

# EXPLORATION DE L'ÉQUILIBRE ACIDO-BASIQUE ET DES GAZ DU SANG

1. pH plasmatique .....	2
2. Gaz respiratoires .....	2
2.1. Notion de pression partielle.....	2
2.2. Dissolution d'un gaz dans un liquide : loi de Henry .....	2
2.3. Formes du dioxygène dans le sang.....	3
2.3.1. O <sub>2</sub> dissous.....	3
2.3.2. Oxyhémoglobine.....	3
2.4. Formes du dioxyde de carbone dans le sang .....	4
2.4.1. CO <sub>2</sub> dissous 10 %.....	4
2.4.2. Hydrogénocarbonate HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> 60 %.....	4
2.4.3. Composés carbaminés 30% .....	4
2.5. Échanges gazeux respiratoires.....	4
2.5.1. Principe de base des échanges gazeux respiratoires .....	4
2.5.2. Échanges alvéolaires .....	4
2.5.3. Échanges tissulaires .....	7
3. Régulation des gaz du sang et du pH .....	8
3.1. Régulation par les systèmes tampons .....	8
3.1.1. Équation d'Henderson-Hasselbach.....	8
3.1.2. Estimation du pH plasmatique .....	8
3.1.3. Diagramme de Davenport .....	8
3.1.4. Différents systèmes tampons .....	9
3.2. Régulation de la ventilation pulmonaire.....	10
3.2.1. Acidose respiratoire .....	10
3.2.2. Alcalose respiratoire .....	10
3.3. Régulation rénale.....	10
4. Désordres de l'équilibre acido-basique.....	11
5. Analyses au laboratoire de biologie médicale .....	12
5.1. pH et gaz du sang .....	12
5.1.1. Nature du prélèvement.....	12
5.1.2. Valeurs usuelles et termes médicaux associés .....	12
5.1.3. Paramètres mesurés : pCO <sub>2</sub> et pH .....	12
5.1.4. Paramètre calculé : HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> .....	13
5.2. Interprétation des résultats.....	14

L'équilibre acido-basique, ou homéostasie du pH, est une des fonctions essentielles de l'organisme. Il est étroitement lié aux gaz respiratoires présents dans le sang (en particulier le CO<sub>2</sub>).

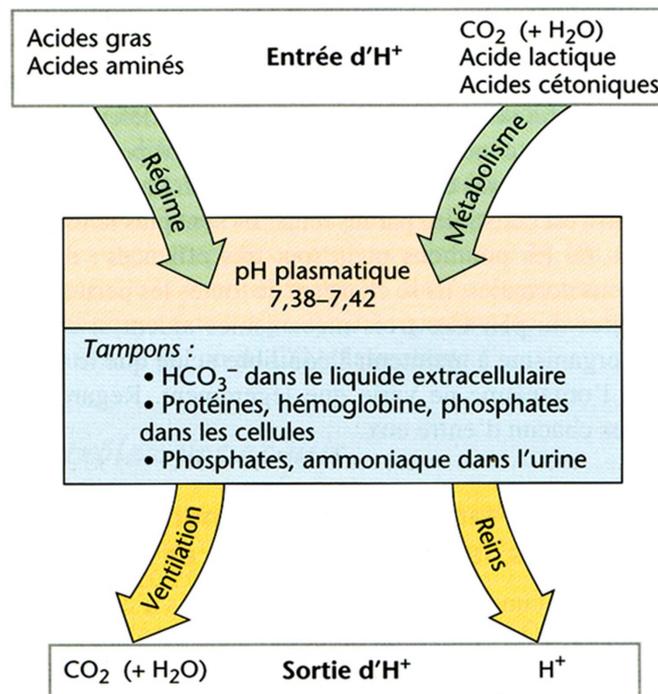
Trois mécanismes interviennent pour maintenir le pH sanguin constant : les systèmes tampons sanguins et deux organes : les poumons et les reins.

# 1. pH plasmatique

Le potentiel hydrogène d'une solution est une mesure de sa concentration en ions  $H^+$  :  $pH = -\log [H^+]$   
 La concentration en ions  $H^+$  dans l'organisme est très faible (concentration dans le plasma artériel =  $0,00004 \text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ ), par rapport à d'autres ions (exemple du  $Na^+$  environ  $135 \text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ ).

	Limite vitale inférieure	Valeur normale basse	Valeur normale	Valeur normale haute	Limite vitale supérieurs
pH	7,0	7,38	7,40	7,42	7,8
$[H^+]$ en $\text{nmol}\cdot\text{L}^{-1}$	126	43	40	37	20

**Tableau 1** : valeurs normales et extrêmes du pH et des concentrations plasmatiques en ions  $H^+$



**Figure 1** : schéma des entrées et des sorties en ions  $H^+$  dans l'organisme

[http://www.uvp5.univ-paris5.fr/wikinu/docvideos/Grenoble\\_1011/levy\\_patrick/levy\\_patrick\\_P01/levy\\_patrick\\_P01.pdf](http://www.uvp5.univ-paris5.fr/wikinu/docvideos/Grenoble_1011/levy_patrick/levy_patrick_P01/levy_patrick_P01.pdf)

# 2. Gaz respiratoires

L'air est constitué de 78 % de diazote, de 21 % de dioxygène et de 0,03 % de dioxyde de carbone.

## 2.1. Notion de pression partielle

La pression d'un mélange gazeux (en kPa) est égale à la somme des pressions partielles des différents gaz.

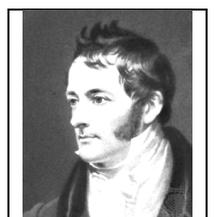
$$P_{totale} = p_{N_2} + p_{O_2} + p_{CO_2}$$

$$p_i = x_i \cdot P_{totale}$$

## 2.2. Dissolution d'un gaz dans un liquide : loi de Henry

Loi de Henry énonce qu'à température constante et à l'équilibre, la quantité de gaz dissous dans un liquide est proportionnelle à la pression partielle qu'exerce ce gaz sur le liquide.

$c_i = K_H \cdot p_i$	$c_i$ : concentration du gaz dissous $p_i$ : pression partielle du gaz exercée sur le liquide $K_H$ : constante de Henry pour un gaz donné, fonction de la température
-----------------------	--



William Henry  
 1774 – 1836  
 Physicien et chimiste britannique

Plus la constante de Henry,  $K_H$  du gaz considéré est grande, plus le gaz est très soluble dans le liquide.

## 2.3. Formes du dioxygène dans le sang

### 2.3.1. O<sub>2</sub> dissous

Calcul du débit sanguin théorique pour satisfaire la consommation des cellules en O<sub>2</sub> de 300 mL de dioxygène par minute.

Une mole de gaz occupe un volume de 22,4 L. Donc la consommation en O<sub>2</sub> en mol·min<sup>-1</sup> :

$$\dot{C}_{O_2} = \frac{300}{22,4} = 13,4 \text{ mmol} \cdot \text{min}^{-1}$$

Concentration en O<sub>2</sub> dans le sang artériel pour une pression de l'air alvéolaire de 1 atm = 760 mmHg :

$$p_{O_2} = 0,21 \times 760 = 160 \text{ mmHg}$$

Constante de Henry pour le dioxygène :  $1,4 \cdot 10^{-3} \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1} \cdot \text{mmHg}^{-1}$

$$C_{O_2} = 1,4 \cdot 10^{-3} \times 160 = 0,224 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$$

Le débit sanguin théorique :

$$\dot{V}_{sang} = \frac{13,4}{0,224} = 60 \text{ L} \cdot \text{min}^{-1}$$

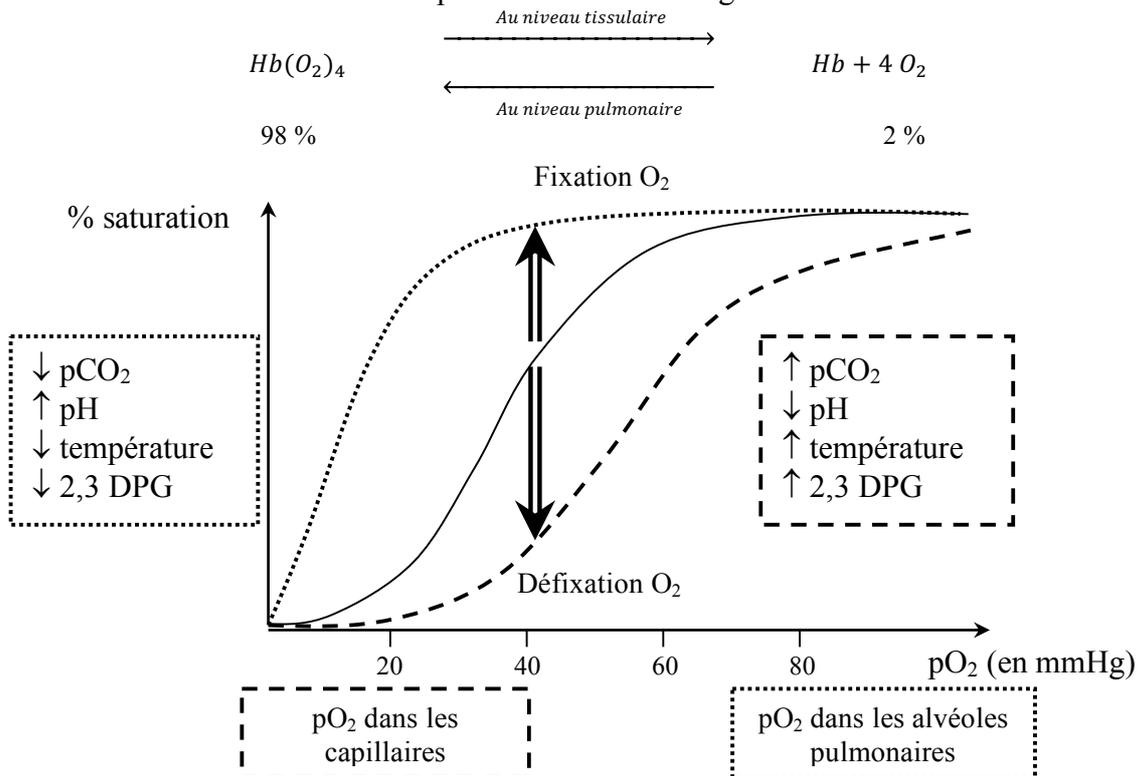
Il faudrait un débit sanguin de 60 L·min<sup>-1</sup> (au lieu de 5 L·min<sup>-1</sup>) pour faire face à la demande des cellules en O<sub>2</sub> si le dioxygène n'était qu'à l'état dissous.

### 2.3.2. Oxyhémoglobine

Le dioxygène doit nécessairement être transportée par l'hémoglobine (Hb).

La fraction dissoute est la fraction du O<sub>2</sub> diffusible dans le sens décroissant de la pression partielle en O<sub>2</sub>. C'est la fraction diffusible qui déplace l'équilibre de défixation du dioxygène.

Au niveau des alvéoles pulmonaires et du sang artériel :



**Figure 2 :** courbe de saturation de l'hémoglobine en présence et en absence d'activateur ou d'inhibiteur

## 2.4. Formes du dioxyde de carbone dans le sang

Le CO<sub>2</sub> est transporté dans le sang sous 3 formes : CO<sub>2</sub> dissous, hydrogénocarbonate (HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>) et combiné aux protéines pour former des composés carbaminés.

Pourcentage donné en fonction du CO<sub>2</sub> éliminé par les poumons.

### 2.4.1. CO<sub>2</sub> dissous 10 %

Le CO<sub>2</sub> est 20 fois plus soluble que l'O<sub>2</sub>.

La fraction dissoute est la fraction de CO<sub>2</sub> diffusible dans le sens décroissant de la pression partielle en CO<sub>2</sub>.

### 2.4.2. Hydrogénocarbonate HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> 60 %

H<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> (acide carbonique) se forme à partir de CO<sub>2</sub> et H<sub>2</sub>O, lentement dans le plasma et rapidement dans les hématies grâce à la présence d'anhydrase carbonique (AC).

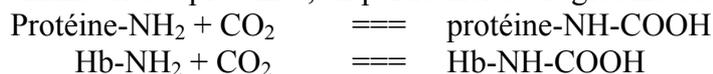


Donc plus la pCO<sub>2</sub> augmente, plus le pH diminue.

H<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> se dissocie ensuite en HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> et H<sup>+</sup> : HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> sort des hématies en échange de Cl<sup>-</sup> (antiport) alors que H<sup>+</sup> reste les hématies où il se lie à l'hémoglobine d'autant plus facilement qu'elle est désoxygénée.

### 2.4.3. Composés carbaminés 30%

Les composés carbaminés se forment par combinaison du CO<sub>2</sub> avec les groupements NH<sub>2</sub> terminaux des protéines, en particulier de la globine de l'hémoglobine (carb(amino)Hb).



## 2.5. Échanges gazeux respiratoires

### 2.5.1. Principe de base des échanges gazeux respiratoires

Les fractions dissoutes sont les seules formes des gaz respiratoires échangeables.

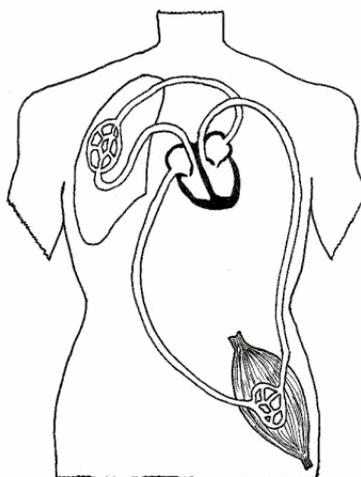
Le passage des gaz d'un compartiment à l'autre s'effectue par diffusion des gaz dissous dans le sens du gradient des concentrations c'est-à-dire dans le sens décroissant des pressions partielles.

Pressions partielles en kPa	Air alvéolaire	Sang oxygéné	Tissus	Sang non oxygéné
pO <sub>2</sub>	14	14	4	5,3
pCO <sub>2</sub>	5,3	5,3	6,6	6,1

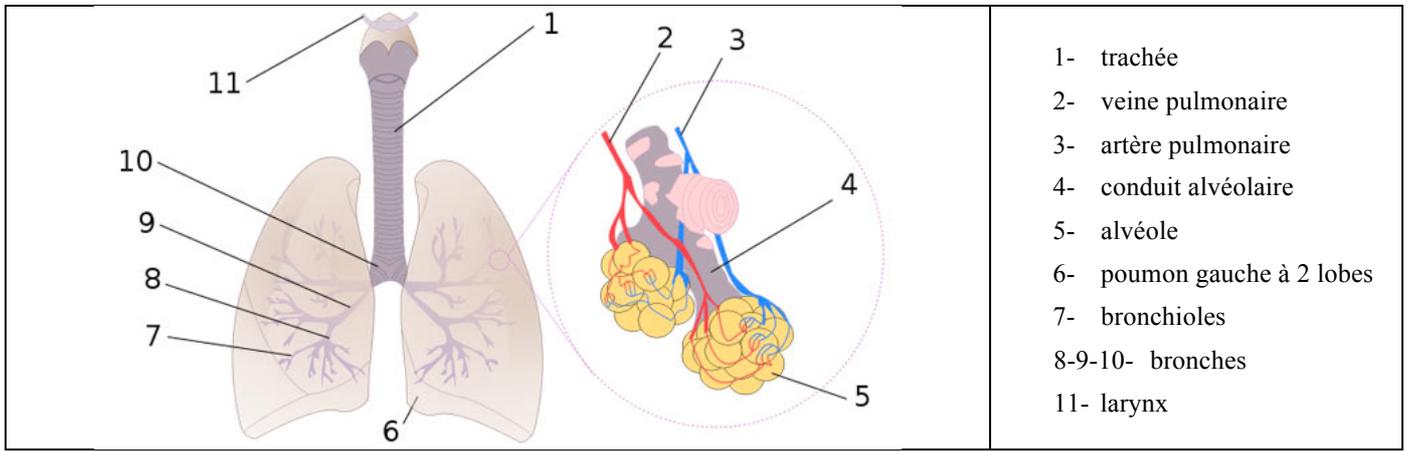
Source : Manuel de Biologie humaine Terminale SMS – O d'Andria – Collection Figarella

### 2.5.2. Échanges alvéolaires

#### a. Circulation sanguine pulmonaire



**Figure 3** : schéma des circulations sanguines générale et pulmonaire



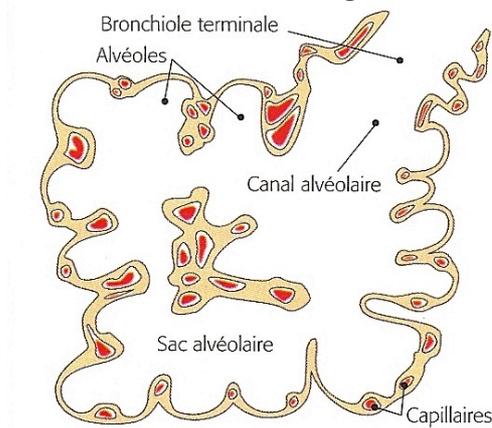
**Figure 4 :** schéma de la structure interne des poumons

**b. Échanges au niveau de la barrière alvéolo-capillaire**

Le sac alvéolaire comporte de nombreux replis qui constituent les alvéoles pulmonaires. Ceci augmente la surface d'échanges et favorise les échanges gazeux entre l'air alvéolaire et le sang des capillaires pulmonaires.

Les alvéoles sont séparées les unes des autres par une paroi alvéolaire d'environ 5 µm d'épaisseur.

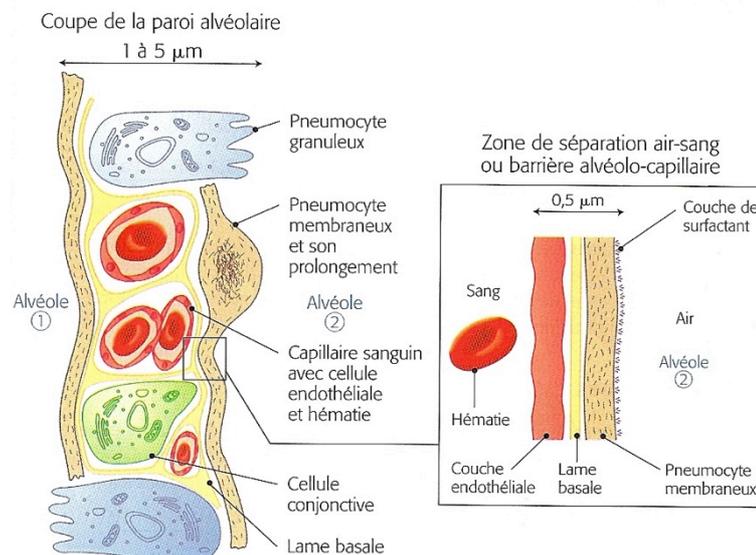
On y trouve des macrophages, des cellules nommées pneumocytes granuleux qui sécrètent le surfactant et des pneumocytes membraneux et de nombreux capillaires.



**Figure 5 :** schéma d'une coupe de tissu alvéolaire

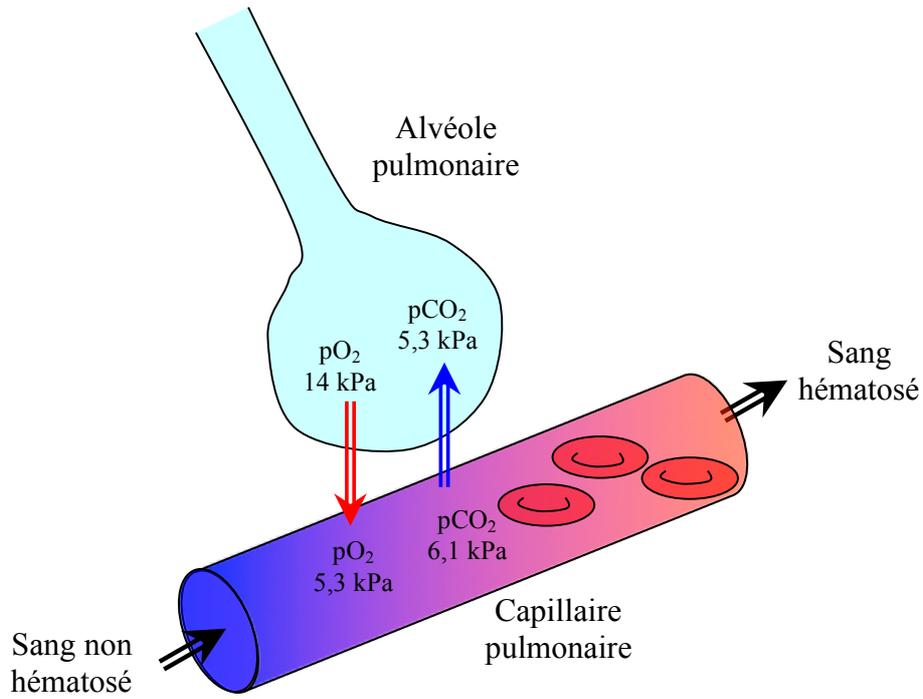
La barrière alvéolo-capillaire mesure 0,5 µm d'épaisseur et 70 m<sup>2</sup> de surface !

Elle est constituée de l'endothélium vasculaire, la lame basale, le prolongement des pneumocytes membraneux et la couche de surfactant. La lymphe interstitielle y est pratiquement inexistante.



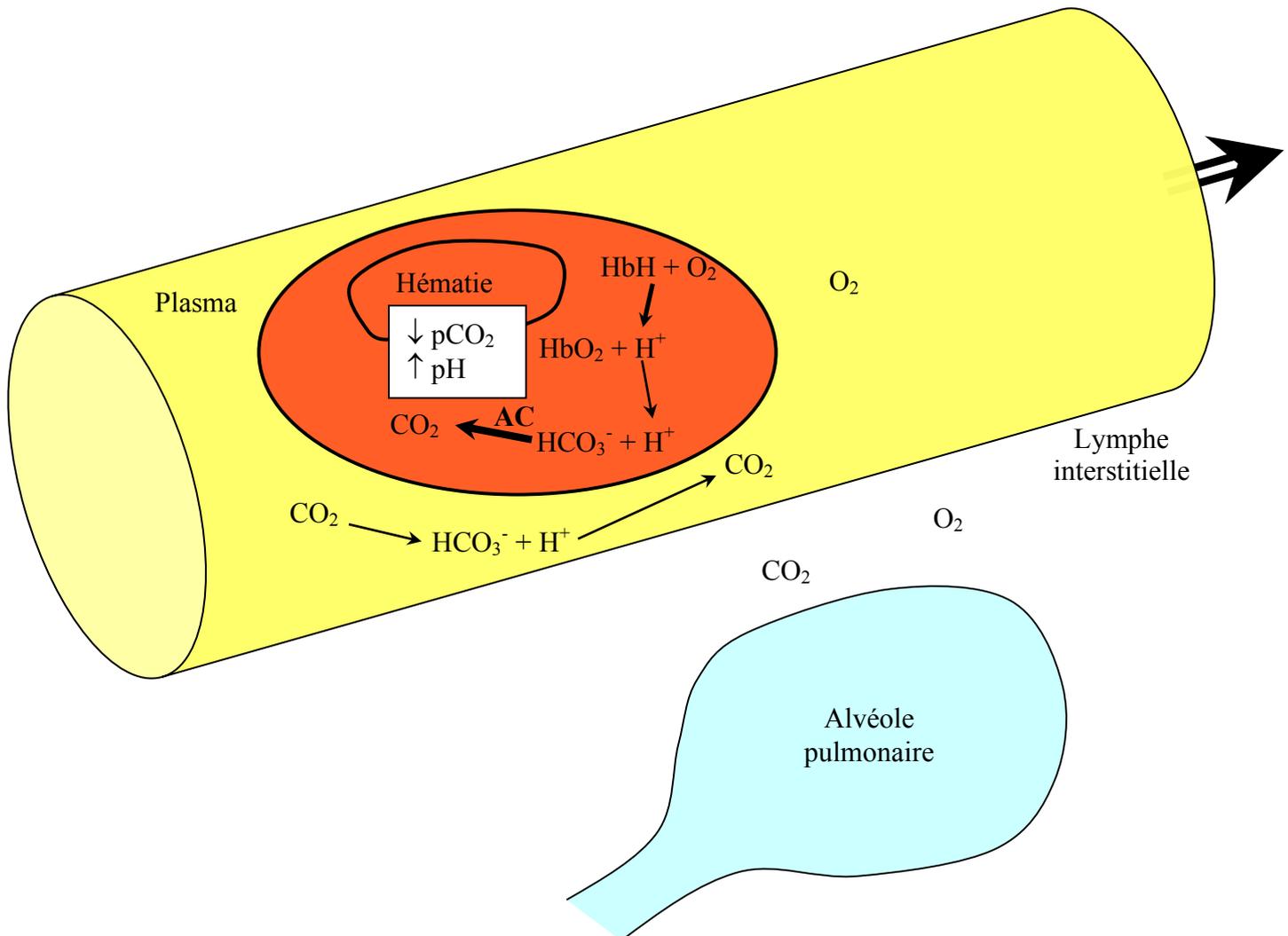
**Figure 6 :** schémas de la paroi alvéolaire et de la barrière alvéolo-capillaire

**c. Hématose dans les capillaires pulmonaires**



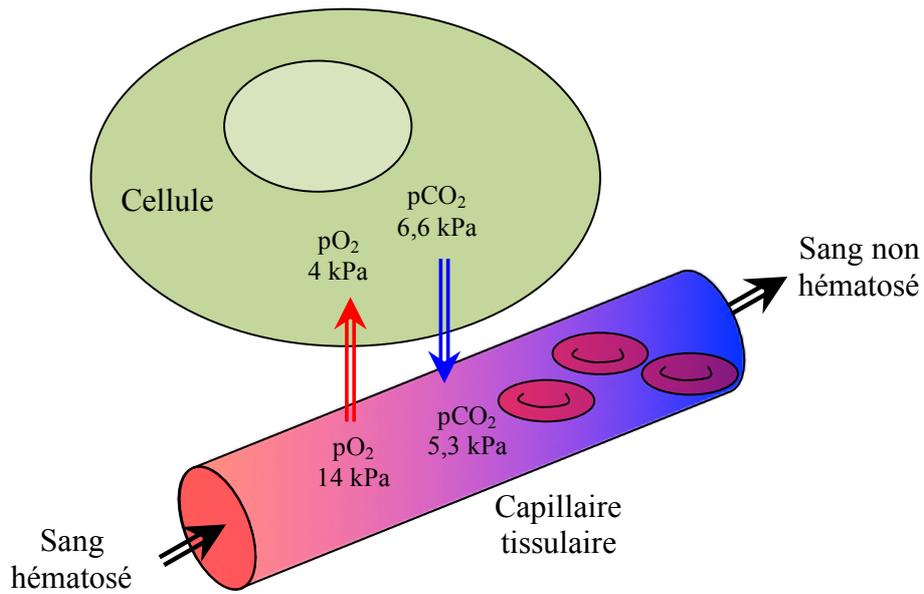
Au niveau alvéolaire, les gaz traversent la barrière alvéolo-capillaire et la membrane plasmique des hématies.

**a. Fixation du dioxygène au niveau érythrocytaire**

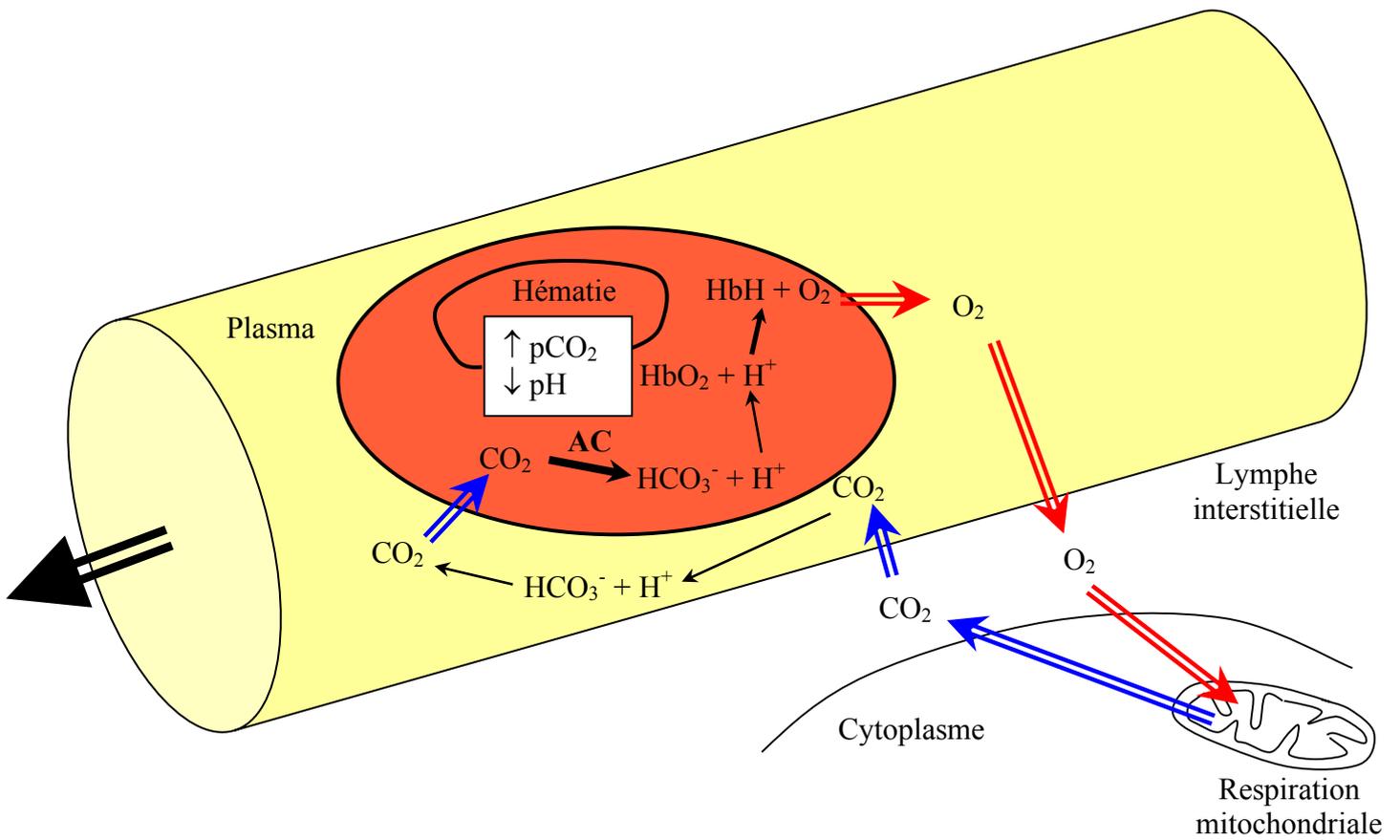


### 2.5.3. Échanges tissulaires

#### a. Cyanose dans les capillaires tissulaires



#### a. Relargage du dioxygène à partir de l'oxyhémoglobine

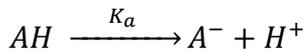


### 3. Régulation des gaz du sang et du pH

#### 3.1. Régulation par les systèmes tampons

##### 3.1.1. Équation d'Henderson-Hasselbalch

L'équation de Henderson-Hasselbalch est une équation donnant le pH d'un système tamponné. Elle permet de déterminer le pH sanguin à partir des concentrations en ions bicarbonates et en acide carbonique.



$K_a$  : constante de dissociation de l'acide

$$K_a = \frac{[A^-][H^+]}{[AH]}$$

$$-\log K_a = -\log \frac{[A^-]}{[AH]} - \log [H^+]$$

$$pK_a = pH - \log \frac{[A^-]}{[AH]}$$

$$pH = pK_a + \log \frac{[A^-]}{[AH]}$$

##### 3.1.2. Estimation du pH plasmatique



$$pK_a(H_2CO_3/HCO_3^-) = 6,1$$

$$pH = pK_a + \log \frac{[HCO_3^-]}{[H_2CO_3]}$$

$$[H_2CO_3] = K_{HCO_2} \times p_{CO_2}$$

$$pH = 6,1 + \log \frac{[HCO_3^-]}{K_{HCO_2} \cdot p_{CO_2}}$$

et

$$[HCO_3^-] = K_{HCO_2} \times p_{CO_2} \times 10^{pH-6,1}$$

##### 3.1.3. Diagramme de Davenport

Avec  $K_{HCO_2} = 0,0307 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1} \cdot \text{mmHg}^{-1}$  et au niveau artériel :  $p_{CO_2} = 40 \text{ mmHg} = 5,3 \text{ kPa}$  et  $pH = 7,4$  alors :

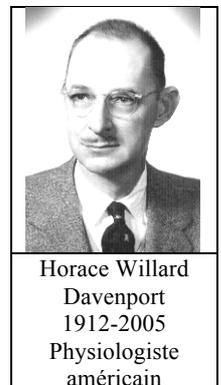
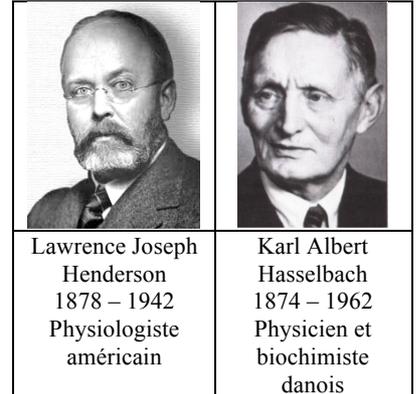
$$pH = 6,1 + \log \frac{[HCO_3^-]}{0,0307 \times p_{CO_2}}$$

$$10^{pH-6,1} = \frac{[HCO_3^-]}{0,0307 \times p_{CO_2}}$$

$$[HCO_3^-] = 0,0307 \times p_{CO_2} \times 10^{pH-6,1}$$

$$[HCO_3^-] = 0,0307 \times 40 \times 10^{7,4-6,1} = 24 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$$

Le diagramme de Davenport est une courbe où on étudie la variation de la concentration en  $[HCO_3^-]$  en fonction du pH.



On définit le point N (normal) de coordonnées (7,4 ; 24) pour une pression en  $CO_2$  de 40 mmHg.

<https://www.youtube.com/watch?v=gDS83bb6QoY>

La Droite Normale d'Équilibration ou DNE est la droite d'évolution de la concentration en  $\text{HCO}_3^-$  en fonction du pH pour des  $p_{\text{CO}_2}$  variables.

Un trouble respiratoire pur est visualisé par un déplacement sur la DNE.

Un trouble métabolique pur est visualisé par un déplacement sur la courbe isobare (courbe à pression constante).

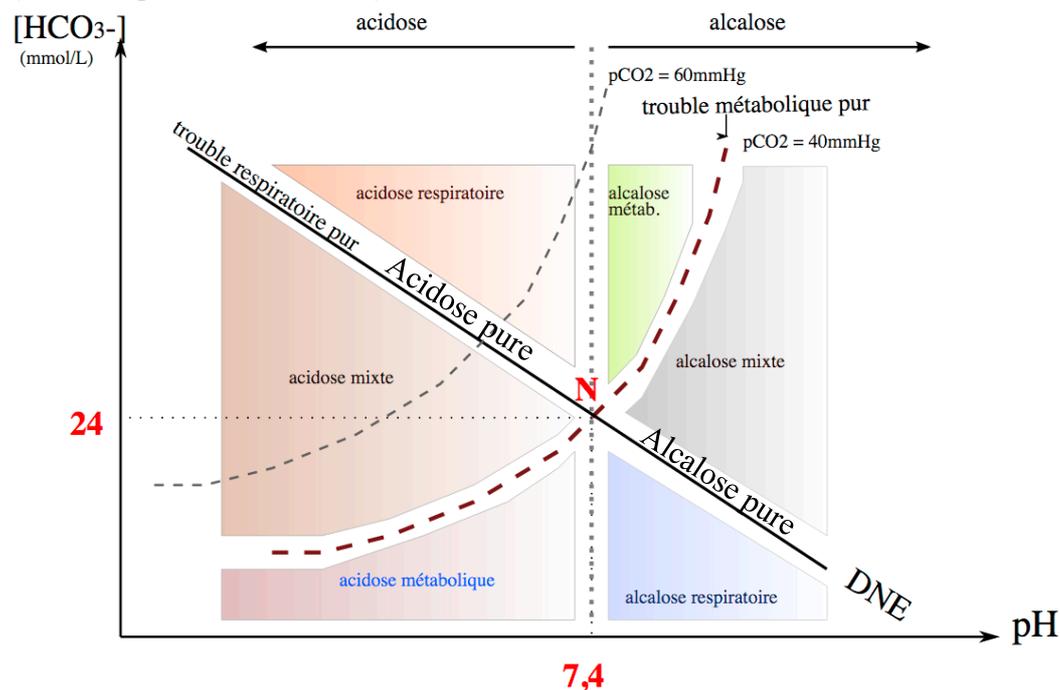


Figure 7 : diagramme de Davenport

### 3.1.4. Différents systèmes tampons

Une solution tampon est une solution dont la composition est telle que le pH varie peu par ajout de petites quantités d'acide, de base ou par dilution.

Un bon système tampon a un  $pK_a$  proche du pH plasmatique.

Ce n'est pas le cas du système «  $\text{H}_2\text{CO}_3/\text{HCO}_3^-$  » en système clos. Mais le sang est équilibré avec l'air alvéolaire et les ions hydrogénocarbonates filtrent librement par les reins. On parle de « tampon ouvert » aux 2 pôles (poumons/reins).

Les systèmes tampons sont essentiels car ils agissent instantanément (quelques secondes). Ils ont pour rôle de limiter les variations du pH sanguin.

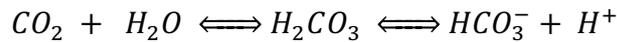
SYSTÈMES TAMPONS	Compartiments	pKa	Pouvoir tampon
EXTRACELLULAIRES	Plasma		
	$\text{H}_2\text{CO}_3/\text{HCO}_3^-$	6,1	33
	Protéine/protéinate	< 7,4	12
	$\text{H}_2\text{PO}_4^-/\text{HPO}_4^{2-}$	6,8	2
INTRACELLULAIRES	Érythrocytes		
	$\text{HbH}/\text{Hb}^-$	7,8	36
	$\text{H}_2\text{CO}_3/\text{HCO}_3^-$	6,1	10
	Phosphates organiques	variable	7
URINAIRES	$\text{NH}_4^+/\text{NH}_3$	9,3	

Tableau 2 : localisation et nature des systèmes tampons

### 3.2. Régulation de la ventilation pulmonaire

Les poumons par adaptation de la fréquence (12 à 20 cycles/min ; apnée / bradypnée / tachypnée) et de l'amplitude respiratoire compensent des variations de pH en quelques minutes.

Tout changement de la ventilation va entraîner une modification de l'équilibre :



#### 3.2.1. Acidose respiratoire

L'hypoventilation (ou hypercapnie) entraîne une augmentation de la  $pCO_2$  et donc une diminution du pH : acidose respiratoire.

Si la cause de l'acidose respiratoire est liée à une impossibilité d'hyperventiler, l'organisme va compenser la diminution du pH sanguin en augmentant la concentration en bicarbonates  $HCO_3^-$  dans le sang (déplacement de l'équation vers la gauche).

#### 3.2.2. Alcalose respiratoire

L'hyperventilation (ou hypocapnie) entraîne une diminution de la  $pCO_2$  et donc une augmentation du pH : alcalose respiratoire.

On peut contrecarrer les effets d'une hyperventilation en respirant dans un sac en papier pour faire remonter la  $pCO_2$ .

Sinon l'organisme va compenser l'augmentation du pH sanguin en diminuant la concentration en bicarbonates  $HCO_3^-$  dans le sang (déplacement de l'équation vers la droite).

### 3.3. Régulation rénale

Le rein permet une régulation du pH plus lente mais plus durable (plusieurs heures à plusieurs jours).

Le rein permet de limiter les pertes en bases :

- par excrétion d'acides libres :  $H^+$ , acide urique, corps cétoniques, phosphates
- par excrétion d'ions ammonium
- par réabsorption des bicarbonates

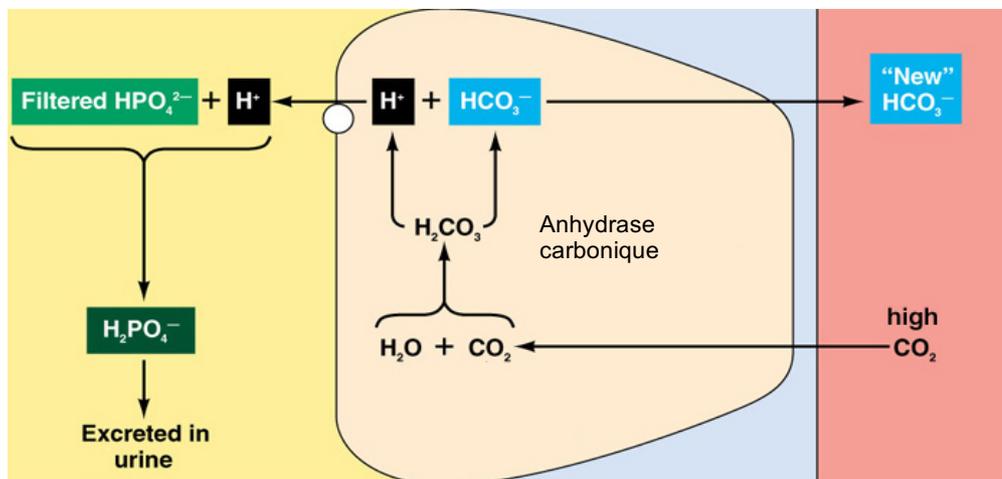


Figure 8 : compensation rénale en cas d'acidose respiratoire

#### 4. Désordres de l'équilibre acido-basique

	ACIDOSES		ALCALOSES	
	MÉTABOLIQUE	RESPIRATOIRE	MÉTABOLIQUE	RESPIRATOIRE
<b>pH</b>	< 7,35		> 7,45	
<b>[HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>]</b>	< 24 mmol·L <sup>-1</sup>		> 24 mmol·L <sup>-1</sup>	
<b>p<sub>CO<sub>2</sub></sub></b>		Hypercapnie >> 40 mmHg		Hypocapnie << 40 mmHg
<b>Causes</b>	<p><b>Acidose lactique</b> avec hypoxie (fermentation cellulaire par défaut d'approvisionnement en O<sub>2</sub>)</p> <p><b>Acidocétose du diabétique</b></p> <p><b>Fuite de bicarbonates par diarrhée</b></p> <p><b>Défaut de réabsorption rénale (insuffisance rénale)</b></p> <p>Surcharge en <b>acides exogènes</b> (intoxication, médicaments : aspirine)</p>	<p><b>Diminution de la pO<sub>2</sub></b> (air confiné, altitude,...)</p> <p><b>Hypoventilation = diminution de la ventilation pulmonaire</b> (traumatisme thoracique, épanchement pleural, bronchite chronique obstructive, asthme, insuffisance respiratoire, œdème aigu du poumon, mucoviscidose)</p>	<p><b>Pertes d'acides par vomissements</b></p> <p><b>Excès de bicarbonates</b> (problèmes de réanimation)</p> <p><b>Hyperaldostérionisme</b> (au niveau rénal, augmentation de la réabsorption du Na<sup>+</sup> et augmentation de la sécrétion de K<sup>+</sup> et H<sup>+</sup> ⇒ augmentation du pH sanguin).</p>	<p>Rare.</p> <p>Apparition transitoire à l'arrêt d'une activité physique.</p> <p><b>Hypocapnie secondaire à une hyperventilation</b> (stress, asthme, altitude)</p> <p>Problème de réanimation</p> <p>Ingestion de toxiques</p> <p>Stress</p>
<b>Compensation</b>	Diminution de la pCO <sub>2</sub> par hyperventilation	Augmentation des bicarbonates par système tampon	Limitée (hypercapnie par hypoventilation)	Augmentation de l'excrétion rénale des bicarbonates

## 5. Analyses au laboratoire de biologie médicale

### 5.1. pH et gaz du sang

#### 5.1.1. Nature du prélèvement

Échantillon de sang artériel (habituellement artère radiale du poignet) en condition d'anaérobiose pour éviter toute modification des gaz du sang sur anticoagulant avec héparine (seringues pré-héparinées) pour avoir du sang total. Le patient doit être détendu pour éviter une hyperventilation. Le prélèvement est réalisé par un médecin ou un infirmier. L'échantillon doit être conservé dans la glace lors de son acheminement.

#### 5.1.2. Valeurs usuelles et termes médicaux associés

	Valeur limite inférieure	Paramètre sanguin	Valeur limite supérieure	
Acidose	7,38	pH 7,40	7,42	Alcalose
Hypocapnie	38	pCO <sub>2</sub> = 40 mmHg	42	Hypercapnie
	22	[HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> ] = 24 mmol·L <sup>-1</sup>	26	

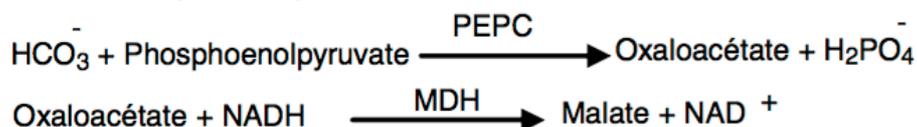
#### 5.1.3. Paramètres mesurés : pCO<sub>2</sub> et pH

Les mesures de pCO<sub>2</sub> et de pH s'effectuent par automate (ex : Cobas (Roche), Rapidlab (Siemens)).

##### a. Bicarbonates et CO<sub>2</sub> total

$$[\text{CO}_2]_{\text{total}} = [\text{HCO}_3^-] + [\text{CO}_2]_{\text{dissous}} + [\text{CO}_2]_{\text{combiné}}$$

90 % du CO<sub>2</sub> plasmatique est sous forme de bicarbonates.



La diminution de l'absorbance due à l'oxydation du NADH est directement proportionnelle à la concentration en CO<sub>2</sub> total à 340-380 nm.

##### b. pCO<sub>2</sub>

L'électrode au CO<sub>2</sub> (ou électrode de Severinghaus) comporte une membrane sélective au CO<sub>2</sub> dissous. Celui-ci se retrouve transformé en HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> et en H<sup>+</sup>. L'augmentation de la concentration en H<sup>+</sup> est mesurée par une électrode à pH.

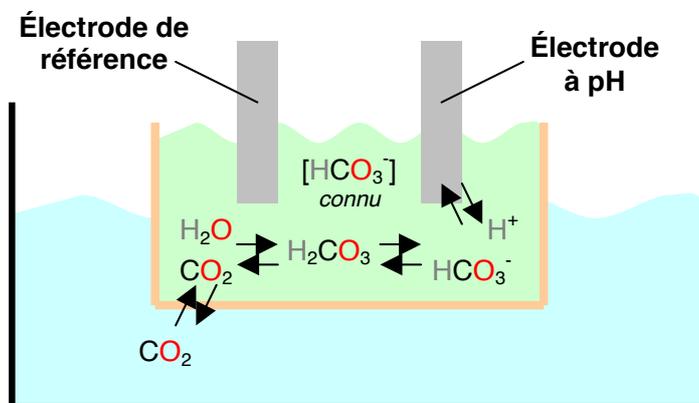
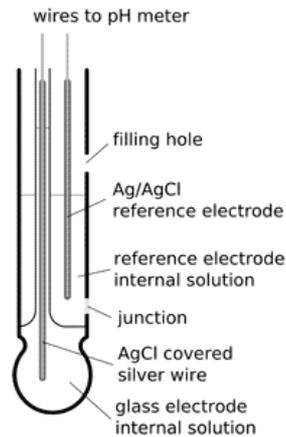


Figure 9 : principe de la mesure de la pCO<sub>2</sub>

### c. pH

Le pH d'un échantillon est déterminé par mesure de la différence de potentiel entre une électrode de mesure (électrode en verre sensible aux ions hydrogène) et une électrode de référence.

L'électrode de mesure est une électrode en Ag/AgCl saturé dans une ampoule de verre sensible aux ions hydrogène et contenant une solution tampon (pH 7). Cette électrode mesure la différence de potentiel apparue entre l'échantillon et l'électrode de référence (électrode constituée d'un fil d'Ag plongé dans une solution saturée de AgCl/KCl).



**Figure 10** : schéma d'une électrode de pH combinée

#### 5.1.4. Paramètre calculé : $[HCO_3^-]$

Paramètres mesurés :  $pH$  et  $p_{CO_2}$

Constantes :  $pK_a$  et  $K_{HCO_2}$

Concentration en  $[HCO_3^-]$  calculée à partir de l'équation d'Henderson-Hasselbach :

$$[HCO_3^-] = K_{HCO_2} \times p_{CO_2} \times 10^{pH-6,1}$$

	Système international	Système usuel
$p_{CO_2}$	5,3 kPa	40 mmHg
$[HCO_3^-]$	24 mmol·L <sup>-1</sup>	24 mEq·L <sup>-1</sup>
$K_{HCO_2}$	0,2295	0,0307
$pK_a$	6,1	

**Tableau 3** : correspondance d'unités des paramètres acido-basiques