



Mécanismes de régulation du pH sanguin

Compétences travaillées

Compétences

Réaliser : Extraire et exploiter des informations pour montrer l'importance du contrôle du pH dans un milieu biologique.

Connaître : Contrôle du pH : solution tampon ; rôle en milieu biologique.

Valider : Extraire et exploiter des informations.

Niveau Validé

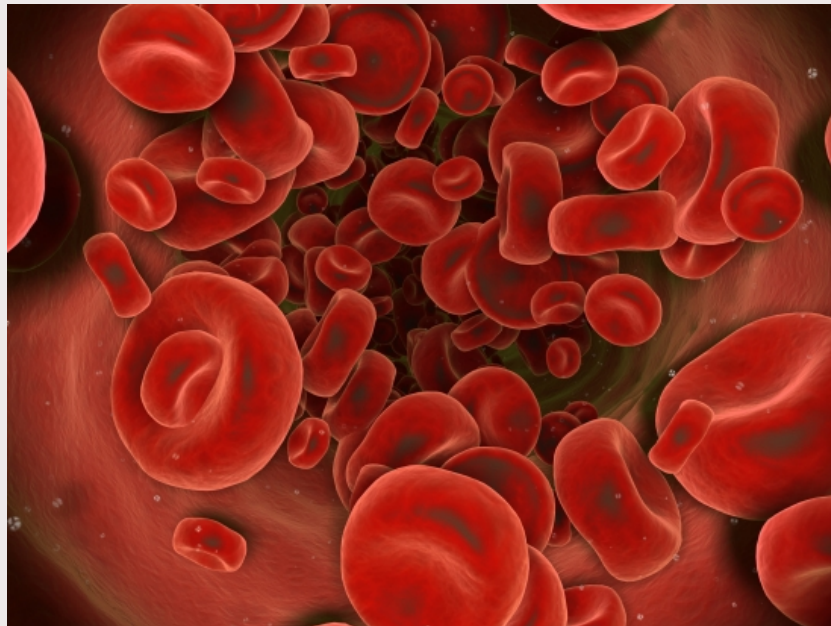
A B C D

A B C D

A B C D

Objectifs :

Le maintien strict d'un pH normal est essentiel car les fonctions enzymatiques de l'organisme sont très sensibles aux variations de $[H_3O^+]$. Un pH sanguin inférieur à 7,0 ou supérieur à 7,8 sont incompatibles avec la vie.



Le contrôle de l'équilibre acide-base est assuré par :

- Systèmes tampons
- Contrôle respiratoire de la P_{CO_2}
- Contrôle rénal de $[HCO_3^-]$ plasmatique

Documents sur le contrôle du pH du sang

Document n° 1 :

L'équilibre acido-basique de l'organisme est essentiel à la vie. De multiples réactions enzymatiques sont dépendantes du maintien dans une étroite limite du pH des milieux extra et intracellulaire. Une variation du pH intracellulaire entraînerait une modification de l'activité biologique des cellules et perturberait la stabilité des protéines. La présence de CO_2 dans le sang est une des résultantes essentielles de l'activité cellulaire. De cette activité résulte par ailleurs une production d'ions H_3O^+ et d'acides non négligeable, largement suffisante pour faire descendre le pH sanguin à des valeurs rapidement incompatibles avec la survie cellulaire si le sang n'était pas tamponné. Les processus métaboliques, les structures quaternaires des protéines, les liaisons intermoléculaires, les perméabilités membranaires, tout ce qui constitue l'être vivant est extrêmement sensible à la moindre variation de pH. Ceci explique l'importance d'une régulation étroite du pH : entre 7,35 et 7,45 pour le pH du sang (limites compatibles avec la vie : 6,8 - 7,8), autour de 7 pour le pH intracellulaire (variable selon les cellules et dans les différents organites d'une même cellule). Il est probable que la régulation la plus fine se situe au niveau de l'intracellulaire, mais ce milieu est très difficile à explorer. Nous nous limiterons à étudier l'équilibre acido-basique par le biais du compartiment extracellulaire (plasma) du sang. Il existe trois niveaux de maintien du pH sanguin permettant de répondre plus ou moins rapidement à une brusque variation du pH :

- Les systèmes tampon (permanents, instantanés, mais limités)
- Deux systèmes de régulation :
 - Le système respiratoire (rapide)
 - Le système rénal (le plus lent)

Document n° 2 :

Si le pH sanguin devient inférieur à 7,35 il y a excès d'acide et cela provoque une acidose ; cette situation entraîne une dépression du système nerveux central et peut mener au coma et à la mort. La crampe, due à un effort musculaire intense, est un autre signe d'acidose (accumulation d'acide lactique). Si le pH sanguin devient supérieur à 7,45 il y a excès de base et cela provoque une alcalose ; cette situation entraîne une hyperexcitabilité neuromusculaire qui peut conduire à la tétanie.

Les causes de ces variations sont nombreuses, on distingue généralement l'origine métabolique de l'origine respiratoire :

- dans l'acidose métabolique, la $[\text{HCO}_3^-]$ diminue suite à l'arrivée « extérieure » d'acide (comme l'acide lactique par exemple) ;
- dans l'acidose respiratoire, la pression partielle de CO_2 augmente suite à une hypoventilation (mauvais fonctionnement du système pulmonaire) ;
- dans l'alcalose métabolique, la $[\text{HCO}_3^-]$ augmente suite à des pertes acides (Ex : 3 vomissements) ou à l'ajout de base (Ex : absorption orale d'une préparation anti-acide) ;
- dans l'alcalose respiratoire, la pression partielle de CO_2 diminue suite à une hyperventilation.

Désordre primitif	Troubles primaires		Réponse compensatrice	
Acidose métabolique pH < 7.38	↓ HCO ₃ ⁻	< 22 mmol/l	↓ pa CO ₂	< 36 mmHg 4.68 kPa
Acidose respiratoire pH < 7.38	↑ pa CO ₂	>42 mmHg 5.46 kPa	↑ HCO ₃ ⁻	> 26 mmol/l
Alcalose métabolique pH > 7.42	↑ HCO ₃ ⁻	> 26 mmol/l	↑ pa CO ₂	>42 mmHg 5.46 kPa
Alcalose respiratoire pH > 7.42	↓ pa CO ₂	< 36 mmHg 4.68 kPa	↓ HCO ₃ ⁻	< 22 mmol/l
Acidose mixte	pa CO ₂ respiratoire ↑ et HCO ₃ ⁻ métabolique ↓			
Alcalose mixte	pa CO ₂ respiratoire ↓ et HCO ₃ ⁻ métabolique ↑			

Document n° 3 : Définitions extraites de l'encyclopédie Larousse

Alcalose : Trouble de l'équilibre acido-basique de l'organisme correspondant à une diminution de la concentration d'acide dans le plasma et les liquides interstitiels

Alcalose métabolique : C'est un trouble de l'équilibre acido-basique dû à un apport excessif de bases (bicarbonate de soude, par exemple) ou à une perte sévère d'acides, par exemple de suc gastrique lors de vomissements importants.

Alcalose respiratoire : C'est un trouble de l'équilibre acido-basique dû à un excès d'élimination pulmonaire de gaz carbonique provoqué par une hyperventilation (respiration rapide et profonde). Elle peut survenir en réponse adaptative au manque d'oxygène, lors d'une crise de panique ou en haute altitude.

Acidose : Trouble de l'équilibre acido-basique de l'organisme correspondant à une augmentation de la concentration d'acide dans le plasma et les liquides interstitiels.

Acidose métabolique : Ce trouble de l'équilibre acido-basique de l'organisme peut être provoqué par une production accrue d'acides dans l'organisme ou par une perte de bases.

Acidose respiratoire : Trouble de l'équilibre acido-basique de l'organisme qui se produit lorsque la respiration ne parvient pas à éliminer le dioxyde de carbone en quantités suffisantes ; l'excès de gaz restant dans le sang entraînant ainsi une élévation de l'acidité sanguine. L'acidose respiratoire peut être causée par un coma, une noyade, une insuffisance respiratoire chronique.

Document n° 4 : Extrait d'un cours de médecine

Le stock d'acide de l'organisme est maintenu constant par deux systèmes régulateurs indépendants : le rein et le poumon. Chacun est spécialisé dans l'élimination d'un type d'acide bien précis : le rein n'est pas que le poumon n'est capable d'éliminer des acides forts. Toutefois, en cas de plus capable d'éliminer du CO₂ défaillance de l'un des deux systèmes, l'autre sera capable de prendre des mesures de compensation.

Ces systèmes régulateurs sont toutefois situés loin des tissus où se produit l'agression acido-basique ; ils ont un délai d'intervention de quelques minutes pour le poumon à quelques heures pour le rein. Compte tenu de la grande sensibilité des processus métaboliques au pH, les cellules ne peuvent pas se permettre d'attendre, d'où la nécessité des systèmes tampons. Les systèmes tampons sont indispensables : présents partout dans l'organisme, sans aucun délai de réponse, ils permettent

d'attendre la régulation mais ne la remplacent pas. [...]

Dans le sang, il existe principalement deux systèmes tampon :

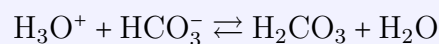
Dans le plasma, le tampon bicarbonate

Dans les globules rouges, le tampon hémoglobine.

Document n° 5 : Le tampon bicarbonate sanguin

Notre organisme maintient le pH du sang constant grâce à plusieurs mélanges tampons, et principalement le mélange tampon $\text{H}_2\text{CO}_3/\text{HCO}_3^-$.

Étudions de plus près les mécanismes (équilibres) liés à ce tampon, et comment ils régularisent le pH sanguin. L'équation traduisant l'effet tampon du mélange $\text{H}_2\text{CO}_3/\text{HCO}_3^-$ est :



avec

$$K_{a1} = \frac{[\text{HCO}_3^-][\text{H}_3\text{O}^+]}{[\text{H}_2\text{CO}_3]}$$

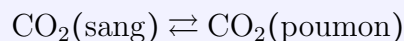
Toute augmentation d' H_3O^+ déplace cet équilibre vers la droite, donc en faveur de la formation d' H_2CO_3 . Or $\text{H}_2\text{CO}_3 = (\text{CO}_2, \text{H}_2\text{O})$, instable, est lui-même en équilibre avec CO_2 et H_2O contenus dans le sang :



avec

$$K_2 = \frac{[(\text{CO}_2, \text{H}_2\text{O})]}{P_{\text{CO}_2}} = 0,0301 \text{ mmol.L}^{-1}.\text{mmHg}^{-1}$$

Toute augmentation d' H_2CO_3 déplace cet équilibre vers la droite, donc vers la formation de CO_2 (en solution dans le sang). À l'interface sang-poumons s'établit l'équilibre entre le CO_2 dissous dans le sang et le CO_2 gazeux pulmonaire :



Puisque la concentration du CO_2 dans le sang augmente, cet équilibre est lui aussi déplacé vers la droite. L'augmentation de la concentration du CO_2 gazeux dans les poumons entraîne une augmentation du rythme respiratoire pour évacuer cet excès de CO_2 (les poumons qui rejettent 8 L de gaz par minute peuvent en rejeter jusqu'à dix fois plus). Il y a hyperventilation pulmonaire. L'augmentation de l'acidité du sang peut-être compensée (au moins en partie) par une hyperventilation pulmonaire. Mathématiquement, ces grandeurs sont reliées par l'équation du pH :

$$\text{pH} = 6,1 + \log \frac{[\text{HCO}_3^-]}{0,0301 \times P_{\text{CO}_2}}$$

où P_{CO_2} est la pression partielle de CO_2 dans le sang

Document n° 6 : Bilan des entrées et sorties d'acide et de base

1. Entrées : Les entrées d'acides ou de bases peuvent être alimentaires ou métaboliques.

1.a. Le CO_2 : métabolique, il est fabriqué par les cellules

1.b. les acides : H_3O^+ générés par l'activité des cellules

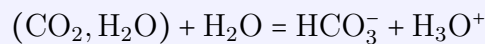
1.c. Les bases : essentiellement alimentaires.

2. Sorties : Elles sont assurées par deux voies : le CO_2 est éliminé par le poumon et les autres acides par le rein. Ce sont les seules voies importantes en physiologie.

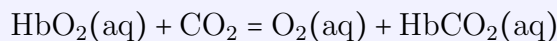
Document n° 7 : Transport du CO_2 dans le sang

Le CO_2 est transporté dans le sang :

- Sous forme dissoute dans le plasma CO_2 dissous = $(\text{CO}_2, \text{H}_2\text{O})$ avec $[\text{CO}_2, \text{H}_2\text{O}] = a \times P_{\text{CO}_2}$ où P_{CO_2} correspond à la pression artérielle en CO_2 dissous dans le sang et a est le coefficient de solubilité du CO_2 ($0,23 \text{ mmol.L}^{-1}.\text{kPa}^{-1}$ ou $0,031 \text{ mmol.L}^{-1}.\text{mmHg}^{-1}$ à 37°C). on a alors



- Combiné à l'hémoglobine dans les hématies (globules rouges) :



Le tampon bicarbonate intervient donc dans le plasma, tandis que le tampon hémoglobine joue son rôle dans les globules rouges.

Document n° 8 : Rôle des poumons dans le maintien de l'équilibre acido-basique

Les poumons interviennent en second lieu après la régulation par les systèmes tampons, en éliminant plus ou moins de CO_2 , de façon à ce que la pression reste constante. Cette régulation est mise en jeu rapidement quand la régulation par les systèmes tampons est insuffisante. Cette régulation est importante quand il y a de brusques variations de pH. La régulation est mise en jeu rapidement au bout de 1 à 3 minutes et optimale en 12 à 24 heures. Le centre respiratoire ajuste de façon reflexe la ventilation pulmonaire et donc l'élimination du CO_2 aux variations du pH sanguin. Une diminution du pH sanguin entraîne une augmentation de la ventilation pulmonaire, il y a augmentation du rythme et de l'amplitude des mouvements respiratoires, de façon à éliminer le CO_2 en excès.

Document n° 9 : Rôle des reins dans le maintien de l'équilibre acido basique

Les tampons chimiques se lient temporairement aux acides ou aux bases en excès, mais ne peuvent les éliminer de l'organisme. Seuls les reins peuvent éliminer les acides autres que CO_2 (Ac phosphorique, sulfurique, urique, corps cétoniques). Seuls les reins peuvent régler les concentrations des substances basiques, notamment HCO_3^- . Le rein a pour fonction d'ajuster les quantités de base et d'acides de l'organisme. Il agit en quelque sorte comme un filtre.

Les ions H_3O^+ ainsi que les HCO_3^- passent dans le rein qui produit de l'ammoniac NH_3 . L'ammoniac se combine avec H_3O^+ , qui sera éliminé dans les urines sous forme d'ions NH_4^+ . L'excrétion d'un H_3O^+ accepté par les tampons urinaires régénère un HCO_3^- qui repasse dans le sang. En même temps cet ion H_3O^+ est échangé contre Na^+ . Si bien que le rein a régénéré un bicarbonate ($\text{Na}^+, \text{HCO}_3^-$). A l'état normal, les HCO_3^- sont maintenus dans le sang à 25 mmol/L pour une de 40 mmHg Parallèlement à cette élimination d'acides par le rein, si dans le sang, l'équilibre du tampon bicarbonate est déplacé dans le sens de la production de CO_2 , des ions HCO_3^- sont consommés, alors le rein en produira une quantité équivalente à celle qui a été consommée pour tamponner les ions H_3O^+ .

D'après : J. Rossert, L. Barousse-Nicolet, Service de néphrologie B, Assistance publique, Hôpital Tenon

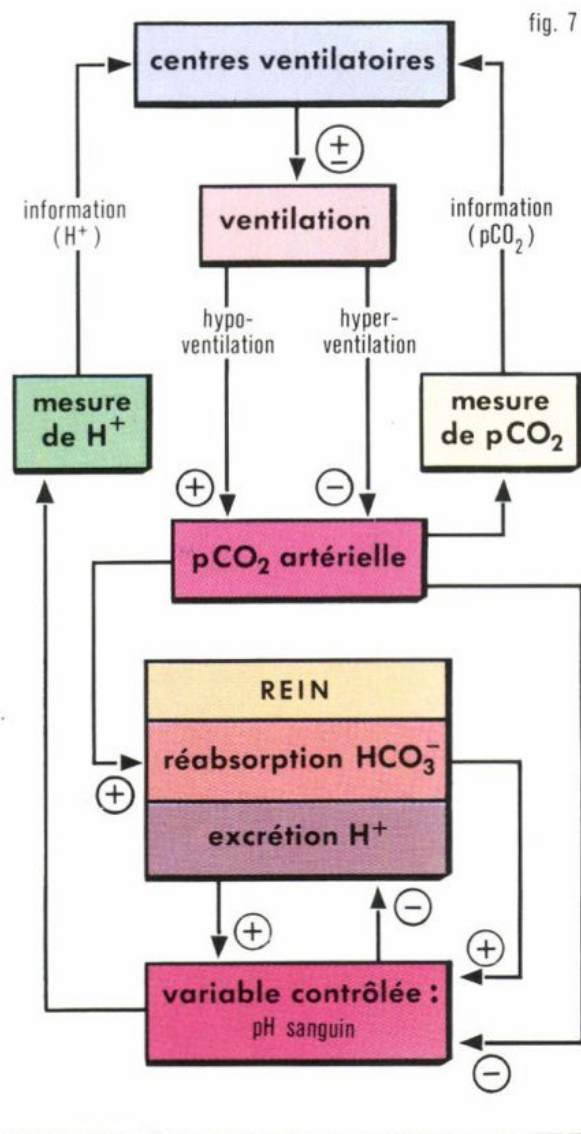


Schéma de la régulation du pH sanguin.

Conclusion : L'organisme est doté de mécanismes régulateurs qui luttent sans cesse contre les agressions acido-basiques, quand ces mécanismes sont dépassés, l'équilibre acido-basique est rompu. Le contrôle du pH du sang s'avère crucial quand certaines pathologies sont soupçonnées. Cet équilibre peut être étudié en déterminant au moins 2 éléments de l'équation de Hendersen-Hasselbalch.

I. Questions

1. A partir des normes de P_{CO_2} et $[HCO_3^-]$, montrer que le rapport $\frac{[HCO_3^-]}{[CO_2, H_2O]} = 20$ et retrouver la valeur du pH moyen du sang dans le plasma.

.....

.....

.....

.....

.....

.....

2. Pour montrer l'importance du rôle tampon, imaginer une entrée d'acide chlorhydrique $\text{H}_3\text{O}_{\text{aq}}^+ + \text{Cl}_{\text{aq}}^-$ de $1,0 \text{ mmol.L}^{-1}$ dans le sang.

(a) Calculer le pH qui en résulterait sans système tampon.

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

(b) Quel sera l'effet de l'apport d' H_3O^+ sur l'équilibre ? En supposant la réaction totale, montrer qu'il disparaît $1,0 \text{ mmol.L}^{-1}$ d' HCO_3^- et qu'il apparaît $1,0 \text{ mmol.L}^{-1}$ de CO_2 , H_2O déterminer la nouvelle valeur du pH.

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

(c) Comparer les valeurs obtenues en a) et b) aux valeurs vitales de pH et conclure.

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

3. Pourquoi le système tampon ne peut-il pas à lui seul équilibrer le pH ?

.....

.....

.....

.....

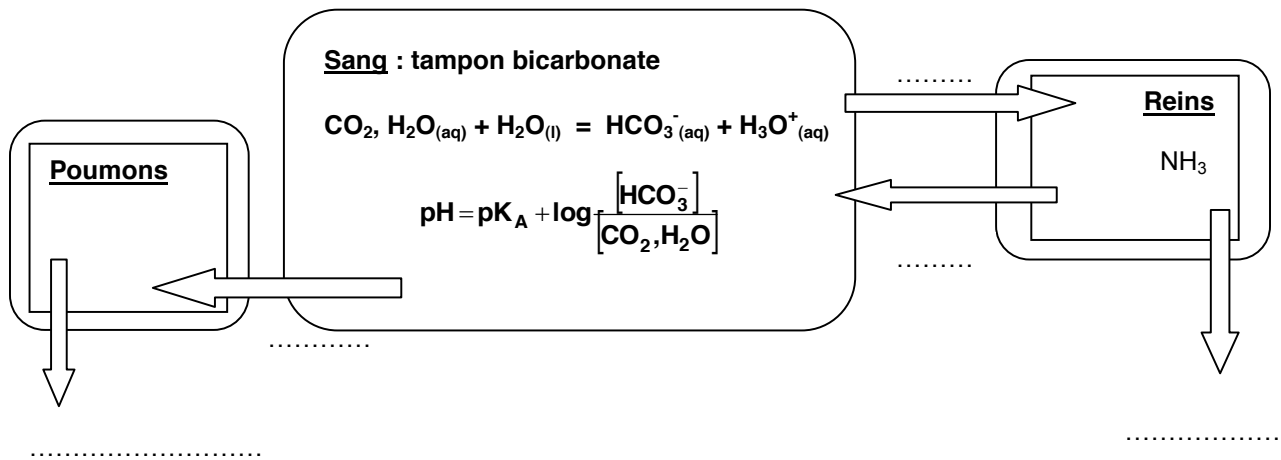
.....

.....

.....

.....

4. (a) Compléter le schéma suivant à partir des différents documents précédents.



(b) Justifier la phrase du document : Le système tampon bicarbonate présente l'avantage important de pouvoir fonctionner en système ouvert.

.....

.....

.....

.....

.....

.....

5. (a) Un homme de 73 ans consulte aux urgences. Il est cyanosé et souffre de broncho-pneumopathie obstructive. Il se dit cardiaque, présente une augmentation rapide de son rythme respiratoire. Sa gazométrie sanguine donne les résultats suivants : $P_{CO_2} = 60$ mm de Hg, $pH = 7,2$ et $[HCO_3^-] = 22$ mmol.L⁻¹. Déterminer le type de trouble acido-basique en cause (acidose métabolique, acidose respiratoire, alcalose métabolique, alcalose respiratoire) en justifiant votre raisonnement. Les systèmes régulateurs fonctionnent-ils ? Justifier.

.....

.....

.....

.....

.....

(b) A votre avis, à quoi est due la survenue de ce trouble ?

.....

.....

.....

.....

.....