

# Transport des gaz dans le sang

Démarrer le module

## Objectifs

- Décrire le transport de l'oxygène et du dioxyde de carbone dans le sang,
- Préciser le rôle des facteurs influençant ce transport
- Déterminer la relation entre le contenu en CO<sub>2</sub> et le pH sanguin

# Introduction

La fonction respiratoire du sang est représentée par le transport des gaz respiratoires des poumons vers les tissus pour l'oxygène ( $O_2$ ) et en sens inverse pour le dioxyde de carbone ( $CO_2$ ).

Ce transport est assuré essentiellement par une hémoprotéine, l'hémoglobine (Hb), contenue dans les érythrocytes, qui fixe de façon réversible l' $O_2$  et le  $CO_2$  sous l'influence d'un gradient de pression partielle.

- Dans un milieu liquide (sang), les gaz sont présents sous 2 formes :
- la forme dissoute
- la forme combinée

La fraction dissoute d'un gaz est la seule forme de ce gaz qui participe à la pression partielle.

- Le volume d'un gaz dissous dans un liquide est déterminé par :
  - sa pression partielle,
  - son coefficient de solubilité
  - la température du liquide.

Il est calculé à partir de la loi de dissolution ou loi de Henry :

$$V_{\text{gaz}} = \alpha \times P_{\text{gaz}} / P_{\text{atm}}$$

où  $\alpha$  représente le coefficient de solubilité

- Le gaz diffuse d'une zone de haute pression vers une zone de basse pression. Cette loi fondamentale régit les transports de gaz dans l'organisme.

# Transport de l'oxygène dans le sang

Vue générale sur le transport de l'O<sub>2</sub> dans le sang

Oxygène dissous

Oxygène combiné à l'hémoglobine

Saturation de l'hémoglobine en oxygène

Courbe de dissociation de l'oxyhémoglobine

Facteurs modifiant la courbe de dissociation de l'oxyhémoglobine

# Vue générale sur le transport de l'O<sub>2</sub> dans le sang

Les poumons et l'appareil cardiovasculaire constituent un système permettant d'alimenter les tissus en O<sub>2</sub> dont la quantité apportée à ces tissus dépend de :

- la quantité d'O<sub>2</sub> entrant dans les poumons
- la qualité des échanges gazeux au niveau alvéolaire
- l'irrigation sanguine des tissus dépendant du degré de constriction des vaisseaux et du débit cardiaque
- la capacité de transport de l'O<sub>2</sub> dans le sang, déterminée par la quantité d'O<sub>2</sub> dissous, le contenu en hémoglobine du sang et l'affinité de l'hémoglobine pour l'O<sub>2</sub>.

L'O<sub>2</sub> est transporté dans le sang sous 2 formes :

- forme dissoute, libre dans le plasma
- forme combinée à l'hémoglobine dans l'érythrocyte

Les réactions entre ces 2 formes sont :

- réversibles
- très rapides
- dépendantes de la PO<sub>2</sub>.

Dans le sang artériel, la PaO<sub>2</sub> est peu inférieure à celle de l'air alvéolaire. Elle est de 100 mmHg et tend à diminuer avec l'âge.

Dans le sang veineux, la PvO<sub>2</sub> varie en fonction des organes et de l'intensité du métabolisme. Elle est en moyenne de 40 mmHg.

## Oxygène dissous

La quantité d'O<sub>2</sub> dissoute est directement proportionnelle à la PO<sub>2</sub> (loi de Henry).  
Aussi, plus la PO<sub>2</sub> est élevée et plus il y a de l'O<sub>2</sub> dissous dans le plasma.

La fraction dissoute d'O<sub>2</sub> représente 1,5 % de l'O<sub>2</sub> dans le sang.

Au niveau artériel, pour une PaO<sub>2</sub> normale de 100 mmHg, il y a 3 ml d'O<sub>2</sub> dissous par litre de sang ; soit 15 ml/min d'O<sub>2</sub> dissous pour un débit cardiaque de 5 l /min. Or, au repos, la consommation d'O<sub>2</sub> par toutes les cellules de l'organisme est de 250 ml /min, cette consommation pouvant augmenter jusqu'à 25 fois lors d'un exercice physique.

Aussi, il existe un autre mode de transport d'O<sub>2</sub> dans le sang qui est l'hémoglobine.

L'O<sub>2</sub> combiné à l'hémoglobine, représentant 98,5%, ne contribue pas à la PO<sub>2</sub> du sang.

**Attention**

La PO<sub>2</sub> reflète seulement la fraction d'O<sub>2</sub> dissoute et non pas la quantité d'O<sub>2</sub> dans le sang.

## Oxygène combiné à l'hémoglobine

L'Hb non combinée à l'O<sub>2</sub> est appelée Hb réduite ou désoxyhémoglobine (Hb).

Combinée à l'O<sub>2</sub>, elle est appelée oxyhémoglobine (HbO<sub>2</sub>).

Il est important de noter que le fer sous sa forme divalente (Fe<sup>++</sup>) peut fixer l'O<sub>2</sub>, alors que le fer sous sa forme trivalente (Fe<sup>+++</sup>) ne peut pas fixer l'O<sub>2</sub>.

Le Fe<sup>+++</sup> est retrouvé dans la méthémoglobine, l'une des formes non fonctionnelles de l'Hb.

### *Rappel*

L'hémoglobine (Hb) est une ferroprotéine contenue exclusivement dans les érythrocytes, se combinant facilement et réversiblement à l'O<sub>2</sub>. Elle est constituée de 4 sous-unités liées. Chaque sous-unité est formée d'un groupement moléculaire appelé hème, renfermant un atome de fer (Fe<sup>++</sup>) sur lequel se fixe l'O<sub>2</sub> et un polypeptide relié à l'hème. Les 4 polypeptides d'une molécule d'Hb forment la globine.

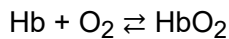
## Saturation de l'hémoglobine en oxygène

Chaque molécule d'Hb peut transporter jusqu'à 4 molécules d'O<sub>2</sub>. Dans ce cas, il y a saturation en O<sub>2</sub> de l'Hb (SO<sub>2</sub>).

La SO<sub>2</sub> représente la portion de molécules d'hémoglobine présentes sous forme oxygénée. Elle est exprimée en pourcentage.

Saturation en O<sub>2</sub> (SO<sub>2</sub>) = (O<sub>2</sub> combiné à Hb/Hb totale)X 100

Ce pourcentage de saturation de l'Hb peut varier de 0 à 100 %. Il dépend essentiellement de la PO<sub>2</sub> du sang qui est fonction de la quantité d'O<sub>2</sub> dissous.



Cette réaction obéit à la loi d'action de masse : l'augmentation de la concentration de l'une des substances déplace la réaction dans la direction opposée et vice-versa.

Ainsi, au niveau du capillaire pulmonaire, une augmentation de la PO<sub>2</sub> entraîne une augmentation l'O<sub>2</sub> dissous d'où augmentation de la saturation en O<sub>2</sub> de l'Hb (HbO<sub>2</sub>). Inversement, au niveau du capillaire systémique, une baisse de la PO<sub>2</sub> entraîne une diminution du volume d'O<sub>2</sub> dissous d'où une diminution de l'HbO<sub>2</sub>.

La différence de la PO<sub>2</sub> dans les poumons et les tissus entraîne une captation de l'O<sub>2</sub> par l'Hb dans les poumons et une libération d'O<sub>2</sub> dans les tissus qui vont utiliser ce dernier pour leur métabolisme.

## Pouvoir oxyphorique du sang

Le pouvoir oxyphorique du sang permet de déterminer le volume d'O<sub>2</sub> que peut fixer 1 g d'Hb.

Théoriquement, 1g d'Hb fixe 1,39 ml d'O<sub>2</sub>.

In vivo, en tenant compte des hémoglobines non fonctionnelles, 1 g d'Hg fixe 1,34 ml d'O<sub>2</sub>.

### *Exemple*

La concentration en Hb est de 15 g/100 ml de sang.

Le volume d'O<sub>2</sub> dissous est de 0,3 ml/100 ml de sang.

Le volume total d'O<sub>2</sub> dans le sang = [O<sub>2</sub> combiné à Hb] + [O<sub>2</sub> dissous]

$$\text{O}_2 \text{ total} = 1,34 \times [\text{Hb}] + 0,3$$

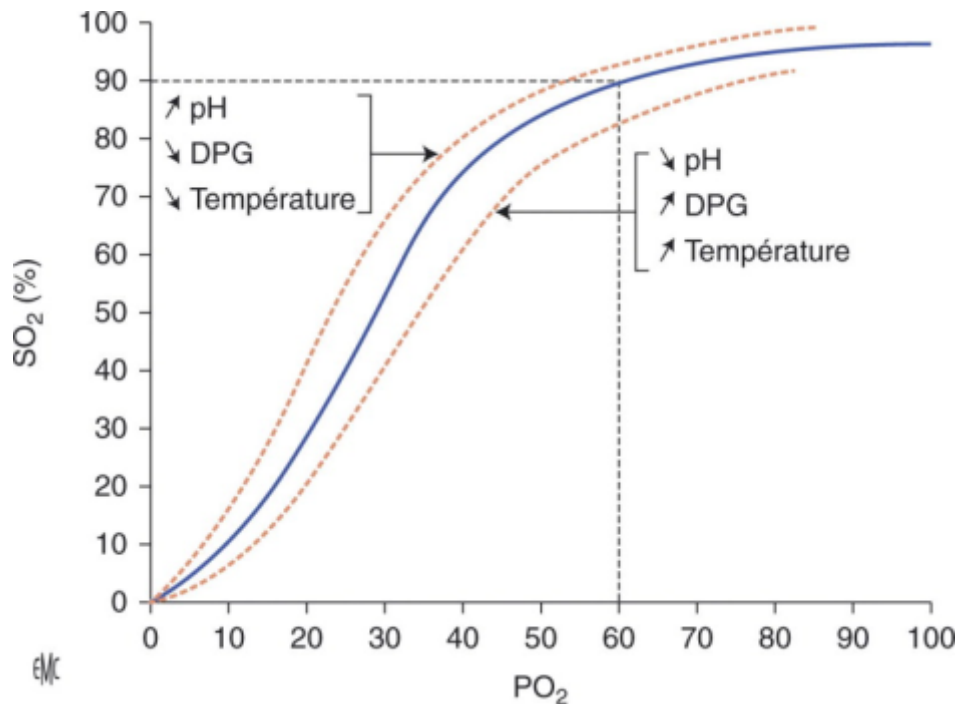
$$= 1,34 \times 15 + 0,3$$

≈ 20 ml /100 ml de sang ; soit environ 1 l d'O<sub>2</sub> /min avec un débit cardiaque de 5 l /min.



## Courbe de dissociation de l'oxyhémoglobine

La relation entre la  $PO_2$  et la saturation en  $O_2$  de l'Hb n'est pas linéaire. Elle est sigmoïde connue sous le nom de courbe de dissociation (ou de saturation) de l'HbO<sub>2</sub> ou courbe de Barcroft.



### Interprétation de la courbe

- Entre 60 et 100 mmHg de  $PO_2$ , la courbe est en plateau et la saturation de l'Hb est de 97,5%, presque une saturation quasi-complète. Par conséquent, si la  $PO_2$  diminue en dessous de la valeur normale, la saturation de l'Hb diminue peu et le contenu du sang en  $O_2$  de même. Le plateau de la courbe représente donc à une marge de sécurité pour le transport de l' $O_2$  par le sang. Ce segment correspond à la zone de la  $PO_2$  dans les capillaires pulmonaires.

- Entre 0 et 60 mmHg de  $PO_2$ , la courbe présente un segment abrupt où l' $O_2$  est déchargé de l'Hb. Ce segment correspond à la zone de la  $PO_2$  dans les capillaires systémiques. L' $O_2$  libéré diffuse librement des globules rouges vers le plasma puis vers le liquide interstitiel et les tissus sous l'effet de la différence de pressions partielles.

Il faut noter qu'une petite baisse de la  $PO_2$  suite à la diffusion de l' $O_2$  dans les cellules entraîne la libération de grandes quantités d' $O_2$  dans les capillaires des tissus périphériques.

La  $PO_2$  à 50 % de saturation en  $O_2$ , appelé  $P_{50}$  constitue une mesure utile de la position de la courbe de dissociation de l'hémoglobine. Sa valeur normale, chez l'homme est de 27 mmHg.

**Fondamental**

Trois points sont à retenir sur la courbe :

- sang artériel normal avec une  $PO_2$  100,  $SO_2$  97 %

# Facteurs modifiant la courbe de dissociation de l'oxyhémoglobine

- la  $\text{PCO}_2$  et la concentration d'ions  $\text{H}^+$
- la température
- la concentration du 2,3 diphosphoglycérate (2,3-DPG)

L'augmentation de l'un de ces facteurs entraîne un déplacement de la courbe de dissociation de l'HbO<sub>2</sub> vers la droite signifiant une diminution de l'affinité de l'Hb pour l'O<sub>2</sub>.

Une baisse de l'un de ces facteurs entraîne un déplacement de la courbe vers la gauche avec augmentation de l'affinité de l'Hb pour l'O<sub>2</sub>.

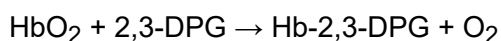
## 1- Effet de la $\text{PCO}_2$ et de la concentration d'ions $\text{H}^+$

Le CO<sub>2</sub> diffuse des tissus vers le sang augmentant la  $\text{PCO}_2$  ainsi que la libération d'ions  $\text{H}^+$  avec diminution du pH sanguin ; ce qui déplace la courbe de dissociation de l'Hb vers la droite. Il en résulte une baisse de l'affinité de l'Hb pour l'O<sub>2</sub> avec apport accru de ce dernier aux tissus. Ce phénomène est connu sous le nom d'effet Bohr.

La diminution de la  $\text{PCO}_2$  et la concentration des ions  $\text{H}^+$  a un effet inverse déplaçant la courbe vers la gauche avec augmentation de l'affinité de l'hémoglobine pour l'O<sub>2</sub>.

## 2- Effet du 2,3- diphosphoglycérate

Une mole de 2,3-DPG se lie à une mole d'Hb selon la réaction suivante :



Toute augmentation de la concentration du 2,3-DPG déplace la réaction et la courbe de dissociation de l'Hb vers la droite entraînant une libération d'O<sub>2</sub> dans le sang. La baisse de concentration du 2,3-DPG déplace la courbe vers la gauche avec une diminution de la P50 d'où augmentation de l'affinité de l'Hb pour l'O<sub>2</sub>.

## 3- Effet de la température

L'élévation de la température suite à la production de la chaleur par le métabolisme tissulaire favorise la dissociation de l'O<sub>2</sub> de l'Hb et entraîne un déplacement de la courbe vers la droite.

# Transport du dioxyde de carbone dans le sang

Vue générale sur le transport du CO<sub>2</sub> dans le sang

CO<sub>2</sub> dissous

CO<sub>2</sub> combiné à l'hémoglobine

CO<sub>2</sub> sous forme de bicarbonate

## Vue générale sur le transport du CO<sub>2</sub> dans le sang

Le métabolisme cellulaire produit 200 ml/min de CO<sub>2</sub> qui diffuse vers le sang et est véhiculé par ce dernier sous 3 formes :

- sous forme dissoute
- sous forme combinée à l'hémoglobine
- sous forme de bicarbonates

CO<sub>2</sub> total du sang = CO<sub>2</sub> dissous + CO<sub>2</sub> lié à Hb + HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>

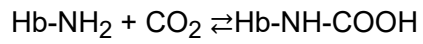
## CO<sub>2</sub> dissous

La quantité de CO<sub>2</sub> dissous obéit à la loi de Henry et dépend de la pression partielle PCO<sub>2</sub>.

Le CO<sub>2</sub> représente 10 % du contenu total du sang en CO<sub>2</sub>. Il est 24 fois plus soluble que l'O<sub>2</sub>.

## CO<sub>2</sub> combiné à l'hémoglobine

Le CO<sub>2</sub> se lie à la globine de l'Hb pour former la carbaminohémoglobine selon la réaction suivante :

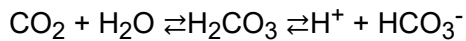


Le CO<sub>2</sub> sous cette forme représente 30% du CO<sub>2</sub> contenu dans le sang.

## CO<sub>2</sub> sous forme de bicarbonate

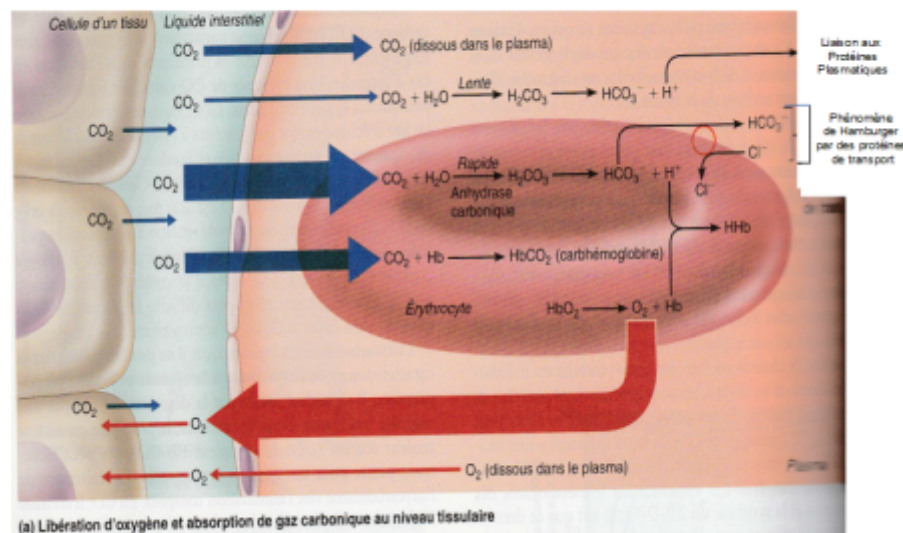
HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> est le transport prédominant du CO<sub>2</sub> représentant 60% du CO<sub>2</sub> contenu dans le sang.

Dans l'érythrocyte, le CO<sub>2</sub> est converti en HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> suivant la formule :



La formation de l'acide carbonique (H<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>) est catalysée par l'anhydrase carbonique.

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

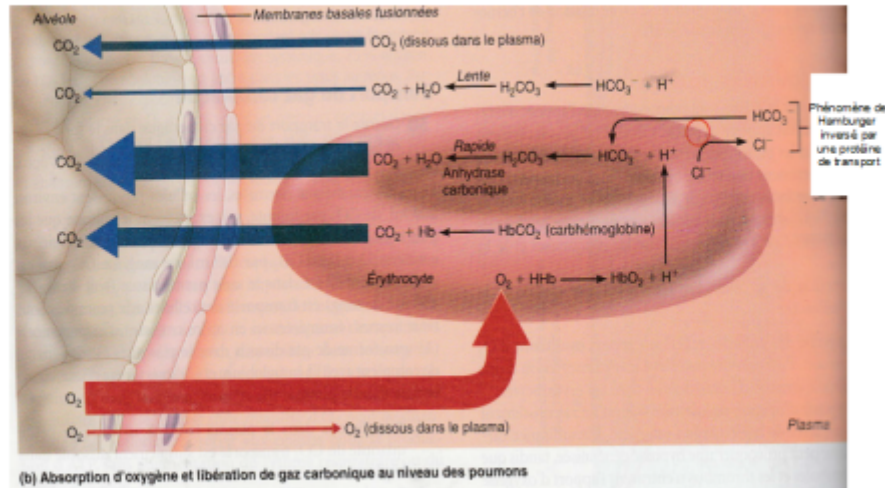


Elaine N Marieb-Katja Hoehn-Anatomie et physiologie humaine

La première réaction est lente sauf en présence de l'anhydrase carbonique présente dans l'érythrocyte mais non dans le plasma. L'acide carbonique, instable, se dissocie en un ion H<sup>+</sup> et un ion HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>. Les ions H<sup>+</sup> abaissent le pH cytoplasmique du globule rouge, entraînant la dissociation de l'HbO<sub>2</sub> et la libération d'O<sub>2</sub> : effet Bohr, puis sont captés par l'Hb réduite. Les ions HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> formés, diffusent de l'érythrocyte vers le plasma via un transporteur.

La sortie d'un ion de HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> de l'érythrocyte se fait contre une entrée d'un ion Cl<sup>-</sup> : c'est l'effet Hamburger.

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



Elaine N Marieb - Katja Hoehn - Anatomie et physiologie humaine

Les réactions qui ont eu lieu dans les tissus, sont réversibles dans les poumons où le CO<sub>2</sub> diffuse hors du sang pour entrer dans les alvéoles. Pour cela, les ions HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> et H<sup>+</sup> reforment le CO<sub>2</sub> par entrée des HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> dans l'érythrocyte et leur liaison aux ions H<sup>+</sup> pour donner l'acide carbonique contre une sortie des ions Cl<sup>-</sup> dans le plasma. L'acide carbonique est transformé en CO<sub>2</sub> et H<sub>2</sub>O. Ce CO<sub>2</sub>, avec celui libéré par l'Hb et le CO<sub>2</sub> dissous diffusent du sang aux poumons dans le sens du gradient de pression partielle.

La PO<sub>2</sub> a une influence sur l'affinité des molécules de CO<sub>2</sub> pour l'Hb : c'est l'effet Haldane. Ainsi, plus la PO<sub>2</sub> et la saturation en O<sub>2</sub> sont faibles et plus la concentration en CO<sub>2</sub> du sang est élevée.



# Relation entre le contenu en CO<sub>2</sub> et le pH sanguin

Relation entre le pH, la PCO<sub>2</sub> et les bicarbonates du plasma  
Déséquilibres acide-base

## Relation entre le pH, la PCO<sub>2</sub> et les bicarbonates du plasma

Les ions H<sup>+</sup> libérés par la dissociation du H<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> sont tamponnés par l'Hb dans l'érythrocyte et certaines protéines du plasma. Les ions HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> produits vont constituer dans le plasma une réserve alcaline dans le système tampon H<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> - HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> du sang permettant l'équilibre du pH sanguin.

Aussi, si la concentration en ions H<sup>+</sup> augmente, la quantité en excès va se combiner aux ions HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> pour former le H<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>. Par contre, si la concentration en ions H<sup>+</sup> diminue, le H<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> se dissocie libérant les ions H<sup>+</sup> et le pH diminue.

La ventilation alvéolaire peut modifier l'élimination du CO<sub>2</sub>, permettant ainsi à l'organisme de contrôler son équilibre acide-base.

La respiration joue un rôle fondamental dans l'ajustement et le maintien du pH sanguin avec la participation du rein.

Dans l'organisme, la [H<sup>+</sup>] = 40nmol/l correspondant à un pH neutre de 7,4.

- Solution acide si pH < 7,4 avec une [H<sup>+</sup>] > 40 nmol/l.
- Solution alcaline si pH > 7,4 avec une [H<sup>+</sup>] < 40 nmol/l.
- Un pH < 6,9 ou un pH > 7,8 est incompatible avec la vie.

Le pH est donné par l'équation de Henderson-Hasselbach :

$$\text{pH} = 6,1 + \log \frac{[\text{HCO}_3^-]}{[\text{H}_2\text{CO}_3]}$$

$$\text{pH} = 6,1 + \log \frac{[\text{HCO}_3^-]}{\text{CO}_2}$$

$$\text{pH} = 6,1 + \log \frac{[\text{HCO}_3^-]}{\text{PCO}_2 \times 0,03}$$

La relation entre le pH, la PCO<sub>2</sub> et les HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> est représentée par le diagramme pH-bicarbonate ou diagramme de Davenport.

Les valeurs physiologiques du plasma artériel sont :

- pH = 7,4 avec une [H<sup>+</sup>] = 40 nmol/l - 7,38 ≤ pH ≤ 7,42
- PCO<sub>2</sub> = 40 mm Hg - 38 mm Hg ≤ PCO<sub>2</sub> ≤ 42 mm Hg
- [HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>] = 24 mmol/l - 23 mmol/l ≤ [HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>] ≤ 28 mmol/l

## Déséquilibres acide-base

4 catégories de déséquilibres acide-base peuvent être observées :

- acidose respiratoire
- alcalose respiratoire
- acidose métabolique
- alcalose métabolique

Ces déséquilibres :

- peuvent être associés : acidose ou alcalose mixte.
- peuvent être corrigés avec un pH normal : déséquilibres compensés

Déséquilibres acido-basiques	pH	PCO <sub>2</sub>	[HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> ]	compensation
Acidose respiratoire	bas	élevée	normale	augmenter [HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> ]
Alcalose respiratoire	élevé	basse	normale	diminuer [HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> ]
Acidose métabolique	bas	normale	basse	diminuer PCO <sub>2</sub>
Alcalose métabolique	élevé	normale	élevée	augmenter PCO <sub>2</sub>