

LA RESPIRATION

I) INTRODUCTION :

• La respiration pulmonaire a pour objectif:

- l'oxygénation des tissus
- l'élimination du gaz carbonique
- le maintien de la stabilité du pH sanguin.

• Elle se déroule en différentes étapes

- ventilation= action cyclique d'amener l'air de l'extérieur et de l'expulser
- diffusion de l'oxygène vers le sang et du CO_2 vers l'alvéole.
- Transport des deux gaz dans le sang, vers et depuis les tissus
- Libération de l'oxygène dans les tissus et capture de CO_2

II) RAPPELS ANATOMIQUES :

Les voies aériennes:

1. Nez et bouche:

- entrée de l'air

2. Pharynx et larynx

- Ouverture et fermeture des tubes, respiratoire et digestif

3. Trachée (≈20 mm de diamètre)

- conduit l'air aux bronches

4. Deux bronches (≈12 mm de diamètre)

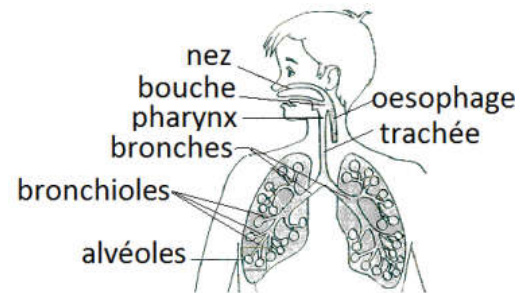
- conduisent l'air aux bronchioles, dans le poumon

5. Bronchioles, tubes ramifiés (≈0,5 mm de diamètre)

- conduisent l'air aux alvéoles + quelques sacs alvéolaires

6. Alvéoles, poches d'air d'environ 0,2 mm de diamètre

- lieu des échanges gazeux avec le sang



III) LA VENTILATION :

1) Principe physique de la ventilation :

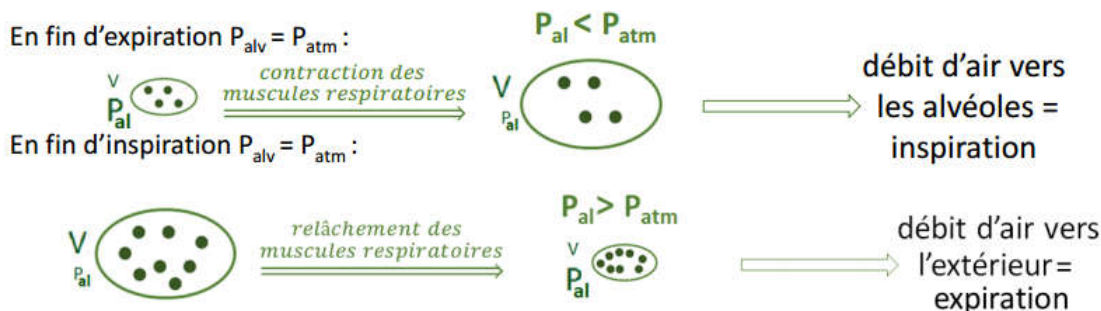
• Elle permet la pénétration de l'air dans les poumons

• Phénomène cyclique, un cycle = inspiration + expiration (en moyenne 16/min)

• Le poumon = pompe → 6l d'air/min au repos

• Basée sur la loi de Boyle-Mariotte: à température constante $P \cdot V = \text{cte}$

Si le volume d'un gaz varie, sa pression totale varie de façon inversement proportionnelle



2) Étapes de la ventilation (mécanismes physiques) :

1. Contraction des muscles intercostaux qui étirent la cage thoracique et du diaphragme qui s'abaisse

2. Augmentation du volume thoracique

⇒ augmentation du volume des alvéoles

⇒ baisse de pression de l'air alvéolaire = dépression ⇒ gradient de pression.

3. Quand $P_{\text{alv}} < P_{\text{atm}}$ ⇒ appel d'air: l'air pénètre dans le poumon, par un mouvement de convection l'inspiration, en fin d'inspiration $P_{\text{alv}} = P_{\text{atm}}$

4. Décontraction des muscles respiratoires ⇒ diminution du volume alvéolaire .

5. Quand $P_{\text{alv}} > P_{\text{atm}}$ l'air est expulsé des alvéoles : l'expiration, en fin d'expiration $P_{\text{alv}} = P_{\text{atm}}$

- L'inspiration, phénomène **actif** (contraction des muscles) doit faire face
 - à la **résistance due aux frottements des tissus**
 - à l'**élasticité du poumon et de la cage thoracique**
 - à la **résistance au passage de l'air dans les voies aériennes**
- L'expiration est un phénomène **passif** (arrêt de la contraction musculaire) possible grâce à l'élasticité des poumons .
- Résultat: établissement de débits aériens, inspiratoire et expiratoire

3) Compliance ou distensibilité pulmonaire :

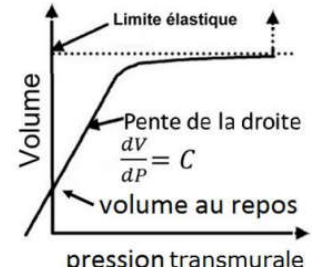
C'est l'aptitude d'une cavité organique à changer de volume sous l'influence d'une variation de pression (ici il s'agit de la pression transmurale du poumon)

Elle correspond au rapport de la variation de volume à la variation de pression

-proportionnalité entre variation du volume et pression: $dV/dP = C$

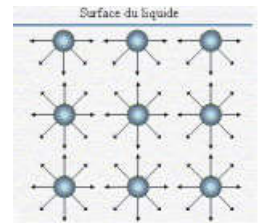
-C \Rightarrow compliance du poumon

-la valeur de C traduit l'aptitude du poumon à se dilater: plus le poumon est distensible (facile à étirer), plus C sera grand



4) La tension superficielle, rappels :

- phénomène de surface qui concerne toutes les surfaces de séparation entre deux phases non miscibles
- Exemple de l'eau en contact avec un gaz: les molécules d'eau sont soumises à des forces d'attraction intermoléculaires
 - molécules à l'intérieur: les forces sont dirigées dans toutes les directions, la résultante des attractions électrostatiques nulle
 - molécules à la surface: attractions entre molécules voisines et au-dessous, la résultante des attractions électrostatiques, non nulle, est dirigée vers l'intérieur du liquide
 - les molécules à l'interface sont tassées et jouent le rôle d'une membrane élastique tendue
 - l'énergie E_s à l'interface air/liquide dépend de:
 - forces d'interaction entre molécules (à l'interface et à l'intérieur)
 - l'épaisseur de la couche à l'interface (diamètre des molécules)
 - S surface de contact entre les deux milieux non miscibles



$E_s = T S$ *T est la tension superficielle (j/m²)*

-Plus $T \nearrow$ plus $S \searrow \Rightarrow$ l'effet de T est de minimiser la surface de contact

-Quand la surface de contact est une sphère air dans eau T tend à rendre la sphère de plus en plus petite.

5) Tension superficielle et rétraction élastique du poumon :

- Les cellules pulmonaires qui tapissent les alvéoles \approx couche d'eau
- l'air inspiré au contact des cellules crée une tension superficielle
- Cette tension superficielle a tendance à collapser (fermer) l'alvéole

\Rightarrow **réduire la surface d'échanges des gaz respiratoires**

- La paroi alvéolaire subit deux forces opposées:

- Une pression de distension P
- une pression de rétraction T

- La loi de Laplace:

- quand $2T/r = p$: il y a un équilibre \rightarrow l'alvéole reste ouverte et stable

- Si $2T/r$ devient $> p$: il y a rétraction de l'alvéole, cette situation est évitée grâce l'existence de surfactant dans les alvéoles.

6) Tension superficielle et surfactant :

- le surfactant est un agent tensio-actif qui tapisse les alvéoles :

- Il abaisse la tension superficielle donc réduit la rétraction alvéolaire

- Il agit de façon à maintenir $2T/r = p$ (c.à.d. $P = p$ c.à.d. alvéole stable)

- Il est sécrété de façon \pm importante en fonction du rayon de l'alvéole

- Le surfactant sert à :

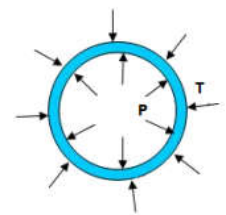
- limiter les dépenses d'énergie que nécessite l'expansion des alvéoles lors de l'inspiration

- éviter que les alvéoles se ferment lors de l'expiration

- homogénéiser la pression dans les alvéoles de différentes tailles

- dans le poumon, les alvéoles ne sont pas de même taille

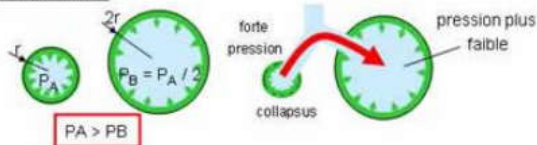
- P est élevé dans les petits alvéoles, ils ont tendance à se vider dans les grands alvéoles et à se



rétracter

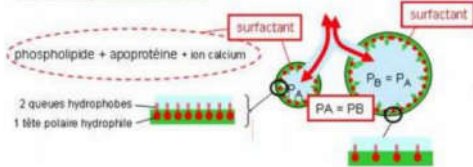
- **Résultat:** alvéoles distendus + alvéoles minuscules

Manque de surfactant



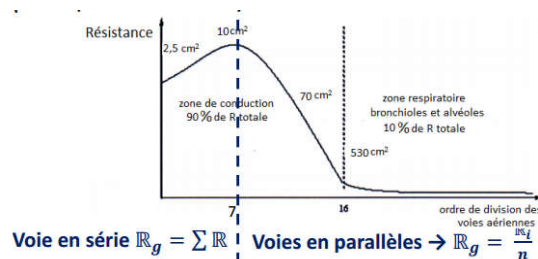
- Le surfactant est sécrété dans les petits alvéoles plus que dans les gros
⇒ équilibration des Pressions dans les alvéoles de différentes tailles

Surfactant : pressions identiques



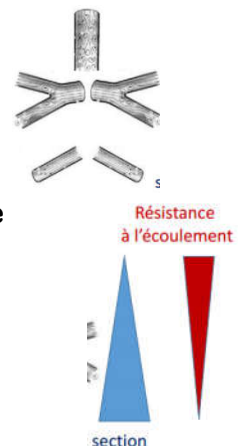
7) Résistance des voies aériennes à l'écoulement :

- L'écoulement de l'air dans les voies aériennes = écoulement fluide visqueux
- La nature de l'écoulement est différente selon les niveaux
 - extra-thoraciques (nez + bouche) /// -Trachée et grosses bronches
>>>>>> écoulement turbulent
 - Des bronchioles aux vacuoles : écoulement laminaire
 - Entre les deux c.à.d. la majorité des conduits: écoulement transitionnel
- Mais on considère que l'écoulement est globalement laminaire → loi de Poiseuille
Le débit s'exprime selon la résistance que l'air rencontre dans les voies aériennes
 $D = P IR = P \pi R^4 / 8 \eta l$ or,
- η = cte par contre le rayon varie de la trachée aux bronchioles



Elle est influencée par :

- la section du conduit : plus le conduit est étroit plus la résistance est élevée
 - trachée + bronches, canalisations en série : $S = 10 \text{ cm}^2$: résistance élevée (40 %)
 - zone de transition, canalisations en parallèle: $S = 70 \text{ cm}^2$: résistance diminuée
 - zone respiratoire, canalisations en parallèle: $S = 530 \text{ cm}^2$: résistance négligeable >>>>>10%
- le débit de l'air respiré: toute \nearrow de la vitesse de respiration ⇒ une \nearrow de la résistance (vitesse contrôlés par l'activité des muscles respiratoires)
- la nature du gaz : viscosité et densité. gaz légers ⇒ la résistance \searrow



VI) DIFFUSION ALVEOLO-CAPILLAIRE :

1) Rappels sur les pressions partielles :

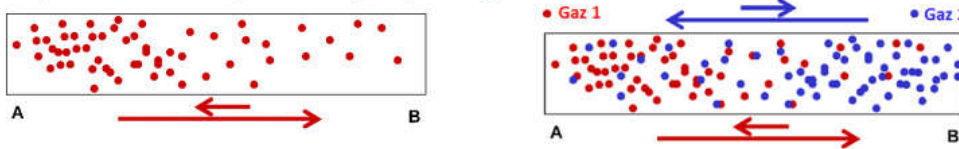
- Mélange: $\text{gaz}_1, \text{gaz}_2, \dots, \text{gaz}_n \Rightarrow P_{\text{tot}} = \sum P_i = P_1 + P_2 + \dots + P_n$
- Pression partielle P_i d'un gaz ⇒ sa contribution à la pression totale
 - P_i dépend de la proportion du gaz i dans le mélange gazeux: fraction molaire
- Fraction molaire $x_i = n_i / n$ n_i : nombre de mole du gaz i / n : nombre total de mole du mélange
Ex. un mélange est composé de 2mmol de CO_2 et 3mmol de O_2
alors $x_{\text{O}_2} = 3 / 5 = 0,6$ on peut dire aussi que O_2 représente 60 % du mélange

$$P_i = x_i \cdot P_{\text{tot}}$$

Ex. si $P_{\text{tot}} = 2 \text{ atm}$ alors $P_{\text{O}_2} = 0,6 \cdot 2 = 1,2 \text{ atm}$
ou $P_{\text{O}_2} = 60\% \cdot 2 = 1,2 \text{ atm}$

2) Rappels sur la diffusion :

- Dans un mélange si la concentration d'une molécule n'est pas la même en tous points du milieu
⇒ tendance à équilibrer les concentrations
- déplacement spontané des molécules vers le milieu le moins concentré
- selon la **Loi de Fick** : $dq = D S dcdx .dt$
- Le déplacement se poursuit jusqu'à égalisation des concentrations dans le milieu



- chaque type de molécule se déplace dans le sens qui privilégie l'équilibration de sa concentration, indépendamment des autres molécules
- Loi de Fick : $dq = D S dcdx .dt$
 dq = quantité de matière qui diffuse
 D = coefficient de diffusion (η , r , T)
 S = section traversée
 dx = distance traversée
signe (-) = déplacement du milieu le plus concentré vers le moins concentré
 $dcdx$ = gradient de concentration
- diffusion en phase gazeuse à travers une membrane:

$$dq = D S dP/dx .dt \text{ et } \Phi_{1 \rightarrow 2} = D .S.dP/e$$

3) Les gaz dans l'interface sang-air alvéolaire :

L'air inspiré:

- air atmosphérique au niveau de la mer, à 25°
- $P_{\text{environnante}} = 1 \text{ atm} = 760 \text{ mmHg} = 10^5 \text{ Pa} = 1 \text{ bar}$
- Composition 78% de N_2 , 20% de O_2 et CO_2 0,02% (très peu) (+ d'autres gaz)
 $PO_2 = 20\% \cdot 760 = 152 \text{ mmHg}$
 $PCO_2 = 0,02\% \cdot 760 = 0,15 \text{ mmHg}$
l'air dans l'alvéolaire est composé de : $O_2 + N_2 + CO_2 + H_2O$
- air provenant d'une bouteille de gaz pour plongée sous-marine
- $P_{\text{environnante}} =$
- $N_2 + O_2 + CO_2$
- $He + O_2 + CO_2$

L'air dans l'alvéole pulmonaire:

Dans l'alvéole l'air inspiré est:

- Réchauffé à 37°
- humidifié ⇒ Saturé en vapeur d'eau, à 37° $P_{\text{vapeur}} = 47 \text{ mmHg}$ dans l'alvéole l'air est composé de:
 $O_2 + N_2 + CO_2 + H_2O$ (en vapeur)
(Gaz inspirés)

$$P_{\text{tot alvéole}} = P_{\text{gaz inspirés}} + P_{\text{vapeur d'eau}} = P_{\text{environnante}}$$

$$- P_i = x_i (P_{\text{environnante}} - P_{\text{vapeur d'eau}})$$

$$- \text{Soit: } P_i = x_i (P_{\text{environnante}} - 47)$$

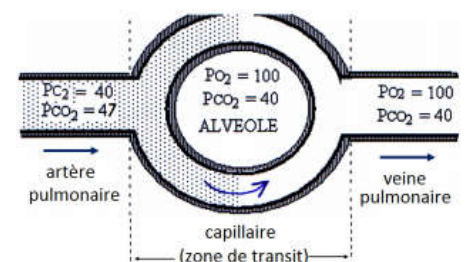
- Composition 80,4% de N_2 , 14% de O_2 et CO_2 5,6% (>air, il provient du métabolisme)

- si $P_{\text{environnante}} = P_{\text{atm}} = 760 \text{ mmHg}$ alors $PO_2 = 100 \text{ mmHg}$, $PCO_2 = 40 \text{ mmHg}$

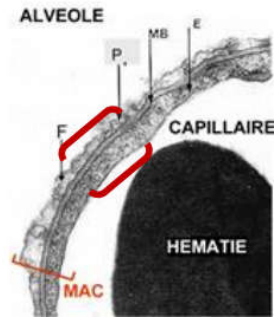
(voir Application page 22 Diapo)

4) Les échanges alvéolo-capillaires (hématose) :

- se font par simple diffusion pour O_2 et CO_2 selon la loi de Fick.
- les gaz diffusent en fonction du gradient de pression.
- la diffusion concerne uniquement la part dissoute de chaque gaz qui est la seule à exercer une pression (forme combinée pas de pression)
- la diffusion se poursuit jusqu'à égalisation des pression dans les deux phases
- Le transit au voisinage de l'alvéole dure 0,8s
- la majorité des échanges se fait en 0,3 à 0,4s



- La diffusion ou quantité de gaz qui diffuse est influencée par:
 - épaisseur de la membrane alvéolo-capillaire MAC (0,3 à 0,5 μm)
 - si l'épaisseur de la membrane \nearrow le débit des gaz \searrow
 - S: Surface de diffusion: 80 à 100m² (Surface des parois alvéolaires)
 - nombre et ouverture des alvéoles (rôle du surfactant)
 - ex. amputation d'une partie du poumon ou tumeur \Rightarrow S \searrow



- Les pressions partielles:
 - sang veineux alvéolaire: $\text{PO}_2 = 40 \text{ mm Hg}$, $\text{PCO}_2 = 47 \text{ mm Hg}$
 - air alvéolaire (niveau de mer): $\text{PO}_2 = 100 \text{ mm Hg}$, $\text{PCO}_2 = 40 \text{ mm Hg}$
 - gradients de pression: $\text{O}_2 = 4 \cdot 10^6 \text{ kPa/m}$ et $\text{CO}_2 = 0,5 \cdot 10^6 \text{ kPa/m}$
- La diffusion ou quantité de gaz qui diffuse est influencée par:
 - Si: coefficient de solubilité: $\text{SCO}_2 = 0,48$; $\text{SO}_2 = 0,0235 \text{ (ml de gaz/ml de sang/atm)}$
 - CO_2 diffuse avec de faibles PCO_2 alors que l' O_2 nécessite des pressions plus élevées
 - $d\text{PO}_2 > d\text{PCO}_2$
 - mais $\text{SCO}_2 > \text{SO}_2 \rightarrow$ équilibre atteint en même temps
- La durée d'exposition ou temps de passage d'un globule rouge devant les alvéoles est de 0,8s (l'échange nécessite 0,3-0,4s)
- en cas d'effort physique modéré le débit \nearrow mais le temps reste suffisant pour effectuer des échanges.

V) TRANSPORT DES GAZ PAR LE SANG :

1) Généralités :

- Le transport se fait dans le plasma ou dans les globules rouges
- Aussi bien O_2 que le CO_2 , ils se trouvent dans le sang sous deux formes:
 - Forme dissoute(libre) \rightarrow participe à la pression partielle
 - \rightarrow peut diffuser à travers une membrane
 - Forme combinée \rightarrow à un transporteur ou à une molécule(réaction chimique)
 - \rightarrow ne participe pas à la pression partielle
 - \rightarrow en équilibre avec la forme libre

2) Gaz dissous dans un liquide :

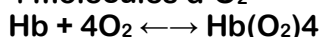
- La quantité de gaz V_i , sous forme dissoute, dans un liquide est
 - \rightarrow proportionnelle à la pression partielle P_i
 - \rightarrow proportionnelle à si, son coefficient de solubilité dans un liquide
 - \rightarrow Selon la loi de Henry $V_i = s_i \cdot P_i$
 - \rightarrow à 37°C dans le sang total, $s_{\text{O}_2} = 0.0235 \text{ ml/ml/atm}$; $s_{\text{CO}_2} = 0.48 \text{ ml/ml/atm}$
- Exemple O_2 dans le sang veineux $\text{PO}_2 = 40 \text{ mm Hg}$

$$V_{\text{O}_2} = 0.0235 \cdot 40/760 = 1.2 \cdot 10^{-3} \text{ ml de } \text{O}_2 / \text{ml de sang}$$
- Dans le sang artériel $\text{PO}_2 = 100 \text{ mm Hg}$,

$$V_{\text{O}_2} = 0.0235 \cdot 100/760 = 3 \cdot 10^{-3} \text{ ml de } \text{O}_2 / \text{ml de sang}$$

3) Transport de l'oxygène dans le sang :

- La forme dissoute représente 1% de l'oxygène sanguin
- Petite quantité : 0,3 ml/100ml, mais capitale car échanges
- La forme combinée à l'hémoglobine représente 99% de l'oxygène sanguin
- l'association de O_2 dissous à l'Hb est rapide et réversible
- la forme combinée constitue une réserve d' O_2
- une molécule d'Hb comporte 4 sites de fixation (hème avec Fe^{2+}) donc peut fixer un maximum de 4 molécules d' O_2



ou globalement $\text{O}_2 + \text{Hb} \longleftrightarrow \text{HbO}_2$ (oxyhémoglobine)

- Quantité totale d' O_2 dans le sang = $[\text{O}_2 \text{ lié à Hb}] + [\text{O}_2 \text{ dissous}]$

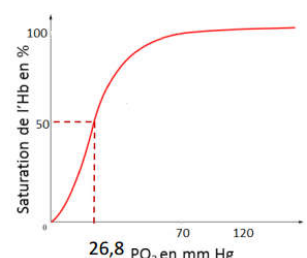
-volume max d' O_2 que peut fixer 1g d'Hb = 1,39ml O_2 / g Hb

-La quantité max d' O_2 que peut contenir le sang = $([\text{Hb}] \cdot 1,39) + [\text{O}_2 \text{ dissous}]$.

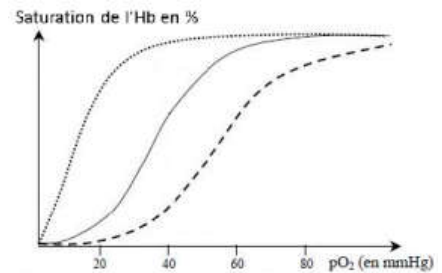
Pour $[\text{Hb}] = 15\text{g}/100\text{ml}$ de sang et $V_{\text{O}_2 \text{ dissous}} = 0,3\text{ml}/100\text{ml}$ de sang

- le contenu total maximal en O_2 :

$$(15 \cdot 1,39) + 0,3 = 20,85 + 0,3 = 21,15 \text{ mlO}_2/100\text{ml de sang}.$$



- courbe de dissociation de l'oxyhémoglobine (CDO)
- PO₂ < 15 mmHg: faible affinité de l'Hb pour l'O₂
- 15 mmHg < PO₂ < 40 mmHg: forte affinité.
- PO₂ > 60-70 mmHg: sites de fixation tous saturés.
- on appelle P₅₀ la PO₂ pour laquelle l'Hb est saturée à 50%
- l'affinité de l'Hb pour l'O₂ est influencée par certains facteurs
- L'Effet Bohr traduit l'influence de la Pression partielle du CO₂
- PCO₂ ↑ → ↓ affinité pour O₂ : dans les capillaires tissulaires
- PCO₂ ↓ → ↑ affinité pour O₂ : au contact des alvéoles pulmonaires -
- Variation du pH d'origine métabolique, respiratoire...
- pH ↓ → ↓ affinité pour O₂ : dans les capillaires tissulaires
- pH ↑ → ↑ affinité pour O₂ : au contact des alvéoles pulmonaires



4) Transport du CO₂ dans le sang :

- forme dissoute: 5% (plasma et cytoplasme des GR)
 - faible quantité mais importante car forme obligée pour les échanges
 - forme combinée: 95%
 - 65% combiné à l'eau (plasma et cytoplasme des GR) → HCO₃⁻ (bicarbonates)
- $$\text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O} \xrightleftharpoons{\text{AC}} \text{H}_2\text{CO}_3 \rightleftharpoons \text{H}^+ + \text{HCO}_3^-$$
- 1ère étape dans le GR (riche en anhydrase carbonique) → H₂CO₃ (Acide carbonique)
 - 2ème étape H₂CO₃ se dissocie en: HCO₃⁻ libéré dans le plasma et H⁺ qui sera tamponné par Hb
 - forme combinée: 95%
 - 65% combiné à l'eau
 - 30% combiné à l'hémoglobine dans les GR → Hb carbaminée
 - avec les groupements NH₂ terminaux de la globine de l'Hb
 - La quantité de CO₂ transportée par l'Hb est influencée par PO₂
 - l'hémoglobine fixe plus de CO₂ si PO₂ basse (niveau tissulaire)
 - L'Hb désoxygénée peut fixer plus de CO₂ que l'Hb oxygénée.
- Ce phénomène est connu sous le nom d'effet Haldane
- Le couplage entre effet Haldane et effet Bohr fait qu'il y a une optimisation du transport des gaz dans le sang