

*UE 3-2 - Physiologie – Physiologie Respiratoire*

# Chapitre 7 : Transport des gaz dans le sang

Pr. Sam Bayat

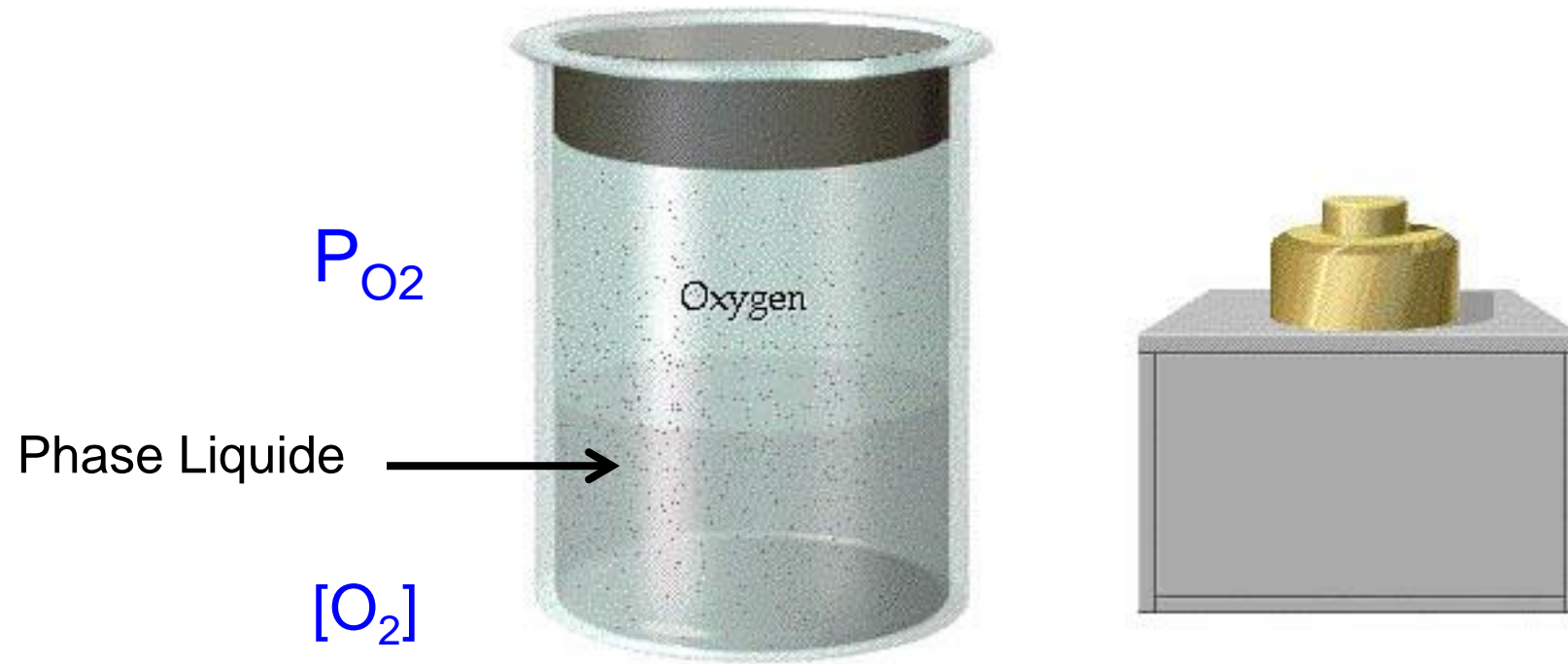
# Plan

- Transport de l'O<sub>2</sub> dans le sang
  - Oxygène dissous
  - Oxygène combiné à l'hémoglobine
    - Structure et propriétés de l'hémoglobine
    - Courbe de dissociation de l'Oxyhémoglobine
- Transport du CO<sub>2</sub>
  - CO<sub>2</sub> dissous
  - Transport de CO<sub>2</sub> à l'état de bicarbonates
  - Transport de CO<sub>2</sub> sous forme de composés carbaminés
  - Courbe de dissociation du CO<sub>2</sub>
  - Relation entre transport de CO<sub>2</sub> et équilibre acido-basique
- Échanges gazeux sang-tissus

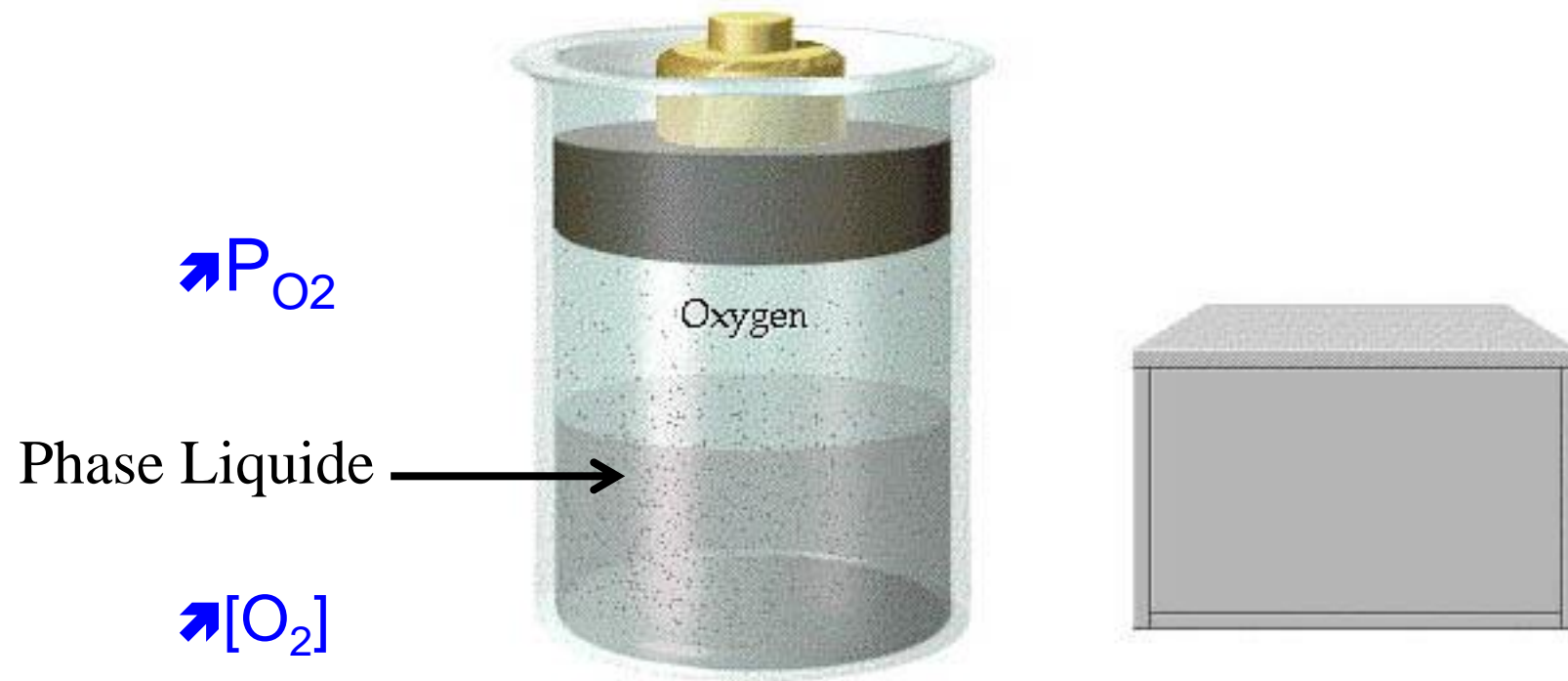
# Transport de l'oxygène

- L'oxygène est transporté:
  - dans le **plasma**
    - sous forme **dissoute**
  - dans les **hématies**
    - sous forme **dissoute**
    - sous forme **combinée à l'hémoglobine (Hb)**

# Loi de Henry



# Loi de Henry



# Loi de Henry

$$[C]_x = \alpha \cdot P_x$$

- Où:  $\alpha$  = coefficient de solubilité (Solubility Coefficient, Bunsen Coefficient)
- La concentration d'un gaz (ex.: O<sub>2</sub>) peut être mesuré dans un liquide (ex: plasma) et exprimé en pression partielle (P<sub>x</sub>)

# Solubilité des gaz

- Le coefficient de solubilité  $\alpha$  :
  - Exprimé en ml gaz/ ml solvant / mmHg (ou kPa)
  - Dépend du gaz
  - Dépend du solvant
  - Dépend de la température ( $\uparrow t^\circ \Rightarrow \downarrow \alpha$ )

$\alpha$ (ml gaz/ml sang/mmHg)		
CO <sub>2</sub>	7.50E-04	
O <sub>2</sub>	3.16E-05	
CO	2.42E-05	
N <sub>2</sub>	1.58E-05	
He	1.05E-05	

# Transport de l'oxygène

- Oxygène dissous

- $\alpha_{O_2} = 0,003 \text{ ml d'O}_2 / 100 \text{ ml de sang} / \text{mmHg de PO}_2$

- Dans le sang artériel:  $\text{PaO}_2 = 100 \text{ mmHg} = 13,3 \text{ kPa}$  :

- **Contenu** en  $\text{O}_2$  dissous =  $0,3 \text{ ml d'O}_2 / 100 \text{ ml de sang artériel}$

- Si débit cardiaque =  $5 \text{ l/min}$ , apport de  $15 \text{ ml d'O}_2/\text{min}$

- Besoins  $\approx 250 \text{ ml d'O}_2/\text{min}$

- **Insuffisant** pour oxygéner les tissus correctement



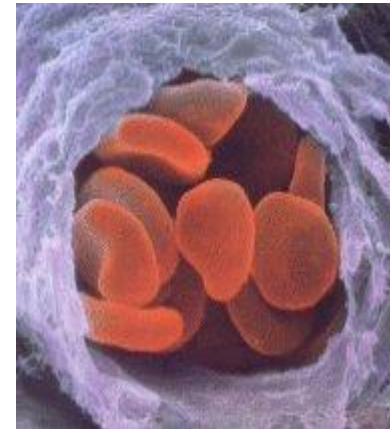


# Plan

- Transport de l'oxygène dans le sang
  - Oxygène dissous
  - Oxygène combiné à l'hémoglobine
    - Structure et propriétés de l'hémoglobine
    - Courbe de dissociation de l'Oxyhémoglobine

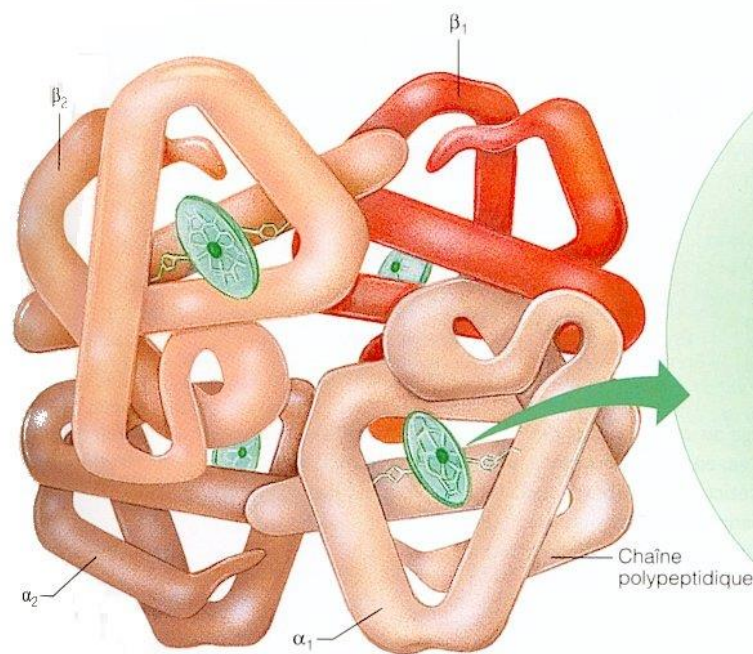
# Oxygène combiné à l'hémoglobine

- Structure et propriétés de l'hémoglobine
  - L'hémoglobine (Hb) est une protéine présente exclusivement dans les hématies
  - Se lie de façon réversible à l'O<sub>2</sub>
  - Concentration dans le sang =
    - 13 à 17 g/dl chez l'homme adulte
    - 12 à 16 g/dl chez la femme adulte

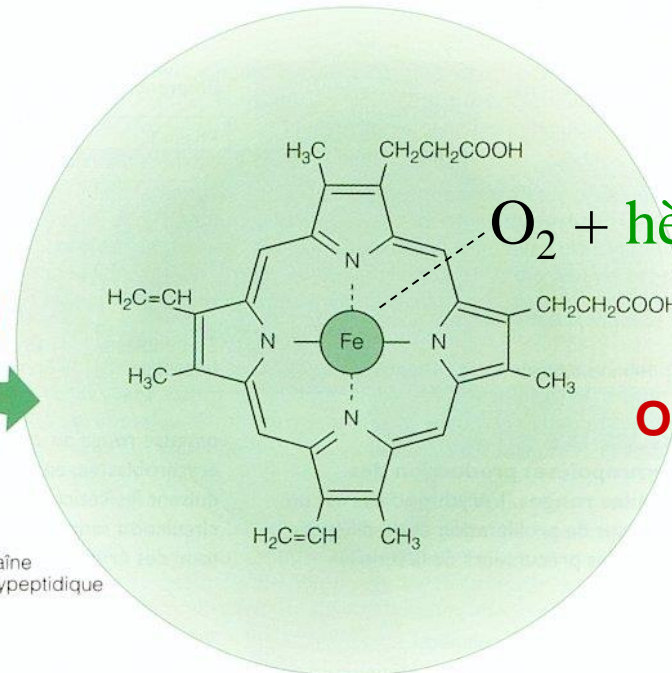


# Structure et propriétés de l'hémoglobine

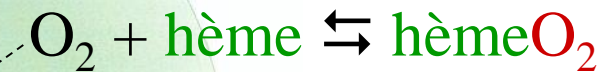
- 4 chaînes polypeptidiques ( $\alpha_1$ ,  $\alpha_2$ ,  $\beta_1$ ,  $\beta_2$ ) = **globine**
- 4 groupements **hèmes**:
  - Chaque hème comporte un atome de fer : **Fe<sup>2+</sup>**
  - Chaque **Fe<sup>2+</sup>** peut se lier de façon réversible avec une molécule d'O<sub>2</sub>



(a) Hémoglobine



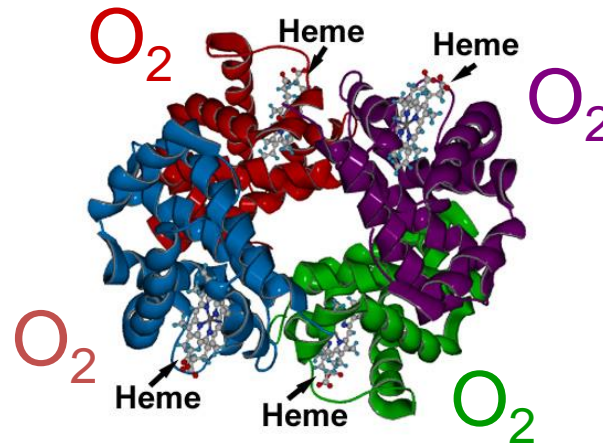
(b) Molécule d'hème contenant du fer



**Oxyhémoglobine**

# Structure et propriétés de l'hémoglobine

- Propriétés allostériques de l'Hb
  - La désoxy Hb a une affinité faible pour l'O<sub>2</sub>
  - La fixation d'une première molécule d'O<sub>2</sub> change la configuration de la molécule d'Hb et facilite la fixation de la seconde molécule d'O<sub>2</sub>
  - Donc l'affinité de l'Hb pour l'O<sub>2</sub> varie selon le degré de saturation de la molécule
- De ce fait, la relation entre la saturation de l'Hb et la PO<sub>2</sub> du sang n'est pas linéaire



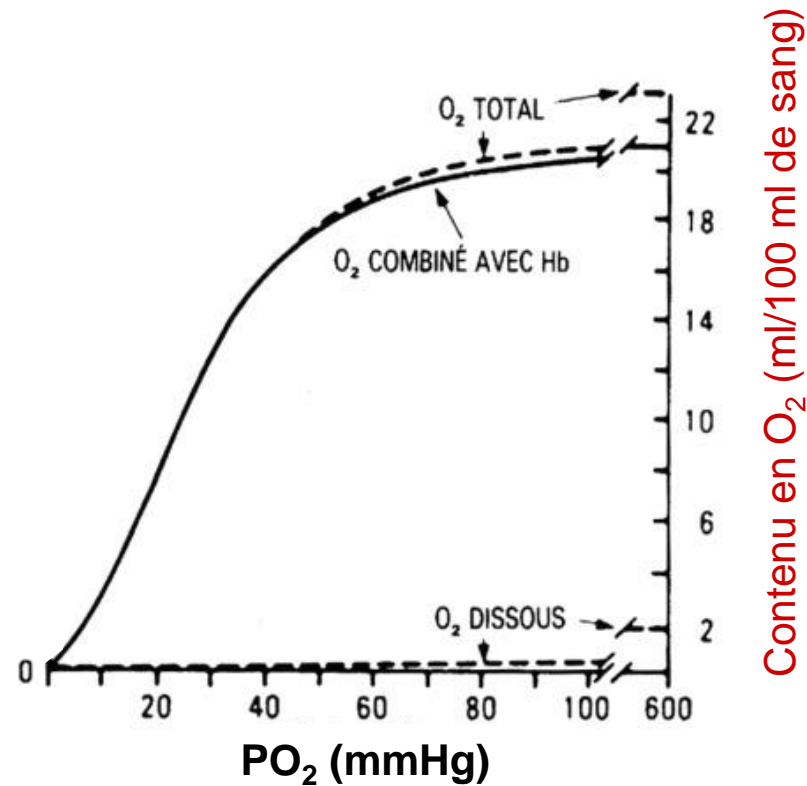
# Structure et propriétés de l'hémoglobine

- Il existe différents types d'hémoglobine **normale**
  - L'hémoglobine adulte est de type A, ex: **HbA1**( $\alpha_2\beta_2$ )
  - Hb Foétale: **HbF** ( $\alpha_2\gamma_2$ ) remplacée au cours de la première année de vie par l'HbA
- Hémoglobines **anormales**:
  - Mutation dans une chaîne polypeptidique:
    - ex: HbS «sickle = faucille» : la **drépanocytose**
    - Affinité diminuée pour l'O<sub>2</sub>
    - Faiblement soluble et précipité à l'intérieur du GR



# La courbe de dissociation de l'oxyhémoglobine

- **Contenu** du sang en  $O_2$  ( $CaO_2$ ,  $Cv_2$ ) = [ $O_2$  dissous +  $O_2$  combiné à l'Hb]



# La courbe de dissociation de l'oxyhémoglobine

- La Capacité de transport en  $O_2$ 
  - 1g d'Hb fixe au maximum 1,39 ml d' $O_2$  = Pouvoir oxyphorique de l'Hb
  - Pour une  $[Hb] = 15$  g/dl:  $15 \times 1,39 = 20,8$  ml d'  $O_2$  / 100 ml
  - La quantité maximum d' $O_2$  pouvant se lier à l'Hb = la Capacité en  $O_2$
  - Capacité *effective* en  $O_2$  =  $1,39 \times ([Hb]_{\text{totale}} - [Hb]_{\text{non fonctionnelle}})$ 
    - $\sim 1.34 \times [Hb]_{\text{totale}}$

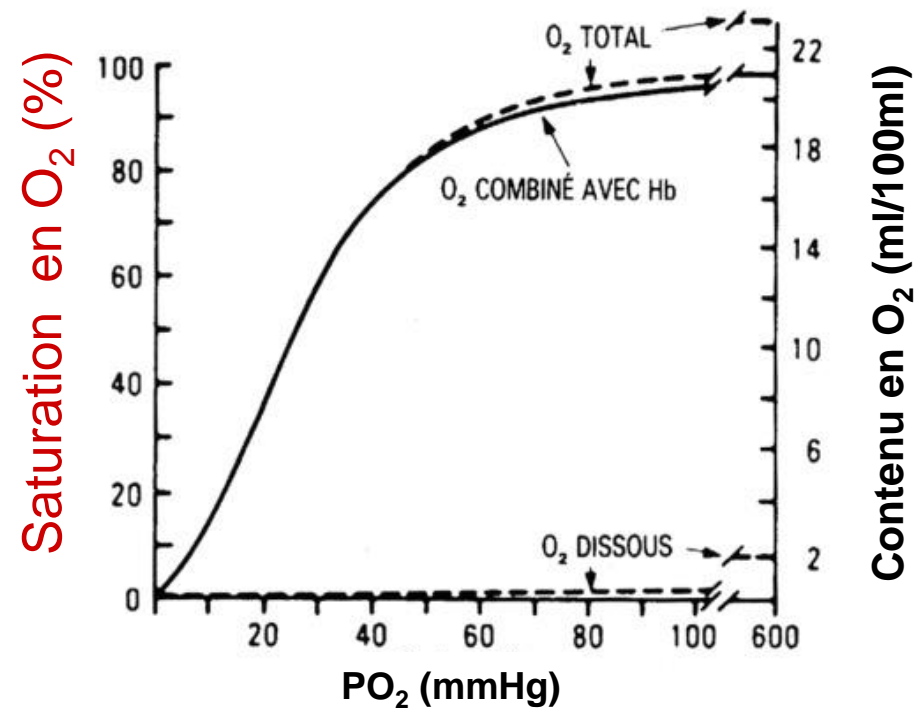


MéthHb  
HbCO

# La courbe de dissociation de l'oxyhémoglobine

- La saturation en O<sub>2</sub> de l'Hb

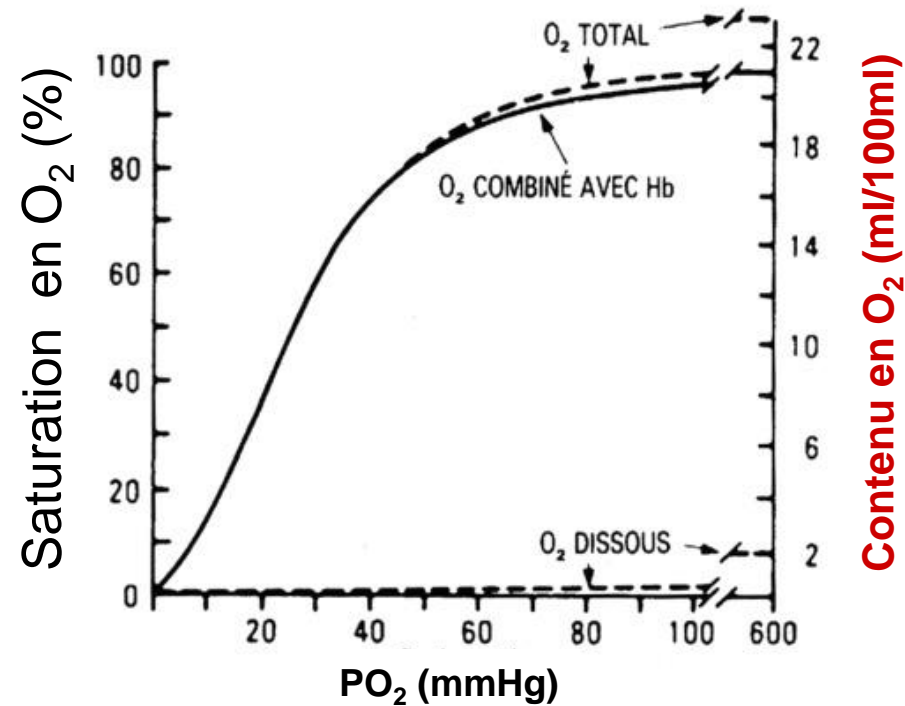
$$S_{O_2} = \frac{O_2 \text{ combiné avec l'Hb}}{\text{Capacité en } O_2} (\%)$$

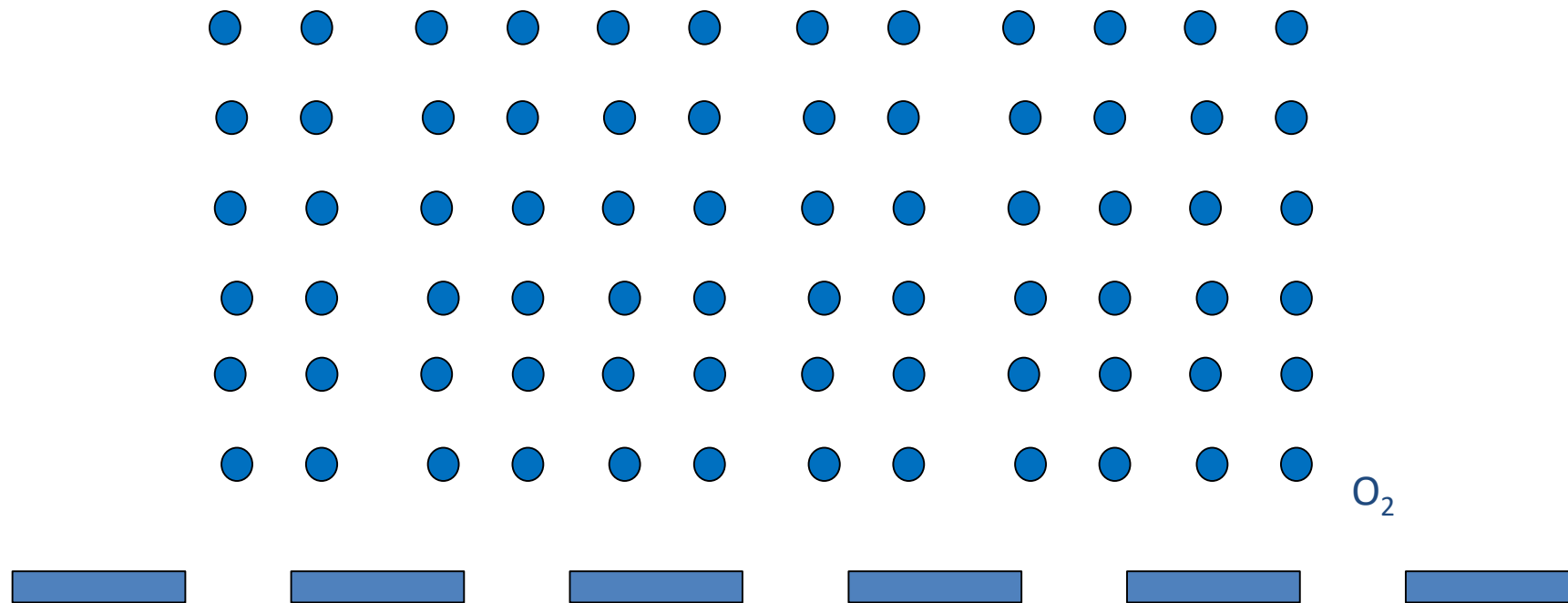




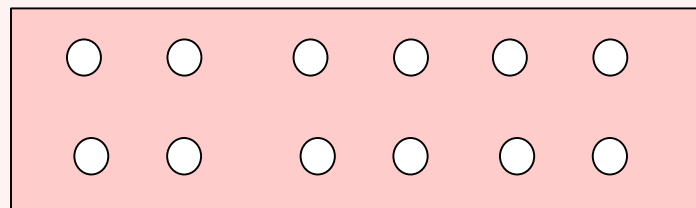
# La courbe de dissociation de l'oxyhémoglobine

- Le contenu en  $O_2$  = 
$$\underbrace{(1,39 \times [Hb] \times SO_2)}_{\text{lié à l'Hb}} + \underbrace{0,003 \times PO_2}_{\text{dissous}}$$

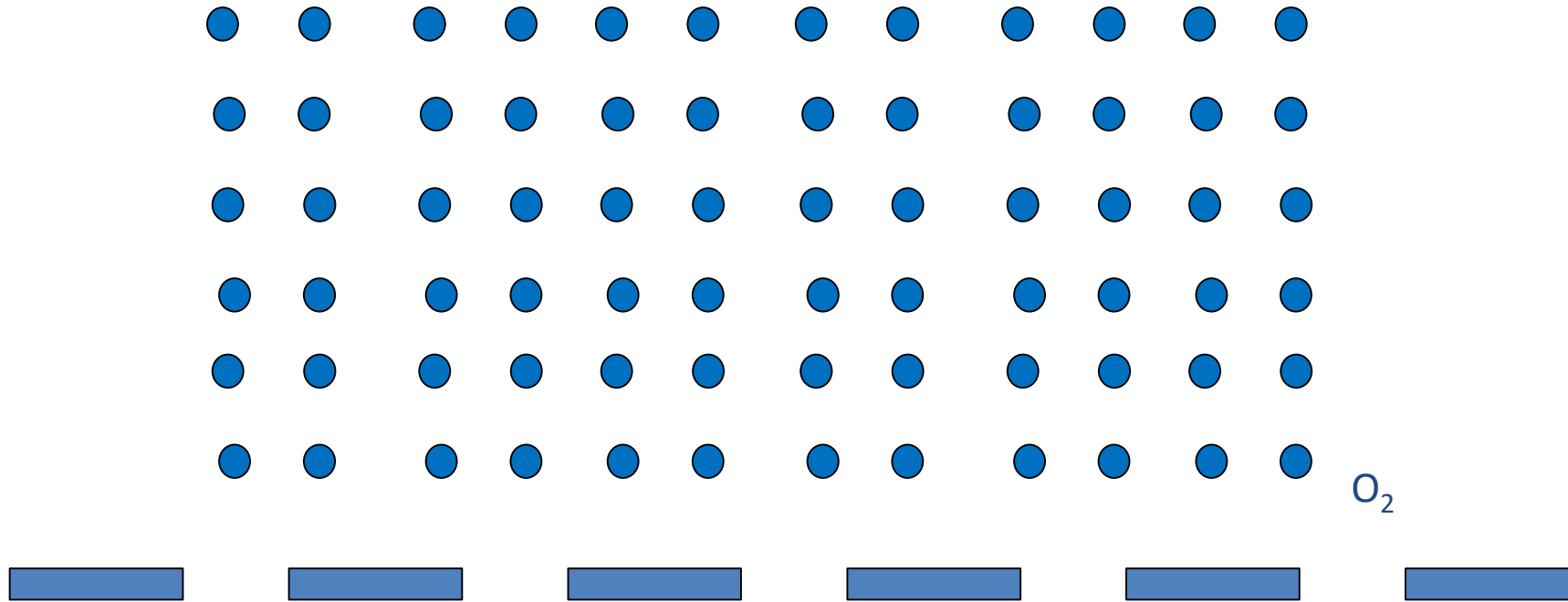




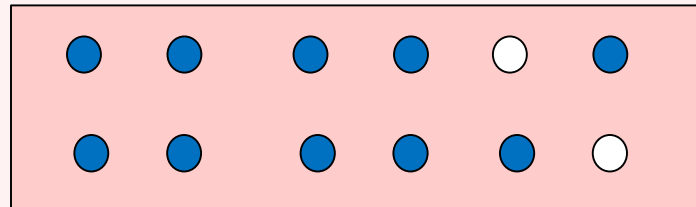
Hb



Nombre de ○ = Capacité de transport



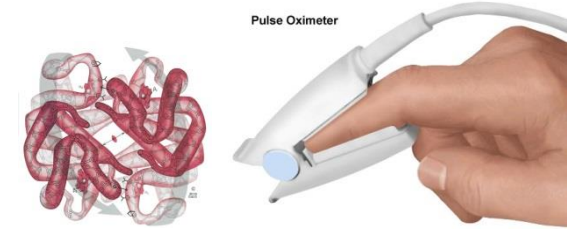
Hb



Nombre de ● / nombre de ○ = Taux de saturation

# La courbe de dissociation de l'oxyhémoglobine

- La saturation en  $O_2$  de l'Hb

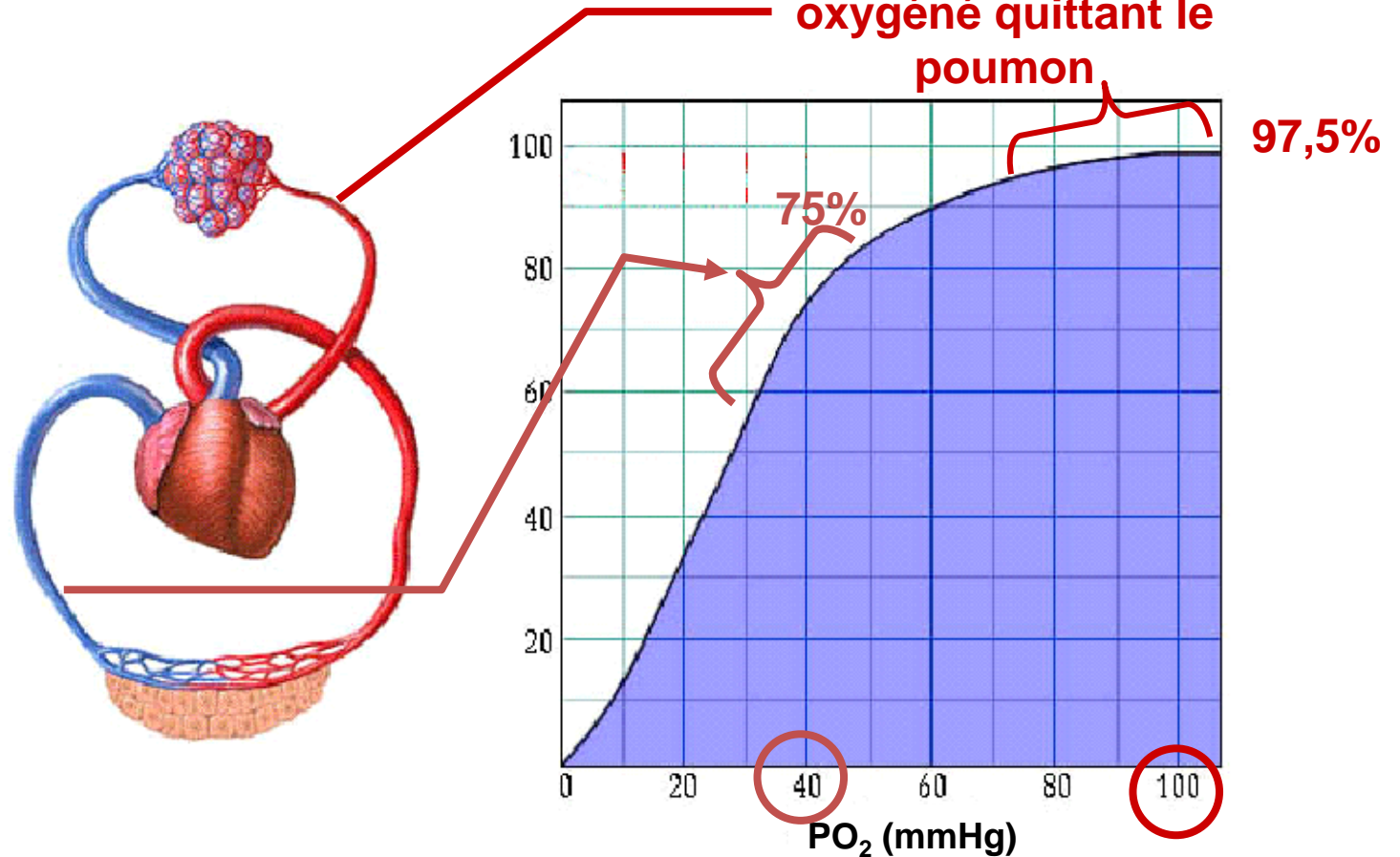
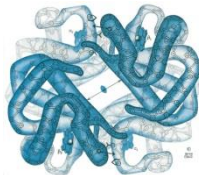


Sang artériel  
oxygéné quittant le  
poumon



Cyanose

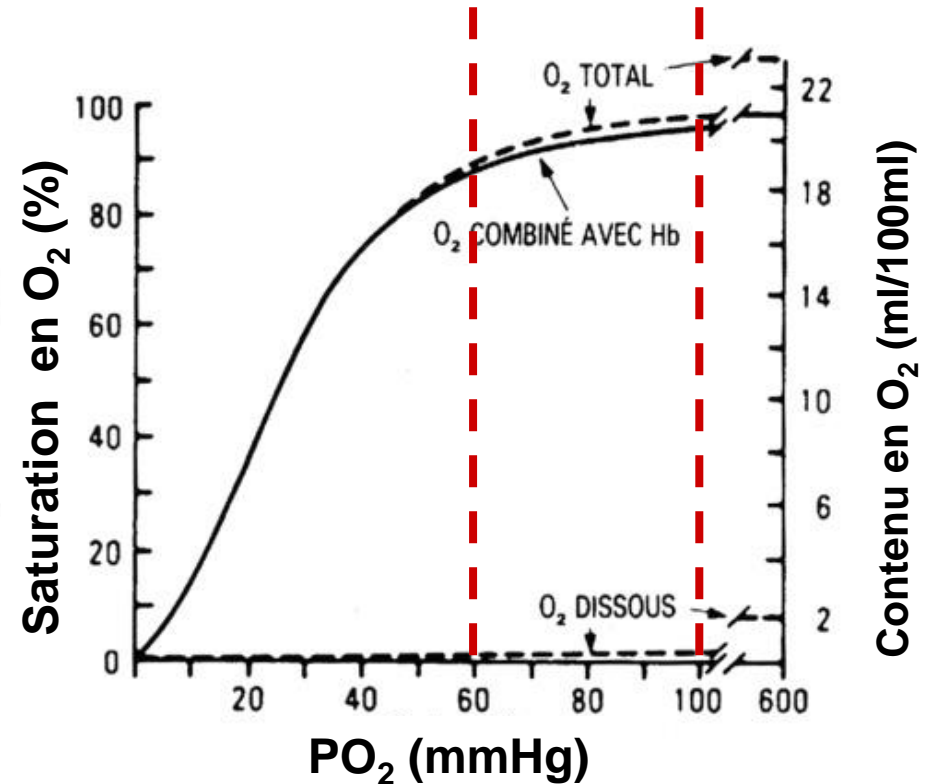
Sang veineux  
quittant les  
tissus



# La courbe de dissociation de l'oxyhémoglobine

- La forme de la courbe de dissociation

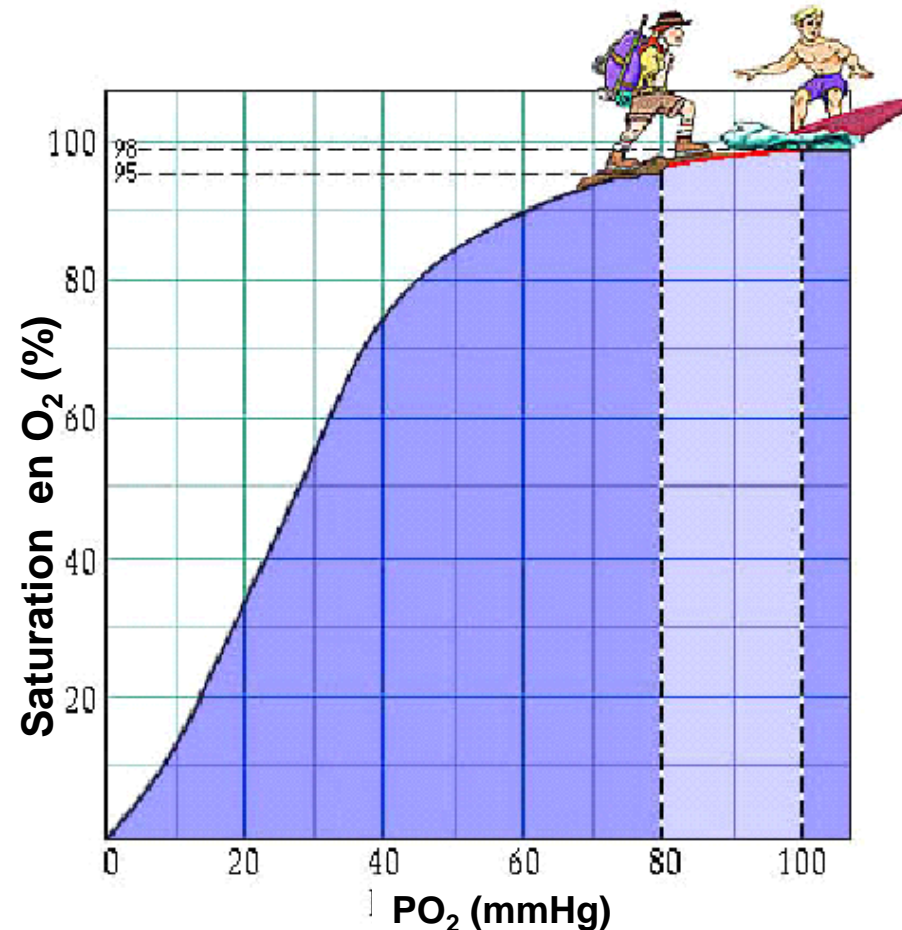
- $PO_2 > 100$  mmHg  
l'augmentation de  $PO_2$  n'affecte plus  $SO_2$ , toute l'Hb est saturée
- $60 > PO_2 > 100$  mmHg  
une diminution de  $PO_2$  diminue peu la quantité d' $O_2$  transportée
- $PO_2 < 60$  mmHg  
une diminution de  $PO_2$  diminue beaucoup la quantité d' $O_2$  transportée



# La courbe de dissociation de l'oxyhémoglobine

- La forme sigmoïde de la courbe de dissociation de l'Hb a des avantages physiologiques:

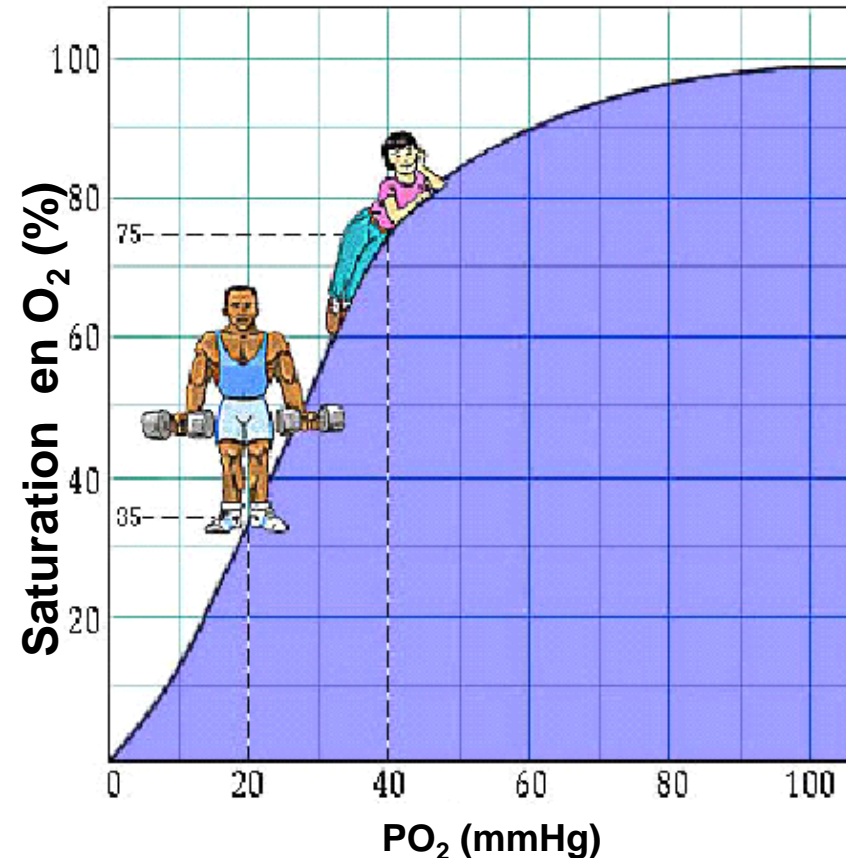
- Si la  $PO_2$  ambiante, et par conséquent la  $PO_2$  du sang artériel diminue de 20 mmHg, la  $SO_2$  ne diminuera que très peu
- Ceci traduit une plus grande affinité de l'Hb pour l' $O_2$ , pour des valeurs de  $PO_2$  correspondant au sang artériel



# La courbe de dissociation de l'oxyhémoglobine

- La forme sigmoïde de la courbe de dissociation de l'Hb a des avantages physiologiques:

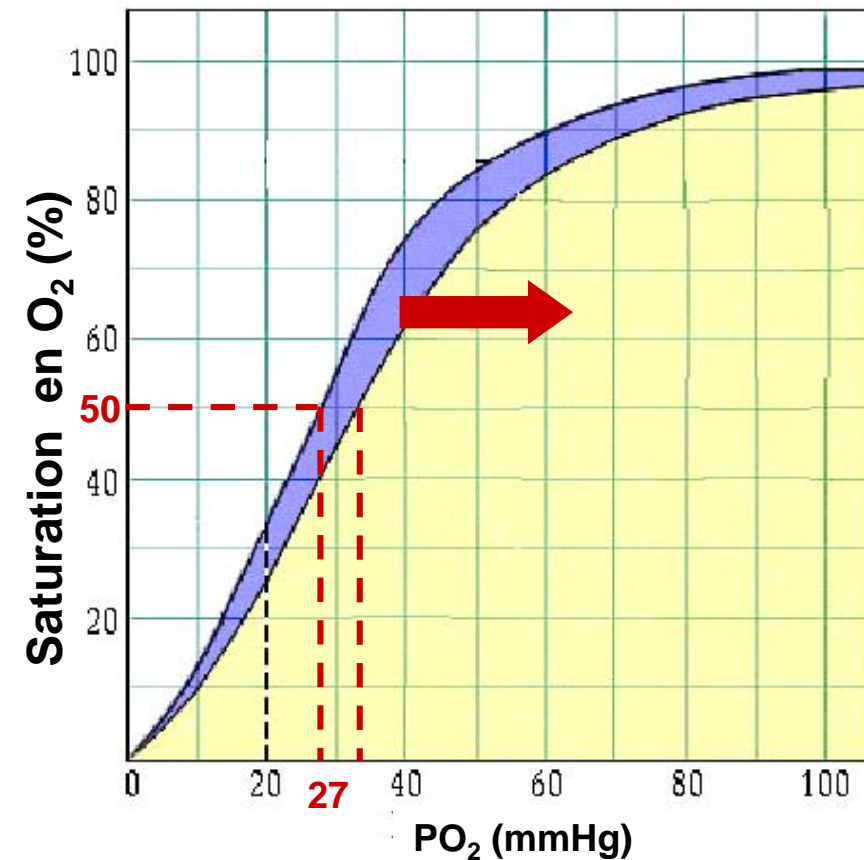
- Pour des valeurs de  $PO_2$  correspondant au sang veineux: de faibles baisses de  $PO_2$  entraînent de fortes chutes de  $SO_2$
- Ceci traduit une baisse de l'affinité de l'Hb pour l' $O_2$  pour des valeurs de  $PO_2$  correspondant au sang veineux
- Favorise la libération de l' $O_2$  dans les tissus



# La courbe de dissociation de l'oxyhémoglobine

- L'affinité de l'Hb pour l'O<sub>2</sub>

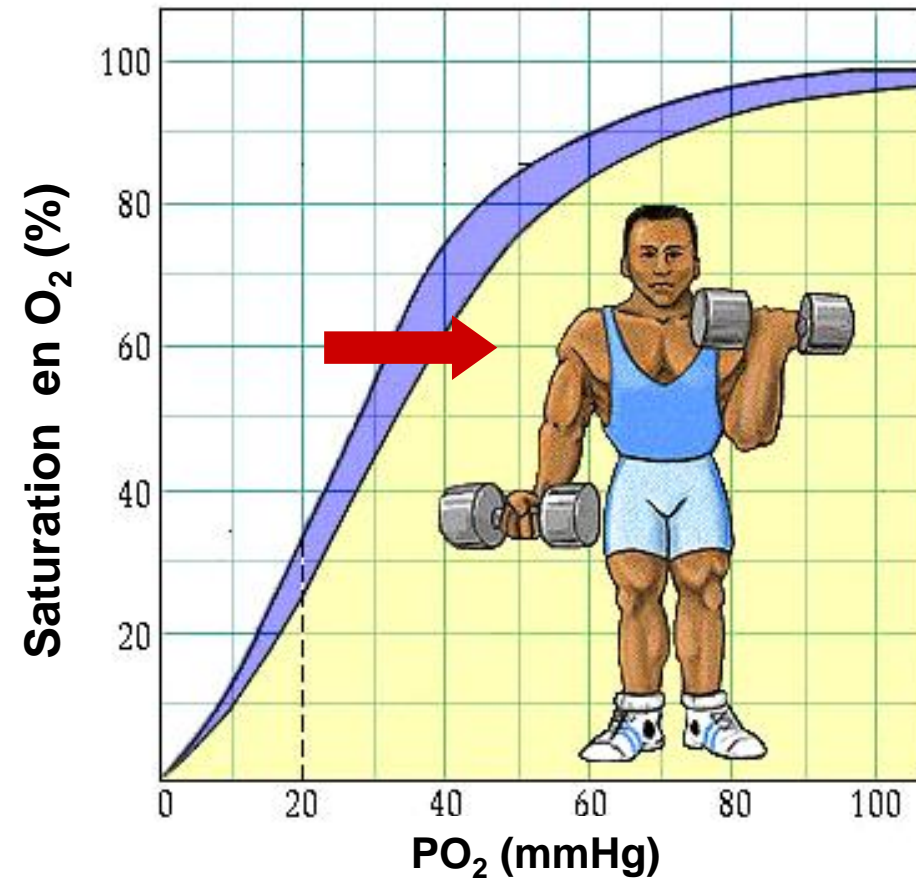
- $P_{50}$  = PO<sub>2</sub> nécessaire pour saturer l'Hb à 50%
- Une baisse de l'affinité de l'Hb pour l'O<sub>2</sub> :
  - $\uparrow P_{50}$
  - Déplacement de la courbe de dissociation vers la droite





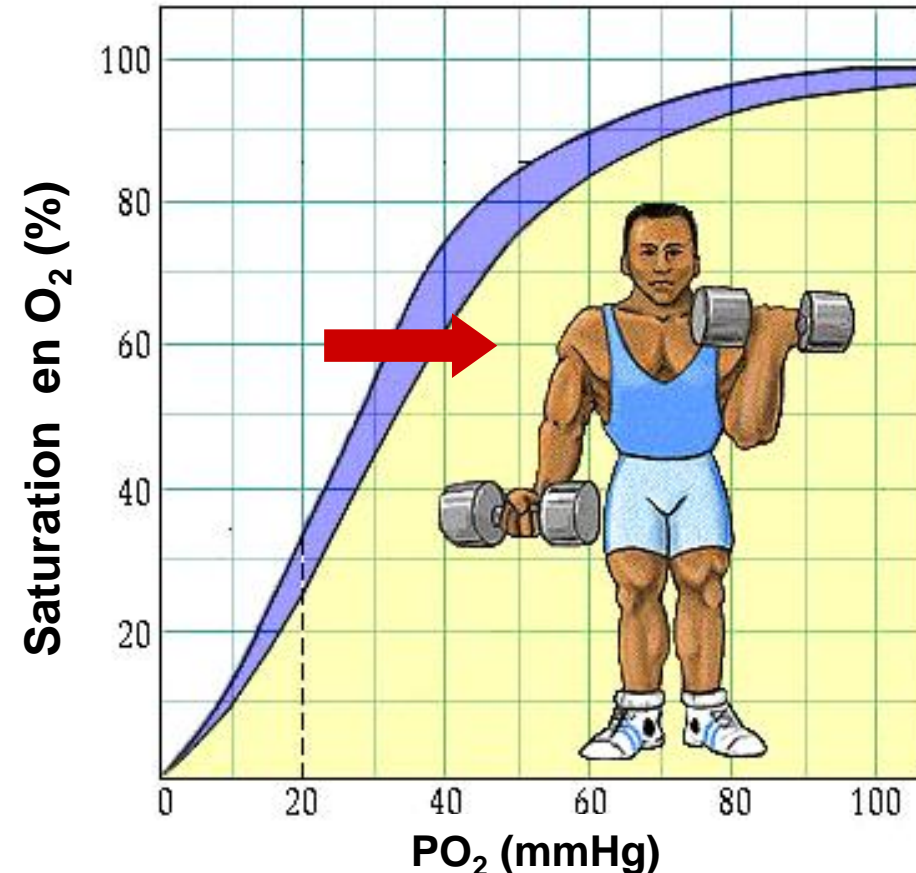
# La courbe de dissociation de l'oxyhémoglobine

- Baisse de l'affinité de l'Hb pour l'O<sub>2</sub>
- $\uparrow$  PCO<sub>2</sub>
- $\uparrow$  [H<sup>+</sup>] : *effet Bohr*
- $\uparrow$  température



# La courbe de dissociation de l'oxyhémoglobine

- Baisse de l'affinité de l'Hb pour l'O<sub>2</sub>
- ↑ 2,3 DPG
  - Produit par la glycolyse anaérobie dans les hématies
  - ↑ en hypoxie chronique



# La courbe de dissociation de l'oxyhémoglobine

- Relation entre  $PO_2$ ,  $SO_2$ , et le Contenu en  $O_2$  ( $C_{O_2}$ )
  - Le contenu en  $O_2$  dépend de  $[Hb]$ , et de la  $PO_2$
  - La saturation ne dépend pas de  $[Hb]$

**Polyglobulie:**

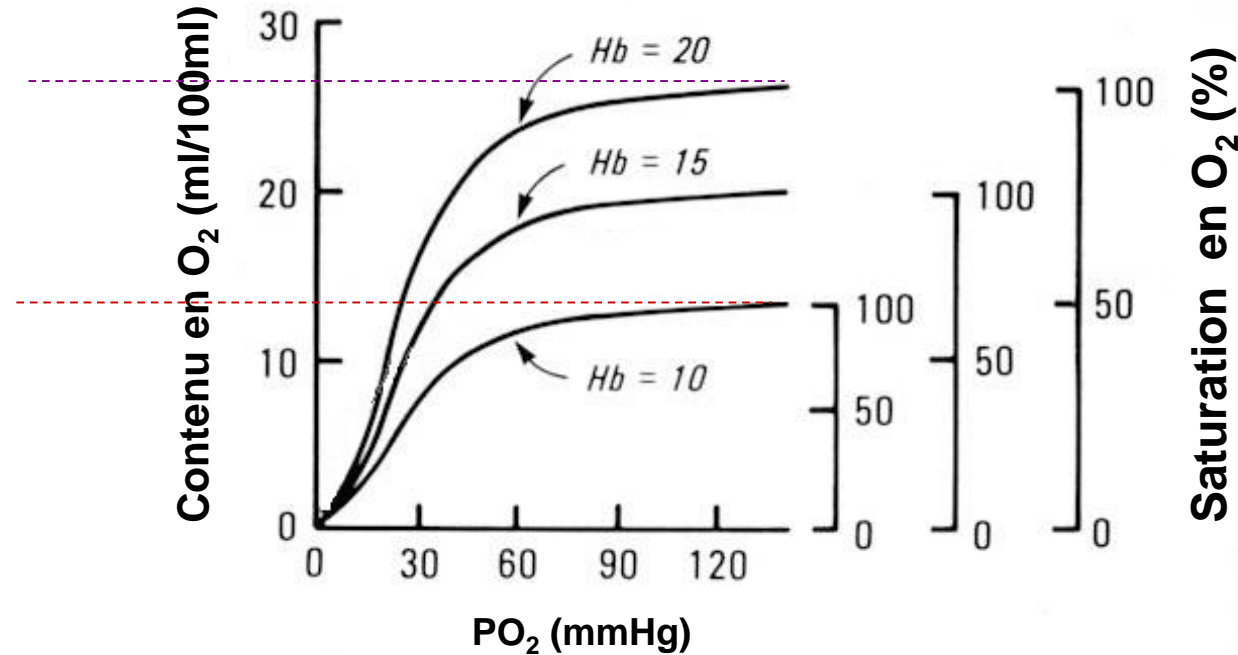
↑  $C_{O_2}$

27,4 ml/100ml

**Anémie:**

↓  $C_{O_2}$

13,8 ml/100ml

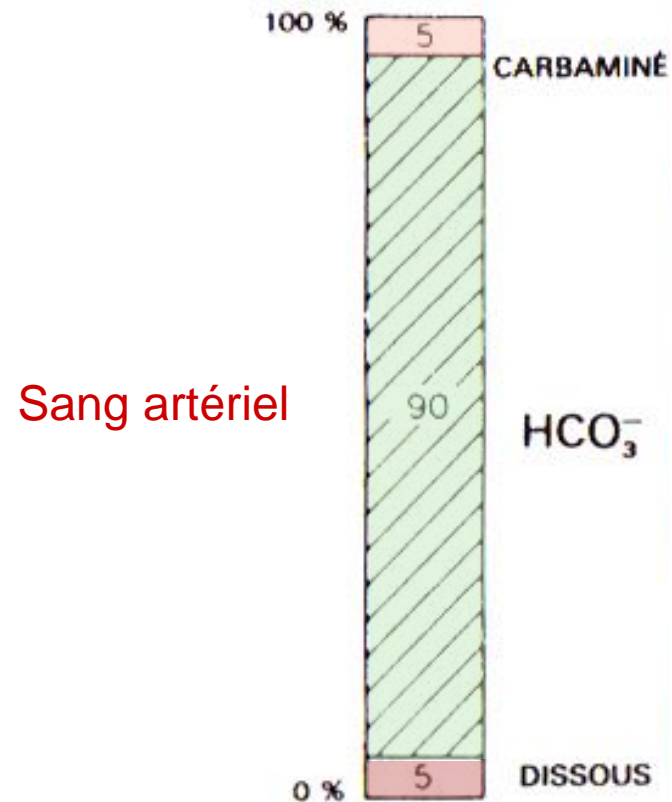


# Plan

- Transport de l' $\text{IO}_2$  dans le sang
  - Oxygène dissous
  - Oxygène combiné à l'hémoglobine
    - Structure et propriétés de l'hémoglobine
    - Courbe de dissociation de l'Oxyhémoglobine
- Transport du  $\text{CO}_2$ 
  - $\text{CO}_2$  dissous
  - Transport de  $\text{CO}_2$  à l'état de bicarbonates
  - Transport de  $\text{CO}_2$  sous forme de composés carbaminés
  - Courbe de dissociation du  $\text{CO}_2$
  - Relation entre transport de  $\text{CO}_2$  et équilibre acido-basique
- Échanges gazeux sang-tissus

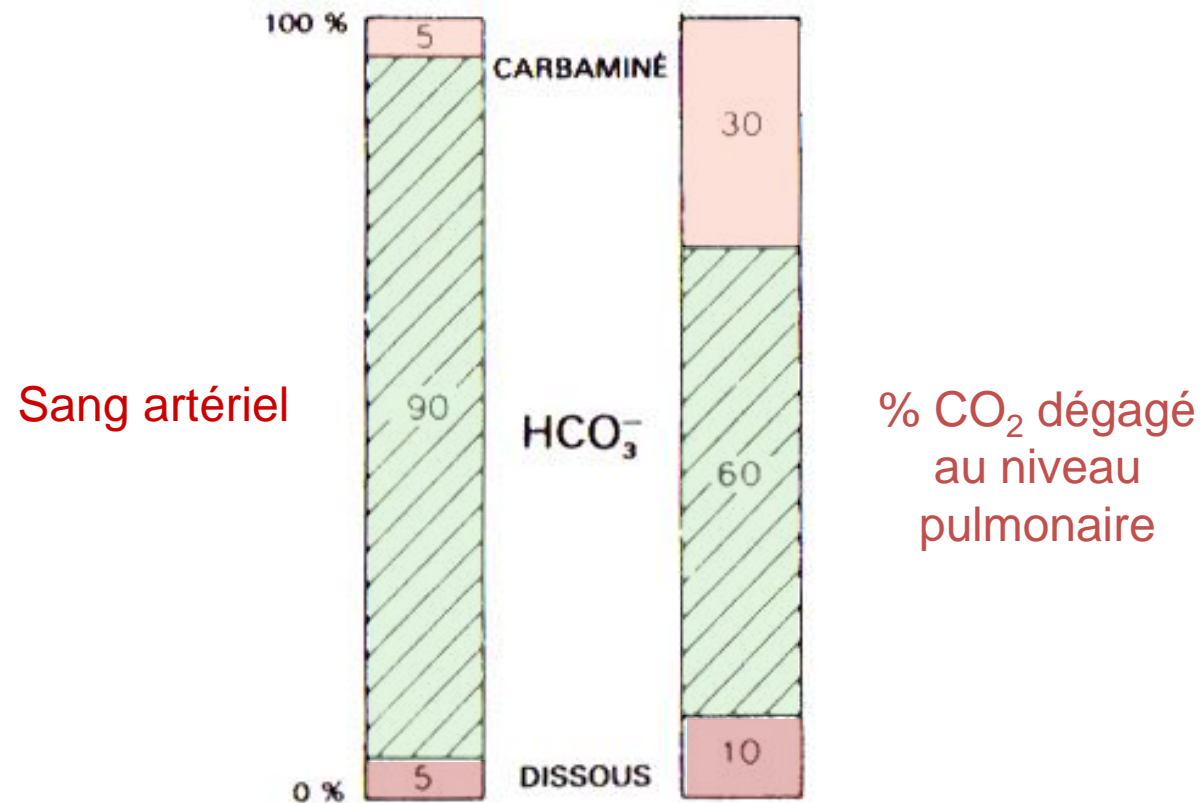
# Transport du CO<sub>2</sub>

- Le CO<sub>2</sub> est transporté dans le sang sous trois formes:
  - CO<sub>2</sub> dissous
  - À l'état de bicarbonates
  - Sous forme de composés carbaminés



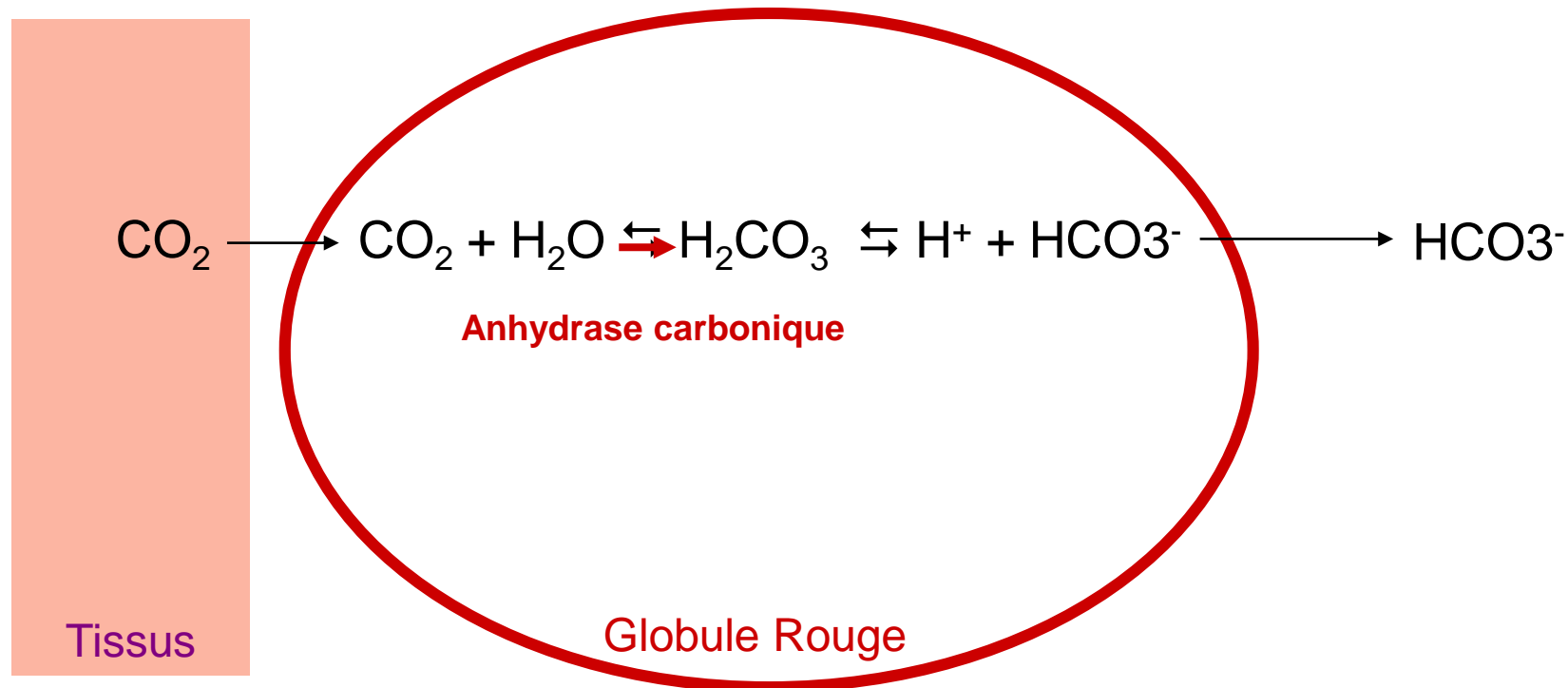
# CO<sub>2</sub> dissous

- À la fois dans le plasma et les globules rouges
- Le CO<sub>2</sub> est 20 fois plus soluble que l'O<sub>2</sub>



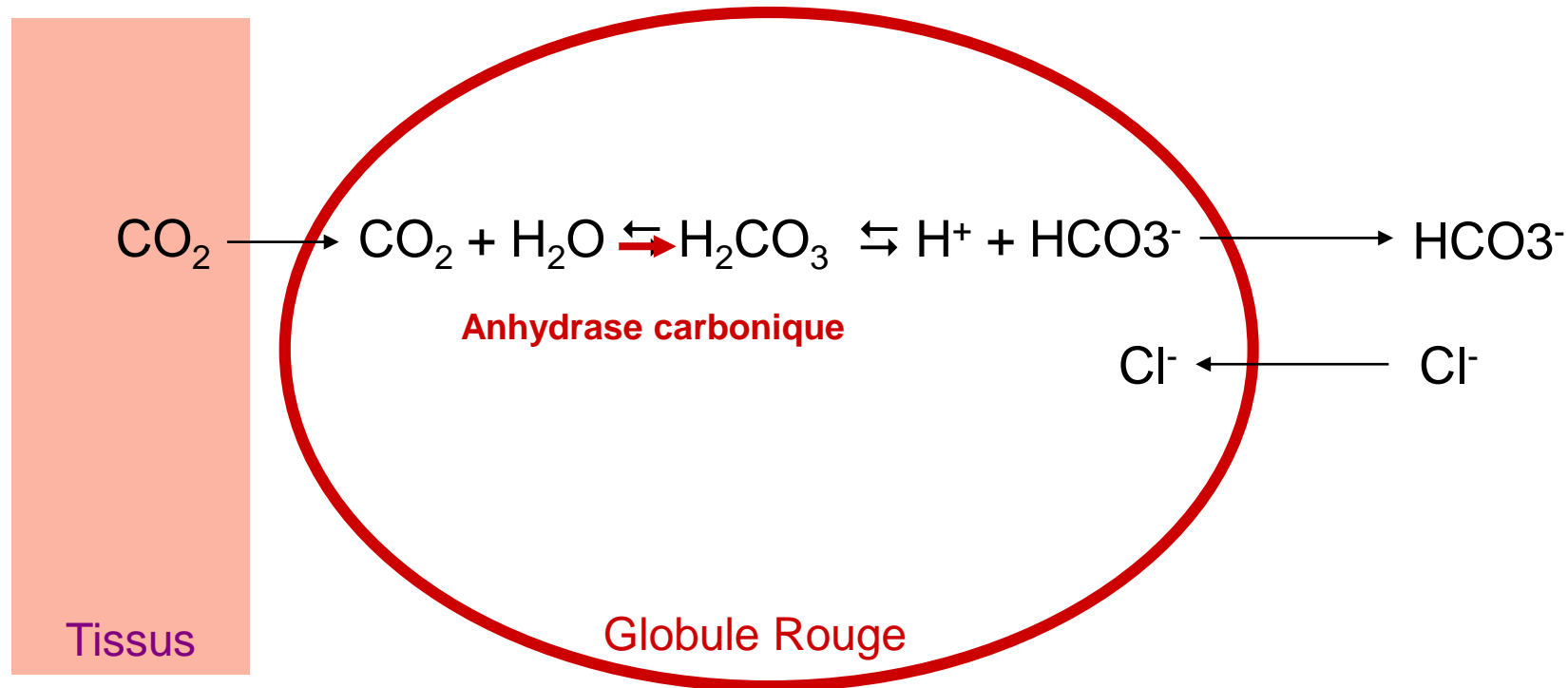
# CO<sub>2</sub> à l'état de bicarbonates

- Le CO<sub>2</sub> se combine avec l'H<sub>2</sub>O et forme l'acide carbonique:
- Cette réaction est lente dans le plasma mais rapide dans le GR: **anhydrase carbonique**
- 60 % du transport du CO<sub>2</sub>



# CO<sub>2</sub> à l'état de bicarbonates

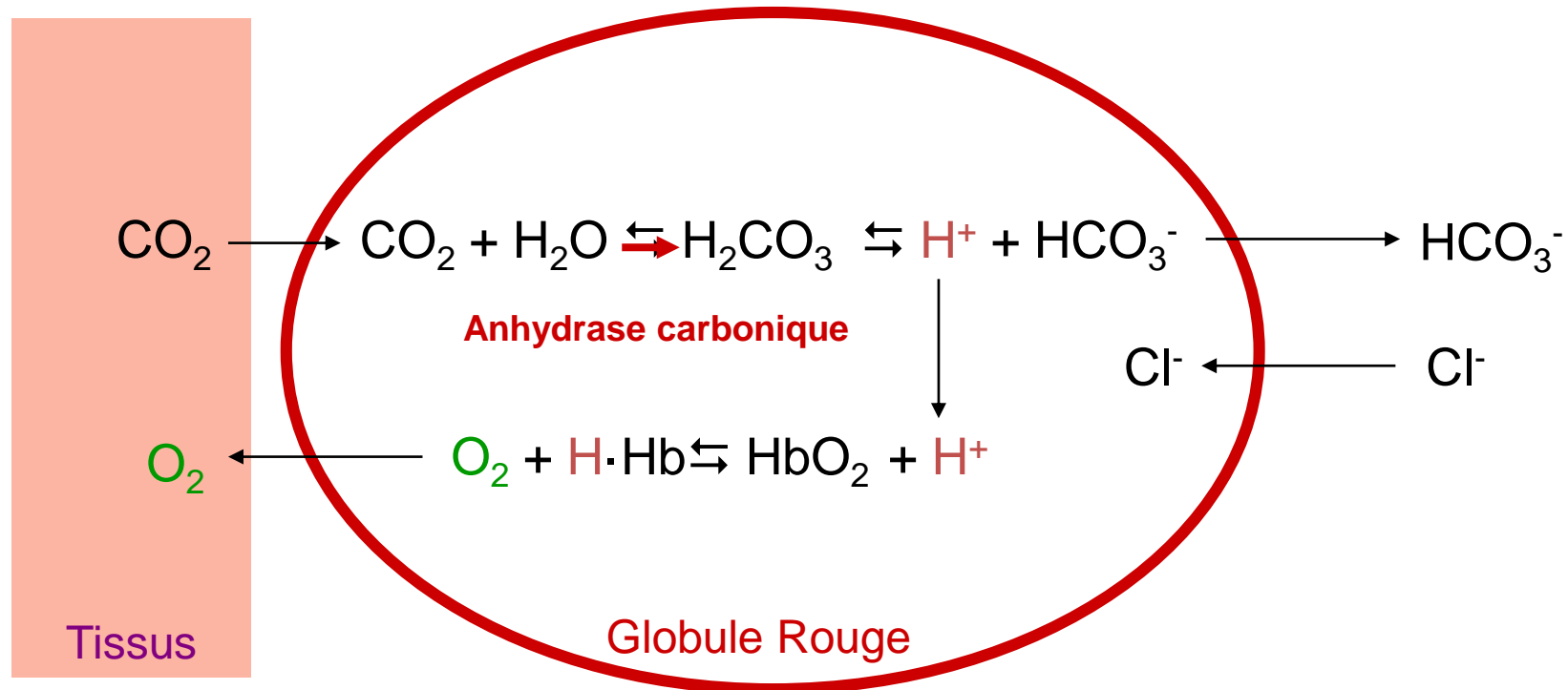
- L'ion H<sup>+</sup> est retenu par la membrane du GR
- Neutralité électrique: l'HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> est échangé contre un anion Cl<sup>-</sup>
- Ce phénomène est appelé *déplacement des chlorures* ou effet "Hamburger"





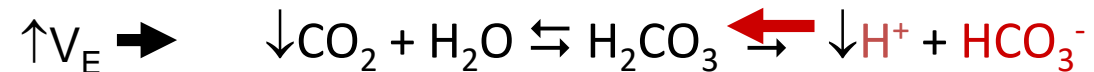
# CO<sub>2</sub> à l'état de bicarbonates

- Une partie de l'H<sup>+</sup> libéré se lie à l'Hb
- L'Hb réduite a une plus grande affinité pour l'H<sup>+</sup>
- La liaison de l'H<sup>+</sup> à l'Hb diminue son affinité pour l'O<sub>2</sub> = *effet Bohr*



## Relation entre transport de CO<sub>2</sub> et équilibre acido-basique

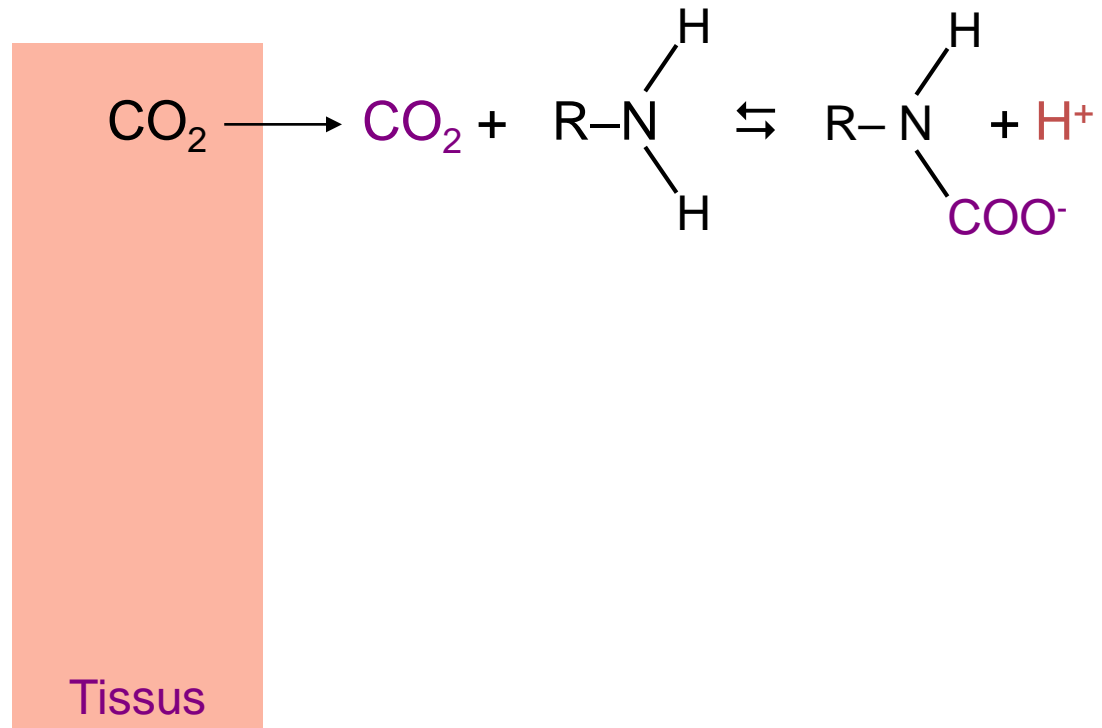
- La **réaction entre le CO<sub>2</sub>** et l'eau produit le système tampon le plus important de l'organisme: bicarbonate/acide carbonique



- Rappel: les systèmes tampons résistent aux variations du pH des liquides organiques :
  - En libérant des ions H<sup>+</sup> (en agissant comme des acides) quand  $\uparrow \text{pH}$
  - En fixant les ions H<sup>+</sup> (en agissant comme des bases) quand  $\downarrow \text{pH}$
  - NB:  $\text{pH} = -\log[\text{H}^+]$
- La ventilation alvéolaire agit sur la PCO<sub>2</sub> qui agit à son tour sur [H<sup>+</sup>]
  - Hyperventilation  $\rightarrow \uparrow$  élimination de CO<sub>2</sub>  $\rightarrow$  alcalose respiratoire
  - Hypoventilation  $\rightarrow \downarrow$  élimination de CO<sub>2</sub>  $\rightarrow$  acidose respiratoire

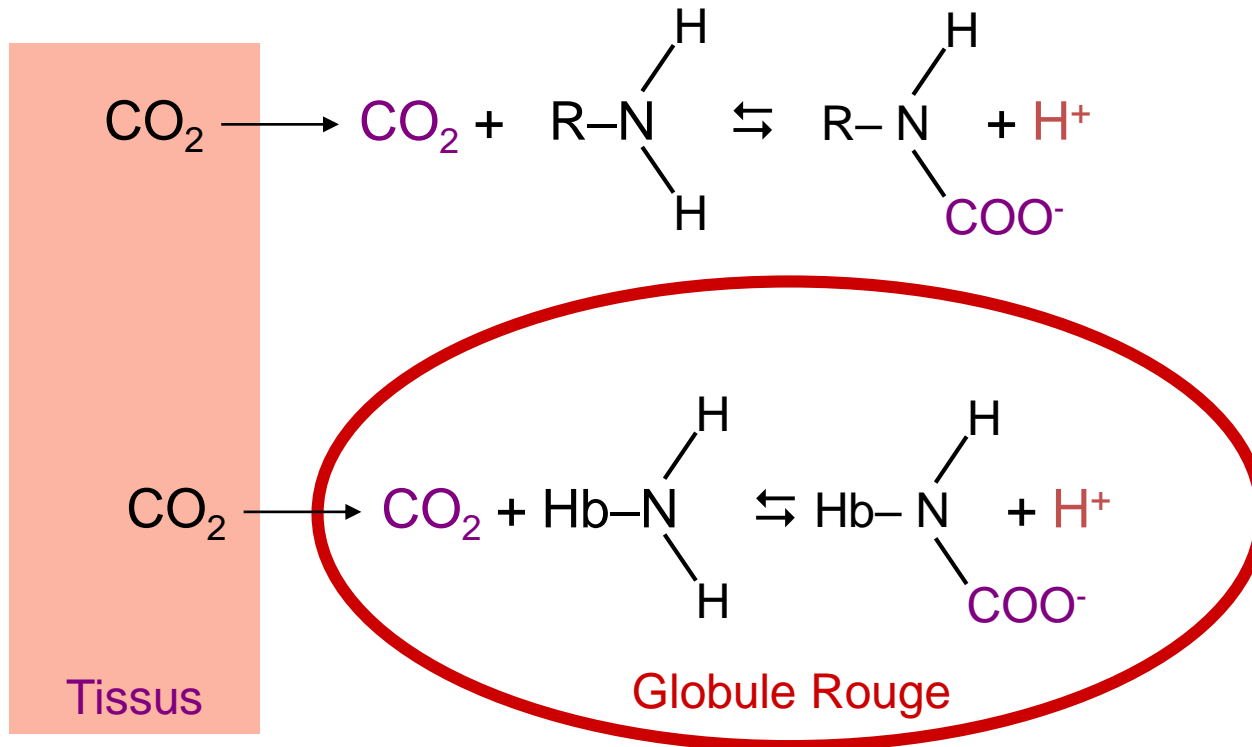
# CO<sub>2</sub> sous forme de composés carbaminés

- Formés par la combinaison du CO<sub>2</sub> avec les groupes amines terminaux des protéines dans le plasma ou le GR
- Réaction rapide ne nécessitant pas d'enzyme



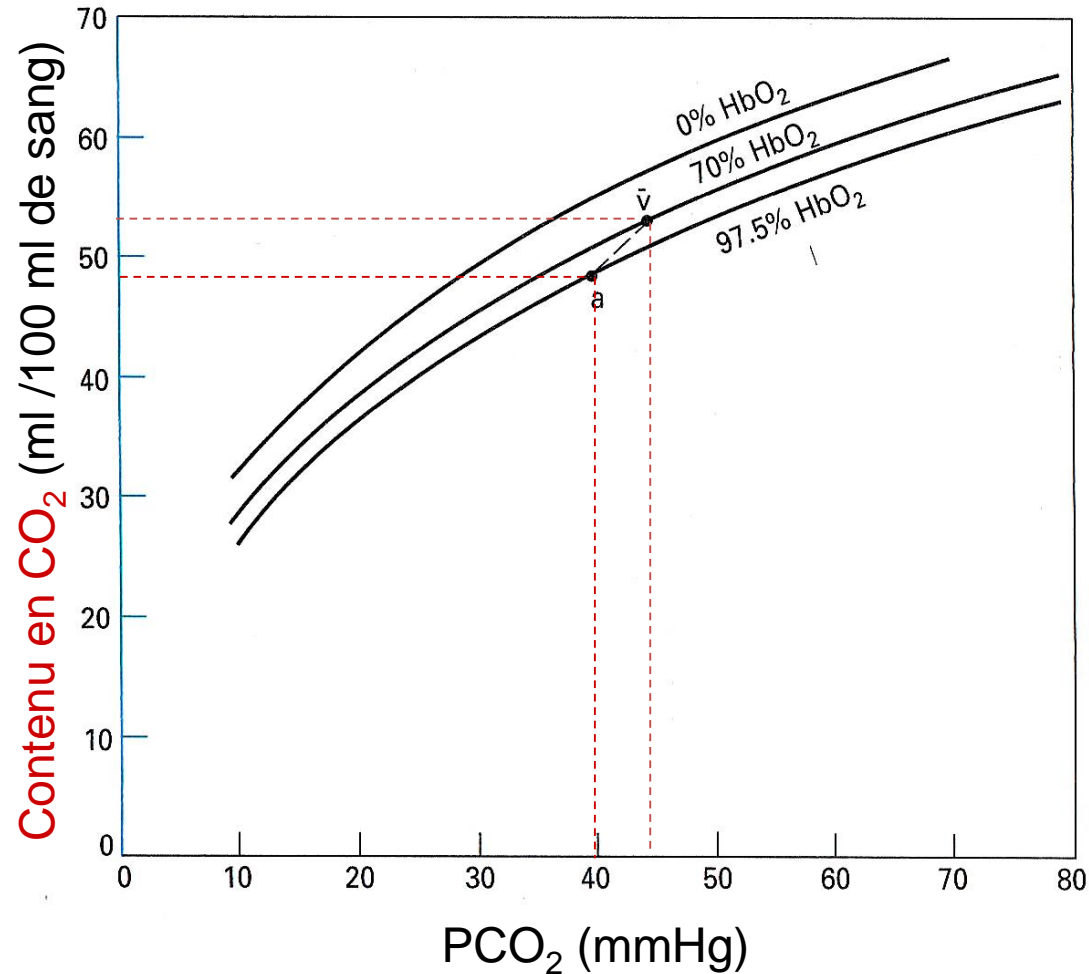
# CO<sub>2</sub> sous forme de composés carbaminés

- La protéine la plus abondante est la **globine** de l'Hb → **carbamino-hémoglobine**
- L'Hb réduite fixe plus de CO<sub>2</sub> sous forme de carbamino-Hb que l'HbO<sub>2</sub>
- **Signification**: la libération d'O<sub>2</sub> par l'Hb dans les tissus facilite la captation de CO<sub>2</sub> = *Effet Hadane*



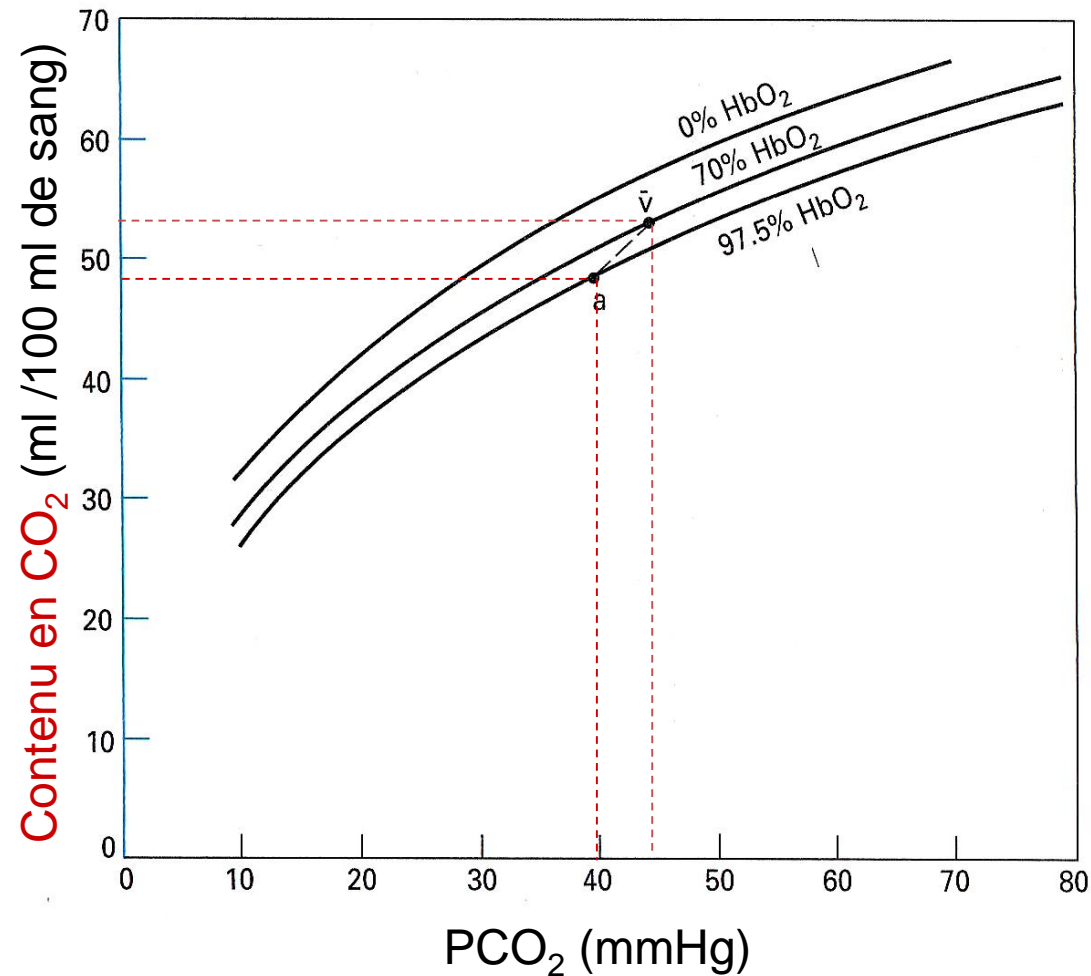
# Courbe de dissociation du $\text{CO}_2$

- Relation entre le contenu en  $\text{CO}_2$  et la  $\text{PCO}_2$  : "Courbe de dissociation du  $\text{CO}_2$ "



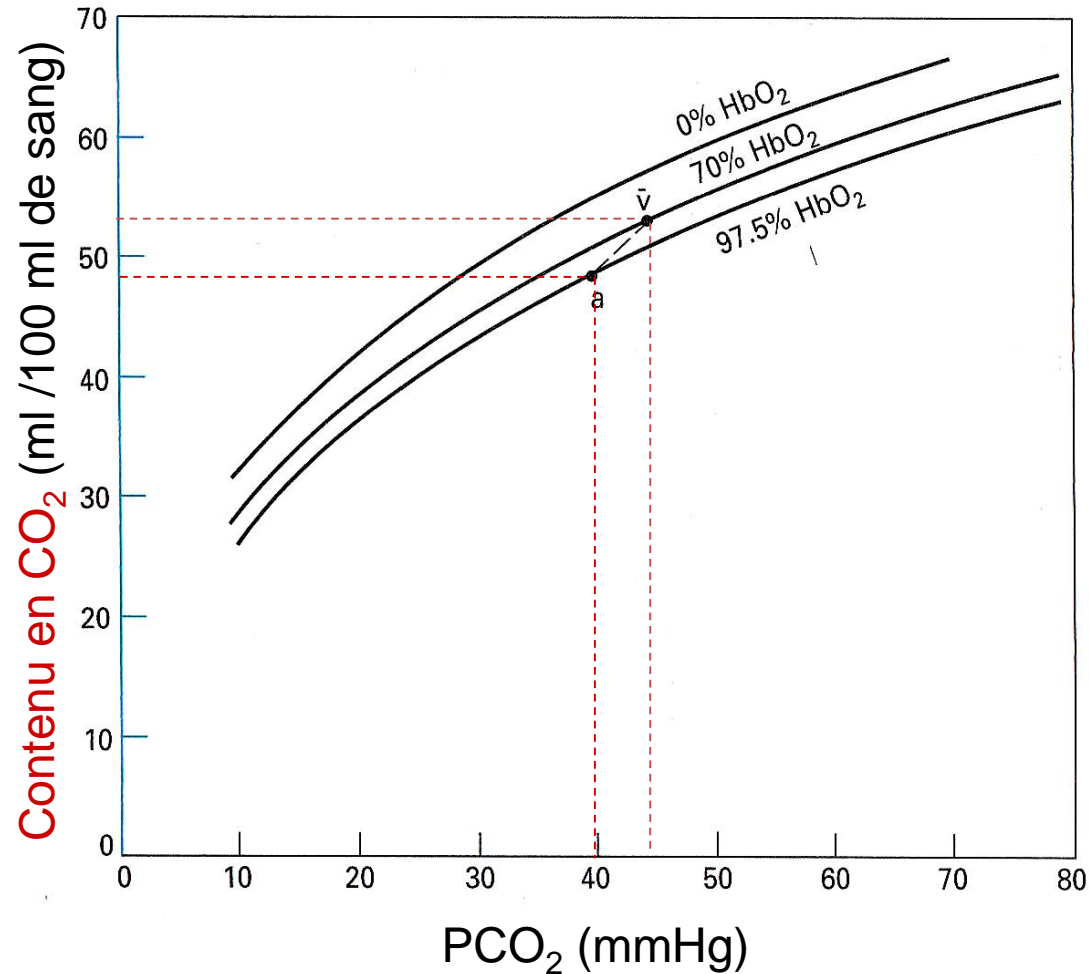
# Courbe de dissociation du $\text{CO}_2$

- La  $\text{SaO}_2$  modifie la Courbe de dissociation du  $\text{CO}_2$ 
  - Sang artériel:  $\uparrow \text{SaO}_2 \rightarrow$  le sang peut capter moins de  $\text{CO}_2$



# Courbe de dissociation du $\text{CO}_2$

- La  $\text{SaO}_2$  modifie la Courbe de dissociation du  $\text{CO}_2$ 
  - Sang veineux:  $\downarrow \text{SaO}_2 \rightarrow$  à  $\text{PCO}_2$  égale, le sang peut capter plus de  $\text{CO}_2$



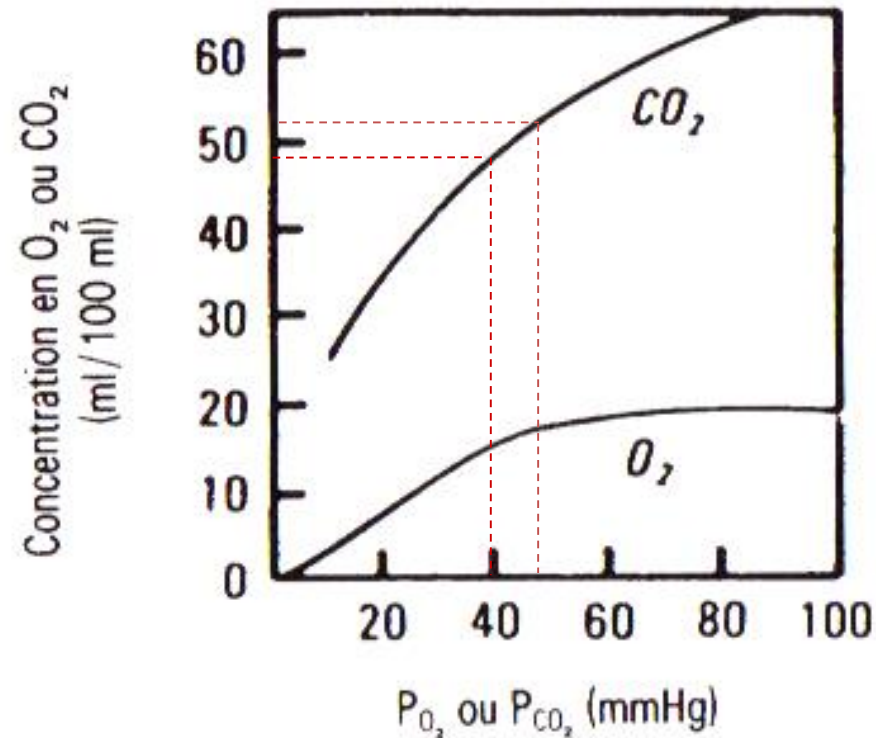
# Courbe de dissociation du CO<sub>2</sub>

- La Courbe de dissociation du CO<sub>2</sub> dépend de la SaO<sub>2</sub>
- Cette propriété = *effet Haldane*
- Signification:
  - Dans les tissus : la désaturation de l'Hb favorise la captation du CO<sub>2</sub>
  - Dans le poumon : la fixation de l'O<sub>2</sub> par l'Hb favorise la libération du CO<sub>2</sub>
- Mécanisme:
  - La liaison de l'H<sup>+</sup> à l'Hb réduite (tissus++) et dans le GR facilite la captation du CO<sub>2</sub> sous forme de HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>
  - L'Hb réduite (tissus++) fixe plus de CO<sub>2</sub> sous forme de carbamino-Hb que l'HbO<sub>2</sub>



# Courbe de dissociation du $\text{CO}_2$

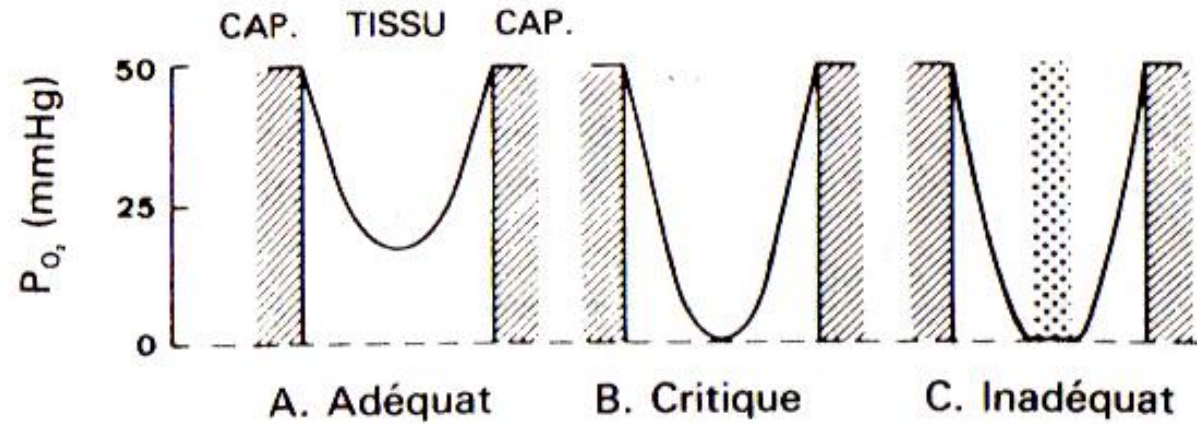
- La Courbe de dissociation du  $\text{CO}_2$  est beaucoup plus pentue que celle de l' $\text{O}_2$



# Plan

- Transport de l'O<sub>2</sub> dans le sang
  - Oxygène dissous
  - Oxygène combiné à l'hémoglobine
    - Structure et propriétés de l'hémoglobine
    - Courbe de dissociation de l'Oxyhémoglobine
- Transport du CO<sub>2</sub>
  - CO<sub>2</sub> dissous
  - Transport de CO<sub>2</sub> à l'état de bicarbonates
  - Transport de CO<sub>2</sub> sous forme de composés carbaminés
  - Courbe de dissociation du CO<sub>2</sub>
  - Relation entre transport de CO<sub>2</sub> et équilibre acido-basique
- Échanges gazeux sang-tissus

# Échanges gazeux sang-tissus



- L' $O_2$  et le  $CO_2$  sont échangés entre le sang capillaire et les tissus par simple diffusion
- La  $PO_2$  tissulaire est déterminé à tout moment par l'équilibre entre l'apport capillaire et l'utilisation tissulaire

# Échanges gazeux sang-tissus

- **Hypoxie tissulaire** = apport inadéquat d'O<sub>2</sub> aux tissus
  - Apport en O<sub>2</sub> =  $\dot{Q} \times \text{CaO}_2$
- ↓CaO<sub>2</sub>
  - ↓PaO<sub>2</sub> si pathologie pulmonaire = **hypoxémie**
    - Hypoventilation alvéolaire
    - Anomalie de la diffusion
    - Inégalités du rapport V/Q
    - ↓PIO<sub>2</sub> (ex: altitude)
  - ↓**Capacité de transport** de l'O<sub>2</sub>
    - Anémie
    - Hb non-fonctionnelle, ex: Intoxication par le CO
- ↓Débit sanguin tissulaire (↓ $\dot{Q}$ )
  - Ex: choc hémodynamique
- ↓Capacité du tissu à utiliser l'O<sub>2</sub>
  - Ex: intoxication par le cyanure (bloque le cytochrome oxydase)

# Mentions légales

L'ensemble de ce document relève des législations française et internationale sur le droit d'auteur et la propriété intellectuelle. Tous les droits de reproduction de tout ou partie sont réservés pour les textes ainsi que pour l'ensemble des documents iconographiques, photographiques, vidéos et sonores.

Ce document est interdit à la vente ou à la location. Sa diffusion, duplication, mise à disposition du public (sous quelque forme ou support que ce soit), mise en réseau, partielles ou totales, sont strictement réservées à l'Université Grenoble Alpes (UGA).

L'utilisation de ce document est strictement réservée à l'usage privé des étudiants inscrits en Première Année Commune aux Etudes de Santé (PACES) à l'Université Grenoble Alpes, et non destinée à une utilisation collective, gratuite ou payante.