



Hôpitaux  
Universitaires  
Genève



**UNIVERSITÉ  
DE GENÈVE**

**FACULTÉ DE MÉDECINE**

# Transport des gaz sanguins

Dr Ivan Guerreiro  
Service de Pneumologie

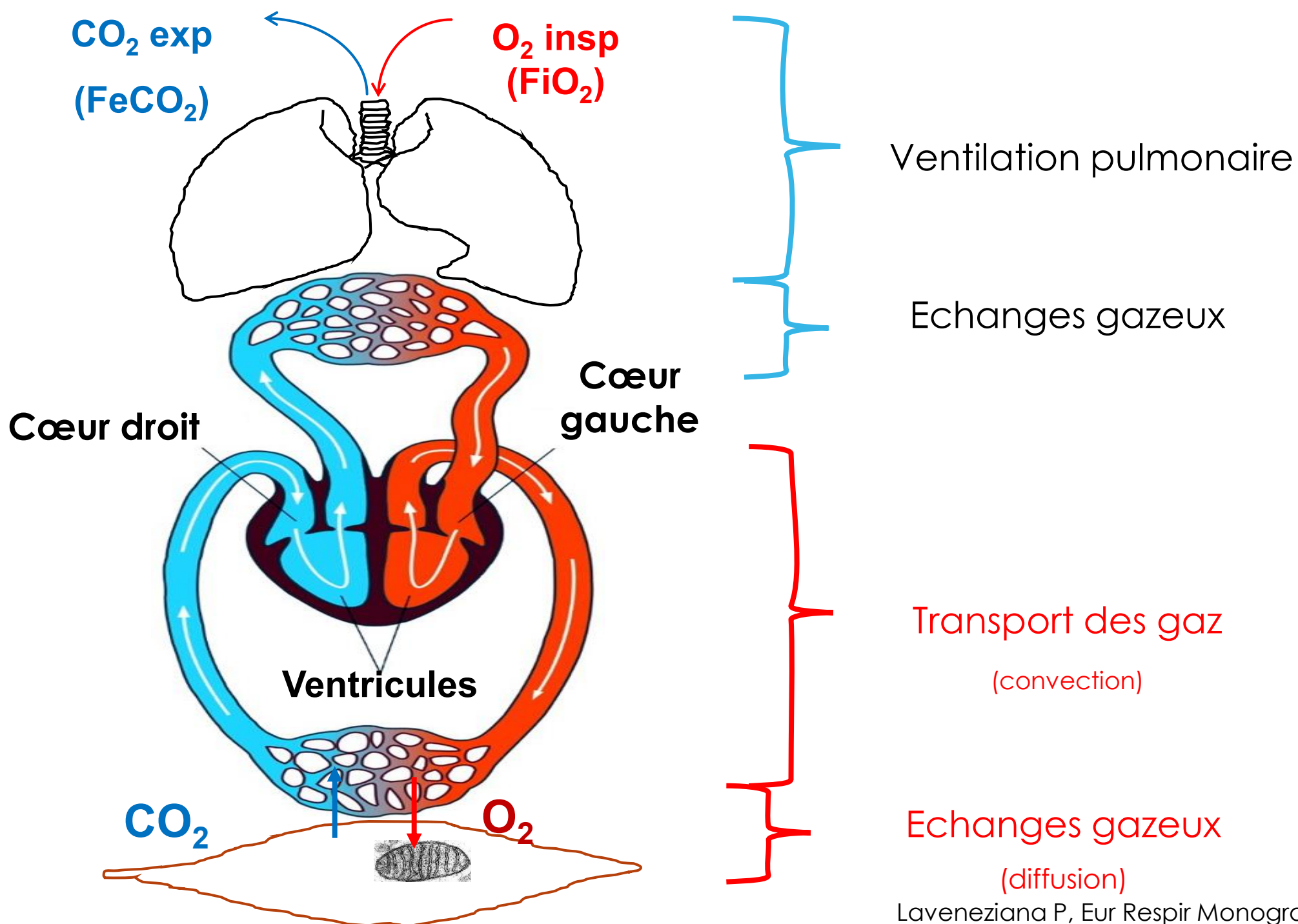
Hôpitaux Universitaires de Genève

[Ivan.guerreiro@hug.ch](mailto:Ivan.guerreiro@hug.ch)

# Objectifs

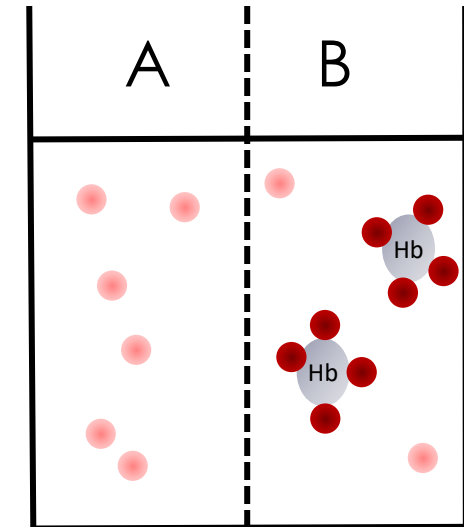
---

- Notion de concentration et saturation en oxygène
- Distribution de l'oxygène
- Distribution du gaz carbonique
- Effet Bohr et Haldane
- Quotient respiratoire
- Consommation de l'oxygène



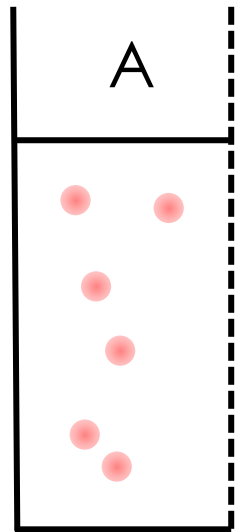
# Le sang, organe de stockage et de transport des gaz

- **Le sang fixe l'O<sub>2</sub> et le CO<sub>2</sub>**
  - De manière réversible
  - Sous l'influence d'un gradient de pression partielle
- **Transport des gaz en milieu liquide (plasma, cytoplasme du globule rouge)**
- **Transport sous 2 formes**
  - **Dissoute** < 3%
  - **Liée à l'hémoglobine (Hb)** > 97%

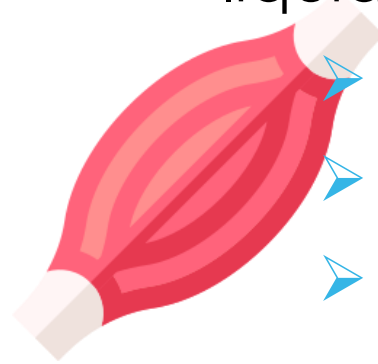


# Le sang, organe de stockage et de transport des gaz

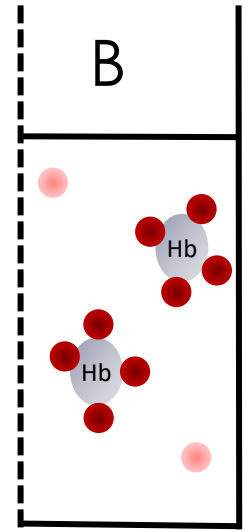
- Seule la **fraction dissoute** du gaz participe à la pression partielle
- Forme de passage obligatoire qui permet la diffusion pour les échanges gazeux



Le volume de gaz dissous dans un liquide est déterminé par



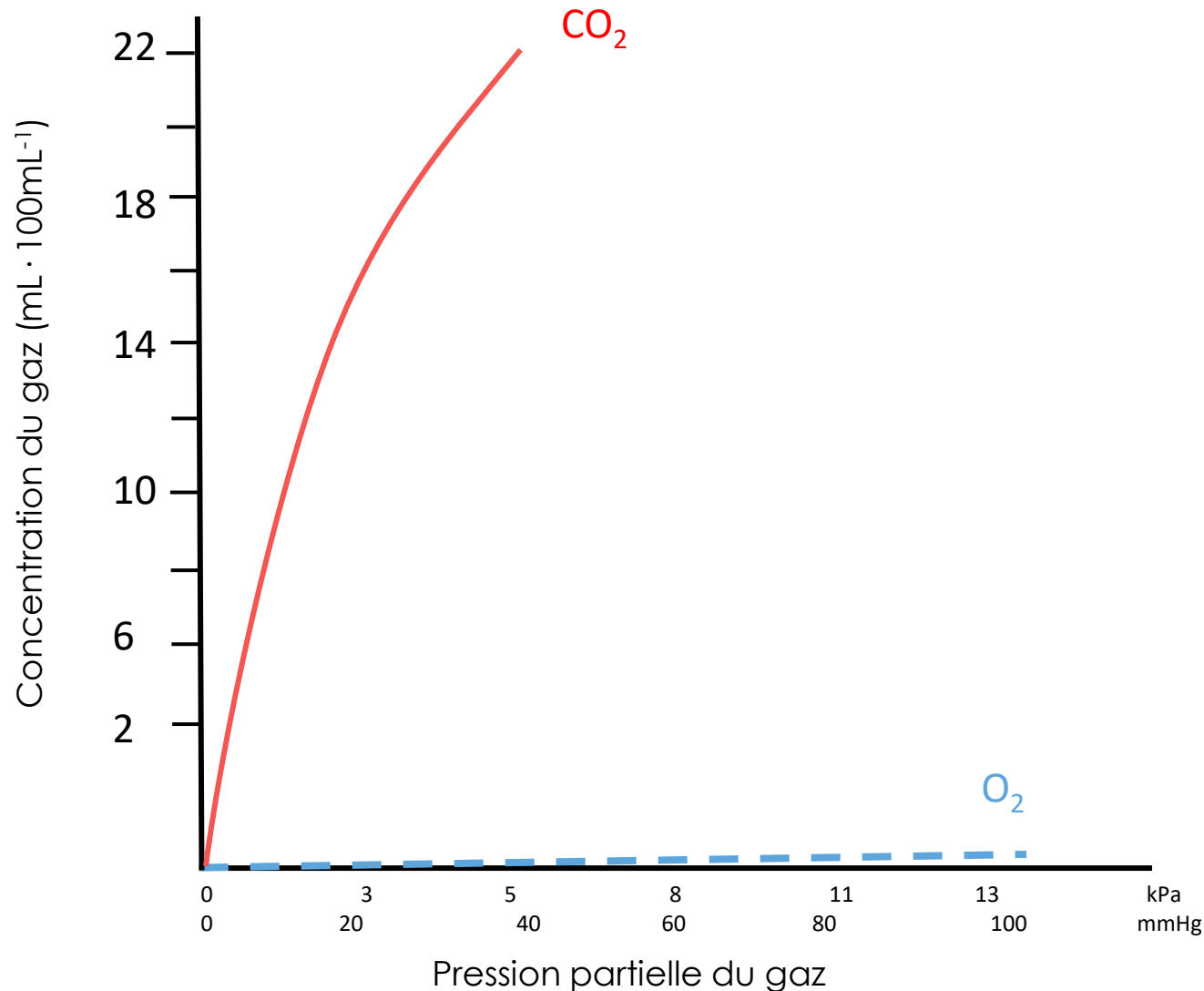
- La pression partielle du gaz
- Son coefficient de solubilité
- La température du liquide (cst à 36.9°)



Moins d'oxygène en terme de quantité, mais plus disponible pour diffuser

Plus d'oxygène en terme de quantité, mais moins disponible pour diffuser

# Oxygène dissous dans le plasma

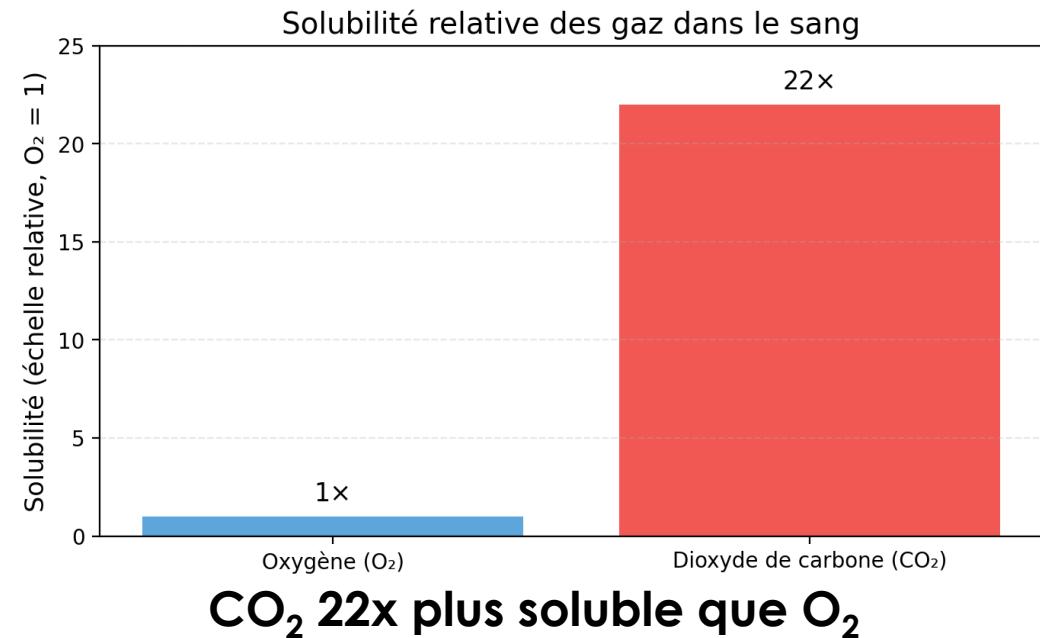


- Coeff de solubilité de l'oxygène :

**0.0023 ml** d'O<sub>2</sub>/ml de sang à 37°C

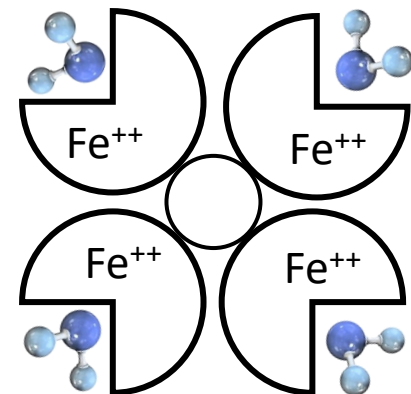
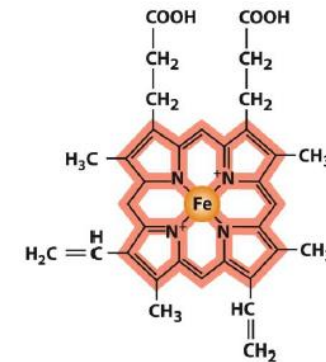
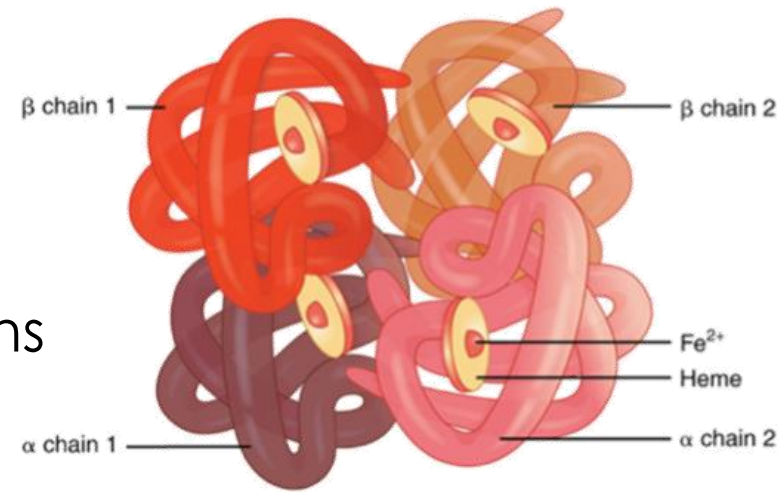
- Coeff de solubilité gaz carbonique:

**0,592 ml** d'O<sub>2</sub>/ml de sang à 37°C

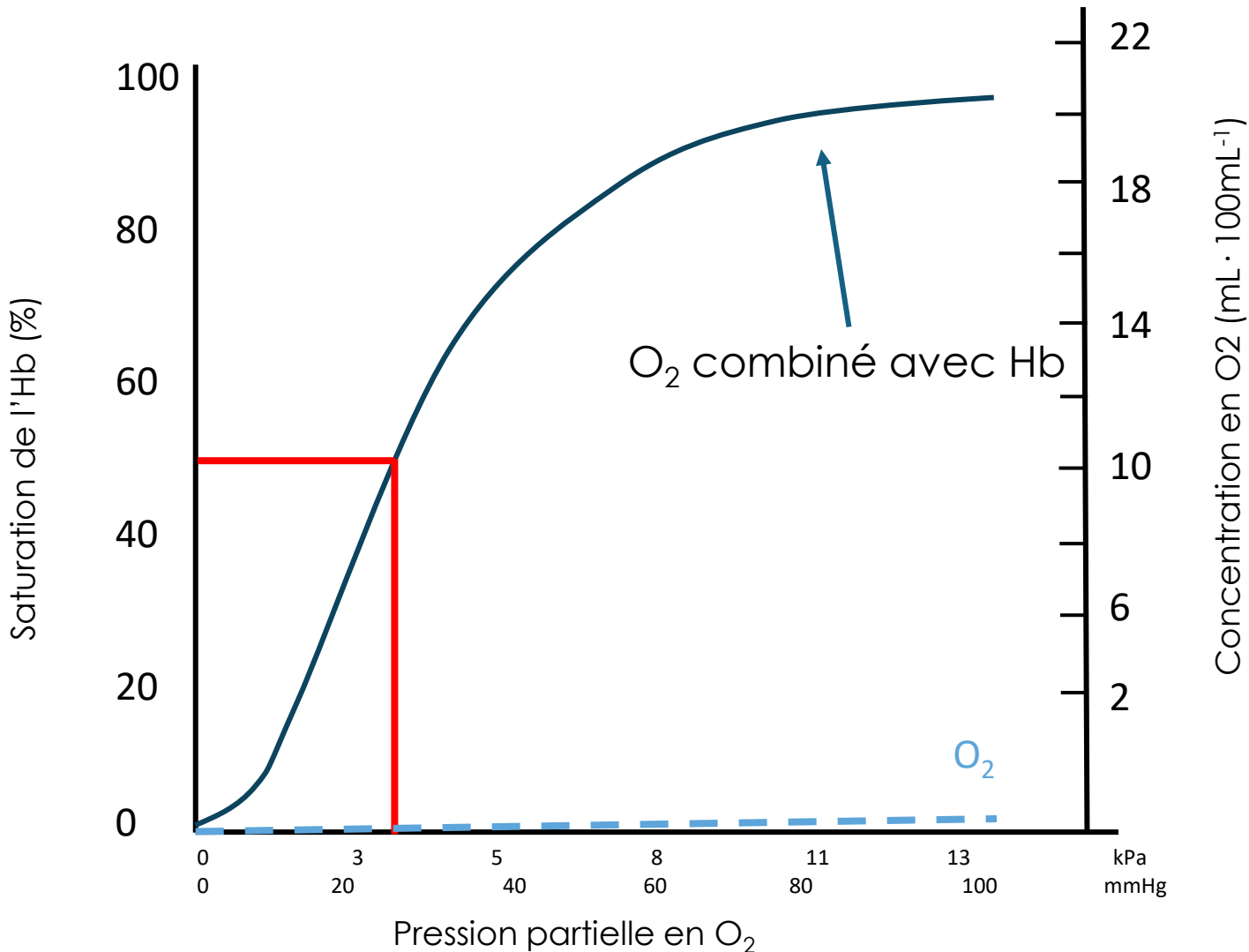


# L'hémoglobine

- L'hémoglobine (Hb) est un pigment respiratoire présent exclusivement dans les globules rouges (hématies)
- 4 chaînes polypeptidiques avec un groupement hème au centre
- Protéine transporteuse
  - Fixation réversible et instable d'un ligand (ex: O<sub>2</sub>) sur un site de fixation
  - Affinité protéine-ligand plus grande au départ qu'à l'arrivée
- Affinité aux gaz
  - CO<sub>2</sub> → +
  - O<sub>2</sub> → +++
  - CO → ++++++



# Courbe de dissociation de l'hémoglobine

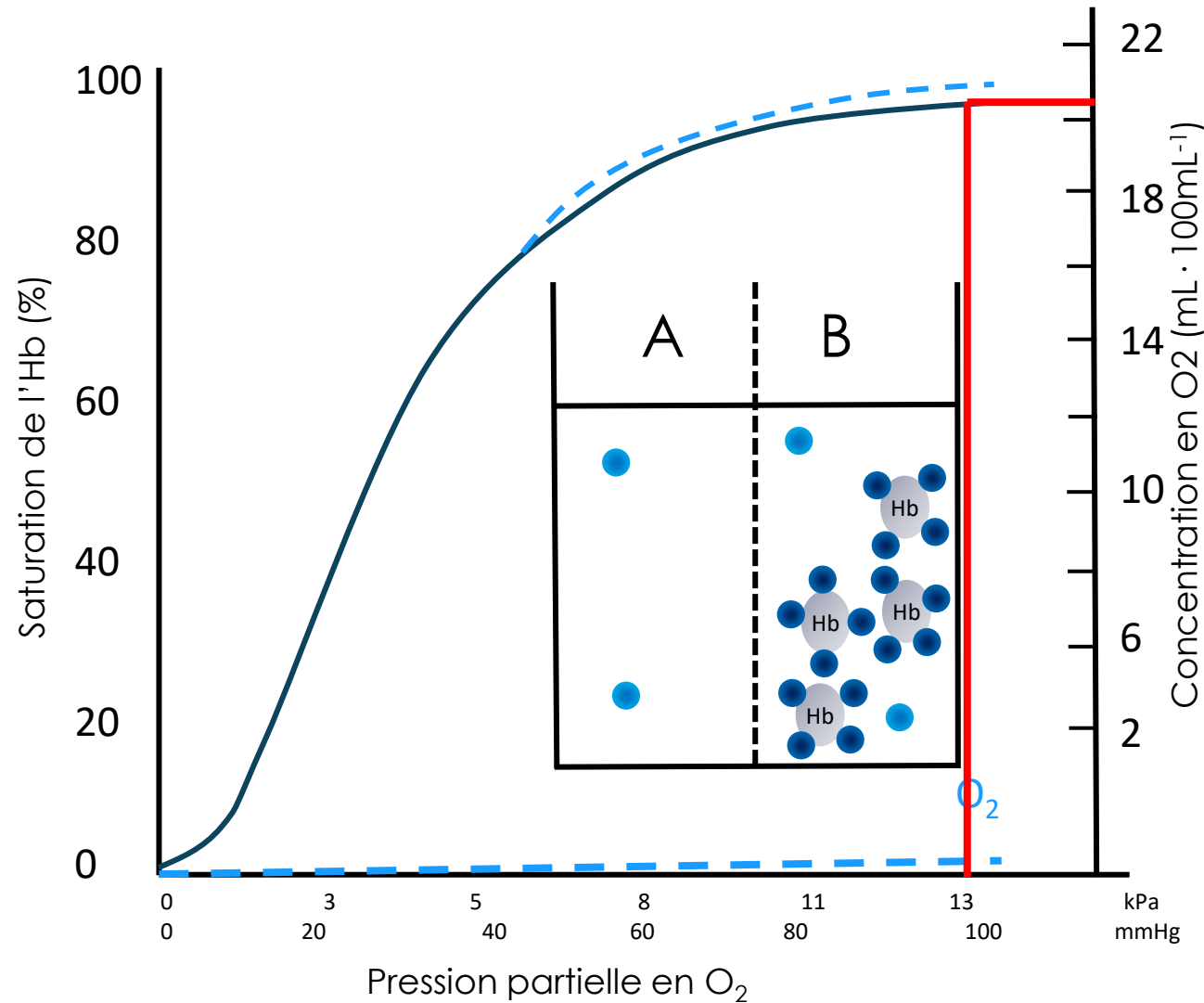


Saturation de l'Hb

$$\frac{O_2 \text{ combiné avec Hb}}{\text{Capacité en } O_2} \cdot 100$$

P50 = 27 mmHg. Mesure l'affinité du sang pour l'O<sub>2</sub>.

# Contenu artériel en O<sub>2</sub>



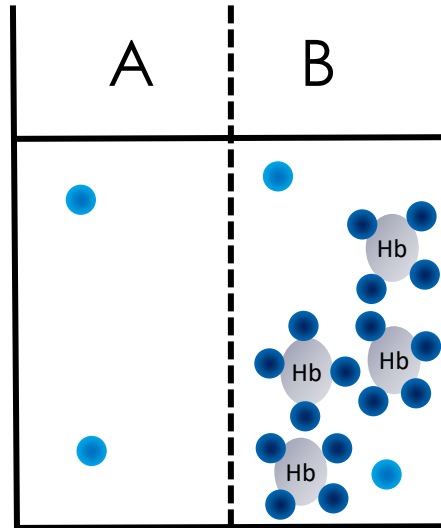
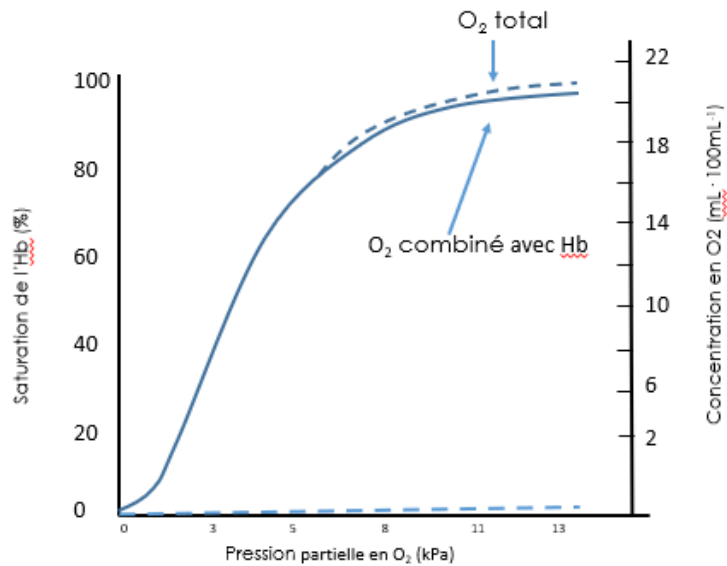
$$\text{CaO}_2 = \underbrace{[\text{Hb}] \cdot 1.39 \cdot \text{SaO}_2}_{\text{Hb-bound O}_2} + \underbrace{0.003 \cdot \text{PaO}_2}_{[\text{O}_2 \text{ dissous}]}$$

pour PaO<sub>2</sub> = 13kPa (97.5mmHg)  
= 0.3ml/100ml sang

$$= 15\text{g}/100\text{ml} \cdot 1.39 \cdot 1 + 0.003 \cdot 13\text{kPa}$$

$$= 20.85 + 0.3 = \mathbf{21.15 \text{ ml O}_2/100\text{ml de sang}}$$

# Courbe de dissociation de l'hémoglobine



Oxygène dissous dans le plasma

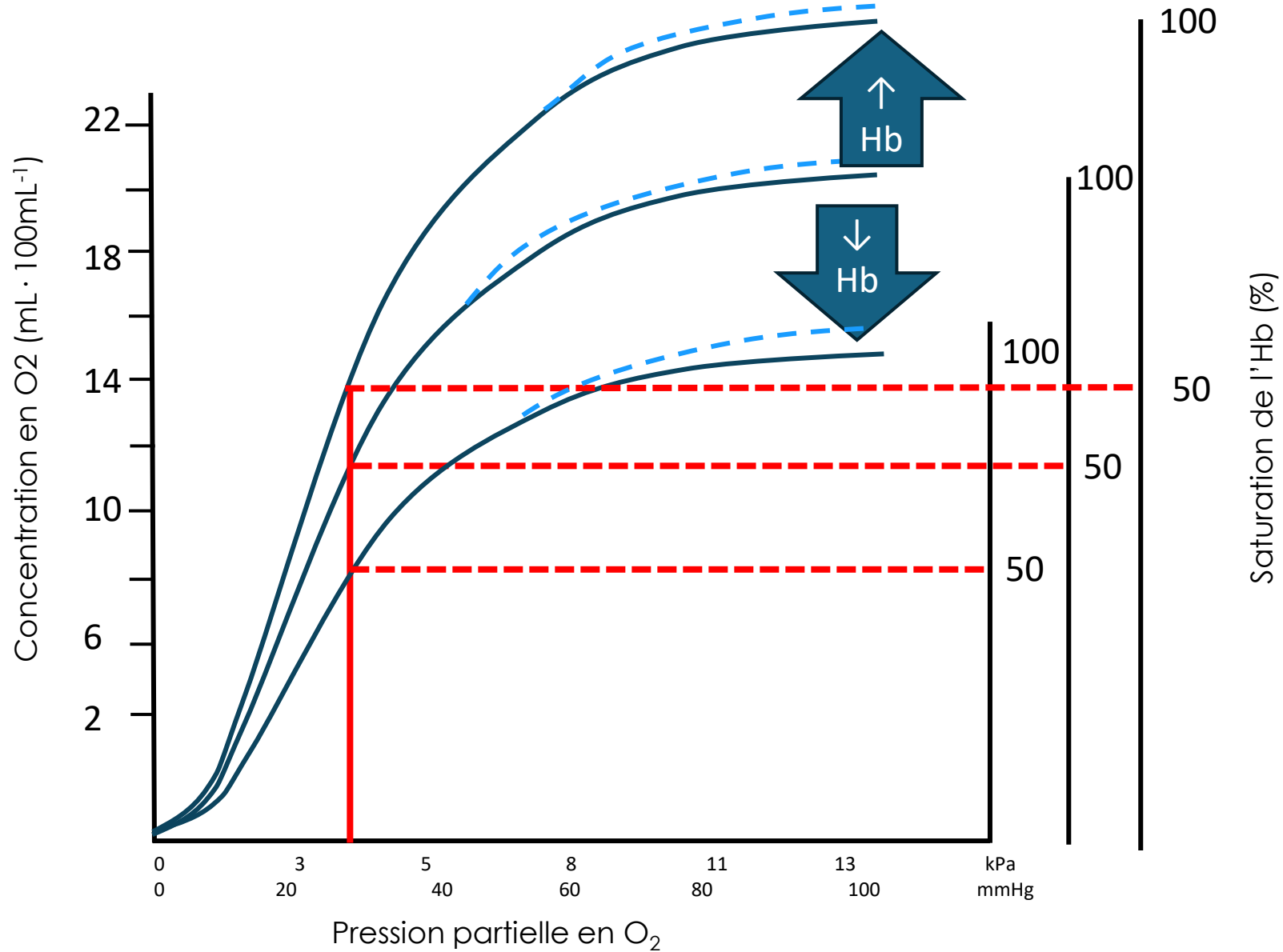
➤ Aspect qualitatif ++

Oxygène transporté dans les globules rouges

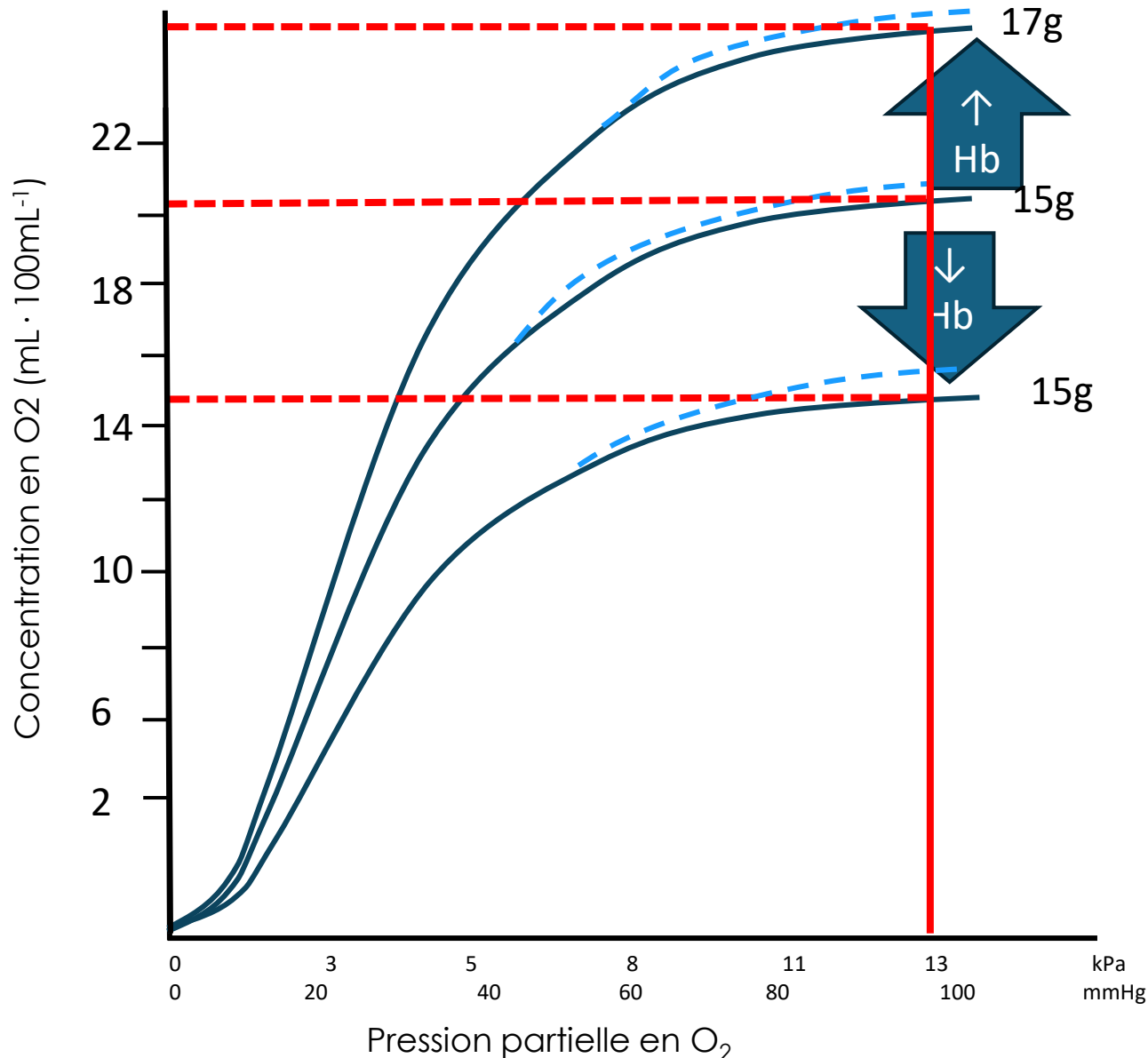
➤ Aspect quantitatif ++

- Contenu du sang en O<sub>2</sub> = [O<sub>2</sub> dissous] + [O<sub>2</sub> combiné]
- Proportionnel à PO<sub>2</sub>

# Importance de l'hémoglobine



# Importance de l'hémoglobine



$$CaO_2 = [Hb] \cdot 1.39 \cdot SaO_2 + 0.003 \cdot PaO_2$$

$$= \underline{17g}/100ml \cdot 1.39 \cdot 1 + 0.003 \cdot 13kPa$$
$$= 23.6 + 0.3 = \underline{\underline{23.9 ml}} O_2/100ml \text{ de sang}$$

$$= \underline{15g}/100ml \cdot 1.39 \cdot 1 + 0.003 \cdot 13kPa$$
$$= 20.85 + 0.3 = \underline{\underline{21.15 ml}} O_2/100ml \text{ de sang}$$

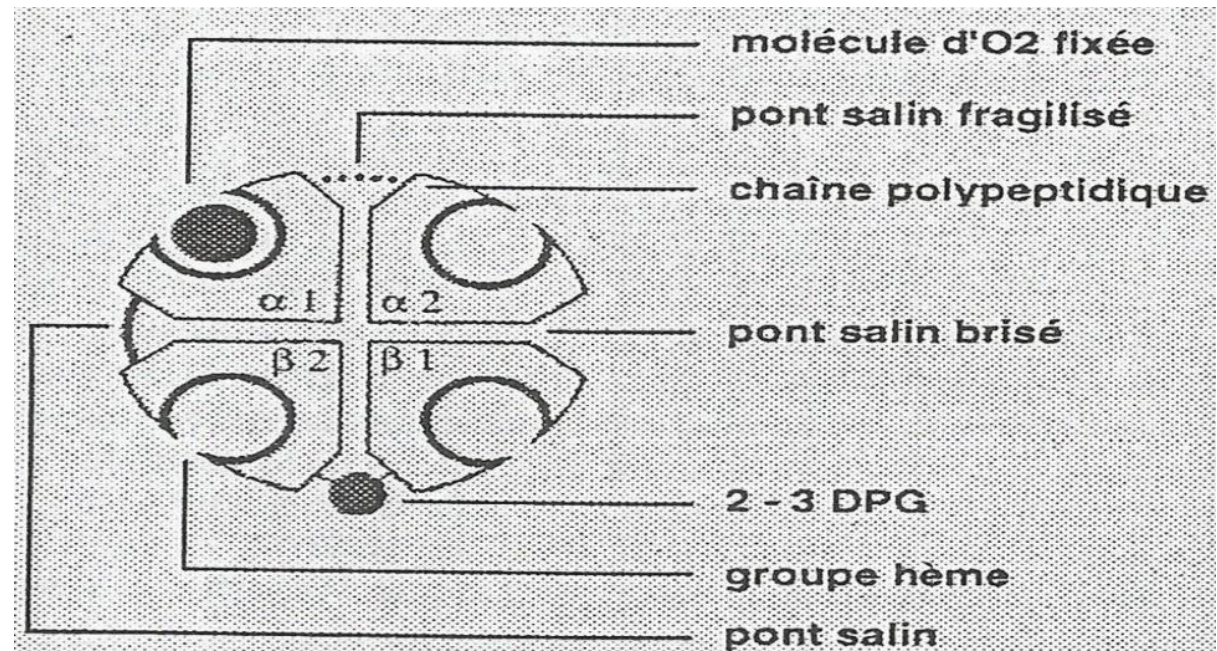
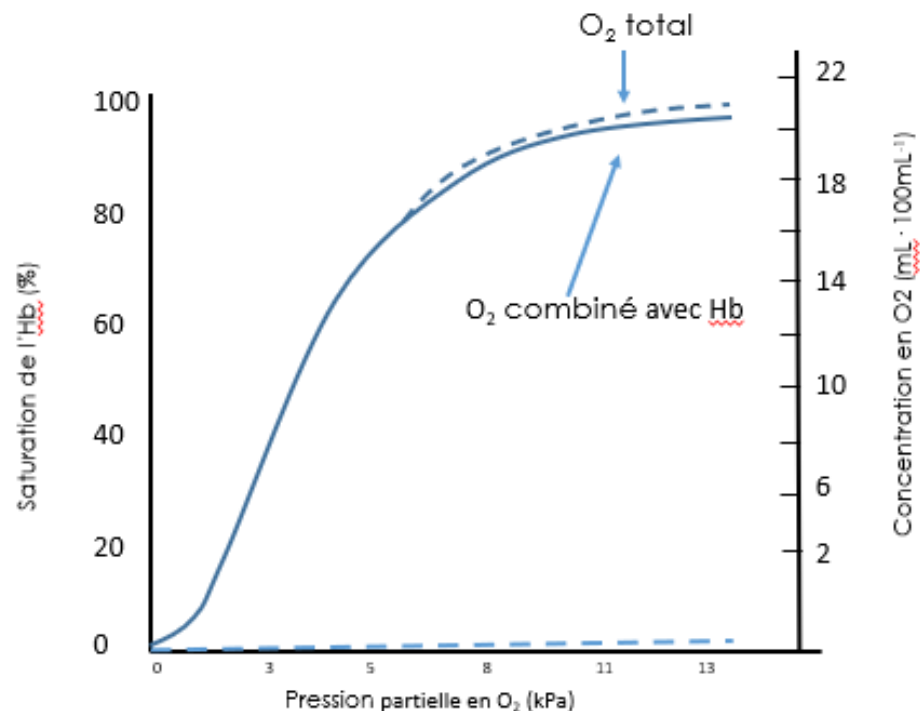
$$= \underline{10.5g}/100ml \cdot 1.39 \cdot 1 + 0.003 \cdot 13kPa$$
$$= 14.6 + 0.3 = \underline{\underline{14.9 ml}} O_2/100ml \text{ de sang}$$

# Pourquoi une forme sigmoïde

- La fixation d' $O_2$  sur la molécule d'hémoglobine fragilise et/ou rompt les ponts salins -> facilite la fixation de la molécule d'oxygène suivante

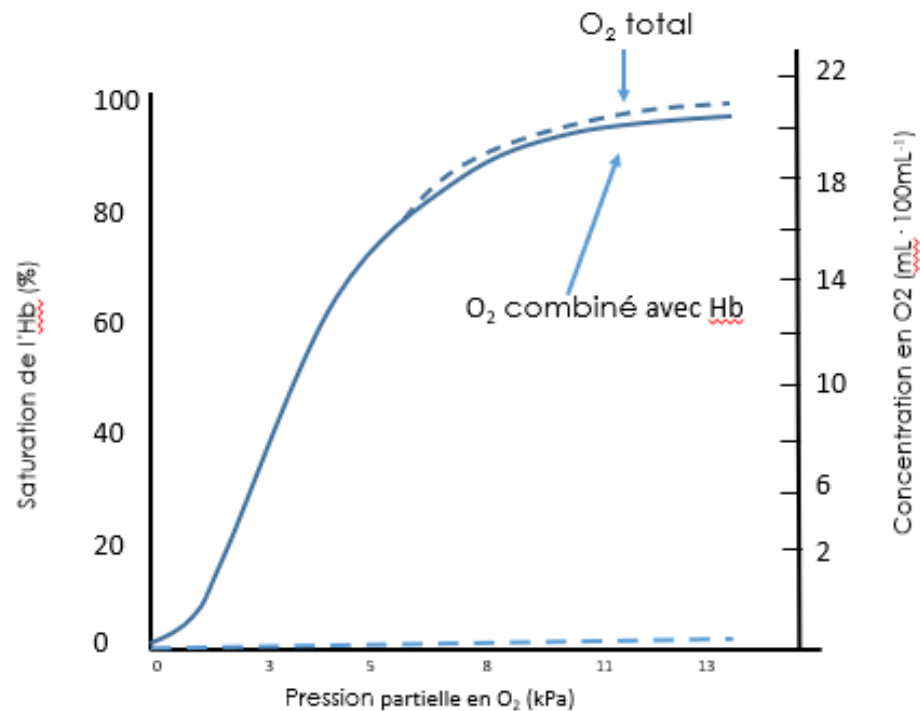
## → Propriété allostérique de l'Hb

- La 4<sup>ème</sup> molécule d' $O_2$  se fixerait 200x plus facilement que la 1<sup>ère</sup>.

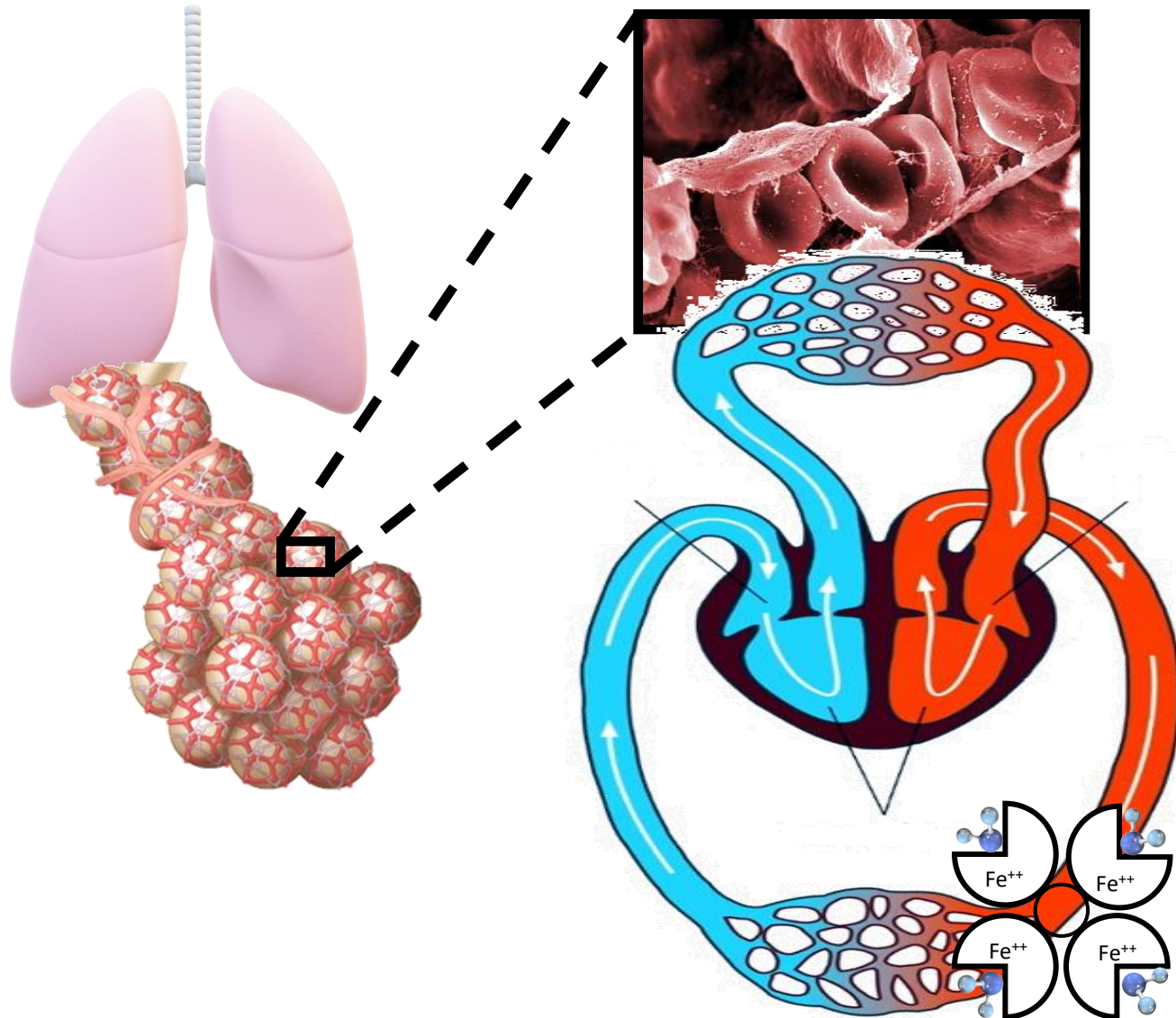
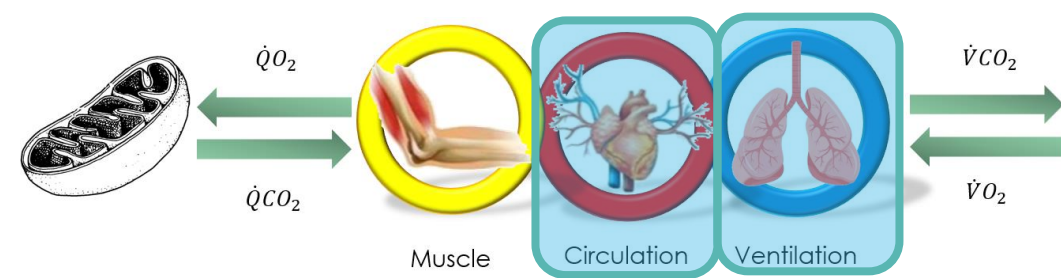


# Avantage de la forme sigmoïdes

- Partie plate de la courbe:
  - une chute de la  $PaO_2$  n'affecte que peu la quantité d' $O_2$  transportée
- Partie moyenne raide:
  - Faible chute de la  $PaO_2$  dans le sang lors de la diffusion d' $O_2$  dans les tissus
  - Maintien du gradient lors du transfert de l' $O_2$  dans le sang au niveau du poumon



# Parcours de l'oxygène



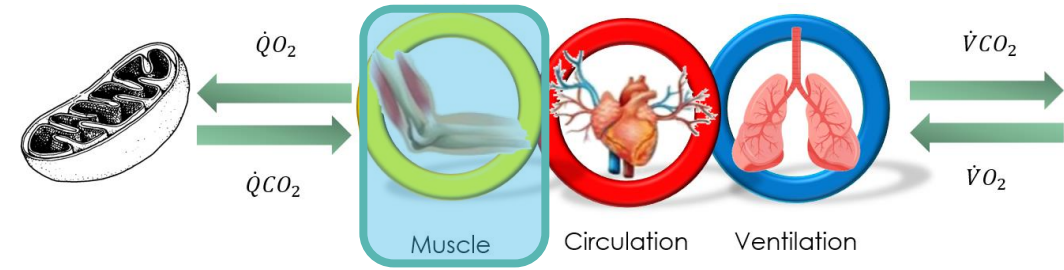
## Convection:

- Gaz respiratoires sont transportés par un débit vecteur  $\dot{Q}$
- Soit le débit cardiaque (5L/min)

$$\dot{Q}aO_2 = \dot{Q} \cdot (C_{aO_2})$$

$\dot{Q}aO_2$  = apport d' $O_2$  aux tissus  
 $C_{aO_2}$  = contenu artériel en  $O_2$

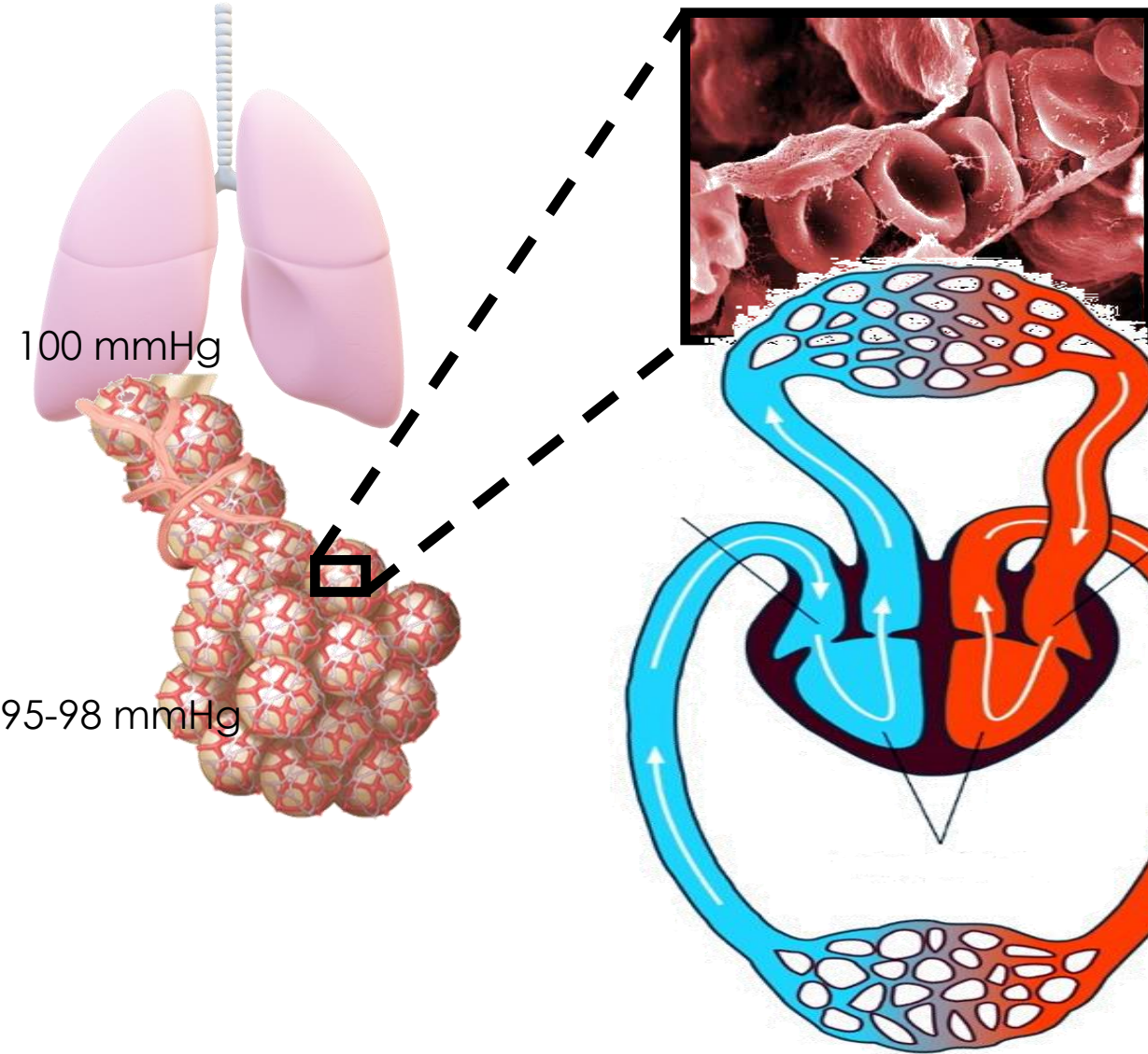
# Parcours de l'oxygène



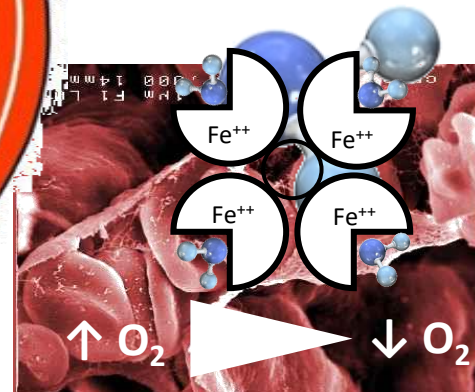
159 mmHg

100 mmHg

95-98 mmHg

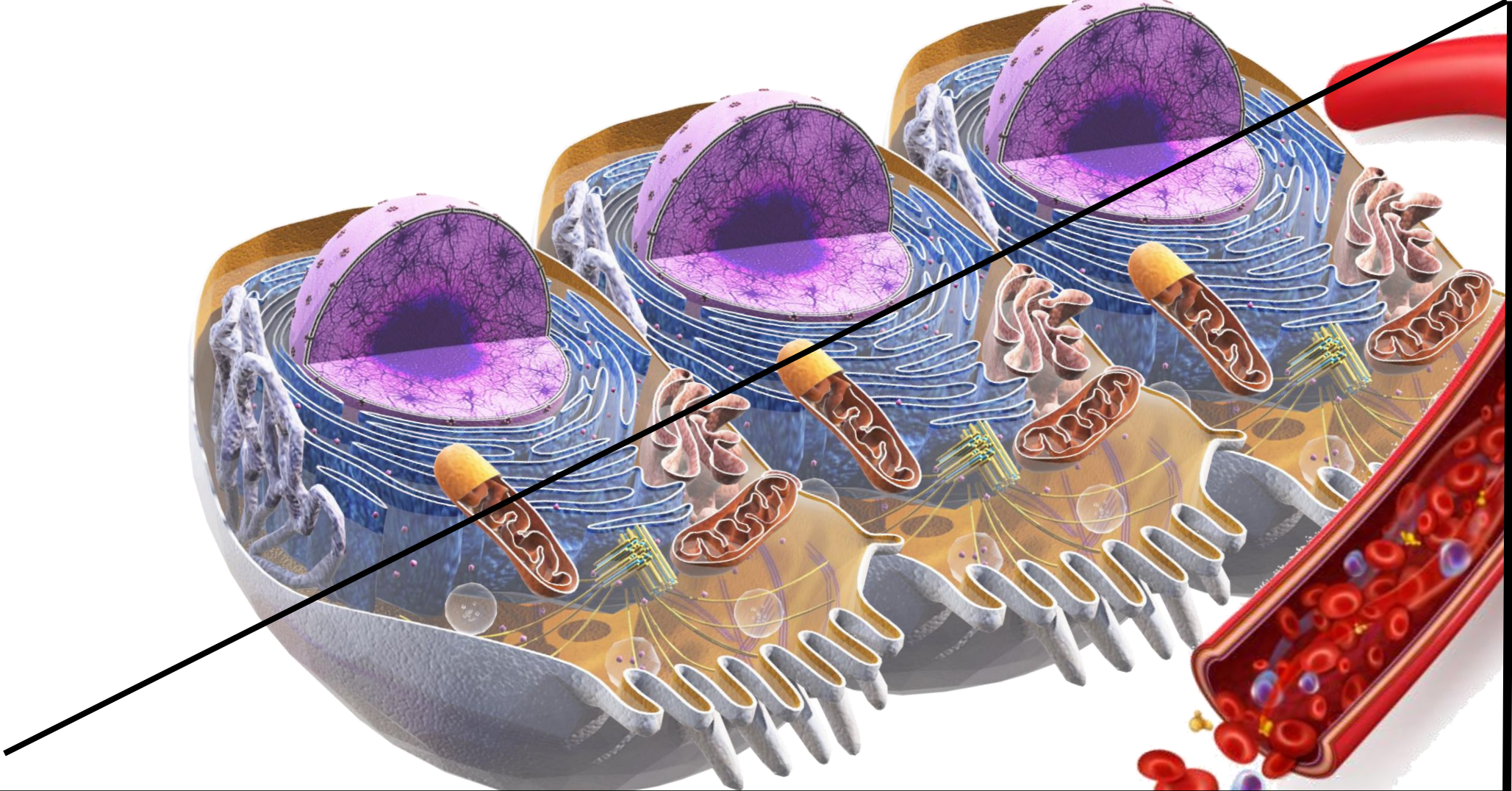


Cellule 9.9 -19 mmHg



# Transport de l'oxygène: cascade d'O2

100 mmHg



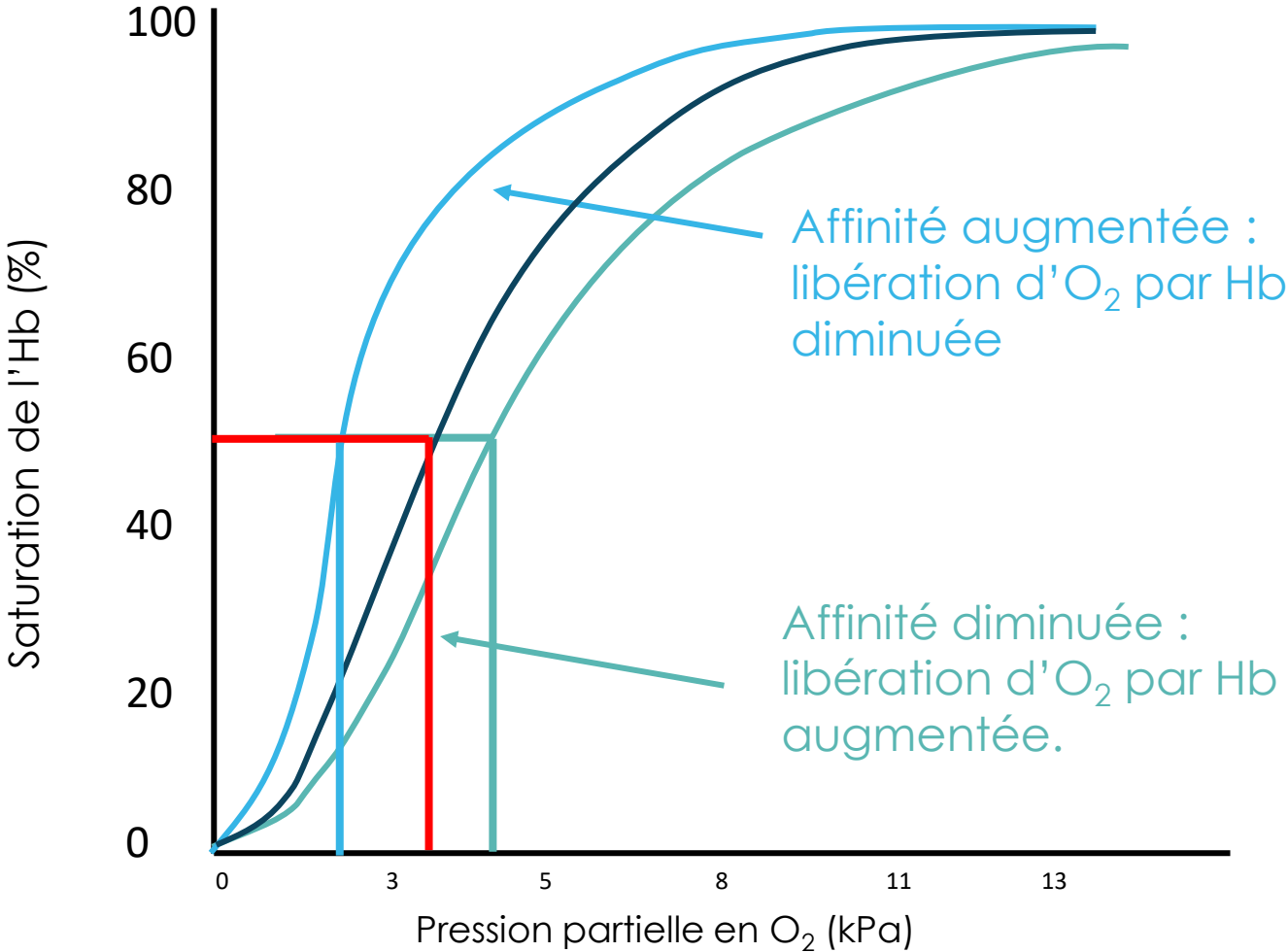
Distance

# Diffusion dans les cellules

- Déterminant majeur: distance au capillaire le plus proche

Pression partielle d'oxygène dans les différents organes et tissus	
Organe/tissu	PaO <sub>2</sub> mmHg
Cerveau	33.8 ± 2.6
Poumon	42.8
Foie	40.6 ± 5.4
Rein	72 ± 20
Muscle	29.2 ± 1.8
Cœur	N/A
Peau	8 à 35.2 ± 2.6

# Saturation de l'hémoglobine



Affinité augmentée :  
libération d'O<sub>2</sub> par Hb  
diminuée

Affinité diminuée :  
libération d'O<sub>2</sub> par Hb  
augmentée.

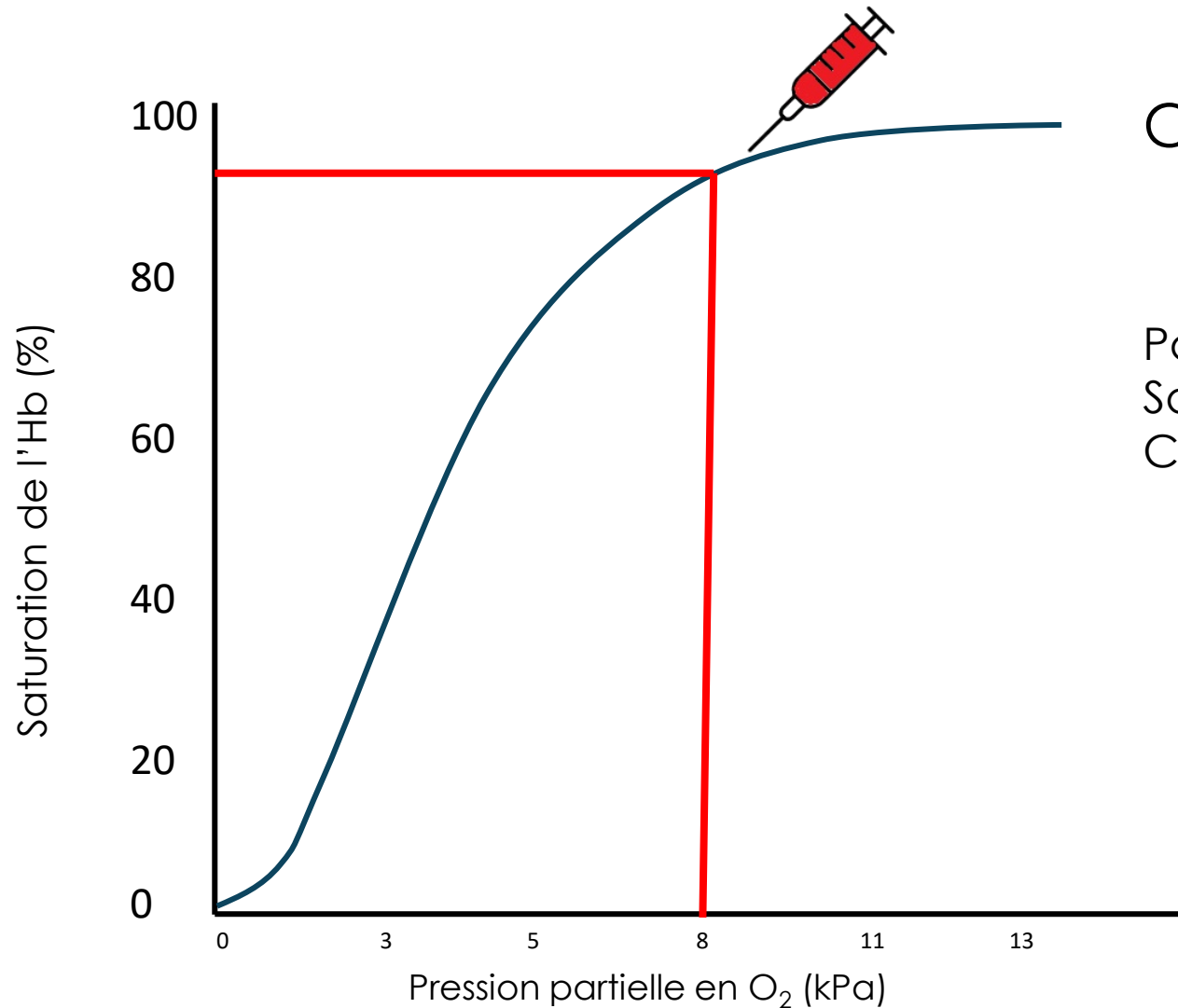
- ↑ pH
- ↓ DPG
- ↓ Temp

P<sub>50</sub> diminue

- ↓ pH
- ↑ DPG
- ↑ Temp

P<sub>50</sub> augmente

# Saturation de l'hémoglobine: augmentation de la température



$$CaO_2 = [Hb] \cdot 1.39 \cdot SaO_2 + 0.003 \cdot PaO_2$$

PaO<sub>2</sub> à 8 kPa

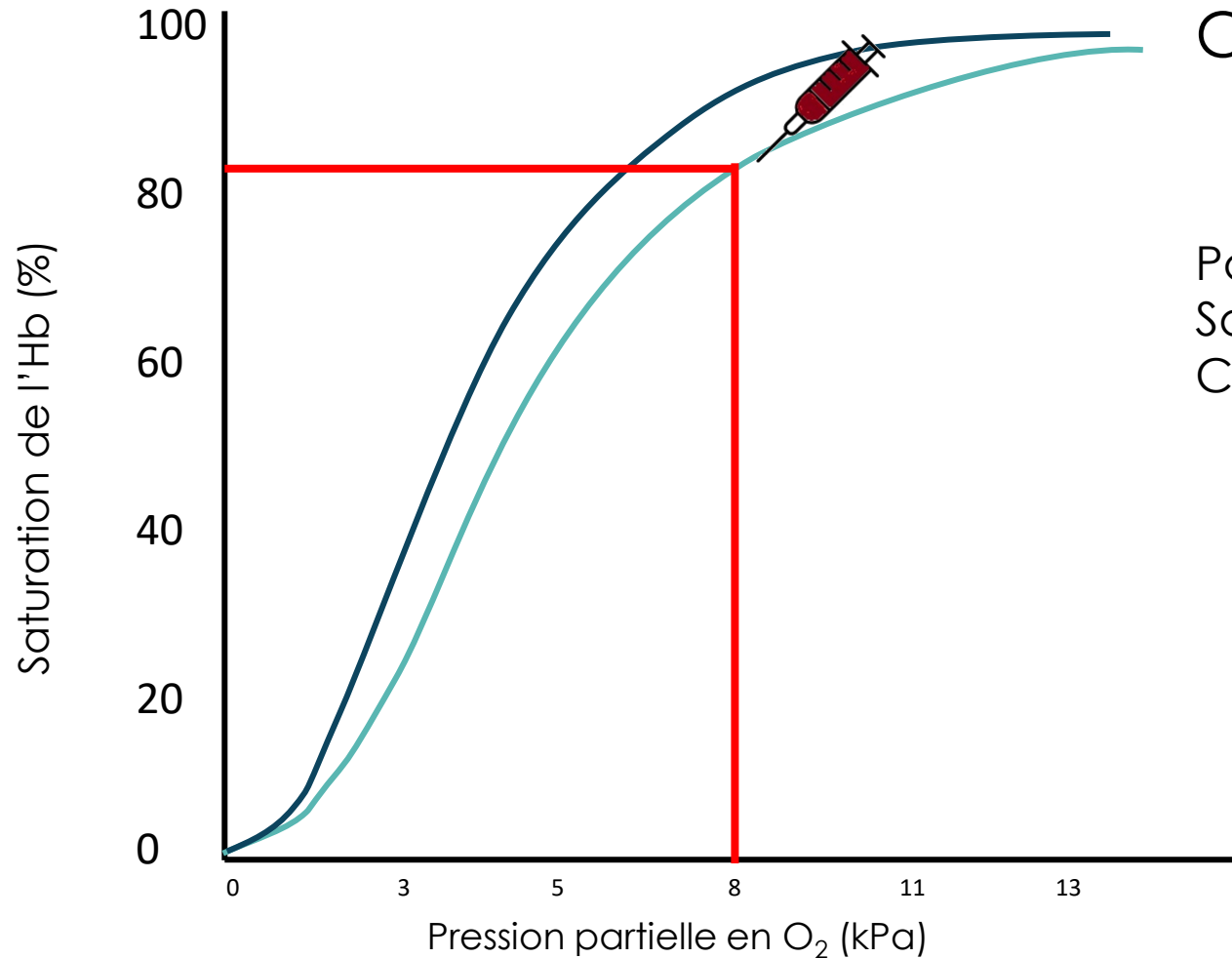
Saturation à environ 91 %

$$Ca O_2 = 15 \times 1.39 \times 0.91 + 0.24$$

$$= 19 + 0.24$$

$$= \underline{\underline{19.24 \text{ ml}}} O_2 / 100 \text{ ml de sang}$$

# Saturation de l'hémoglobine: augmentation de la température



$$CaO_2 = [Hb] \cdot 1.39 \cdot SaO_2 + 0.003 \cdot PaO_2$$

PaO<sub>2</sub> à 8 kPa

Saturation à environ 86%

$$\begin{aligned} Ca O_2 &= 15 \times 1.39 \times 0.86 \\ &= 18.17 + 0.24 \\ &= 18.41 \end{aligned}$$

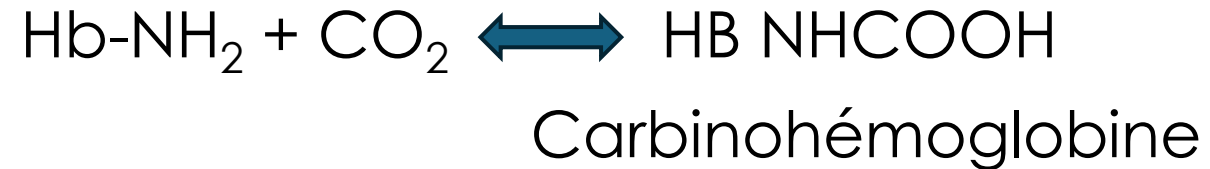
# Facteurs physiologiques modifiant l'affinité de l'Hb pour l'O<sub>2</sub>

- **pH**
  - Diarrhée, vomissements
- **CO<sub>2</sub>**
  - Via le pH et indépendamment
  - Lors d'effort physique
- **Température tissulaire**
  - Lors d'infection, de fièvre
- **Concentration de 2,3 Diphosphoglycérates (DPG, métabolite de la glycolyse dans les GR)**
- **Bicarbonates**

# Transport du CO<sub>2</sub> dans le sang :

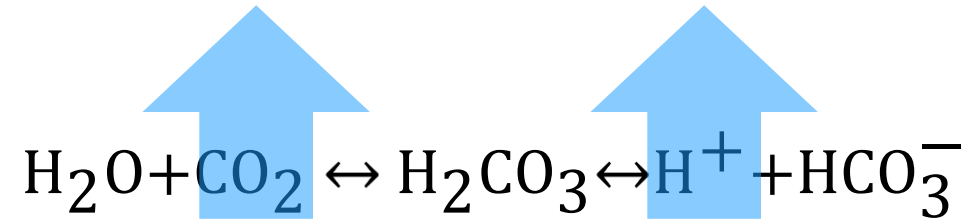
➤ Transporté sous 3 formes:

1. Forme dissoute: 5%
2. Bicarbonates: 90%
3. Lié à l'hémoglobine (composés carbaminés): 5%



# Transport du CO<sub>2</sub> dans le sang : équilibre acido-basique

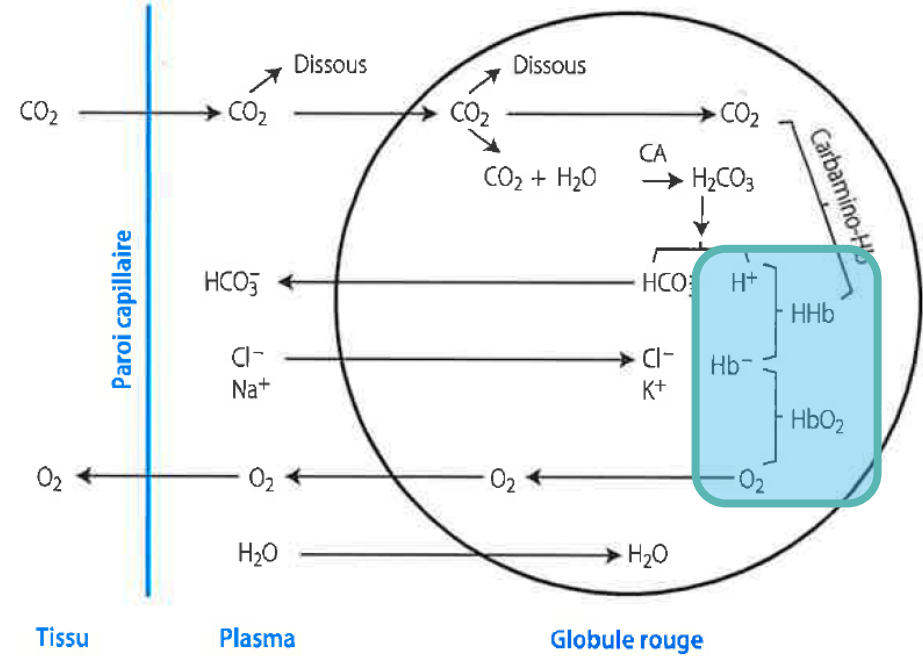
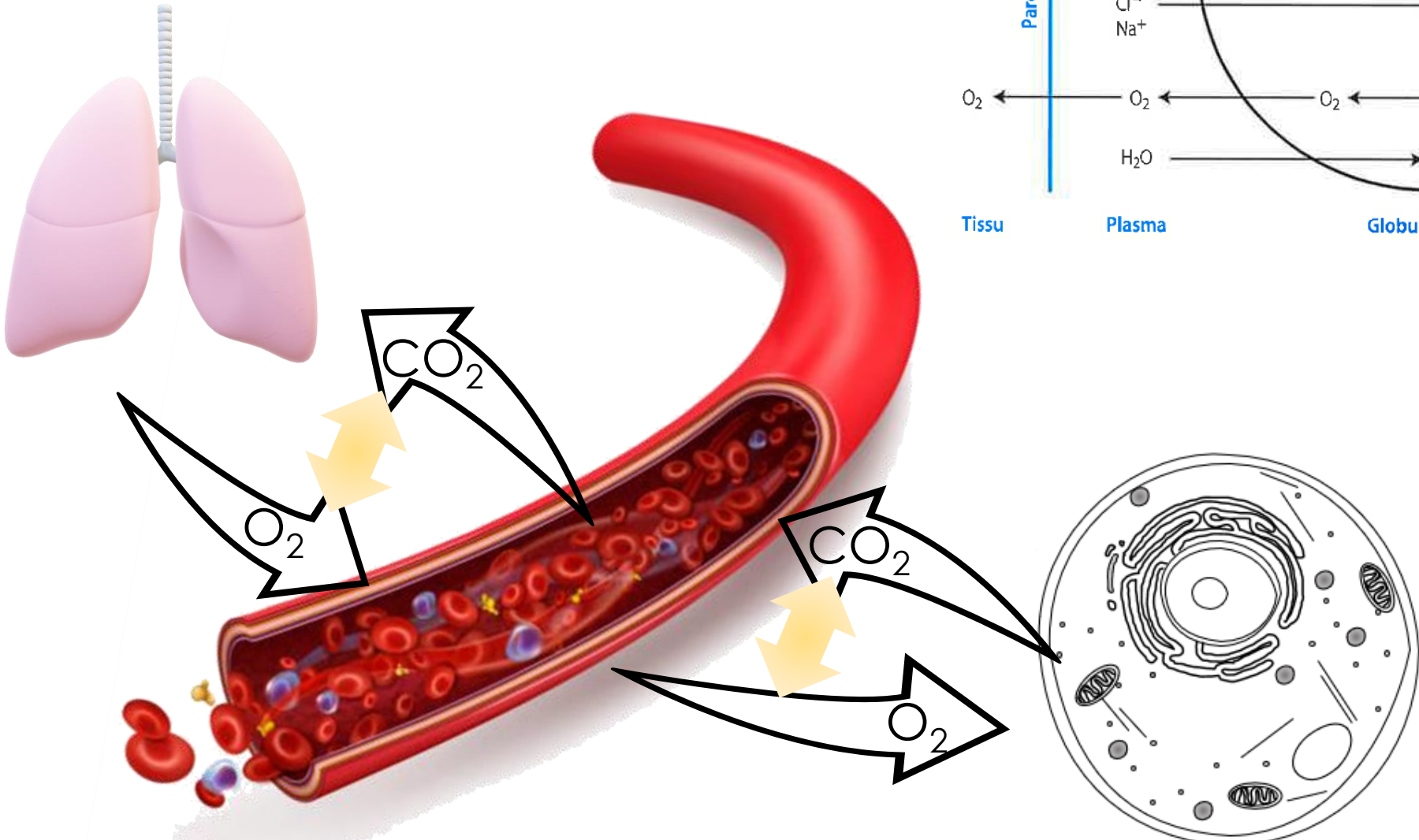
- Système bicarbonate/acide carbonique (équation d'Henderson-Hasselbalch)



Contrôle de la respiration cf. cours suivant par la Dre A. Kharat

$$\text{pH} = \text{pK}(6.1) + \log [\text{HCO}_3^-]/[\text{CO}_2] = -\log [\text{H}^+]$$

# Saturation de l'hémoglobine

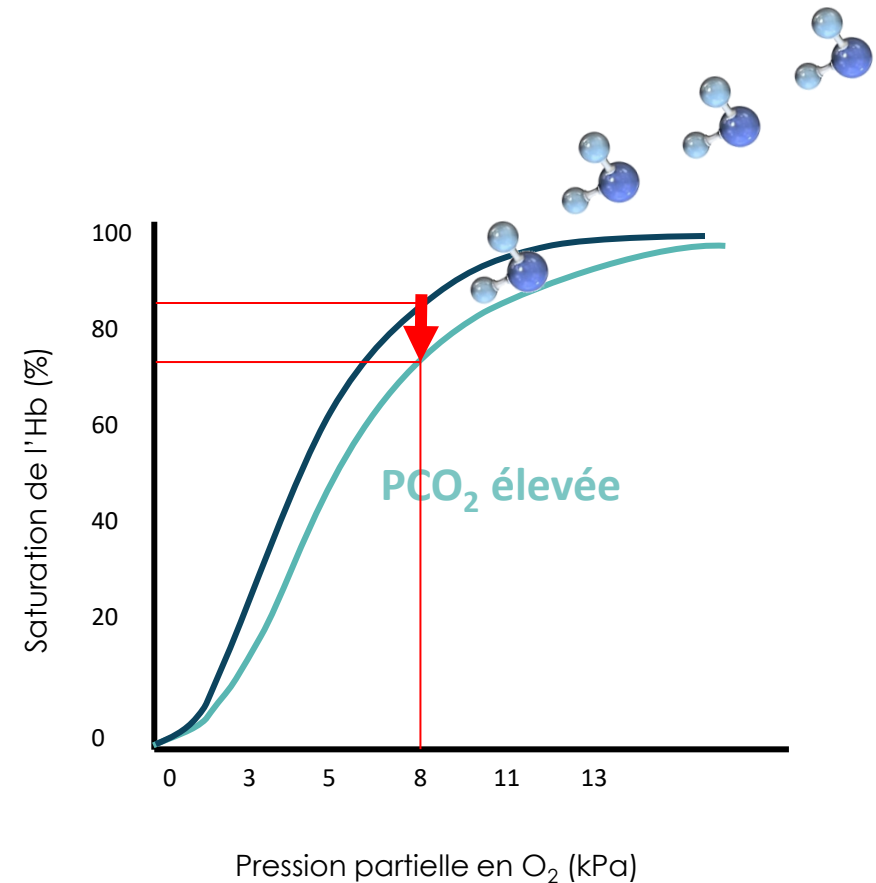
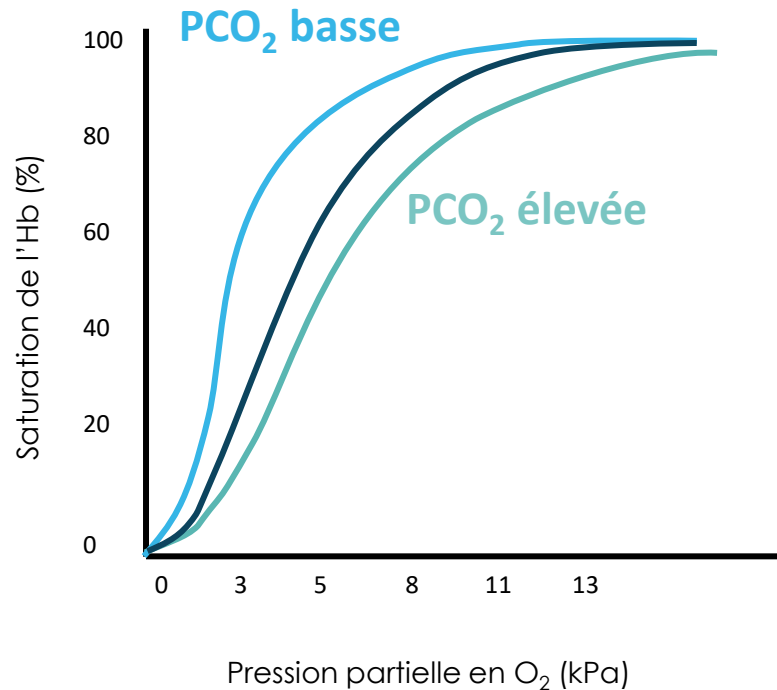


# Saturation de l'hémoglobine: effet Bohr

## Effet Bohr:

- Modification de l'affinité de l'Hb pour l'O<sub>2</sub> par le pH et le CO<sub>2</sub>

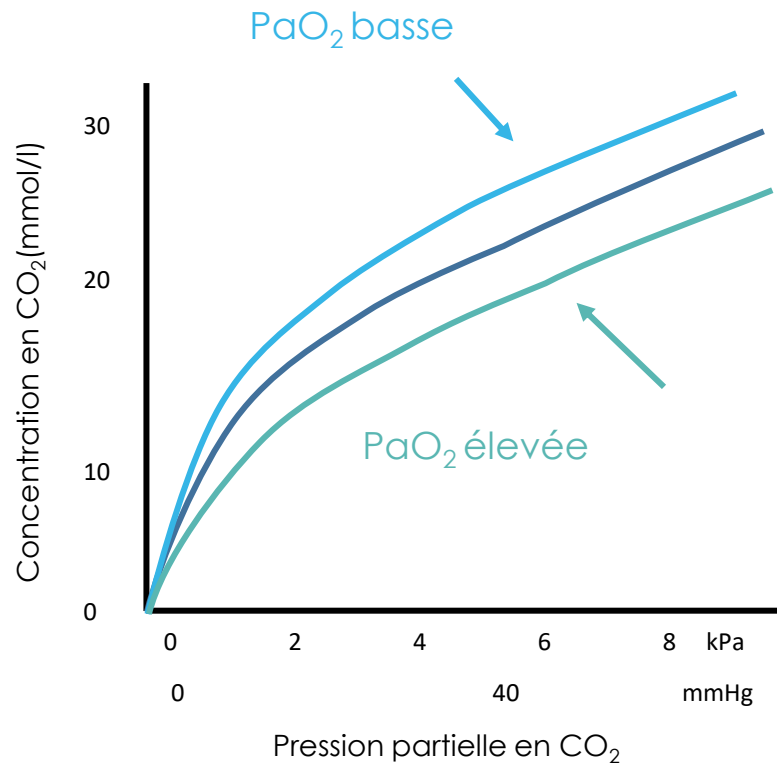
A l'arrivée dans le muscle, qui produit bcp de CO<sub>2</sub> qui diffuse dans le sang -> augmentation de la PCO<sub>2</sub>



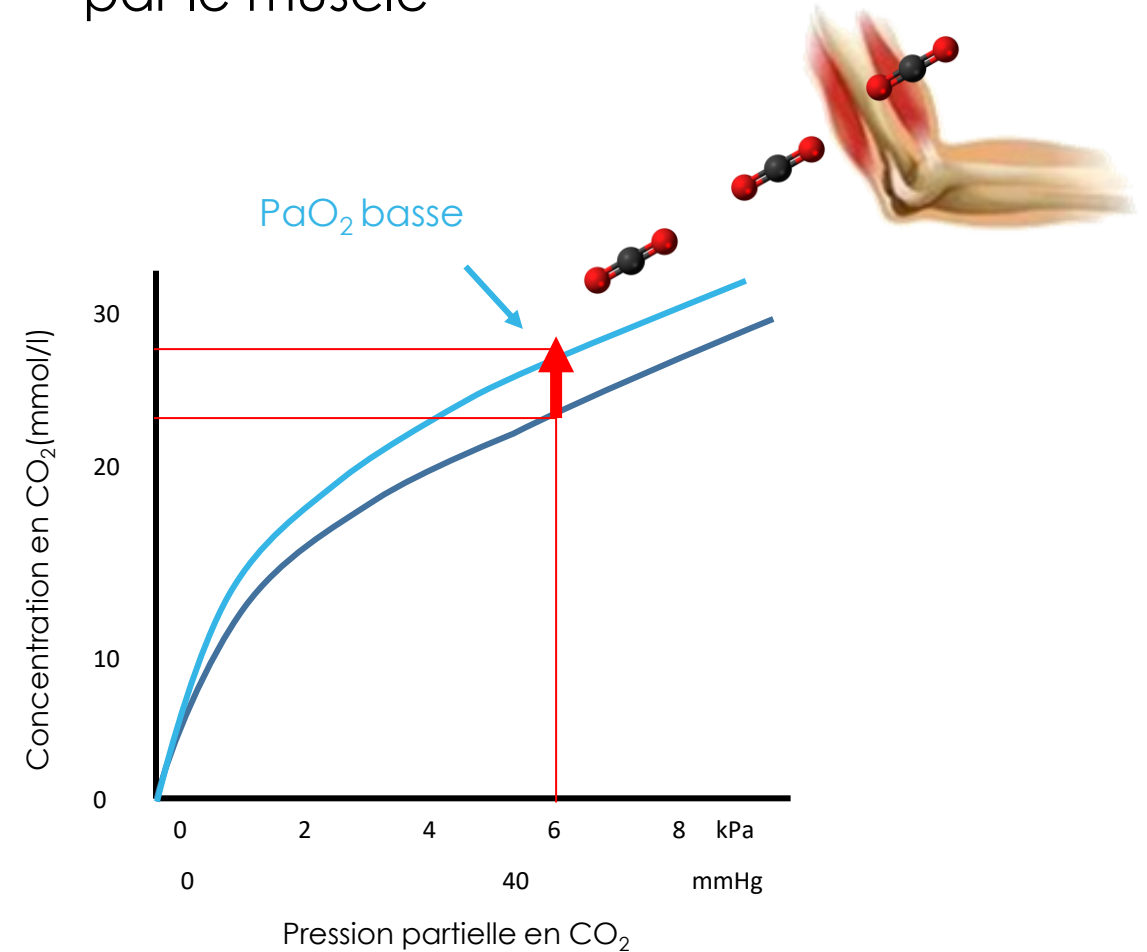
# Saturation de l'hémoglobine: effet Haldane

## Effet Haldane

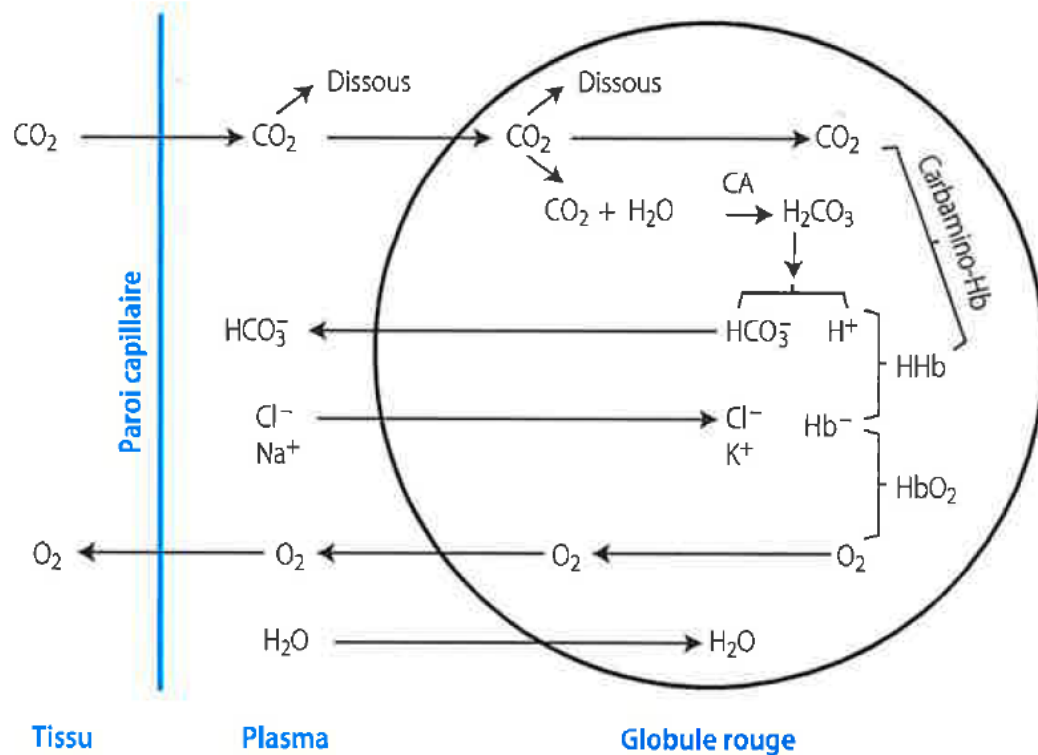
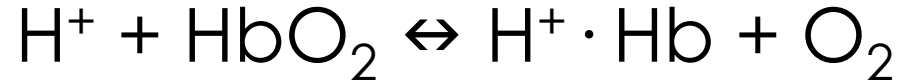
- influence de la  $\text{PaO}_2$  sur la concentration en  $\text{CO}_2$  (donc liée à l'Hb)



## Consommation de l'oxygène par le muscle

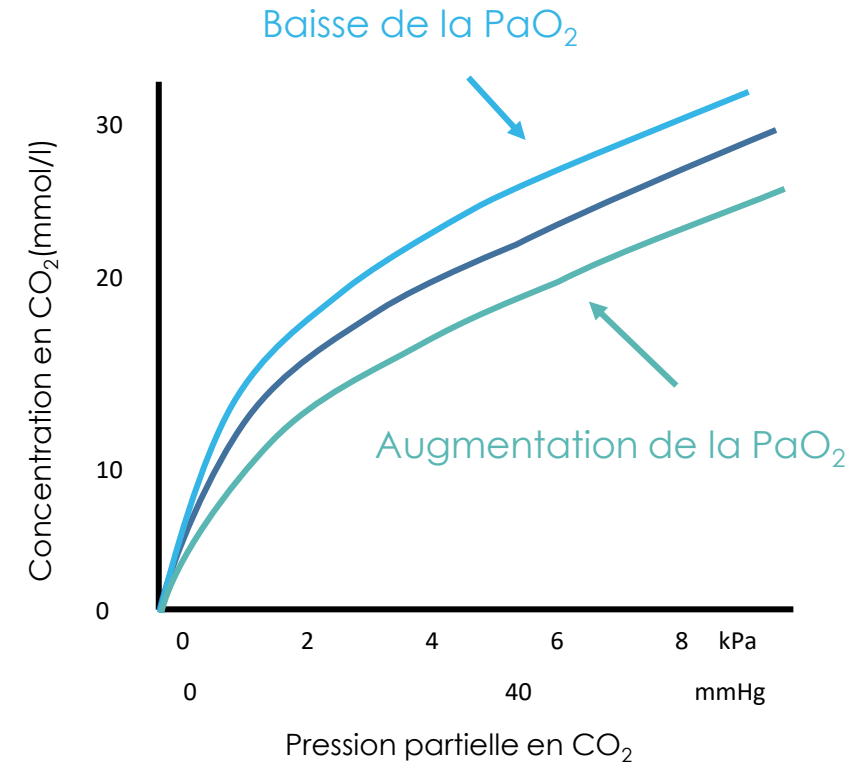


# Saturation de l'hémoglobine



## Effet Haldane

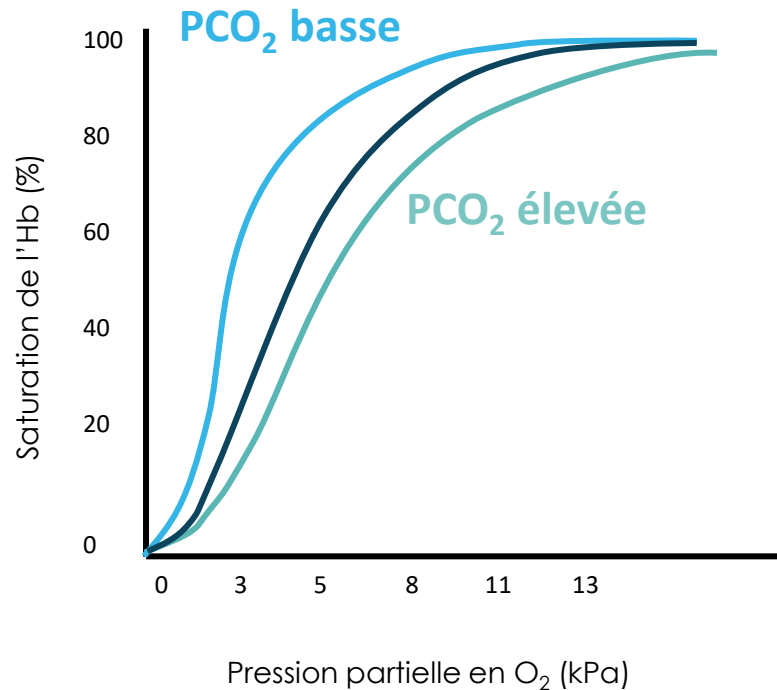
- influence de la PaO<sub>2</sub> sur la concentration en CO<sub>2</sub> (donc liée à l'Hb)



# Saturation de l'hémoglobine

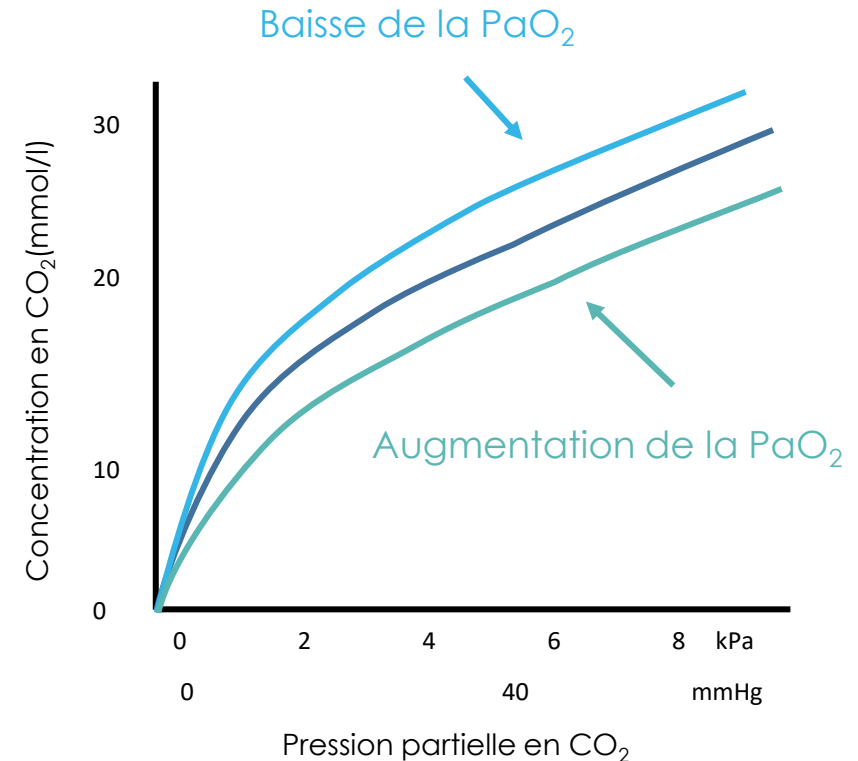
## Effet Bohr:

- Modification de l'affinité de l'Hb pour l'O<sub>2</sub> par le pH et le CO<sub>2</sub>



## Effet Haldane

- influence de la PaO<sub>2</sub> sur la concentration en CO<sub>2</sub> (donc liée à l'Hb)



# Importance des effets Bohr et Haldane

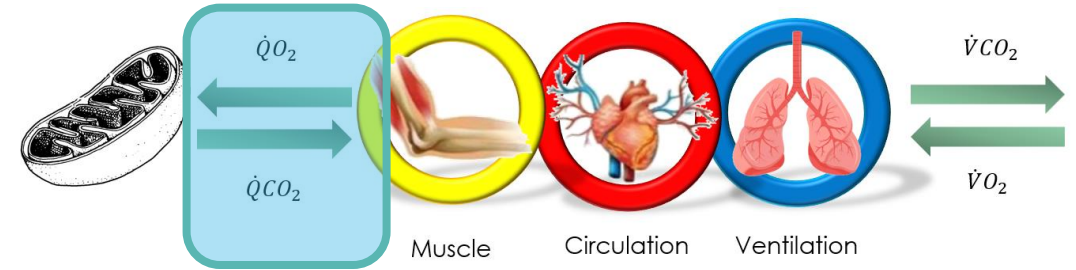
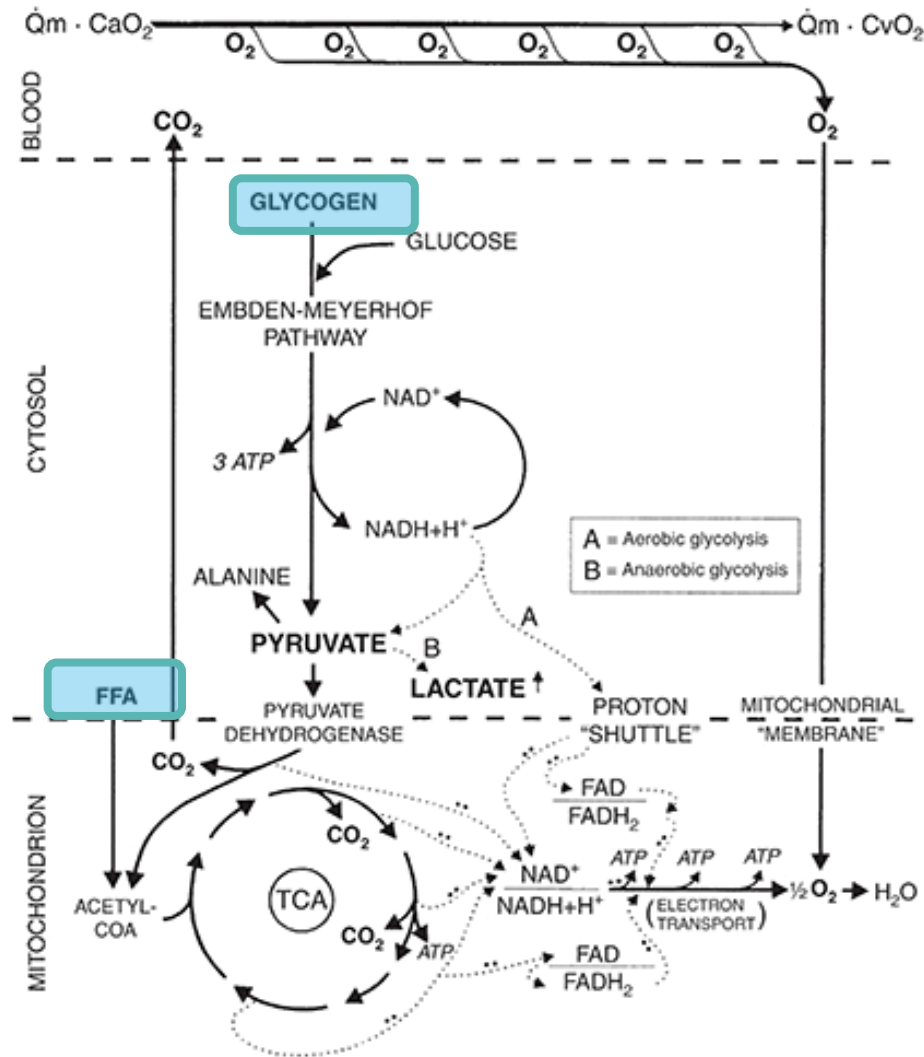
## Au niveau des tissus:

- Effet Bohr: l'élévation de la  $PCO_2$  dans les capillaires tissulaires facilite la dissociation de l'oxygène de l'Hb, il peut diffuser dans les tissus
- Effet Haldane: la chute de la  $PO_2$  consécutive à cette diffusion favorise la liaison chimique du  $CO_2$  sous forme de carbamate et bicarbonate

## Au niveau des poumons:

- Effet Haldane: l'élévation de la  $PO_2$  sanguine facilite la libération du  $CO_2$  qui diffuse vers la phase gazeuse
- Effet Bohr: La chute de  $PCO_2$  sanguine consécutive facilite l'association de l'oxygène avec l'hémoglobine

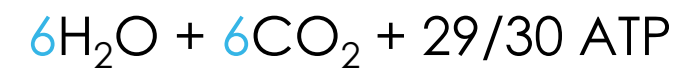
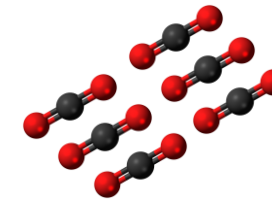
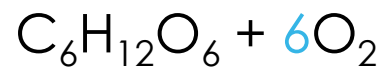
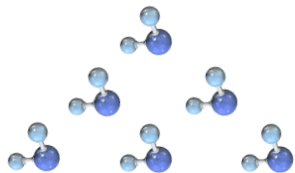
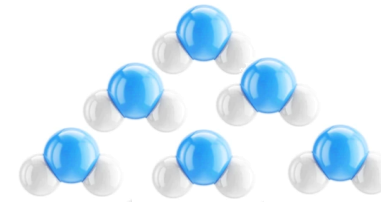
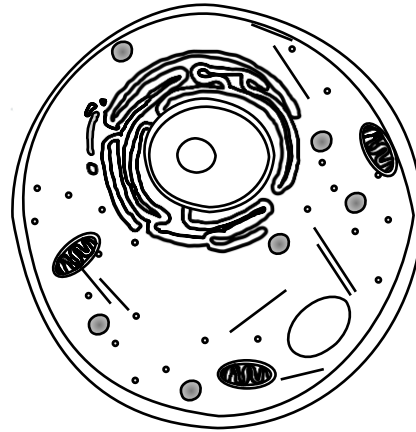
# Substrat de la cellule: quotient respiratoire (QR)



- $\dot{Q}O_2$  = consommation d'oxygène au niveau cellulaire
- $\dot{V}O_2$  = consommation d'oxygène au niveau des poumons
- $\dot{Q}CO_2$  = production de CO<sub>2</sub> au niveau cellulaire
- $\dot{V}CO_2$  = expiration de au niveau des poumons

# Quotient respiratoire

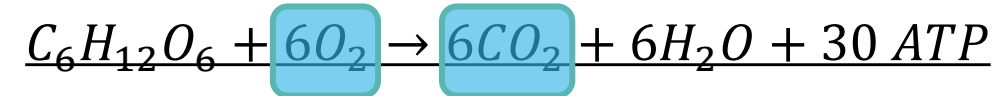
- Représente le rapport entre la quantité de CO<sub>2</sub> produit par oxygène consommé.



$$\text{Quotient respiratoire} \sim \frac{\dot{V}\text{CO}_2}{\dot{V}\text{O}_2} = \frac{6}{6} = 1$$

# Quelle énergie consommée par les tissus

## Oxydation des hydrates de carbone

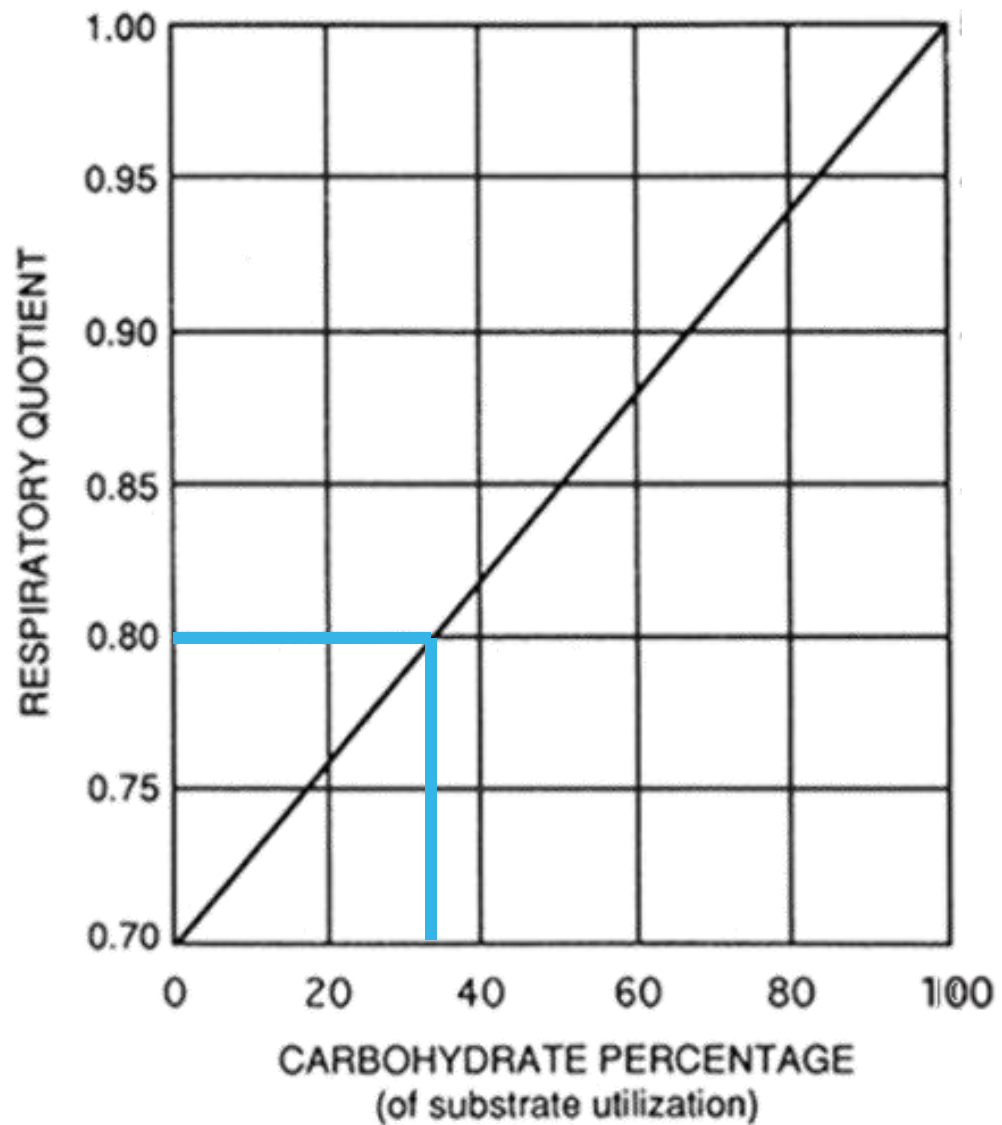


## Oxydation des lipides

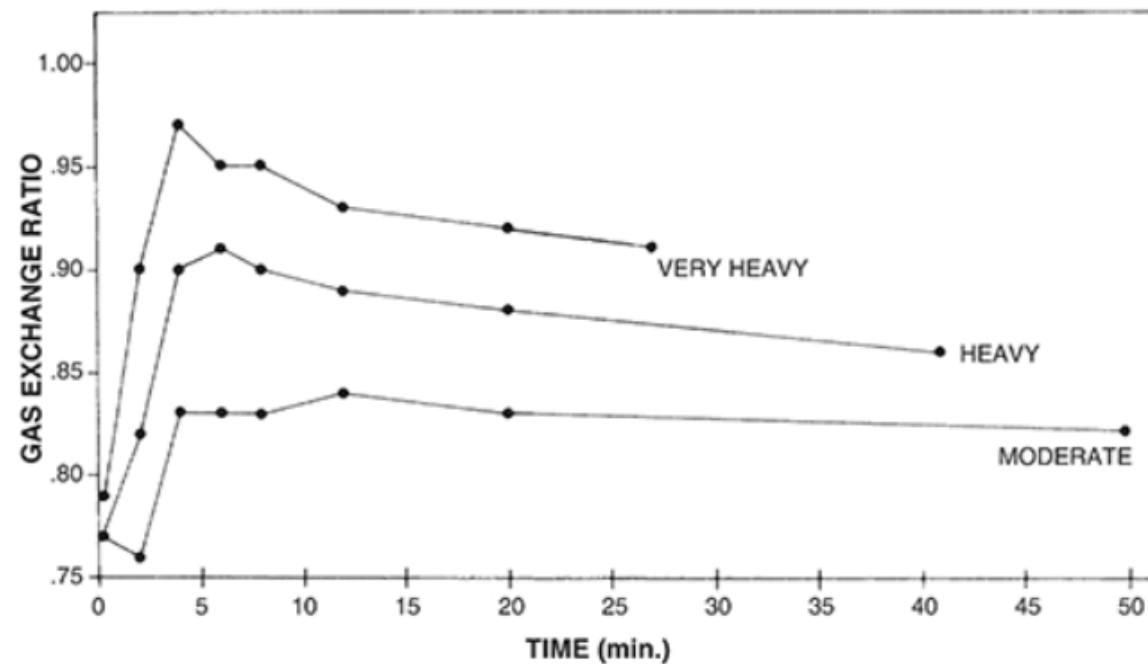


$$\text{Quotient respiratoire} \sim \frac{\dot{V}CO_2}{\dot{V}O_2} = \frac{16}{23} = 0.7$$

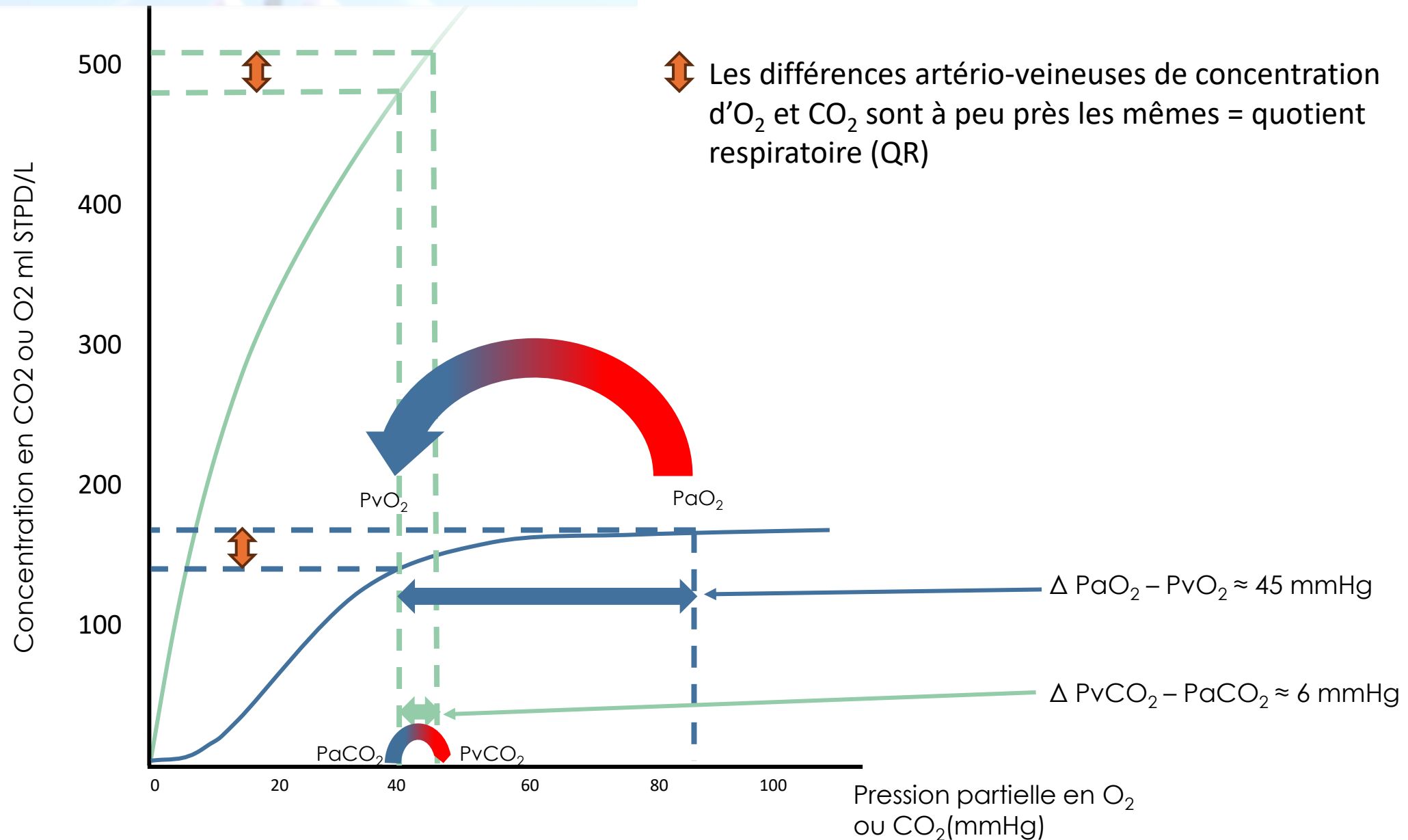
# Relation entre QR et utilisation des hydrates de carbone



Exemple : effort physique

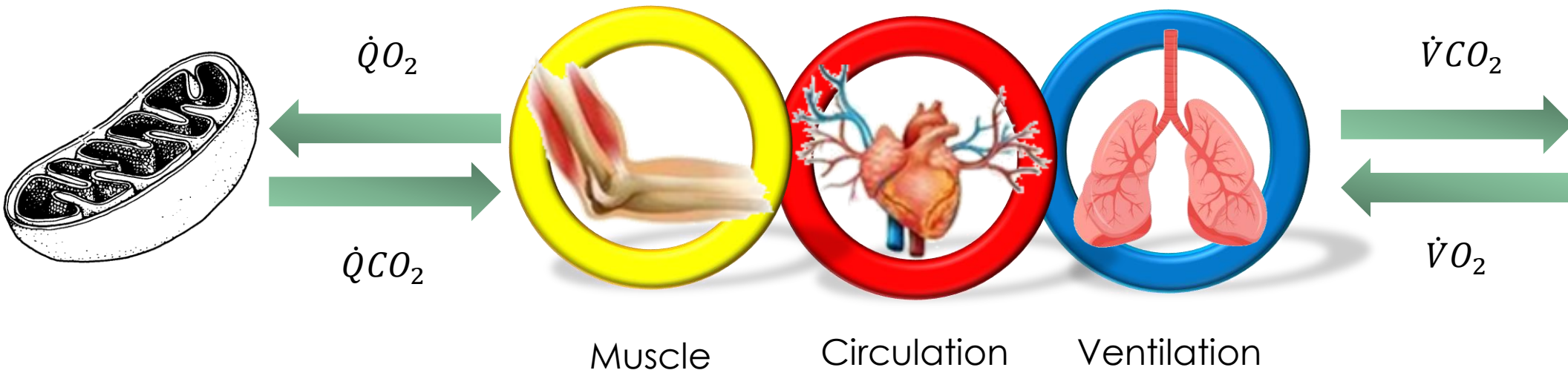


# Comparaison des courbes de dissociation de l'O<sub>2</sub> et du CO<sub>2</sub>



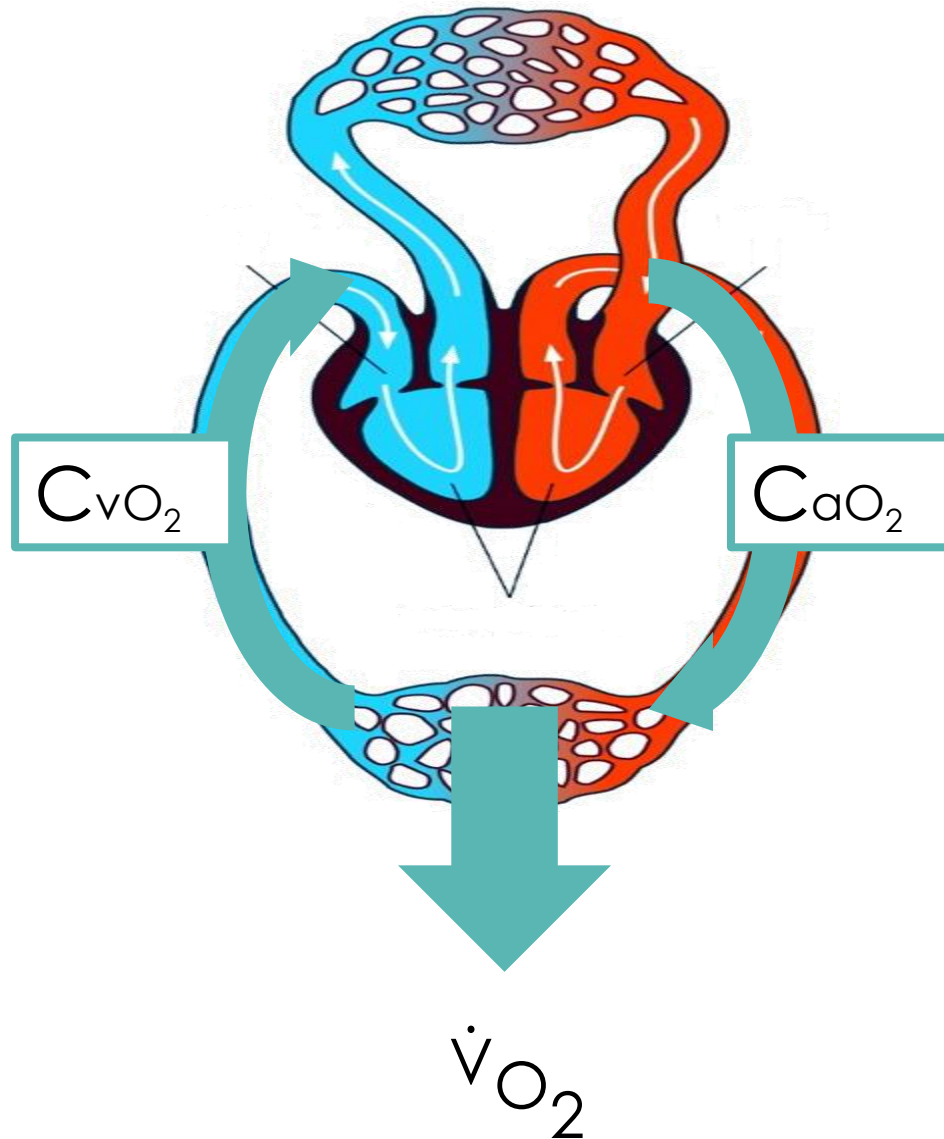
# Consommation de l'oxygène ( $\dot{V}O_2$ )

- Débit cardiaque ( $\dot{Q}$ )
- Quantité d'Hb
- Capacité du poumon à oxygéner le sang



# Consommation d'oxygène

$C_{vO_2}$  = contenu veineux en  $O_2$   
 $C_{aO_2}$  = contenu artériel en  $O_2$



Principe de Fick (cf. cours Dr Gex)

$$\dot{V}_{O_2} = \dot{Q} \cdot (C_{aO_2} - C_{vO_2})$$

# Consommation d'oxygène

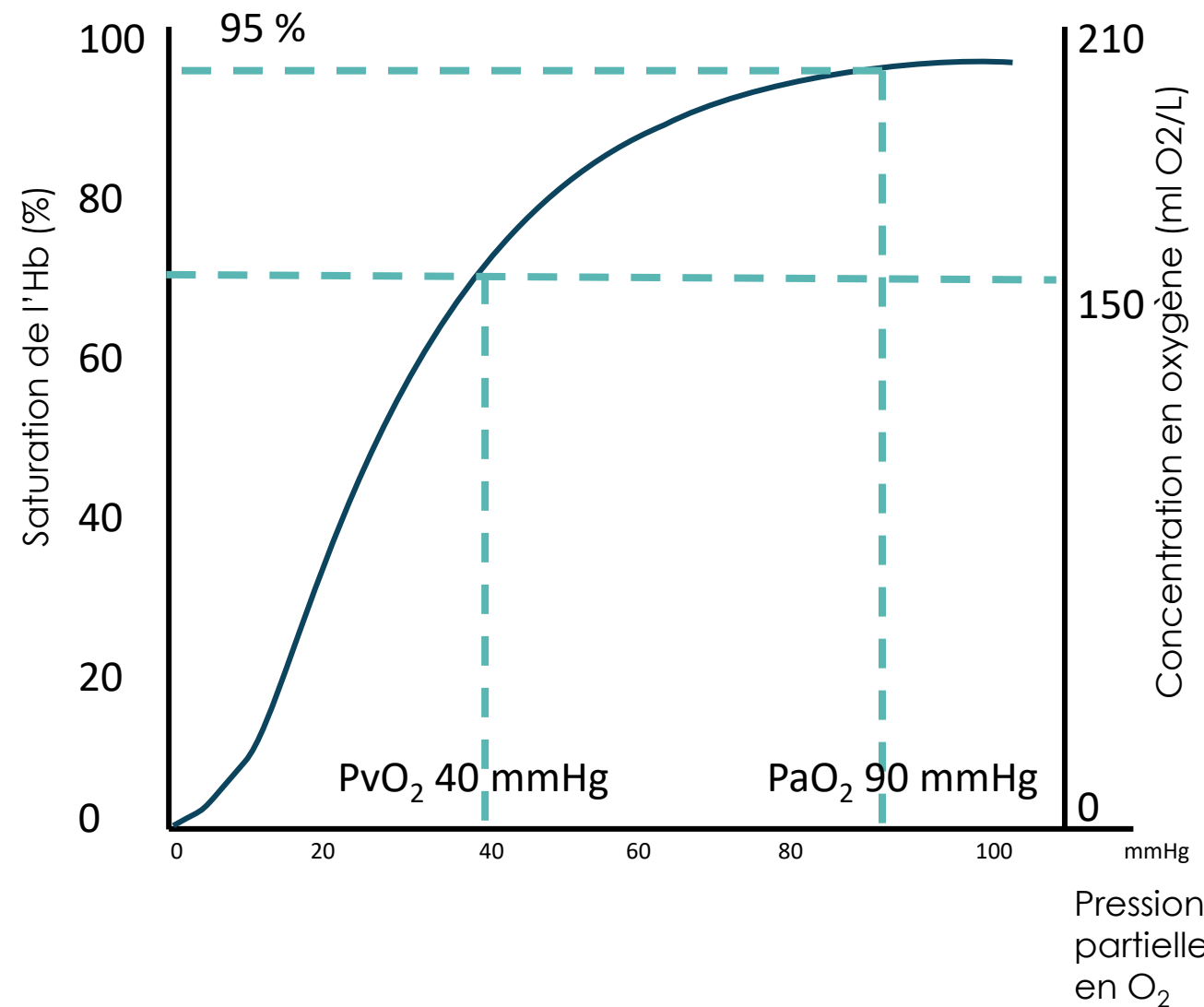
$$\dot{V}_{O_2} = \dot{Q} \cdot (C_{aO_2} - C_{vO_2})$$

- Hb 150 g/L
- $C_{aO_2} = 210$  ml O<sub>2</sub>/L
- $C_{vO_2} = 150$  ml d'O<sub>2</sub>/L

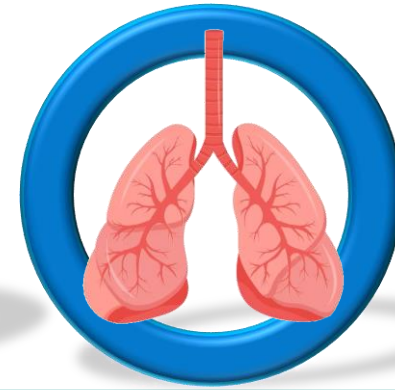
$$(C_{aO_2} - C_{vO_2}) = 60 \text{ ml d'O}_2/\text{L}$$

extraction  $\approx 25\%$

$$\dot{V}_{O_2} = 5 \text{ L/min} \cdot 60 \text{ ml d'O}_2/\text{L} = 300 \text{ ml/min}$$

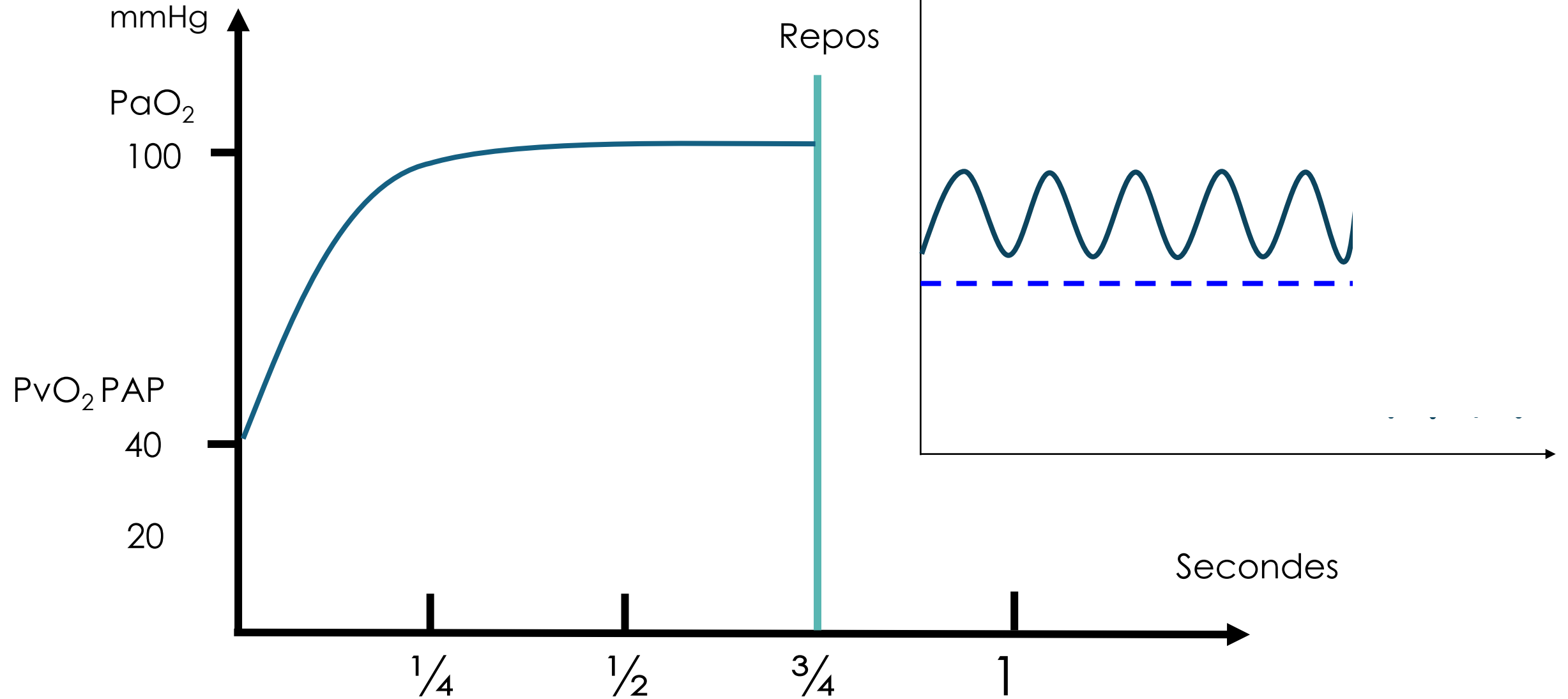


# Déterminants de l'apport de l'O<sub>2</sub> dans le corps à l'effort

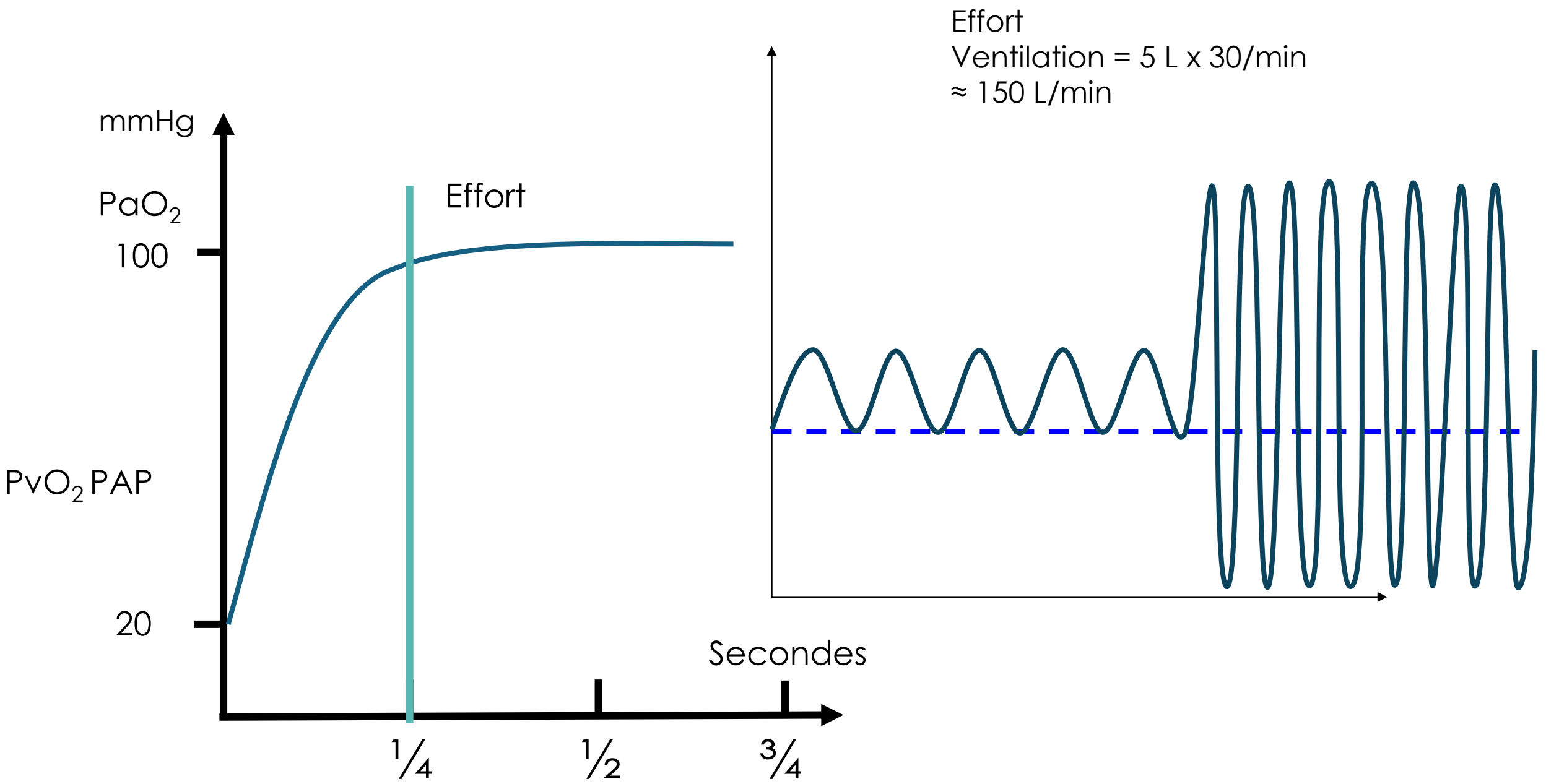


	Muscle	Circulation	Ventilation $\dot{V}_A + \dot{V}_D = \dot{V}_E$
Réponse physiologique	$\uparrow \dot{Q}O_2$ $\uparrow \dot{Q}CO_2$	$\uparrow V_{ej}$ $\uparrow Fc$ Dilatation des vaisseaux	$\uparrow V_T$ $\uparrow F_{resp}$ Recrutement des alvéoles
Résultante	extraction O <sub>2</sub> de 25% → 90%	$\uparrow \dot{Q} \times 4-5$	$\uparrow VE$ de 20-25x

# Vitesse de diffusion de l'O<sub>2</sub>



# Vitesse de diffusion de l'O<sub>2</sub>



# Messages clés

- Dans le sang, l'oxygène est transporté principalement par l'hémoglobine, mais aussi sous forme dissoute
- La quantité d'oxygène dissoute dans le sang est faible, mais importante pour les échanges gazeux
- L'hémoglobine est un transporteur réversible et à affinité variable des gaz.
- L'apport d'oxygène dans le corps est influencé par le débit cardiaque et la concentration sanguine en  $O_2$
- Le poumon par les échanges gazeux et la mécanique ventilatoire, n'est pas le facteur limitant la capacité d'effort