

# ECHANGES GAZEUX ET TRANSPORT DES GAZ

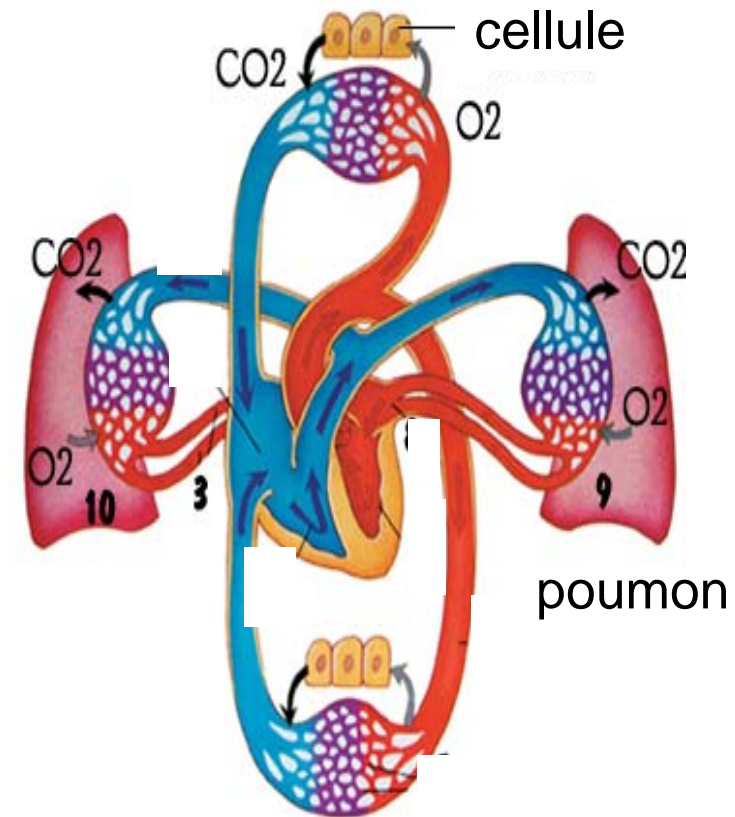
Physiologie respiratoire

IFMK. Septembre 2012

Dr. M. VIPREY

# DEFINITIONS

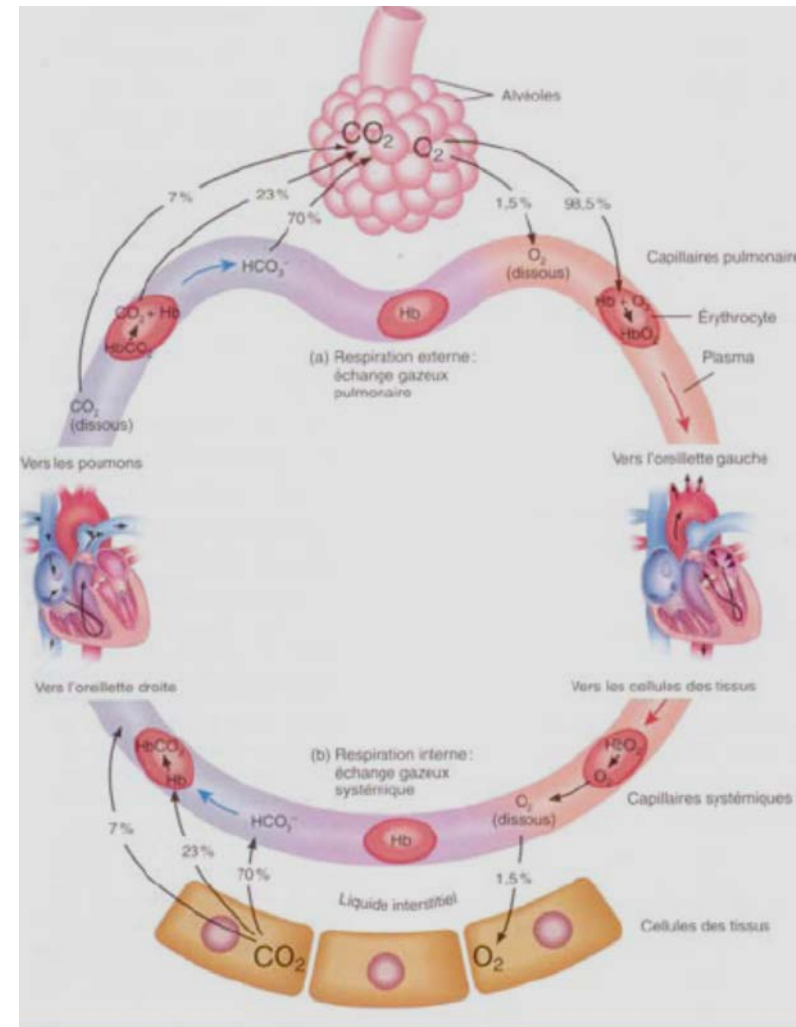
- 4 étapes :
  - Ventilation pulmonaire : mouvements d'air entre l'atmosphère et l'alvéole (Convection)
    - Mécanique ventilatoire
    - Ventilation alvéolaire
  - Diffusion : passage des gaz de l'alvéole au capillaire pulmonaire (Diffusion)
  - Circulation sanguine : transport des gaz des capillaires pulmonaires aux capillaires tissulaires (Convection)
  - Diffusion : échanges des gaz entre le capillaire tissulaire et la cellule (Diffusion)



Ventilation  $\neq$  Respiration

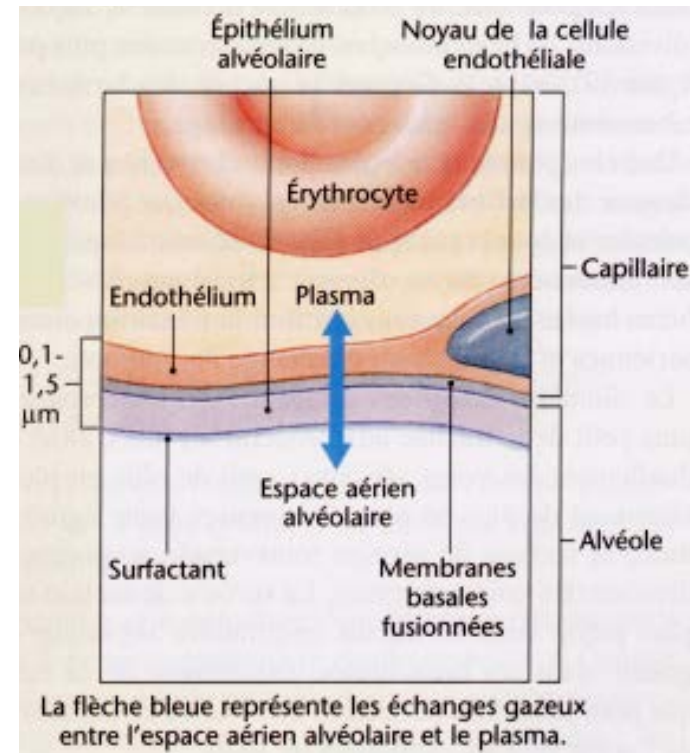
# PLAN

- Diffusion alvéolo-capillaire
  - Membrane alvéolo-capillaire
  - Principes physiques
  - Diffusion de l'O<sub>2</sub>
  - Diffusion du CO<sub>2</sub>
- Transport des gaz :
  - Hémoglobine
  - Transport sanguin de l'O<sub>2</sub>
  - Saturation de l'Hb en O<sub>2</sub> et quantité d'O<sub>2</sub> combinée
  - Affinité de l'Hb pour l' O<sub>2</sub>
  - Transport sanguin du CO<sub>2</sub>
- Interactions O<sub>2</sub> / CO<sub>2</sub>



# MEMBRANE ALVEOLO-CAPILLAIRE

- Diffusion de l'O<sub>2</sub> de l'alvéole au capillaire pulmonaire
- Diffusion du CO<sub>2</sub> du capillaire pulmonaire à l'alvéole
- 2 étapes :
  - Diffusion à travers la membrane alvéolo-capillaire (MAC)
  - Diffusion et fixation dans le sang capillaire
    - Plasma
    - Hématies



# MEMBRANE ALVEOLO-CAPILLAIRE

Alvéole

Surfactant

Film liquidien

Épithélium alvéolaire : Pneumocytes I et II

Membrane basale alvéolaire

Interstitium

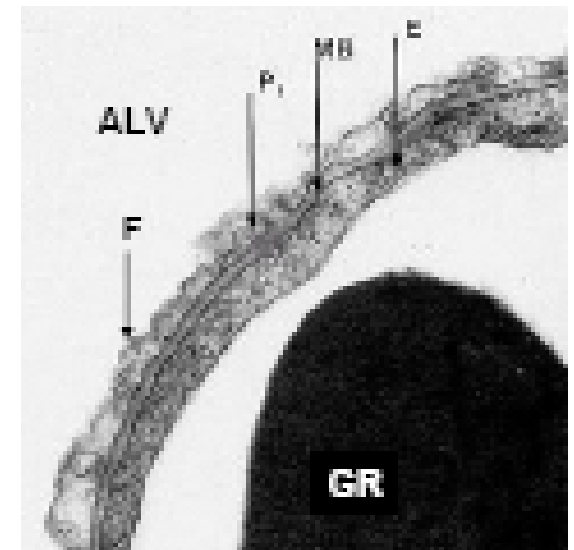
Membrane basale capillaire

Cellule endothéliale

fusionnés

Capillaire

- 0,2 à 1  $\mu\text{m}$
- 60 - 80  $\text{m}^2$
- Pathologie : fibrose pulmonaire



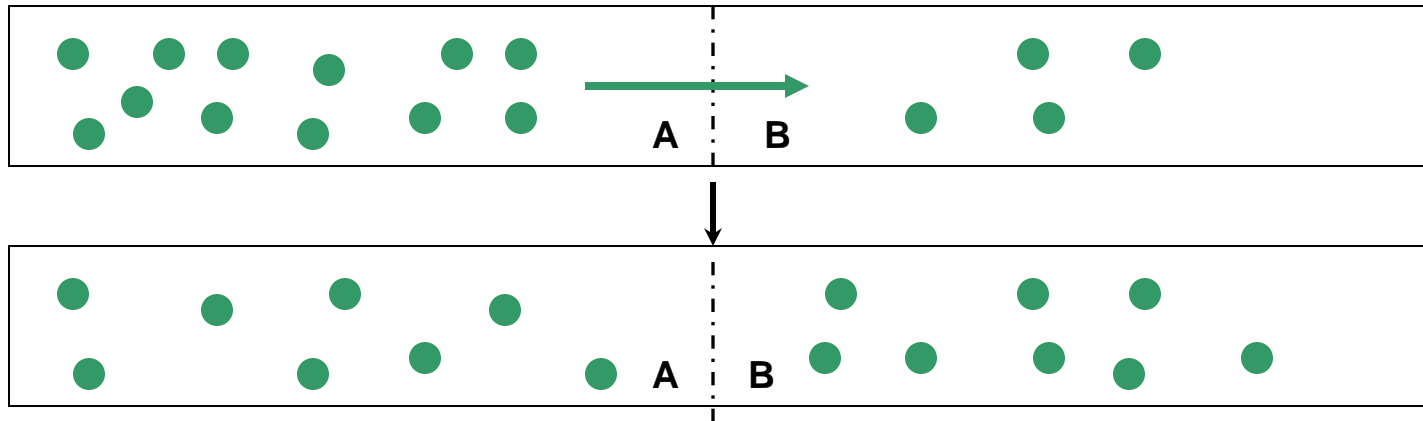
# PLAN

- Diffusion alvéolo-capillaire
  - Membrane alvéolo-capillaire
  - Principes physiques
  - Diffusion de l'O<sub>2</sub>
  - Diffusion du CO<sub>2</sub>
- Transport des gaz :
  - Hémoglobine
  - Transport sanguin de l'O<sub>2</sub>
  - Saturation de l'Hb en O<sub>2</sub> et quantité d'O<sub>2</sub> combinée
  - Affinité de l'Hb pour l' O<sub>2</sub>
  - Transport sanguin du CO<sub>2</sub>
- Interactions O<sub>2</sub> / CO<sub>2</sub>

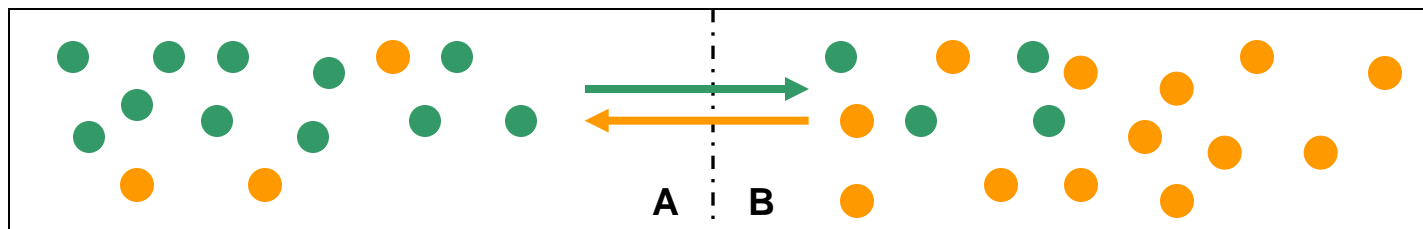
# PRINCIPES PHYSIQUES



Un gaz diffuse toujours de la zone de pression partielle la plus élevée vers la zone de pression partielle la plus basse, jusqu'à obtention de l'équilibre.



Dans un mélange gazeux, chaque gaz se comporte de façon indépendante



# PRINCIPES PHYSIQUES



- Loi de Fick :

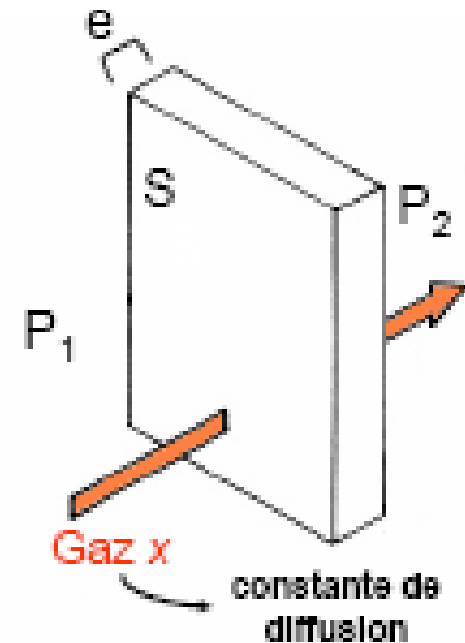
La quantité de gaz  $V_x$  diffusant à travers la MAC dépend de :

- Différence de pression :  $\Delta P = P_2 - P_1$
- Temps de contact:  $dt$
- Constante de diffusion du gaz :  $D_x$
- Surface d'échange :  $S$
- Épaisseur du tissu (inverse) :  $e$

$$V_x = (P_2 - P_1) \cdot (D_x \cdot S / e) \cdot dt$$

$$V_x = \Delta P \cdot DL_x$$

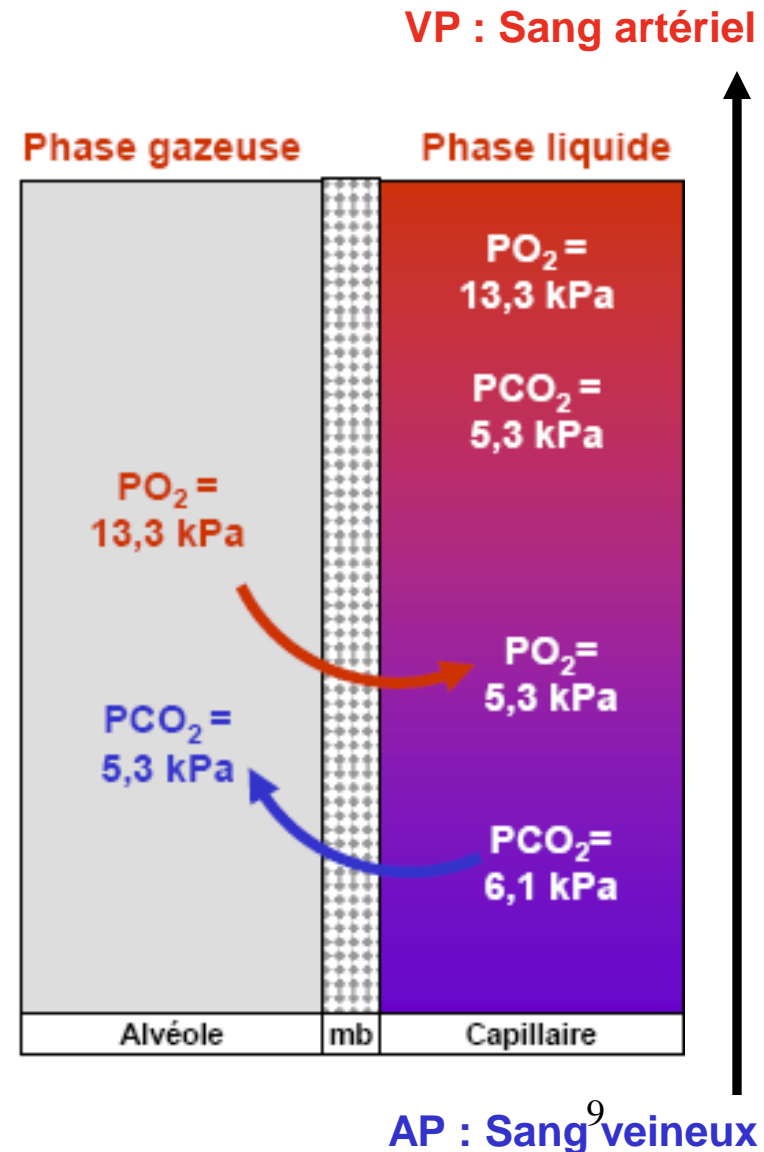
avec  $DL_x = D_x \cdot S / e$  : coefficient de diffusion du gaz  $x$





# Diffusion alvéolo-capillaire

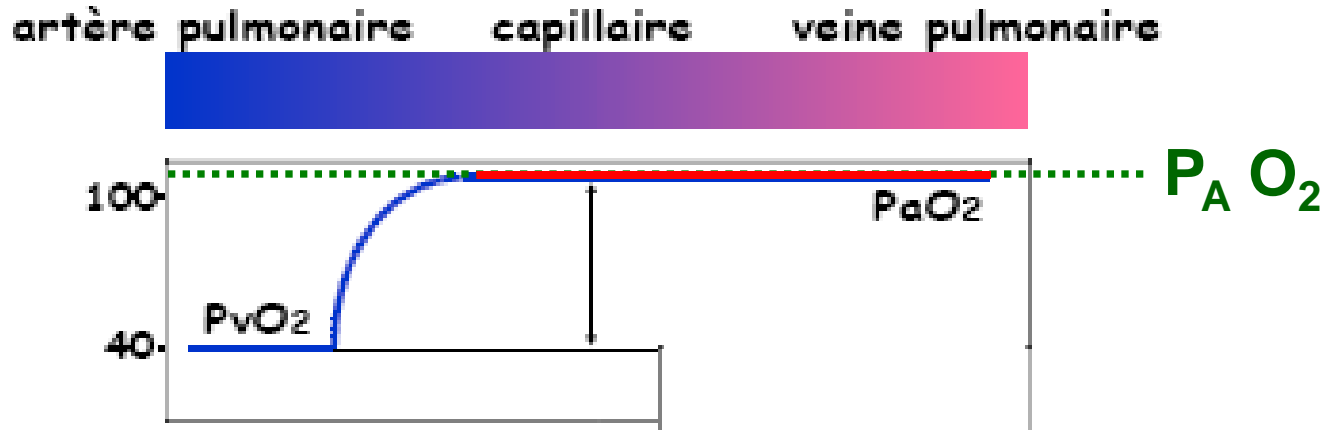
- Une artère pulmonaire contient du sang veineux ( $P_vO_2$  basse)
- Une veine pulmonaire contient du sang artériel ( $P_aO_2$  élevée)
- $P_AO_2 > P_vO_2 \rightarrow$  passage de l' $O_2$  de l'alvéole vers le capillaire pulmonaire
- $P_ACO_2 < P_vCO_2 \rightarrow$  passage du  $CO_2$  du capillaire pulmonaire à l'alvéole



# PLAN

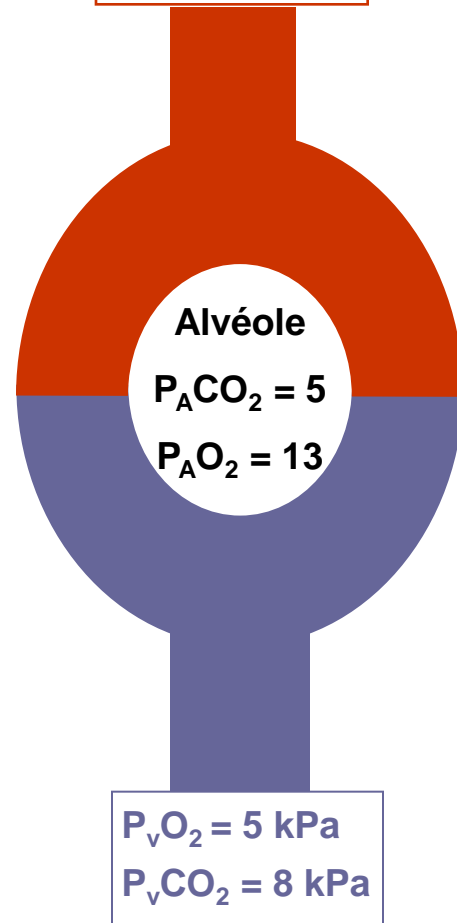
- Diffusion alvéolo-capillaire
  - Membrane alvéolo-capillaire
  - Principes physiques
  - Diffusion de l'O<sub>2</sub>
  - Diffusion du CO<sub>2</sub>
- Transport des gaz :
  - Hémoglobine
  - Transport sanguin de l'O<sub>2</sub>
  - Saturation de l'Hb en O<sub>2</sub> et quantité d'O<sub>2</sub> combinée
  - Affinité de l'Hb pour l' O<sub>2</sub>
  - Transport sanguin du CO<sub>2</sub>
- Interactions O<sub>2</sub> / CO<sub>2</sub>

# DIFFUSION DE L'O<sub>2</sub>



VP : Sang artériel

$P_a O_2 = 13 \text{ kPa}$   
 $P_a CO_2 = 5 \text{ kPa}$



AP : Sang veineux

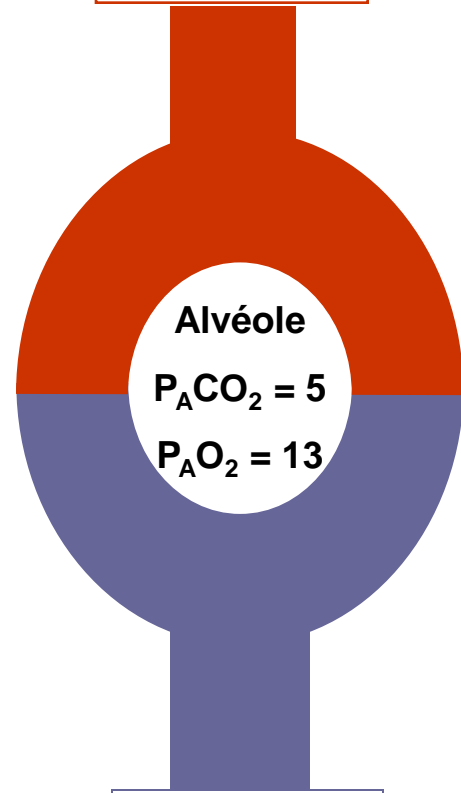
- $V O_2 = DL_{O_2} \cdot (P_A O_2 - P_v O_2)$
- $P_A O_2 \gg P_v O_2$  donc  $\Delta P$  : élevée
- Capacité de diffusion  $DL_{O_2}$  basse
- Diffusion de l'O<sub>2</sub> jusqu'à l'équilibre, soit  $P_A O_2 = P_a O_2$

# DIFFUSION DU CO<sub>2</sub>

- $V_{CO_2} = DL_{CO_2} \cdot (P_A CO_2 - P_v CO_2)$
- $P_A CO_2 > P_v CO_2$  .  $\Delta P$  : basse
- Capacité de diffusion  $DL_{CO_2}$  élevée  
( $DL_{CO_2} = 20 \times DL_{O_2}$ )
- Diffusion du CO<sub>2</sub> jusqu'à l'équilibre, soit  $P_A CO_2 = P_a CO_2$

VP : Sang artériel

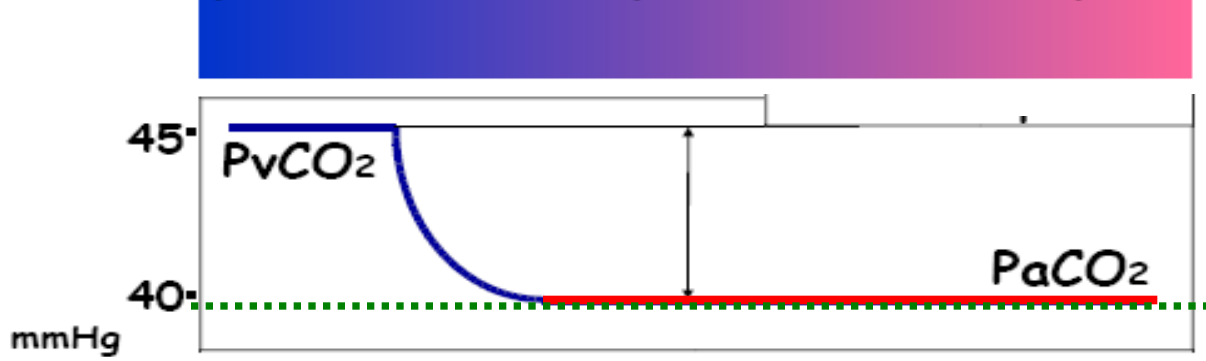
$P_a O_2 = 13 \text{ kPa}$   
 $P_a CO_2 = 5 \text{ kPa}$



$P_v O_2 = 5 \text{ kPa}$   
 $P_v CO_2 = 8 \text{ kPa}$

AP : Sang veineux

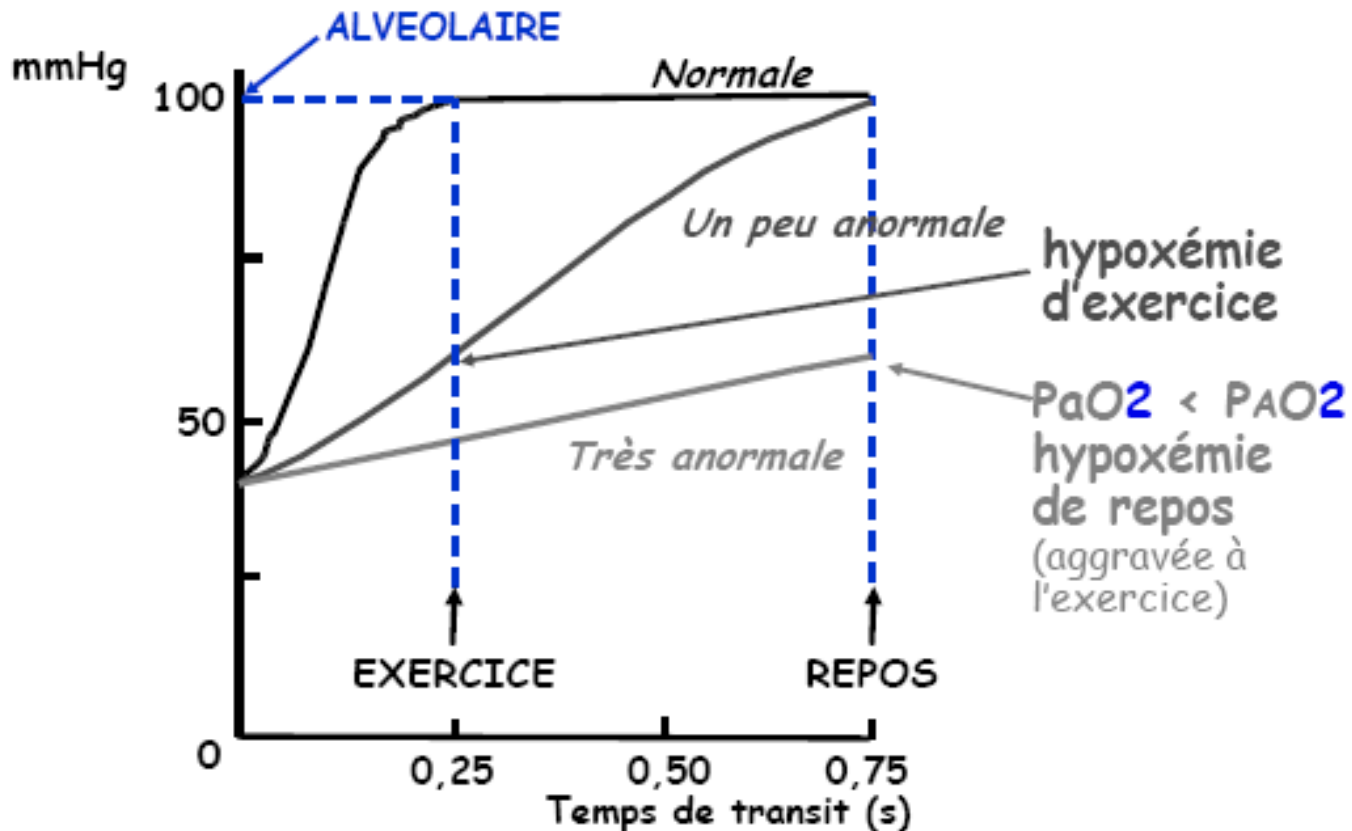
artère pulmonaire      capillaire      veine pulmonaire



$P_A CO_2$

# Diffusion alvéolo-capillaire

- $V_X = (D.S / e) (P_2 - P_1) .dt$
- Au repos :  $dt = 0,75$  s
- Exercice :  $dt = 0,25$  s

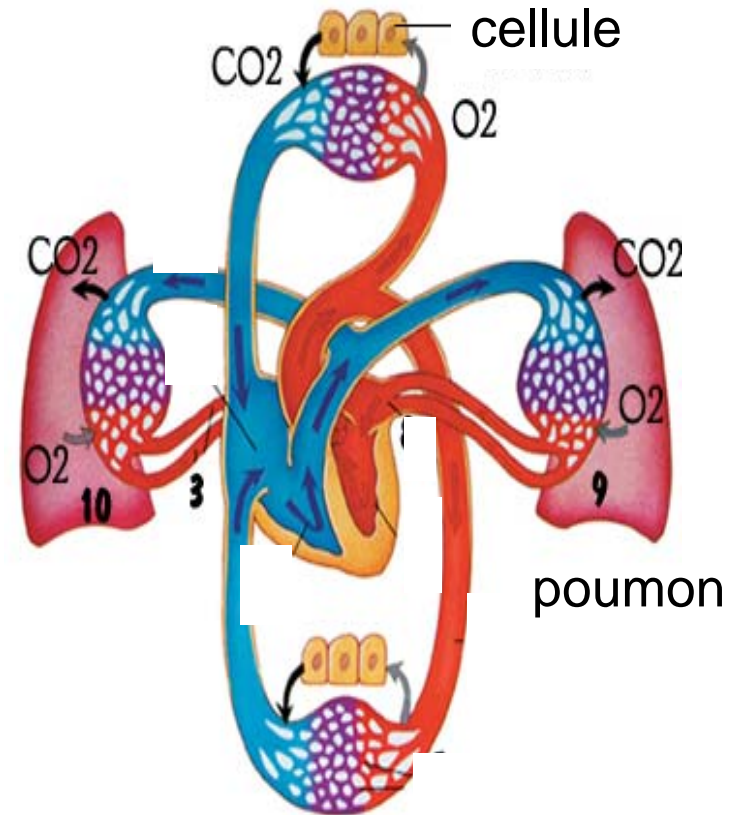


# PLAN

- Diffusion alvéolo-capillaire
  - Membrane alvéolo-capillaire
  - Principes physiques
  - Diffusion de l'O<sub>2</sub>
  - Diffusion du CO<sub>2</sub>
- Transport des gaz :
  - Hémoglobine
  - Transport sanguin de l'O<sub>2</sub>
  - Saturation de l'Hb en O<sub>2</sub> et quantité d'O<sub>2</sub> combinée
  - Affinité de l'Hb pour l' O<sub>2</sub>
  - Transport sanguin du CO<sub>2</sub>
- Interactions O<sub>2</sub> / CO<sub>2</sub>

# DEFINITIONS

- 4 étapes :
  - Ventilation pulmonaire : mouvements d'air entre l'atmosphère et l'alvéole (Convection)
    - Mécanique ventilatoire
    - Ventilation alvéolaire
  - Diffusion : passage des gaz de l'alvéole au capillaire pulmonaire (Diffusion)
  - **Circulation sanguine : transport des gaz des capillaires pulmonaires aux capillaires tissulaires (Convection)**
  - Diffusion : échanges des gaz entre le capillaire tissulaire et la cellule (Diffusion)



Ventilation  $\neq$  Respiration

# Transport des gaz

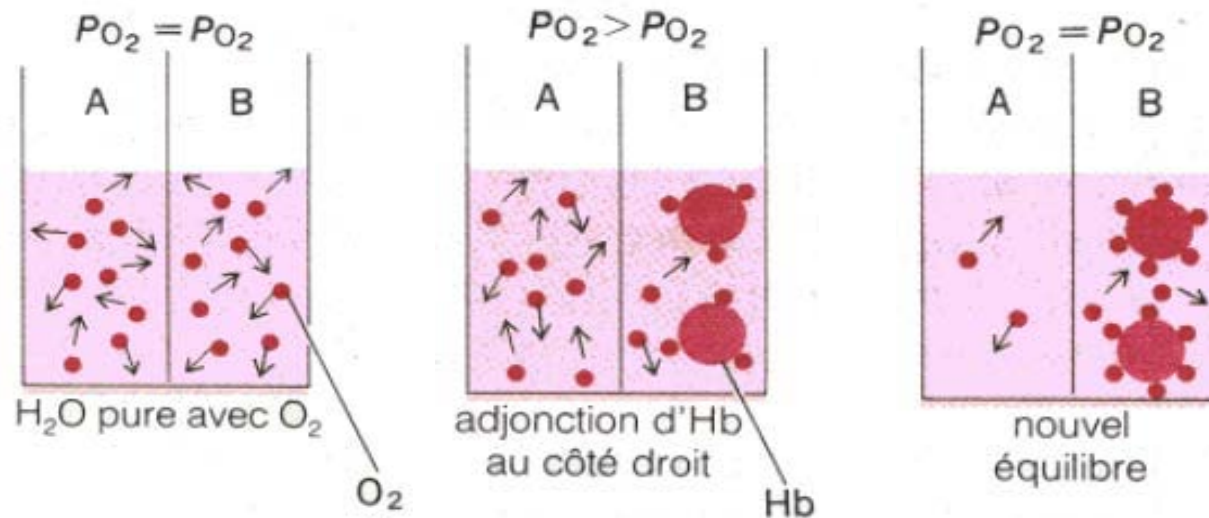
- Dans un liquide, un gaz peut être présent sous 2 formes :
  - Dissoute
  - Combinée
    - Liée à un transporteur (hémoglobine)
    - Transformée après réaction chimique (bicarbonates)
- Le volume de gaz dissous dans un liquide est déterminée par :
  - la pression partielle du gaz
  - son coefficient de solubilité S ( $S_{O_2} = 0.003 \text{ ml / ml sang / mmHg}$ )
  - selon la loi de Henry :

$$V_{\text{gaz}} = S_{\text{gaz}} \times \frac{P_{\text{gaz}}}{P_{\text{atm}}}$$



# Transport des gaz

- **Pression partielle** : quantité de gaz sous forme dissoute
- **Concentration ou contenu** : quantité totale de gaz
- A l'équilibre, seules les pressions partielles s'équilibrent de part et d'autre de la membrane



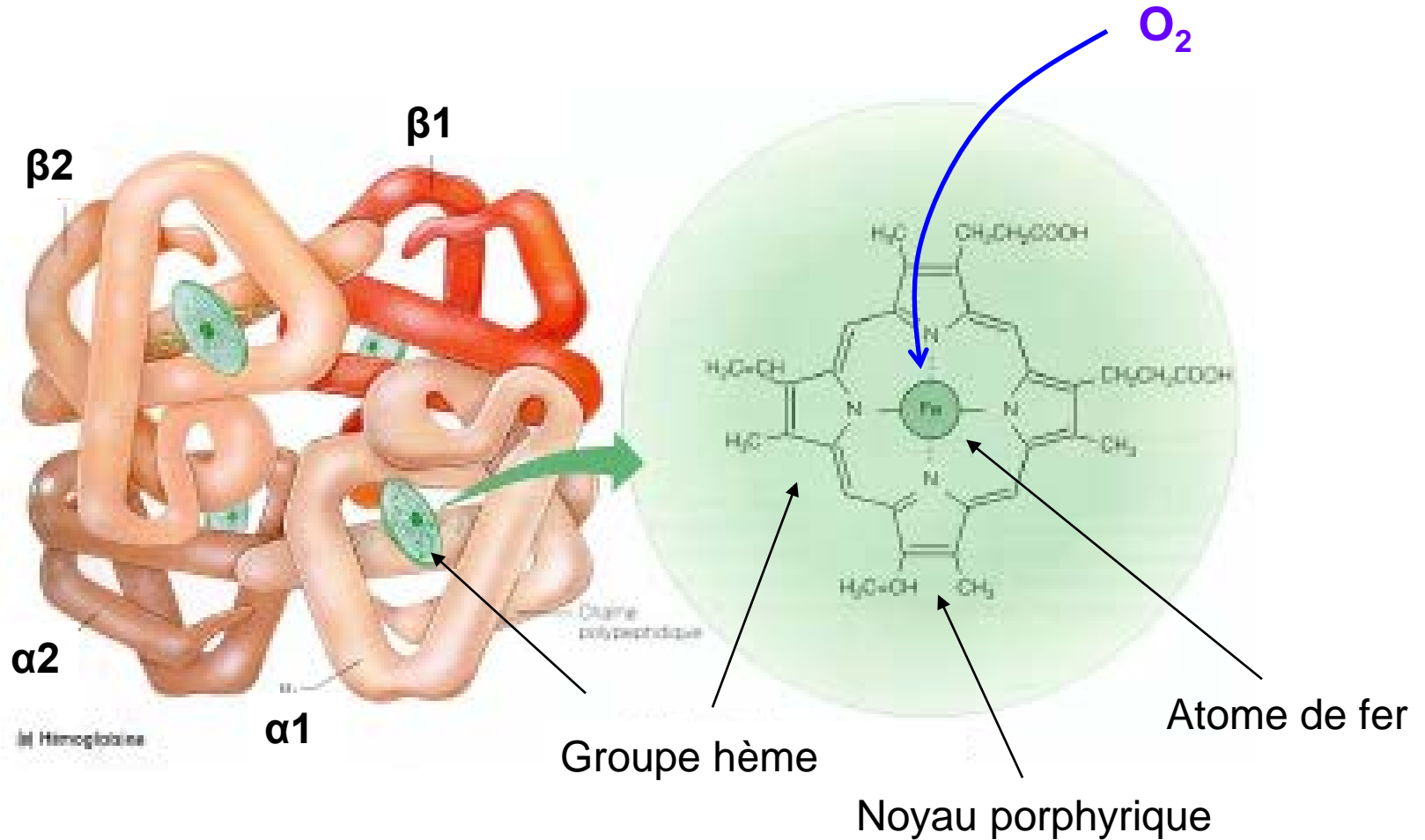
- Après adjonction d'Hb d'un côté de la membrane, les pressions partielles ne sont pas égales dans les 2 compartiments
- Le gaz diffuse d'un compartiment à l'autre afin d'obtenir un état d'équilibre en terme de pressions partielles de part et d'autre de la membrane

# HEMOGLOBINE

- Pigment respiratoire présent uniquement dans les hématies
- Composition :
  - Tétramère : 4 sous-unités de globine
    - 2 sous-unités  $\alpha$  :  $\alpha_1, \alpha_2$
    - 2 sous-unités  $\beta$  :  $\beta_1, \beta_2$
  - Globine = chaîne polypeptidique de conformation hélicoïdale
  - Chaque chaîne de globine est associée à un groupe hème (noyau porphyrrique + 1 atome de fer)
  - L'atome de fer se lie à 1 molécule d'O<sub>2</sub>
- Hb : molécule allostérique
  - modification structurale → modification fonctionnelle
  - Modification de l'affinité pour l'O<sub>2</sub>



# HEMOGLOBINE



Chaque molécule d'Hb peut fixer au maximum 4 molécules d' $\text{O}_2$

# PLAN

- Diffusion alvéolo-capillaire
  - Membrane alvéolo-capillaire
  - Principes physiques
  - Diffusion de l'O<sub>2</sub>
  - Diffusion du CO<sub>2</sub>
  - Exploration
- Transport des gaz :
  - Hémoglobine
  - Transport sanguin de l'O<sub>2</sub>
  - Saturation de l'Hb en O<sub>2</sub> et quantité d'O<sub>2</sub> combinée
  - Affinité de l'Hb pour l' O<sub>2</sub>
  - Transport sanguin du CO<sub>2</sub>
- Interactions O<sub>2</sub> / CO<sub>2</sub>

# TRANSPORT SANGUIN DE L'O<sub>2</sub>

Oxygène

Forme combinée  
(fixée à l'Hb) : 97%

Forme dissoute  
(plasma) : 3%

Capacité oxyphorique de l'Hb pour l'O<sub>2</sub>

Pression partielle en O<sub>2</sub>

Concentration = Contenu en O<sub>2</sub>

- Pouvoir oxyphorique de l'Hb :
  - PO = 1,34 ml / g
  - 1 g d'Hb peut fixer 1,34 ml d'O<sub>2</sub>
- Capacité oxyphorique de l'Hb :
  - quantité maximale d'O<sub>2</sub> pouvant être fixée à l'Hb
  - CO = PO x [Hb]

# PLAN

- Diffusion alvéolo-capillaire
  - Membrane alvéolo-capillaire
  - Principes physiques
  - Diffusion de l'O<sub>2</sub>
  - Diffusion du CO<sub>2</sub>
  - Exploration
- Transport des gaz :
  - Hémoglobine
  - Transport sanguin de l'O<sub>2</sub>
  - Saturation de l'Hb en O<sub>2</sub> et quantité d'O<sub>2</sub> combinée
  - Affinité de l'Hb pour l' O<sub>2</sub>
  - Transport sanguin du CO<sub>2</sub>
- Interactions O<sub>2</sub> / CO<sub>2</sub>

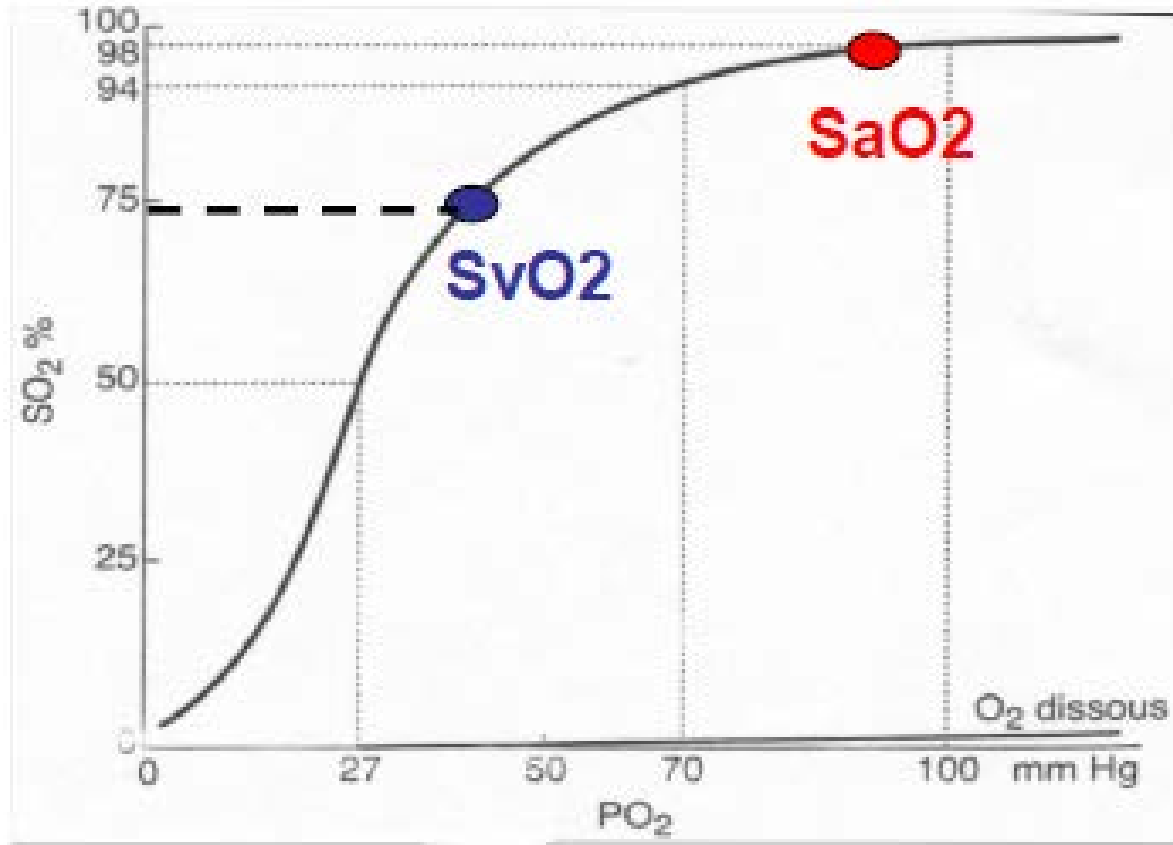
# SATURATION DE L'Hb EN O<sub>2</sub>



- Toutes les molécules d'Hb ne sont pas saturées en O<sub>2</sub>, elles ne fixent pas toutes 4 molécules d'O<sub>2</sub>
- $$SaO_2 (\%) = \frac{\text{Quantité d'O}_2 \text{ liée à l'Hb}}{\text{Capacité oxyphorique de l'Hb}} \times 100$$
- Capacité oxyphorique de l'Hb = PO x [Hb]
- Quantité d'O<sub>2</sub> combinée (liée à l'Hb) = CO x SaO<sub>2</sub> / 100  
= PO. [Hb]. SaO<sub>2</sub> / 100
- Saturomètre :



# SATURATION DE L'Hb EN O<sub>2</sub>



Courbe de dissociation de l'oxyhémoglobine : Courbe de Barcroft

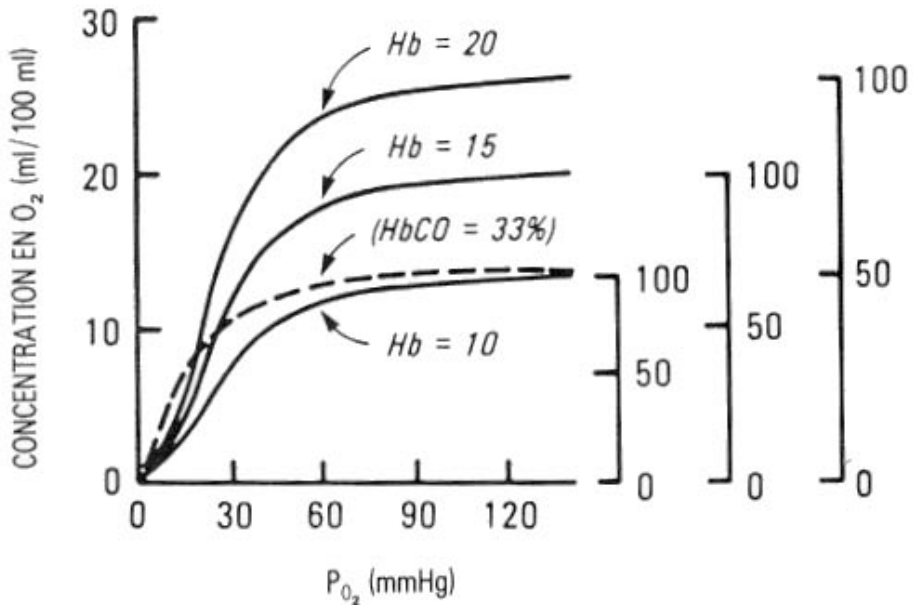


# QUANTITE D'O<sub>2</sub> COMBINE

$$QO_2 = CO \times SaO_2 / 100 = PO \cdot [Hb] \cdot SaO_2 / 100$$

Elle dépend de :

## 1. La concentration d'Hb dans le sang



- Pour [Hb]: 15 g /100 ml de sang et Sa O<sub>2</sub> de 98 % :

$$QO_2 = 1,34 \times 15 \times (98 / 100) = 19,7 \text{ ml d'O}_2 / 100 \text{ ml}$$

- Pour [Hb]: 10 g /100 ml de sang et Sa O<sub>2</sub> de 98 % :

$$QO_2 = 1,34 \times 10 \times (98 / 100) = 13,1 \text{ ml d'O}_2 / 100 \text{ ml}$$

# QUANTITE D'O<sub>2</sub> COMBINE

$$QO_2 = CO \times SaO_2 / 100 = PO \cdot [Hb] \cdot SaO_2 / 100$$

Elle dépend de :

1. [Hb] sanguine

2. La saturation (liée à PO<sub>2</sub>)

- Zone A : PO<sub>2</sub> > 13 kPa (100 mm Hg) :

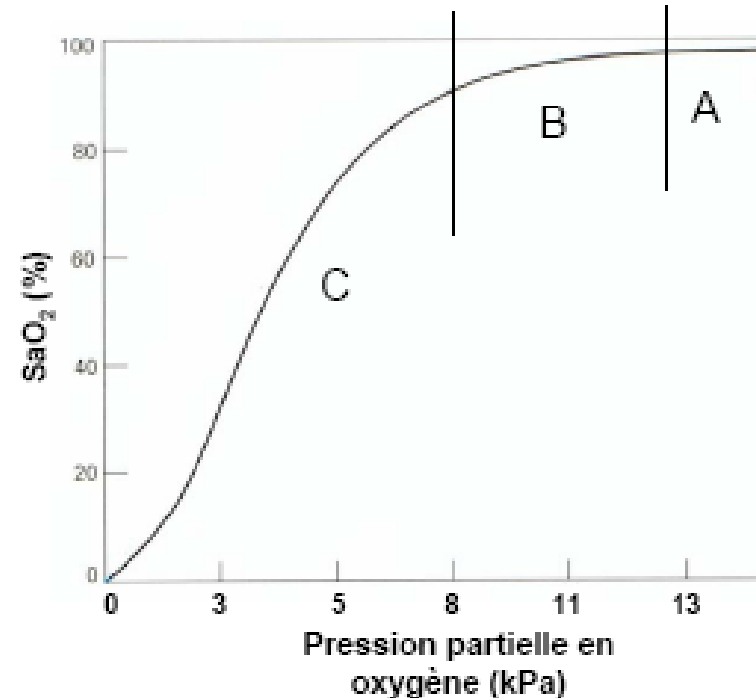
↑ de la PO<sub>2</sub> n'affecte pas la Sa O<sub>2</sub> ni le contenu en O<sub>2</sub>

- Zone B : 8 < PO<sub>2</sub> < 13 kPa :

↓ PO<sub>2</sub> → faible ↓ de la SaO<sub>2</sub> et du contenu en O<sub>2</sub>

- Zone C : PO<sub>2</sub> < 8 :

faible ↓ de PO<sub>2</sub> → forte ↓ de SaO<sub>2</sub> et du contenu en O<sub>2</sub>



1 mmHg = 133 Pa

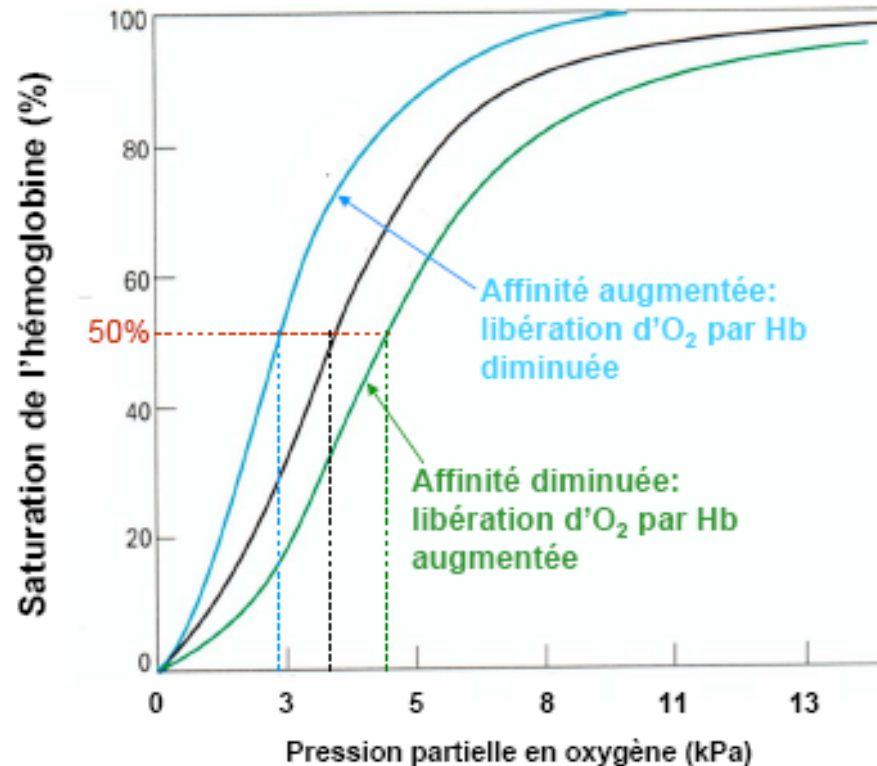
# QUANTITE D'O<sub>2</sub> COMBINE

$$QO_2 = CO \times SaO_2 / 100 = PO \cdot [Hb] \cdot SaO_2 / 100$$

Elle dépend de :

1. La concentration d'Hb dans le sang
2. De la saturation

3. De l'affinité de l'Hb pour l'O<sub>2</sub>



# PLAN

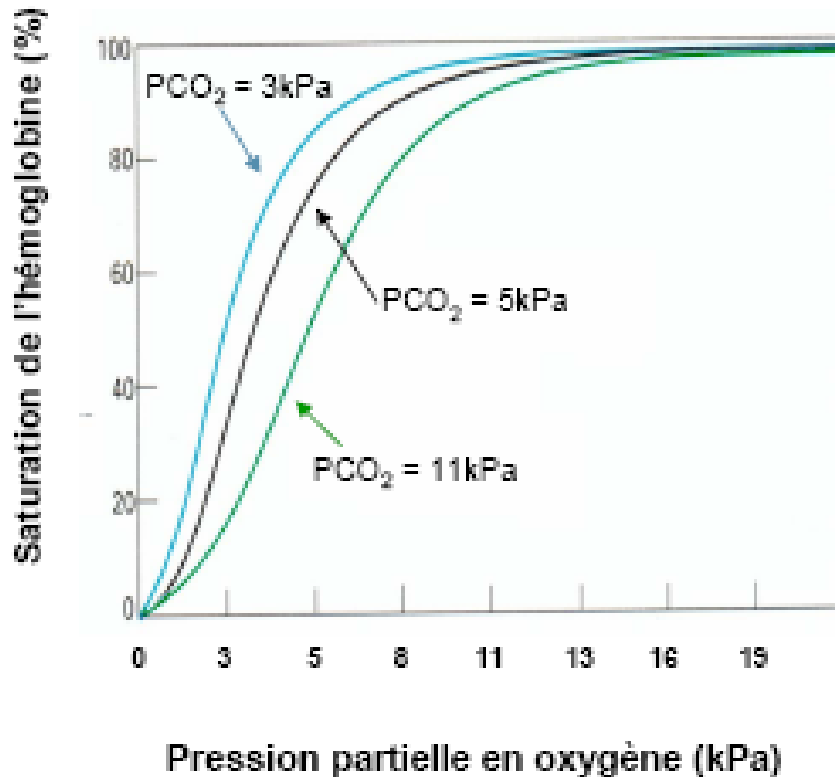
- Diffusion alvéolo-capillaire
  - Membrane alvéolo-capillaire
  - Principes physiques
  - Diffusion de l'O<sub>2</sub>
  - Diffusion du CO<sub>2</sub>
  - Exploration
- Transport des gaz :
  - Hémoglobine
  - Transport sanguin de l'O<sub>2</sub>
  - Saturation de l'Hb en O<sub>2</sub> et quantité d'O<sub>2</sub> combinée
  - Affinité de l'Hb pour l' O<sub>2</sub>
  - Transport sanguin du CO<sub>2</sub>
- Interactions O<sub>2</sub> / CO<sub>2</sub>


# AFFINITE DE L'Hb POUR L'O<sub>2</sub>

- Modification de l'affinité de l'Hb pour l'O<sub>2</sub>
  - Augmentation de l'affinité : favorable à l'hématose  
→ fixation de l'O<sub>2</sub> au niveau pulmonaire
  - Diminution de l'affinité : favorable à l'oxygénation des tissus → libération de l'O<sub>2</sub> aux cellules

# AFFINITE DE L'Hb POUR L'O<sub>2</sub>

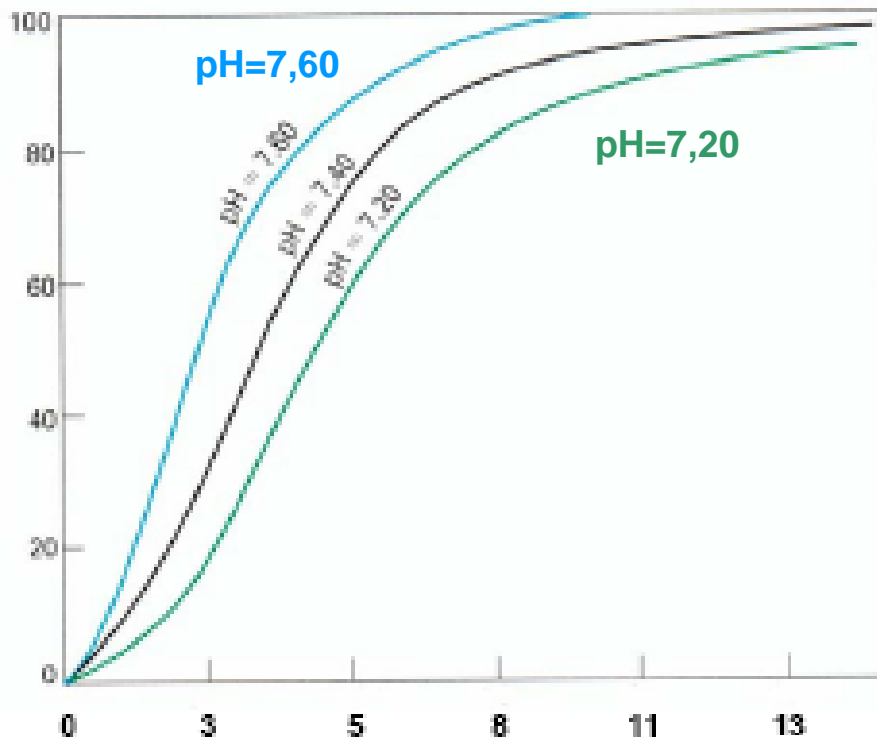
- Modifiée par :
  - la PCO<sub>2</sub>



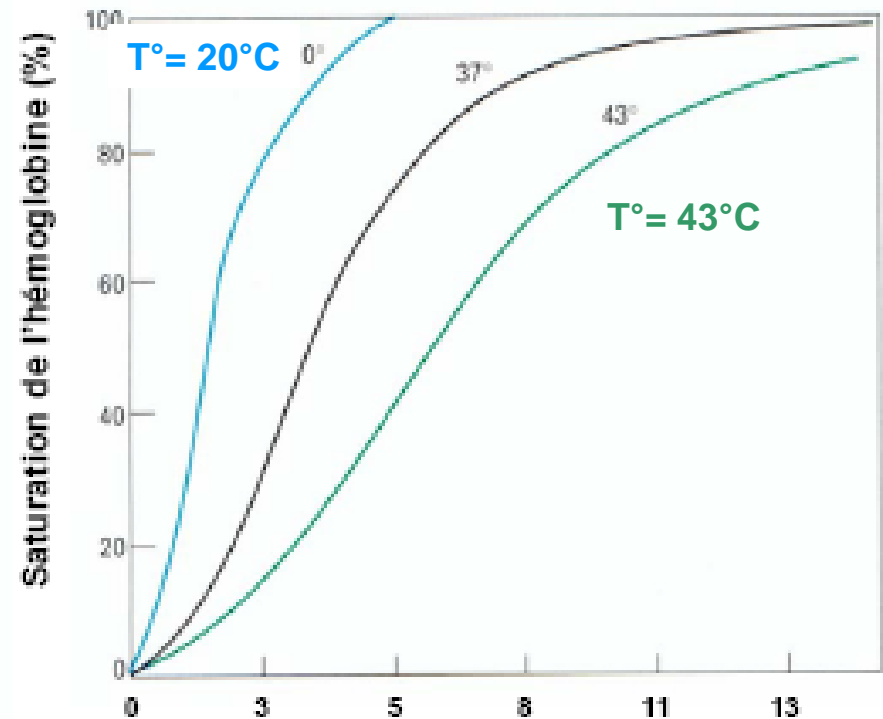
- Effet Bohr : 
  - Si PCO<sub>2</sub> ↑ (→ ↓ pH) :
    - ↓ de l'affinité de l'Hb
    - libération d'O<sub>2</sub> au niveau tissulaire
  - Si PCO<sub>2</sub> ↓ (→ ↑ pH) :
    - ↑ de l'affinité de l'Hb
    - fixation de l'O<sub>2</sub> au niveau pulmonaire

# AFFINITE DE L'Hb POUR L'O<sub>2</sub>

- Modifiée par :
  - le pH sanguin



- la température



Pression partielle en oxygène (kPa)

# PLAN

- Diffusion alvéolo-capillaire
  - Membrane alvéolo-capillaire
  - Principes physiques
  - Diffusion de l'O<sub>2</sub>
  - Diffusion du CO<sub>2</sub>
  - Exploration
- Transport des gaz :
  - Hémoglobine
  - Transport sanguin de l'O<sub>2</sub>
  - Saturation de l'Hb en O<sub>2</sub> et quantité d'O<sub>2</sub> combinée
  - Affinité de l'Hb pour l' O<sub>2</sub>
  - Transport sanguin du CO<sub>2</sub>
- Interactions O<sub>2</sub> / CO<sub>2</sub>



# TRANSPORT SANGUIN DU CO<sub>2</sub>

Le CO<sub>2</sub> est transporté sous 3 formes :

1. Sous forme dissoute = 10%
  - Plasma
  - Hématies
2. Sous forme liée à l'Hb (Hb carbaminée) = 20%
3. Sous forme combinée (Bicarbonates) = 70 %
  - Plasma
  - Hématies



O<sub>2</sub> combiné = lié à l'Hb  
≠ CO<sub>2</sub> combiné = bicarbonates (HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>)

# TRANSPORT SANGUIN DU CO<sub>2</sub>

## 1. CO<sub>2</sub> dissous : 10 %

- Plasma, cytoplasme érythrocytaire
- Faible fraction du CO<sub>2</sub> total
- Mais passage obligé

## 2. CO<sub>2</sub> lié à l'Hb : 20%

- Hb carbaminée
- Site de fixation sur l'hémoglobine ≠ de celui de l'O<sub>2</sub> :  
fonction NH<sub>2</sub> terminale des chaînes protéiques :  
$$\text{Hb-NH}_2 + \text{CO}_2 \leftrightarrow \text{Hb-NH-COOH}$$

# TRANSPORT SANGUIN DU CO<sub>2</sub>

## 3. CO<sub>2</sub> combiné (bicarbonates) : 70%

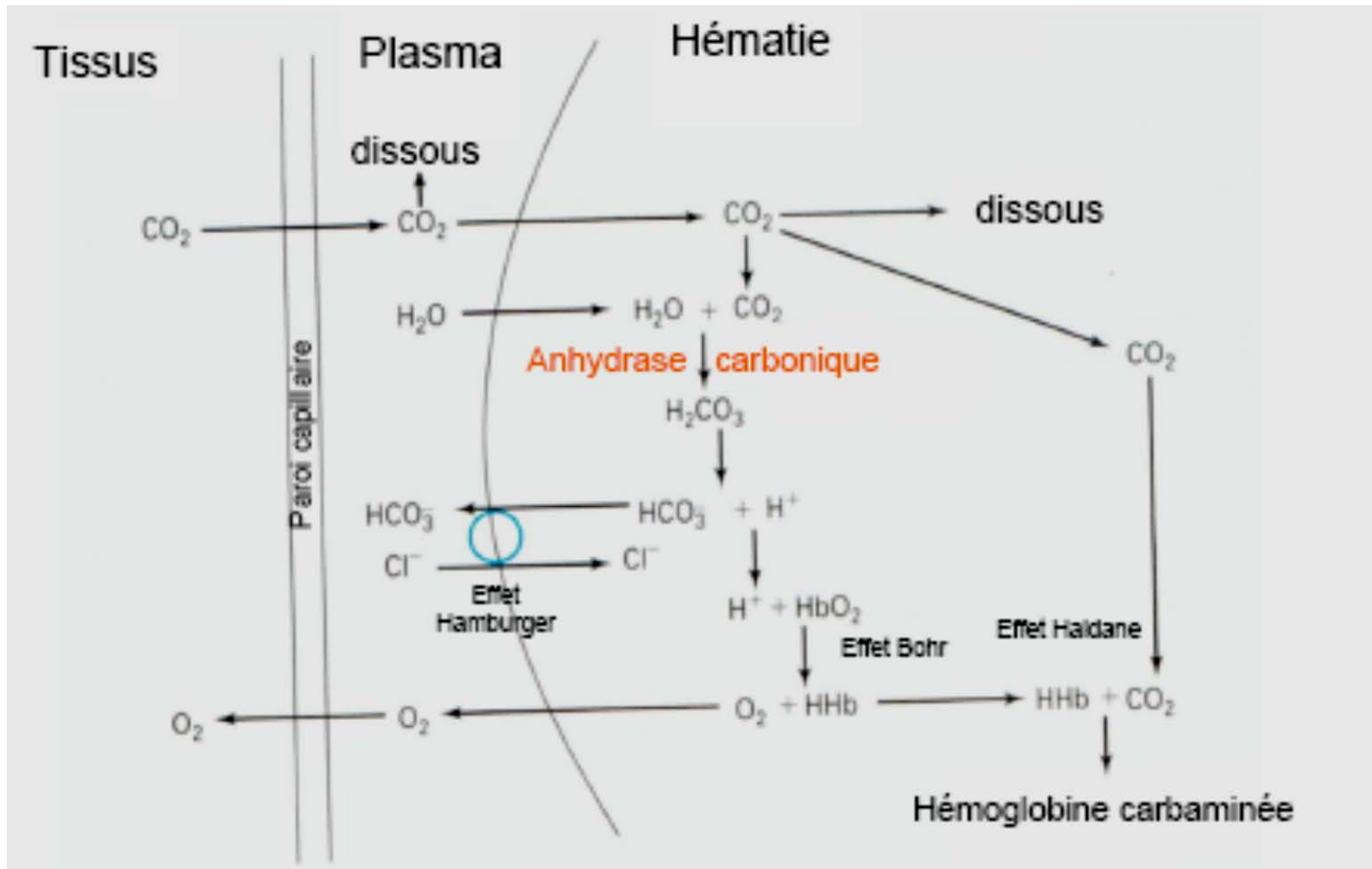
### – plasmatique

- HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> provenant des hématies (+++ , effet Hamburger)
- $\text{H}_2\text{O} + \text{CO}_2 \leftrightarrow \text{H}_2\text{CO}_3 \leftrightarrow \text{HCO}_3^- + \text{H}^+$
- réaction lente car pas d'anhydrase carbonique plasmatique

### – CO<sub>2</sub> combiné intra-érythrocytaire +++

- $\text{H}_2\text{O} + \text{CO}_2 \leftrightarrow \text{H}_2\text{CO}_3 \leftrightarrow \text{HCO}_3^- + \text{H}^+$
- réaction rapide par l'anhydrase carbonique intra-érythrocytaire

# TRANSPORT SANGUIN DU CO<sub>2</sub>



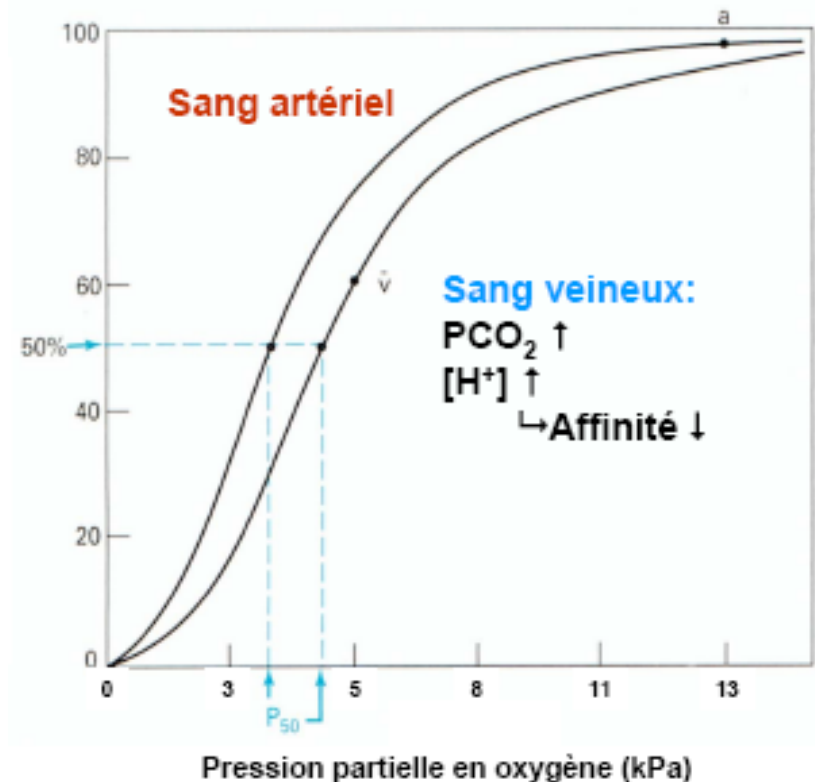
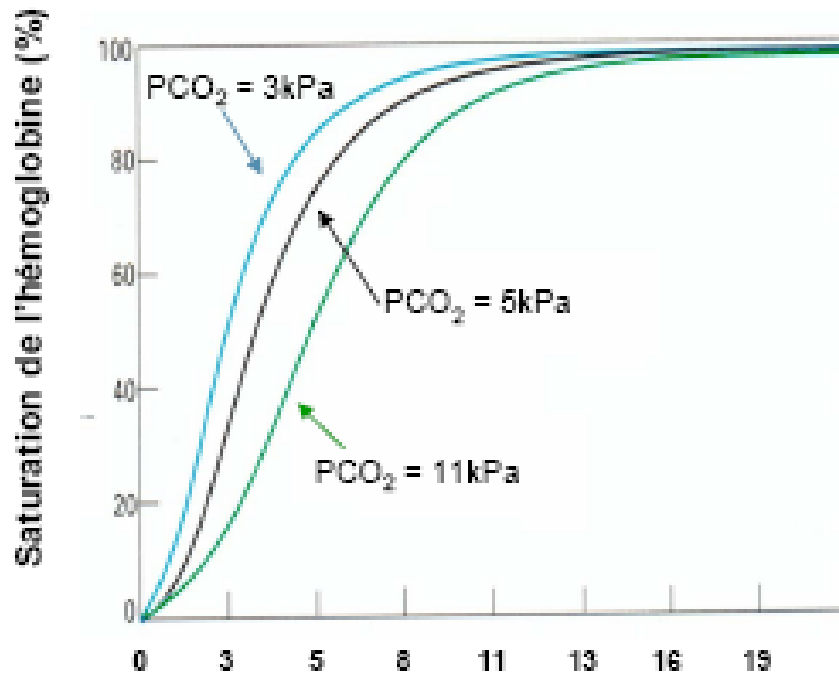
# PLAN

- Diffusion alvéolo-capillaire
  - Membrane alvéolo-capillaire
  - Principes physiques
  - Diffusion de l'O<sub>2</sub>
  - Diffusion du CO<sub>2</sub>
  - Exploration
- Transport des gaz :
  - Hémoglobine
  - Transport sanguin de l'O<sub>2</sub>
  - Saturation de l'Hb en O<sub>2</sub> et quantité d'O<sub>2</sub> combinée
  - Affinité de l'Hb pour l' O<sub>2</sub>
  - Transport sanguin du CO<sub>2</sub>
- Interactions O<sub>2</sub> / CO<sub>2</sub>

# INTERACTIONS O<sub>2</sub> / CO<sub>2</sub>

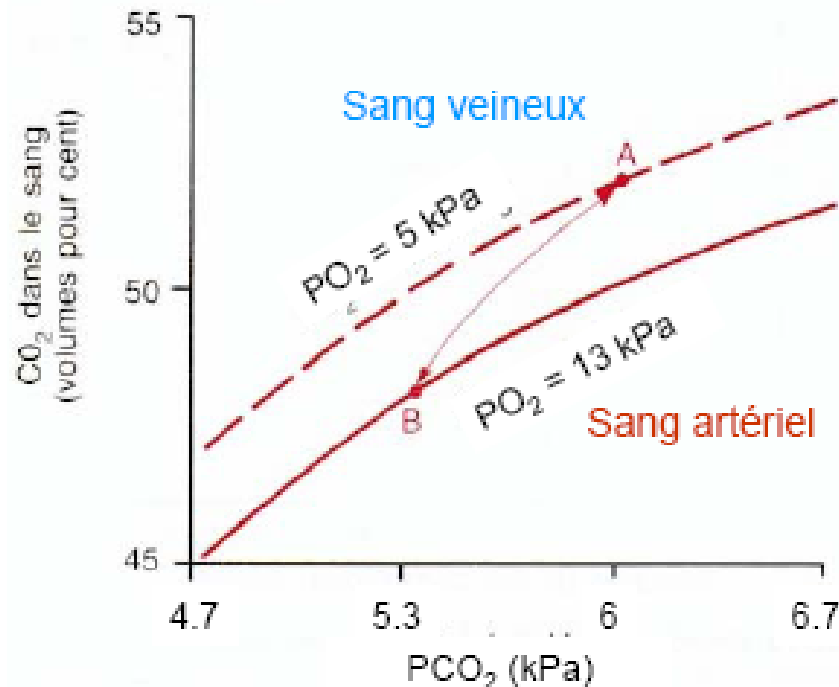


- Effet Bohr :
  - La PCO<sub>2</sub> modifie l'affinité de l'Hb pour l'O<sub>2</sub>
  - Pour une même PO<sub>2</sub>, l'affinité de l'Hb pour l'O<sub>2</sub> est plus importante si la PCO<sub>2</sub> est basse



# INTERACTIONS O<sub>2</sub> / CO<sub>2</sub>

- Effet Haldane (< effet Bohr) :
  - La PO<sub>2</sub> influence l'affinité de l'Hb pour le CO<sub>2</sub>
  - Pour une même PCO<sub>2</sub>, l'affinité de l'Hb pour le CO<sub>2</sub> est plus importante si PO<sub>2</sub> basse



# CONCLUSION



- Diffusion alvéolo-capillaire : loi de Fick
- Structure de l'Hb et fixation de l'O<sub>2</sub>
- Courbe de Barcroft
- Facteurs influençant la liaison O<sub>2</sub>-Hb
- Transport plasmatique du CO<sub>2</sub>  
(anhydrase carbonique)
- Effet Bohr