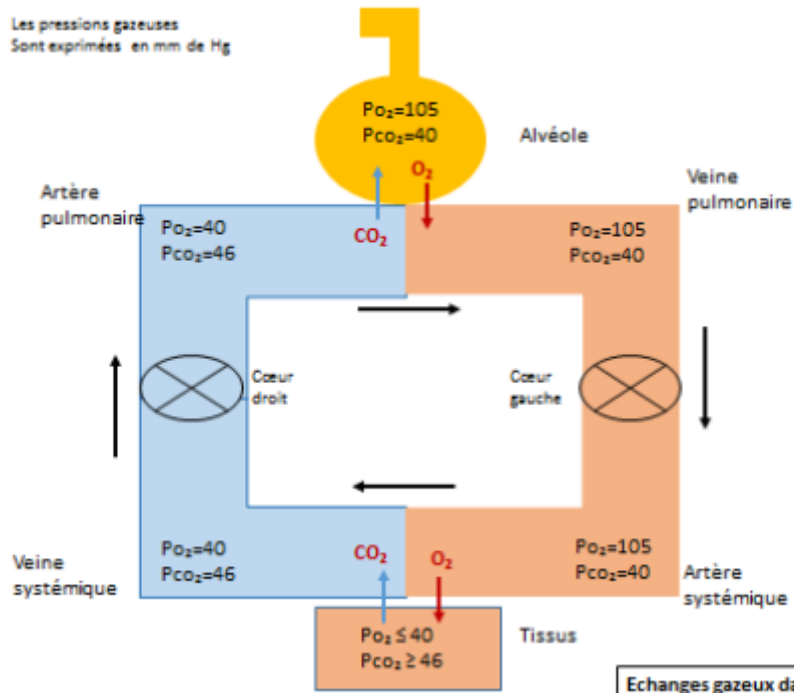
-Le sang entrant dans le capillaire pulmonaire par l'artère pulmonaire, est le sang veineux systémique, pauvre en O₂ avec une PO₂ = 40 mm Hg et riche en CO₂ avec une PCO₂ = 46 mm Hg.

-De ce fait, il y a une différence de pression partielle entre les gaz alvéolaires et le sang des capillaires pulmonaires, d'où diffusion de l'O₂ vers le sang et du CO₂ vers le gaz alvéolaire jusqu'à équilibre des pressions partielles du gaz alvéolaire et du sang sortant des capillaires pulmonaires (0,3-0,4 sec).



Echanges gazeux au niveau des alvéoles et des cellules

Les pressions gazeuses
Sont exprimées en mm de Hg



Echanges gazeux dans les poumons et les tissus

C-Lois de la diffusion

La diffusion d'un gaz à travers la membrane alvéolocapillaire est régie par la loi de Fick ; la diffusion est proportionnelle :

- la surface S de la membrane;
- l'inverse de l'épaisseur e ;
- au gradient de pression du gaz de part et d'autre de la membrane.
- à la constante de diffusion K qui tient compte des caractéristiques du gaz et qui est proportionnelle à :
 - la solubilité du gaz dans la membrane alvéolocapillaire
 - l'inverse de la racine carrée de son poids moléculaire .

La constante de diffusion à travers la membrane alvéolocapillaire est 20 fois plus élevée pour le CO₂ que pour l'O₂.

$$V^{\circ}\text{gaz} = K \times S / e (P1 - P2)$$

V°gaz : est le débit de gaz qui diffuse à travers la membrane alvéolocapillaire;

P1: est la pression du gaz dans l'alvéole;

P2: est la pression à l'entrée du capillaire pulmonaire.

D-Diffusion de l'O₂ et du CO₂ :

1-Diffusion de l'O₂ :

-grande ΔP entre le sang qui arrive dans les capillaires pulmonaires et l'air alvéolaire ;

-équilibre est atteint rapidement (0,3-0,4s).

2-Diffusion du CO₂ :

-faible ΔP entre le sang veineux mêlé et l'air alvéolaire mais diffusibilité importante ;

-équilibre est atteint rapidement (0,3-0,4s).

K du CO₂ >> K de l'O₂ car la solubilité du CO₂ >>à celle de l'O₂.

E- Mesure de la capacité de diffusion

- Dans l'équation de diffusion, plusieurs paramètres (surface d'échange, épaisseur de la membrane et constante de diffusion) sont difficiles à mesurer individuellement:

$$V^{\circ}\text{gaz} = K \times S / e (P1 - P2)$$

- Pour être évalués, ils doivent donc être regroupés sous la forme d'un seul paramètre appelé « coefficient de diffusion du poumon » (DL).

on peut écrire alors : $V^{\circ}\text{gaz} = DL \times (P1 - P2)$,

ou encore : $DL = V^{\circ}\text{gaz}/(P1 - P2)$,

où DL est exprimée en millilitres par minute par millimètre de mercure (ml/min/mmHg).

- Si le gaz analysé est l'O₂, P₂ est difficile à mesurer, et DL ne peut être évalué facilement.
- En clinique, on utilise donc pour mesurer DL le monoxyde de carbone (CO) et on en déduit par le calcul la capacité de diffusion pour l'oxygène.
- Principe de la méthode :

-Une petite quantité de CO est introduite dans le gaz inspiré et la pression partielle de CO (P₁) mesurée par recueil de gaz alvéolaire.

-La pression de CO dans le sang (P₂) est pratiquement nulle car le CO se combine si rapidement à l'hémoglobine qu'il n'a pas le temps de constituer une pression: l'équation devient pour le CO : $DLCO = V^{\circ}CO / PaCO$

-Enfin, en mesurant le CO ventilé pendant un temps donné et en le divisant par sa pression partielle alvéolaire(PaCO),on obtient une valeur fiable de la capacité de diffusion pour le CO.

-On calcule alors la $DLO_2 = 1,23 DLCO$

$DLCO = 17\text{ml/mn/mmHg}$ chez l'adulte jeune au repos→ $DLO_2 = 1,23 \times 17$ soit 21ml/mn/mmHg

$DLCO_2 = 20 DLO_2$

- La DLO_2 est utilisé en clinique pour rechercher une perturbation des échanges gazeux quand
 - l'épaisseur de la membrane alvéolocapillaire augmente(œdème pulmonaire) ;
 - la surface de diffusion diminue(emphysème).

Les échanges gazeux seront perturbés par diminution de la capacité de diffusion. Les concentrations artérielles des gaz peuvent alors être perturbés, alors que la ventilation alvéolaire est adéquate.

F-Efficacité des échanges alvéolocapillaires:

Les échanges alvéolocapillaires dépendent de:

- la ventilation alvéolaire ;
- la diffusion alvéolocapillaire;
- la perfusion pulmonaire ;
- le rapport ventilation/perfusion

1-Diffusion alvéolocapillaire : anomalie possible de la diffusion si modification de la surface, de l'épaisseur,...

a-Modification de la surface

- modification de la surface anatomique: amputation globale(enlever une partie du poumon);
- modification de la surface fonctionnelle:

-amputation circulatoire: arrêt de la perfusion, exemple par un caillot;

-amputation ventilatoire: territoire ventilatoire mal ventilé exemple tumeur bronchique

b-Modification de l'épaisseur:

-accumulation de fibres collagène ou de liquide dans l'interstitium;

-accumulation de liquide dans les alvéoles(pathologie pulmonaire).

2- Rapport ventilation/perfusion

Dans un poumon idéal la pression partielle artérielle en O_2 (PaO_2) est égale à la pression partielle alvéolaire en O_2 (PAO_2) grâce à la diffusion passive de l' O_2 à travers la membrane alvéolocapillaire, les pressions se sont équilibrées.

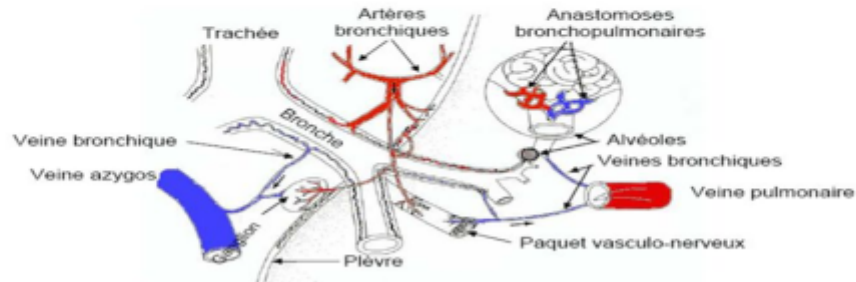
Dans le poumon réel normal $PaO_2 < PAO_2$ (légèrement) : $PaO_2 \approx 100 \text{ mmHg}$ et $PAO_2 \approx 105 \text{ mmHg}$.

Ce gradient alvéolocapillaire normal en O_2 est lié :

- au shunt(court-circuit) anatomique;
- à l'inégalité du rapport ventilation/perfusion.

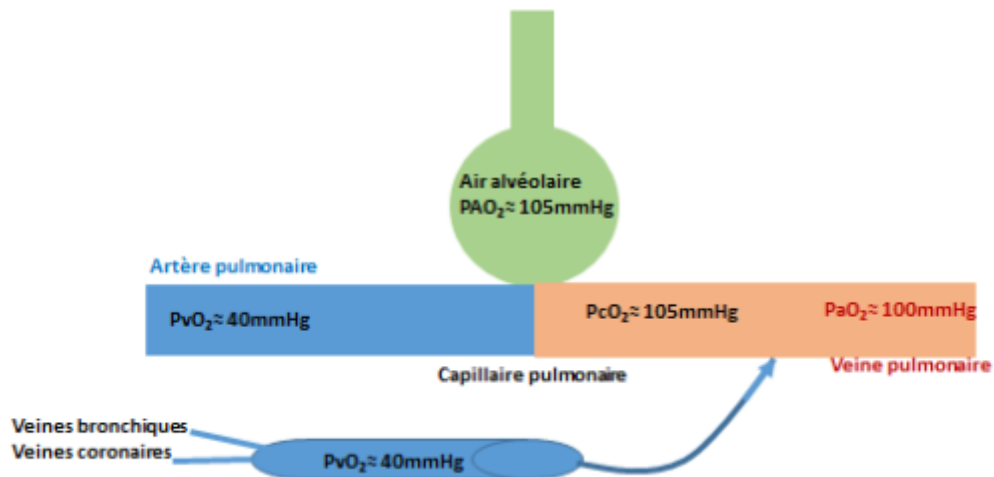
Circulation bronchique

- Aorte → artères bronchiques → capillaires bronchiques → veines bronchiques → veines azygos → veine cave supérieure → **veines pulmonaires**



7

Shunt sanguin anatomique

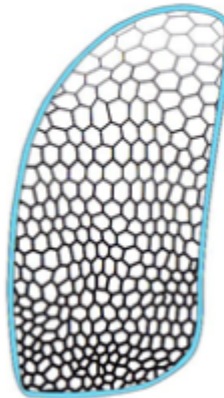


Rapport ventilation-perfusion

Ventilation:

Alvéoles distendus
moins compliants;
ventilation moindre

Alvéoles non distendus
compliants;
ventilation plus élevée



Perfusion:

Pressions vasculaires plus
basses, résistances plus
élevées; **perfusion moindre**

Pressions vasculaires plus
hautes, résistances moins
élevées; **perfusion plus élevée**

Rapport ventilation/perfusion

Sommet : 1

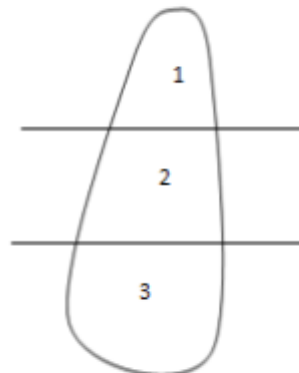
Ventilation(VA) > Perfusion(Q)
Rapport VA/Q élevé

Partie médiane : 2

VA = Q
Rapport VA/Q = 1 (idéal)

Base : 3

VA < Q
Rapport VA/Q bas

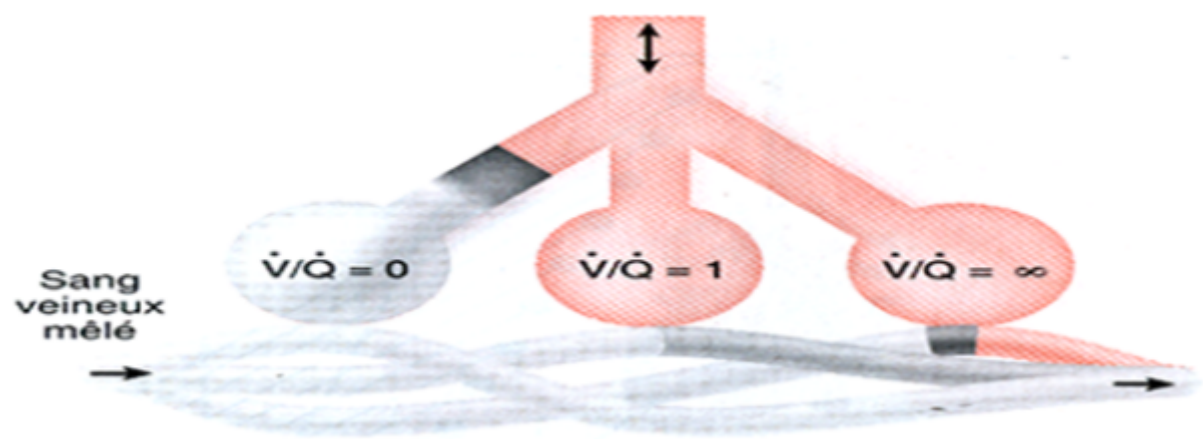


- Facteurs responsables de la distribution du rapport VA / Q :

- notions de gravité et d'élasticité : poumon, structure élastique suspendue à la trachée ;
- structures pulmonaires les plus étirées : sommet
- compliance alvéolaire plus basse au sommet
- sujet normal ; valeurs régionales $0,8 < VA / Q < 1,2$

Résultats :

- Sujet normal; adéquation globale entre VA et Q (rapport VA/ Q ≈ 1)
- Pathologies : inadéquation ; 2 cas extrêmes :
 - obstruction bronchique : VA / Q = 0 (zone perfusée et non ventilée)
 - obstruction vasculaire : VA / Q = ∞ (zone ventilée et non perfusée)



IV-Echanges gazeux dans les capillaires systémiques

Introduction

Différences de PO₂ et PCO₂ au niveau des capillaires systémiques:

Introduction

Le transfert d'O₂ et de CO₂ entre le sang des capillaires systémiques et les cellules des tissus se fait par simple diffusion à cause des différences de pressions partielles.

Le sang artériel qui arrive dans les capillaires systémiques est pratiquement identique à celui qui sort des poumons par les veines pulmonaires : la PO₂ est de 100mm Hg et la PCO₂ de 40mm Hg.

Différences de PO₂ et PCO₂ au niveau des capillaires systémiques:

Du fait du métabolisme oxydatif, les cellules consomment de l'O₂ et produisent du CO₂ de façon continue :

-la PO₂ cellulaire est d'environ 40mm Hg (elle est beaucoup plus basse dans les mitochondries, siège du métabolisme oxydatif) ;

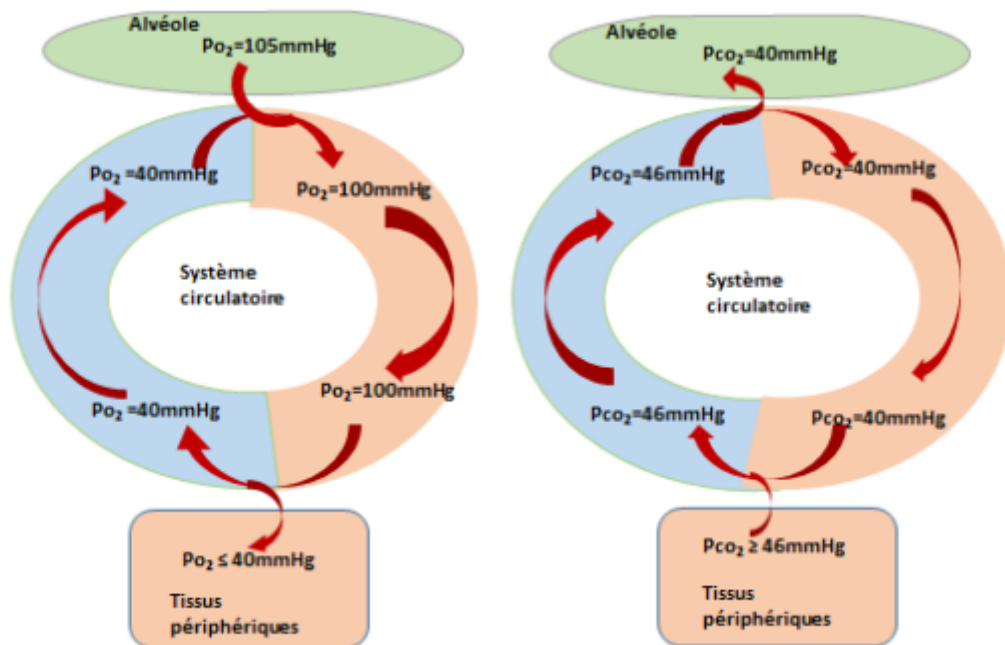
-la PCO₂ est de 46 mm Hg (ces valeurs variables selon le niveau d'activité du métabolisme oxydatif).

- L'O₂ diffuse alors sous l'effet de la différence de la PO₂ (des capillaires systémiques vers les cellules).
- Il se passe l'inverse pour le CO₂ :

- le CO₂ diffuse rapidement hors des cellules (PCO₂=46 mmHg) vers le sang entrant dans les capillaires (PCO₂ = 40mmHg) : différence de pression partielle liée à la production continue de CO₂ ;

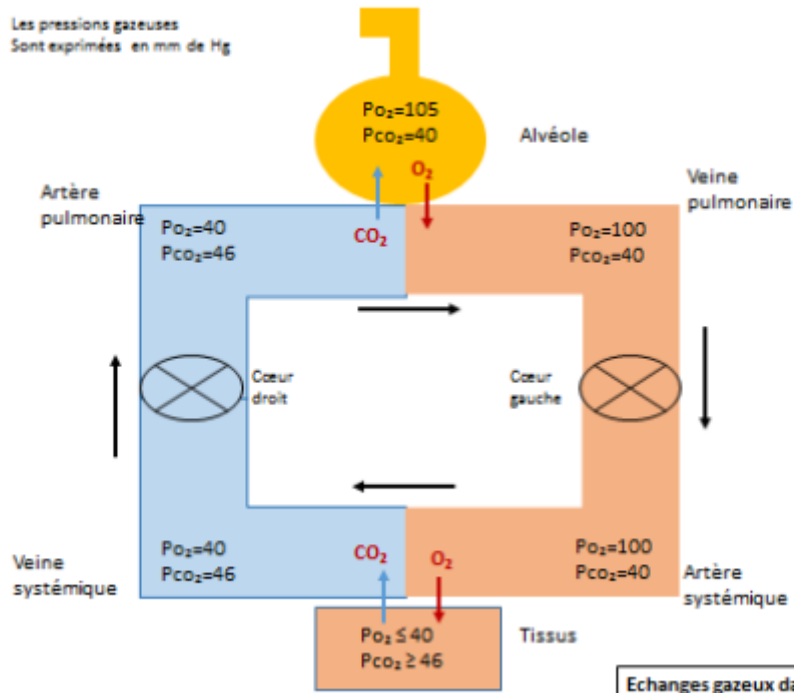
-ce transfert en CO₂ continue jusqu'à ce que la PCO₂ du sang soit en équilibre avec celle des tissus soit 46mm Hg.

- Le sang veineux systémique, qui est relativement pauvre en O₂ (PO₂ = 40mm Hg) et riche en CO₂ (PCO₂ = 46 mm Hg), retourne au cœur qui le pompe vers les poumons.



Echanges gazeux au niveau des alvéoles et des cellules

Les pressions gazeuses
Sont exprimées en mm de Hg



Echanges gazeux dans les poumons et les tissus

Conclusion

Les échanges alvéolocapillaires représentent la fonction essentielle de l'appareil respiratoire, ils déterminent la quantité d'O₂ qui sera disponible pour les échanges gazeux tissulaires, donc pour la respiration cellulaire.