

Sainte physio - TTR
Équilibre acido-basique



Généralité et définitions importantes



Acide : espèce capable de céder un ou plusieurs protons

Base : espèce capable de capter un ou plusieurs protons

Couple acido-basique : molécules capables de déplacer l'équilibre entre les ions H^+ et les ions OH^- en solution aqueuse en s'ionisant dans l'eau



Exemple : NH_3 / NH_4^+

Ionisation de l'eau :



$$K_{H_2O} = \frac{[H^+] \times [OH^-]}{[H_2O]}$$

Trois cas de figures :

- Solution neutre \rightarrow $pH = 7$, $[H^+] = 10^{-7} \text{ mol.L}^{-1}$
- Solution acide \rightarrow $pH < 7$, $[H^+] > 10^{-7} \text{ mol.L}^{-1}$
- Solution basique \rightarrow $pH > 7$, $[H^+] < 10^{-7} \text{ mol.L}^{-1}$

\rightarrow Une solution s'acidifie quand la concentration en protons augmente (le pH DIMINUE)

\rightarrow Une solution s'alcalinise quand la concentration en protons diminue (le pH AUGMENTE)

Récap :

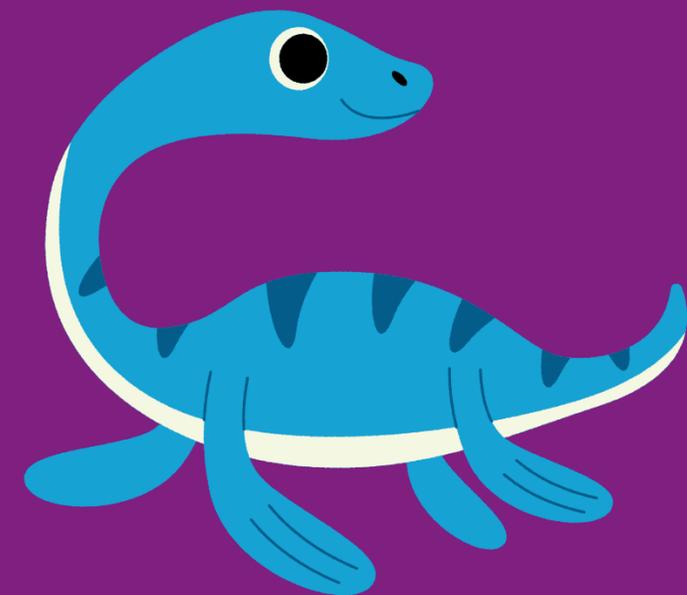
° Une solution s'acidifie quand la concentration en protons augmente
(le pH DIMINUE)

° Une solution s'alcalinise quand la concentration en protons diminue
(le pH AUGMENTE)



Petites questions :

- Pour quelles valeurs de pH et de concentration en protons une solution est elle acide ? Basique ?
- Quels ions l'eau forme-t-elle par ionisation ?



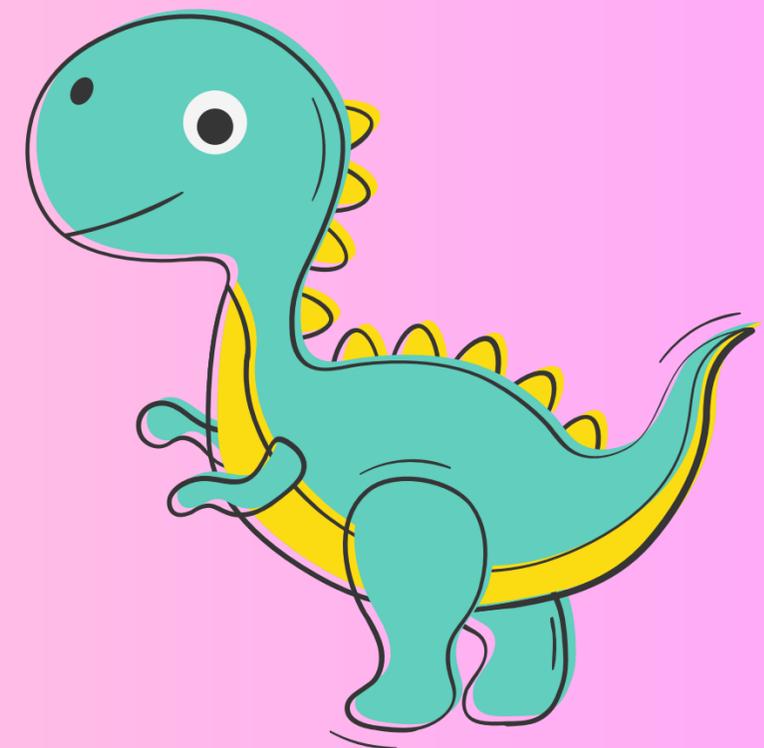
Echelle logarithmique :

Tout couple acido-basique possède une constante de dissociation (K) qui s'exprime en échelle logarithmique

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

On en tire deux formules importantes à savoir :

- $\text{pH} = -\log[\text{H}^+]$
- $\text{pK} = -\log K$

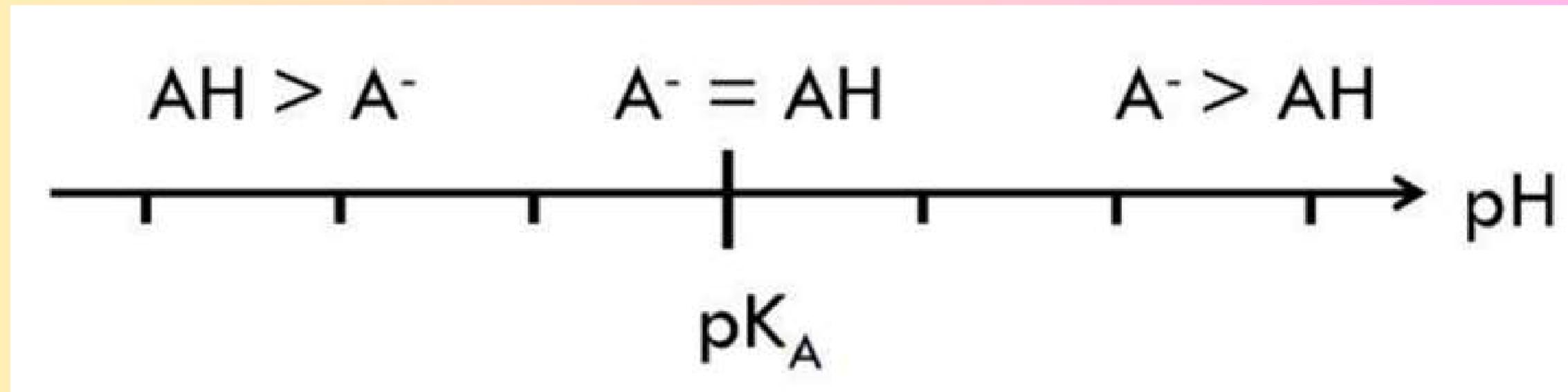


Liquides biologiques :

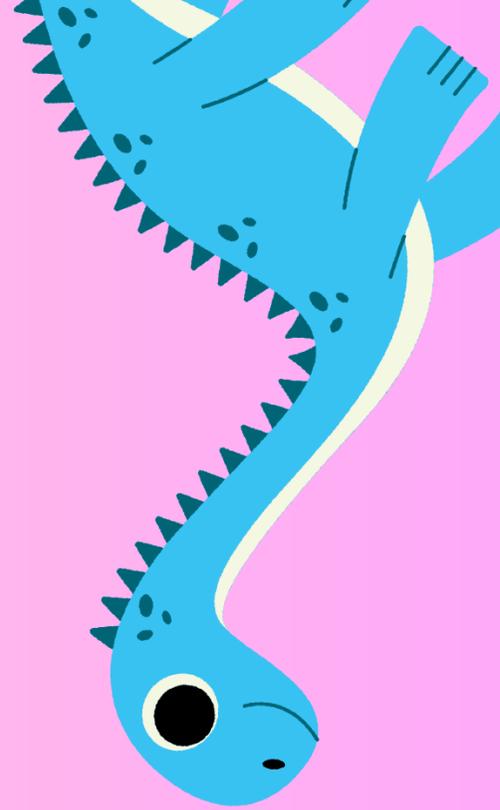
Lieu concerné	Caractéristique de pH
Estomac	Le pH est très bas, environ 100 mmol.L^{-1} . C'est l'endroit les plus acides de l'organisme ° pH = 1
Cellules	La concentration en protons est à 100 nmol.L^{-1} ° pH = 7
Milieu extracellulaire	La concentration en protons est à 40 nmol.L^{-1} ° pH = 7,40
Urine	Possède un pH extrêmement variable. Elle est un émonctoire variant sa composition selon les besoins de l'organisme ° $5 < \text{pH} < 8$

Les valeurs de pH sont à savoir les petits lou ...

Echelle de pH et de pKa :



- Si le $\text{pH} < \text{pK}_A$ alors la forme liée AH (l'acide du couple) prédomine
- Si le $\text{pH} > \text{pK}_A$ alors la forme, dissociée A^- (la base du couple) prédomine



Importance de l'équilibre acido-basique :

Le milieu intérieur est extrêmement régulé : entre 7,38 et 7,42. La survie de l'individu peut être compromise si :

- pH 7,00
- pH 7,80

Certaines fonctions sont influencées par l'état acido-basique notamment :

- Ouverture des canaux membranaires
- Vitesse de réactions enzymatiques
- Conformation et interactions de certaines protéines
- Transport de l'oxygène par l'hémoglobine



Petites questions :

- **Pouvez-vous rappeler les pH des différents organes/milieus que nous avons vus (estomac, cellules, milieu extracellulaire, urine) ?**
- **Pouvez-vous citer les fonctions influencées par l'équilibre acido-basique ?**

Charge acide

++ L'organisme est soumis à une charge acide permanente ++

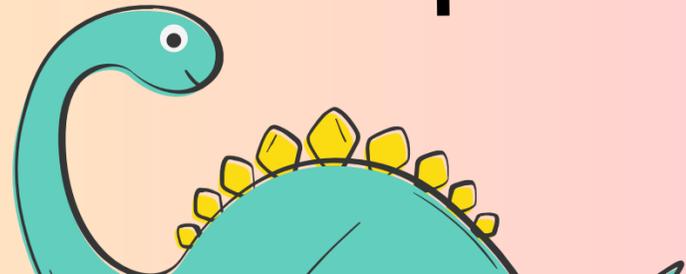
→ Provient de la dégradation des acides aminés et du métabolisme énergétique

→ Inéluctable

Deux types de métabolisme (déchets différents) :

° **Métabolisme aérobie : production de CO₂ exclusivement (acide volatil)**

° **Métabolisme anaérobie : production de CO₂ et d'acide lactique (acide fixe)**

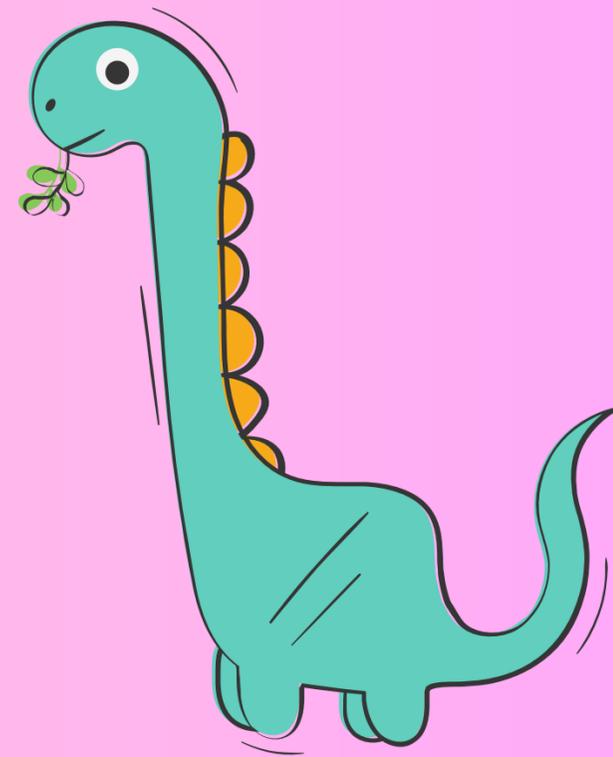
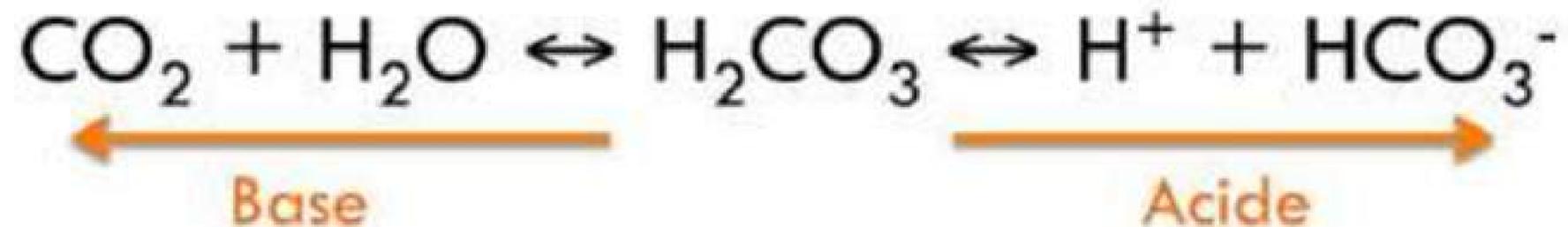


Acide carbonique H₂CO₃ :

- Au cœur de la régulation du pH du sang et des cellules
- Extrêmement abondant
- Régulé par les **poumons** et les **reins**

Réaction réversible d'hydratation
accélérée par
l'anhydrase carbonique

Dissociation
ionique



- Bicarbonates (HCO_3^-) : fabriqué par les reins
- CO_2 : éliminé par les poumons (à travers l'expiration)
- H^+ : soit éliminés par les reins sous forme d'ammonium (NH_4^+), soit s'associe à un bicarbonate pour devenir un acide carbonique (pouvant lui-même se dissocier en CO_2 et H_2O)

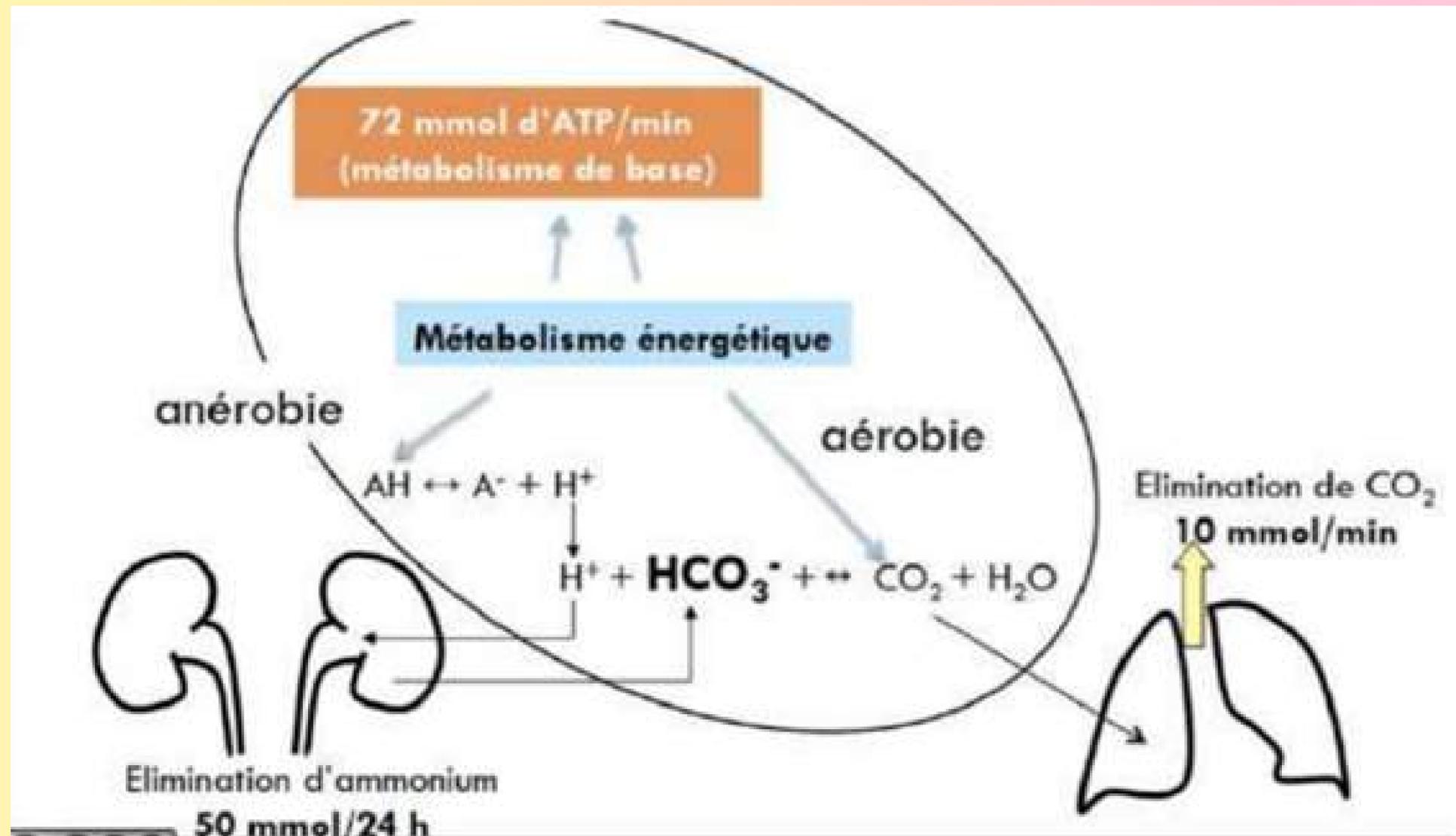
L'acide carbonique H_2CO_3 peut acidifier ou alcaliniser l'organisme, c'est un couple acidobasique :

- Il **acidifie** via **l'ionisation** de l'acide carbonique
- Il **alcalinise** via **l'hydratation** du gaz carbonique



Rôles des reins et des poumons

a - Au repos



- Métabolisme aérobie > anaérobie
- Les poumons expulsent le CO₂
- Les reins éliminent les H⁺ dans l'urine et produisent du bicarbonate
- Les poumons ont une capacité de régulation supérieure à celle des reins

Rôles des reins et des poumons

a - Au repos

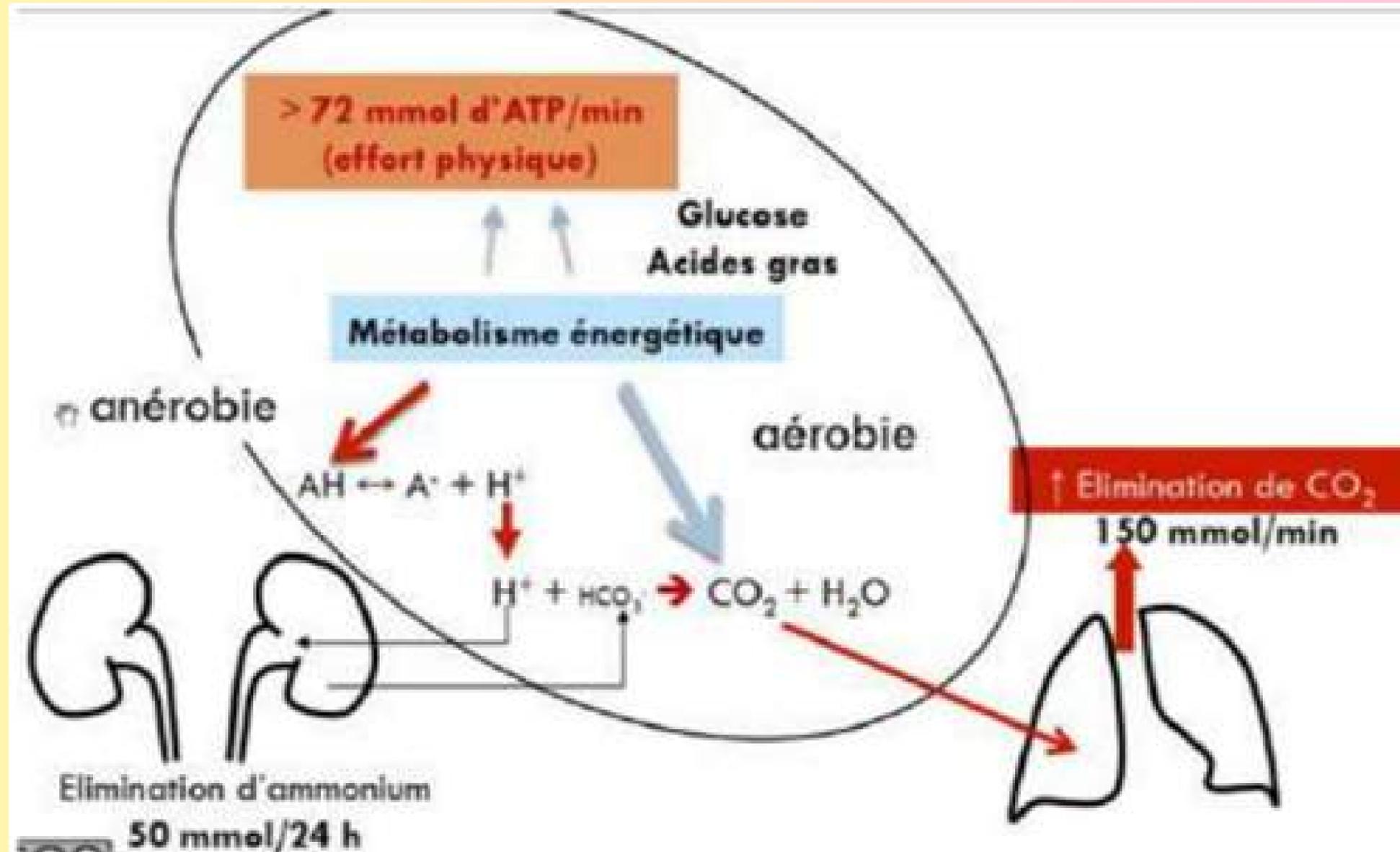
H⁺

```
graph TD; Hplus[H+] --> Left[Peut s'associer à un NH3 formant du NH4+ (ammonium) qui peut être éliminé par les reins]; Hplus --> Right[Peut être trappés par un bicarbonate pour former H2CO3 qui se dissociera finalement en H2O et CO2, ce-dernier pouvant être lui-même exhalé par les poumons];
```

Peut s'associer à un NH₃ formant du NH₄⁺ (ammonium) qui peut être éliminé par les reins

Peut être trappés par un bicarbonate pour former H₂CO₃ qui se dissociera finalement en H₂O et CO₂, ce-dernier pouvant être lui-même exhalé par les poumons

b - À l'effort

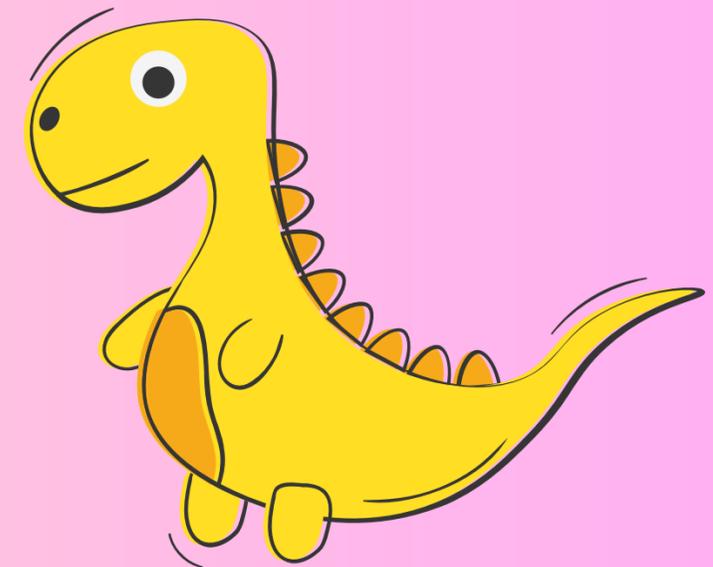


- Les besoins énergétiques augmentent
- Les métabolismes aéro et anaérobiques augmentent
- CO_2 et acide lactique augmentent
- Les poumons s'adaptent immédiatement (hyperventilation) ($\times 15$)
- Les reins ne s'adaptent pas (les bicarbonates sont consommés et le pouvoir tampon amputé)

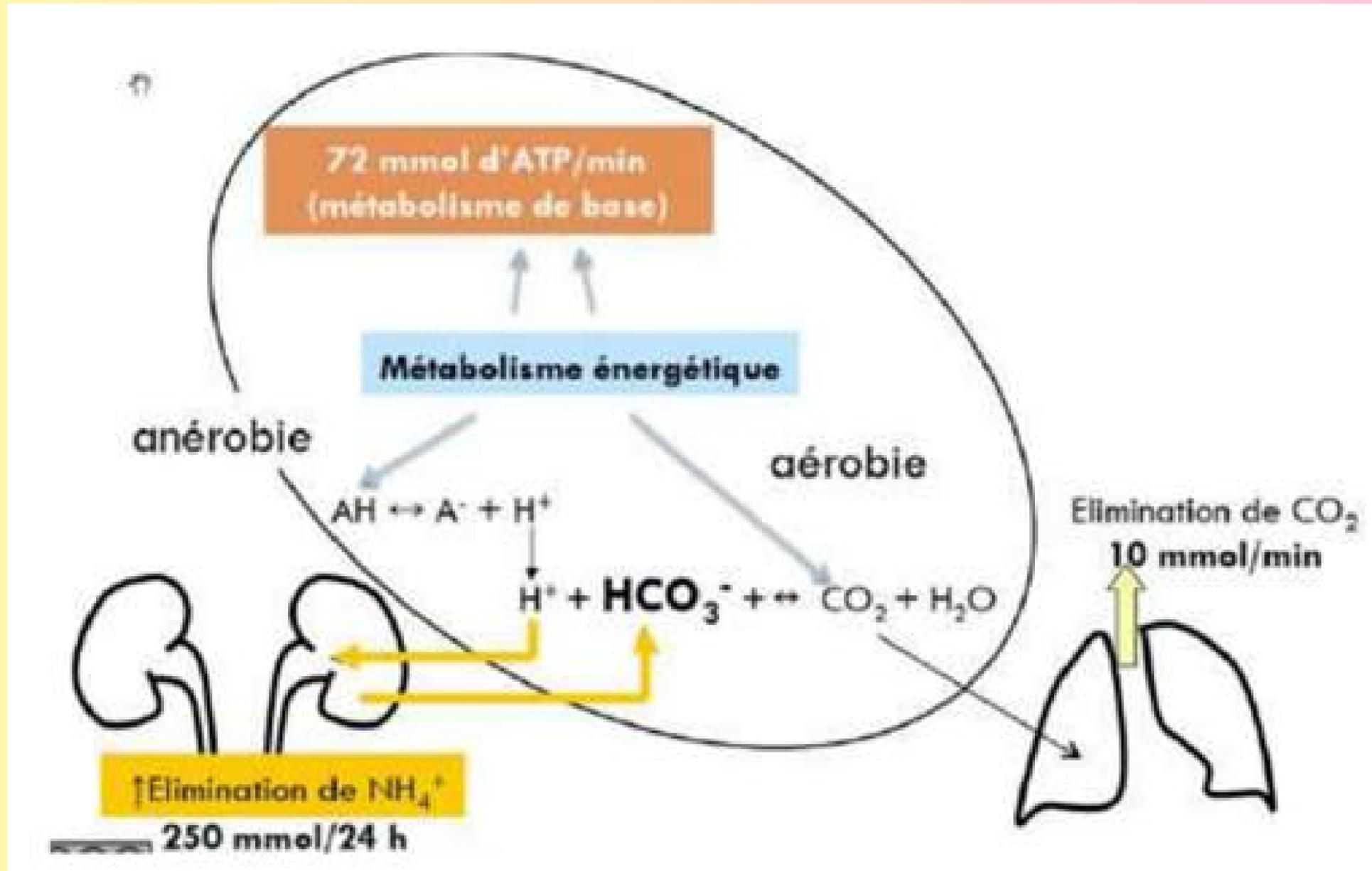
Récap à l'effort :



- **Les poumons s'adaptent immédiatement (X15)**
- **Les reins ne s'adaptent pas**



c – Après l'effort



◦ La demande énergétique diminue

◦ Retour à la normale de la ventilation

◦ Les bicarbonates sont régénérés

◦ Les reins éliminent 5x plus

◦ Le pouvoir tampon revient à la normale

La capacité de régulation des poumons est plus importante que celle des reins (x15 contre x5)

QCM Time

A propos du rôle des reins et des poumons dans l'équilibre acido-basique, indiquez la(les) proposition(s) exacte(s) :

- A) A l'effort, les poumons, contrairement aux reins, s'adaptent immédiatement pour éliminer 5x plus de protons
- B) Cependant au repos, ce sont les reins qui ont une capacité de régulation supérieure à celle des poumons
- C) Après l'effort, les reins, qui sont des organes longue détente vont pouvoir s'adapter pour éliminer plus de protons
- D) Pendant l'effort, on dit que le pouvoir tampon du bicarbonate est amputé. En effet, ils s'associent à des protons, ainsi leur taux diminue
- E) Les réponses A, B, C et D sont fausses

QCM Time

A propos du rôle des reins et des poumons dans l'équilibre acido-basique, indiquez la(les) proposition(s) exacte(s) :

- A) Faux : Tout était vrai, mais c'est pas 5 mais 15x plus
- B) Faux : Au repos, le métabolisme est aérobie. Le déchet est donc le CO₂, il est principalement éliminé par les poumons
- C) Vrai
- D) Vrai : Comme le rein ne s'adapte pas, il est incapable de renouveler le taux de bicarbonate dans l'immédiat
- E) Faux

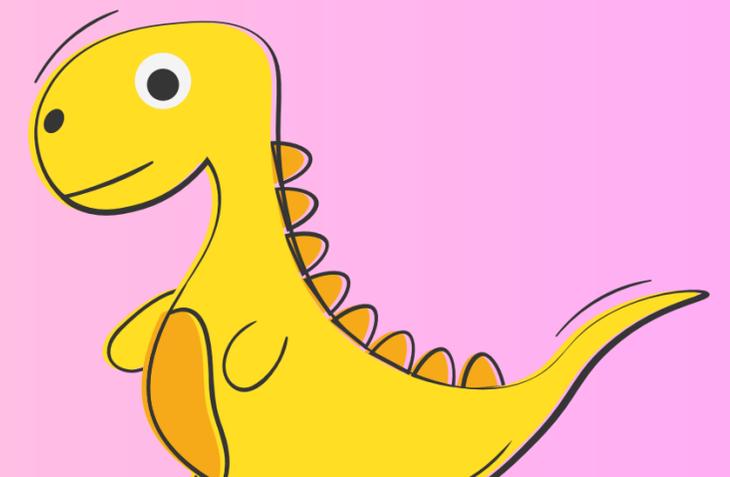
Charge acide : aliments et métabolisme énergétique

H⁺ et HCO₃⁻
14 400 mmol/jour
Élimination pulmonaire sous
forme de CO₂

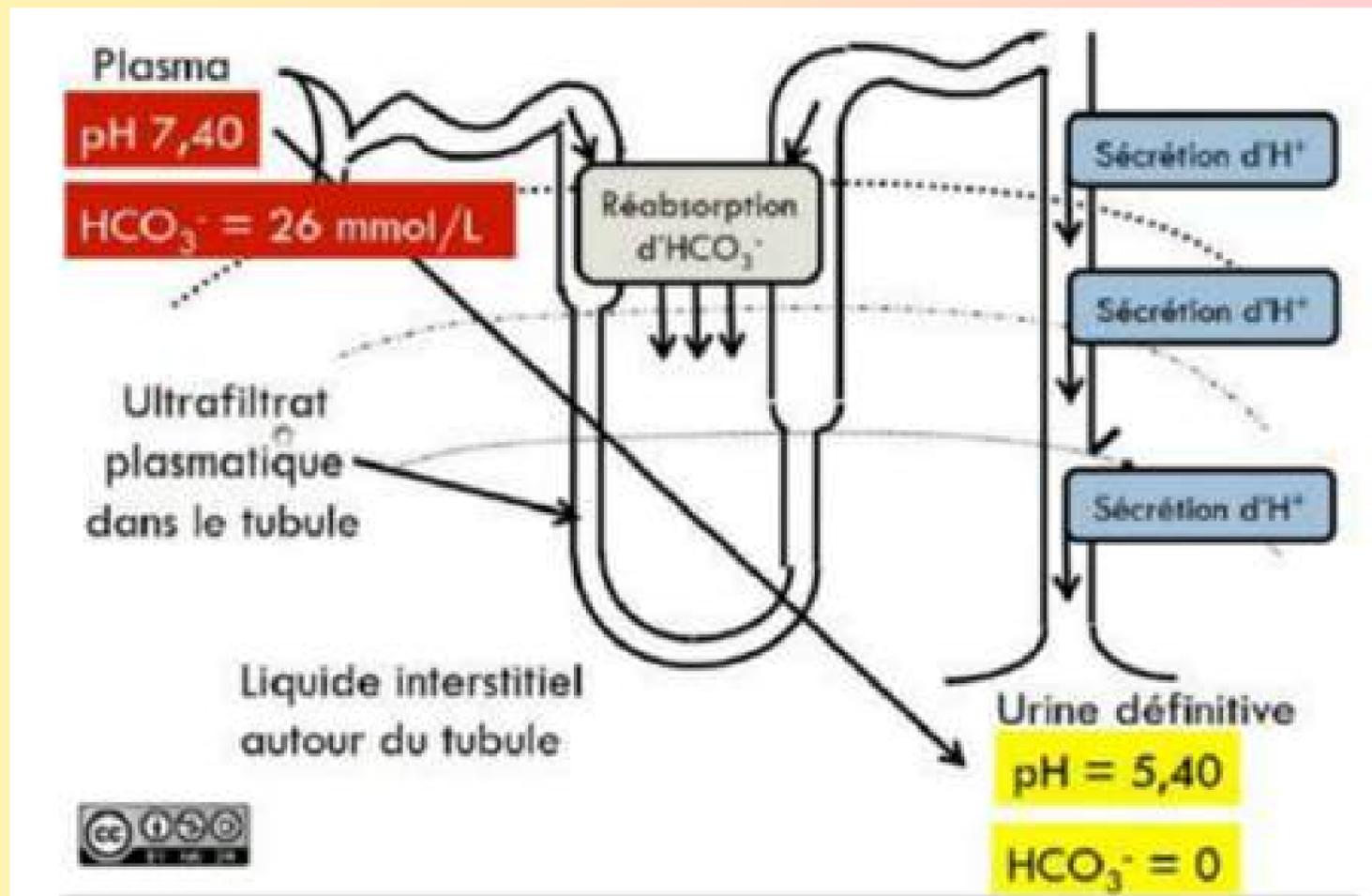
H⁺ et anions organiques
70 mmol/jour
Élimination rénale sous forme
d'ammonium et d'acide
phosphorique

Dégradation des nutriments et charge acide :

- ° Protéines → glucose + urée + acide phosphorique + acide sulfurique + CO₂
- ° Glucose → CO₂ ± acide lactique + ATP
- ° Acides gras → CO₂ ± corps cétoniques + ATP



Les reins



La réabsorption des bicarbonates se fait à partir du fluide dans le tubule vers le liquide interstitiel

L'urine définitive est dépourvue de bicarbonate → **TOUS les bicarbonates sont réabsorbés**

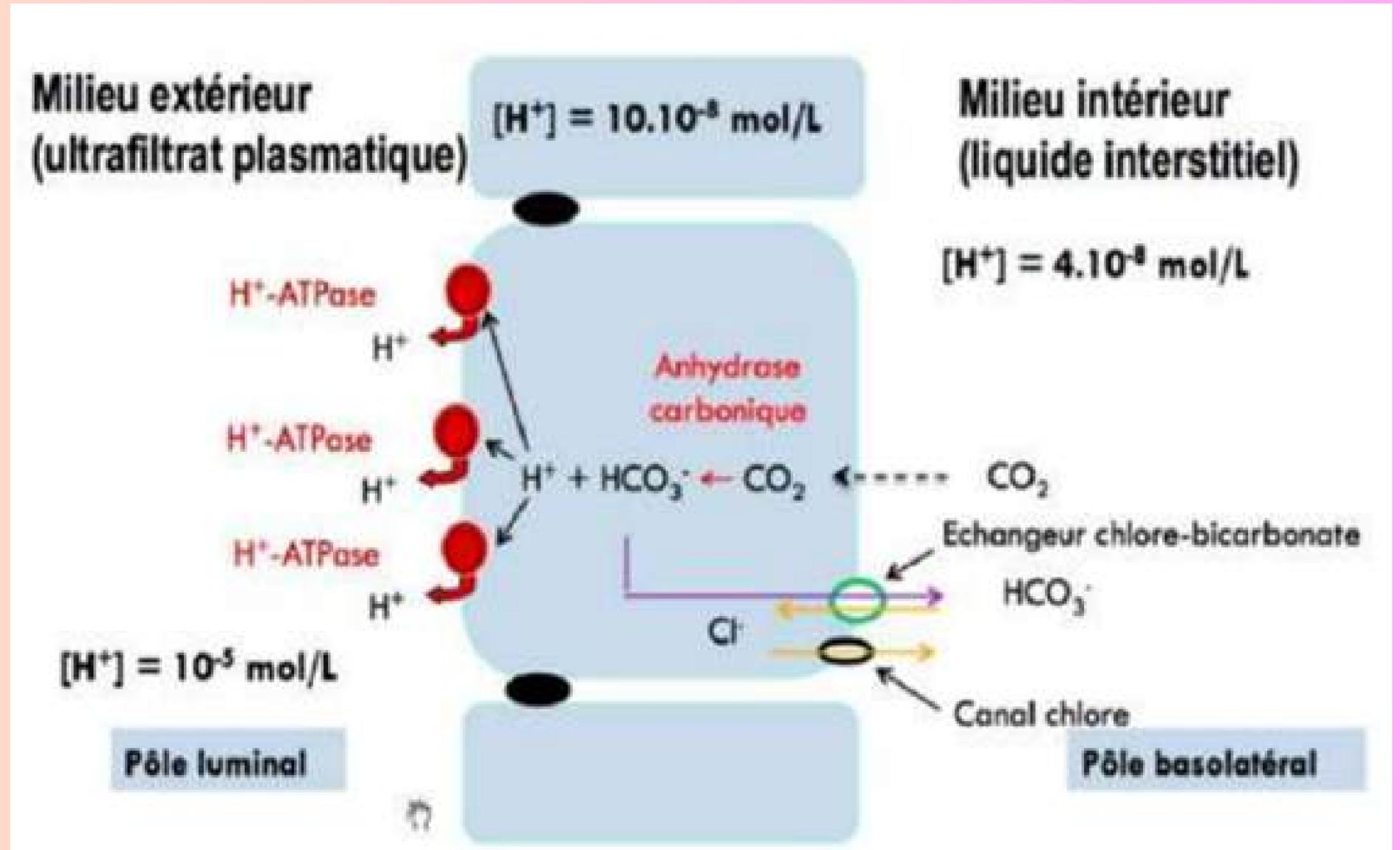
En distalité du tubule les protons vont être sécrétés du liquide interstitiel vers le fluide tubulaire, ainsi le pH de l'urine est bas. La réabsorption de protons est variable et dépend de l'état acido basique

Suivant les besoins de l'organisme l'urine est plus ou moins enrichis en protons

Sécrétion des protons :

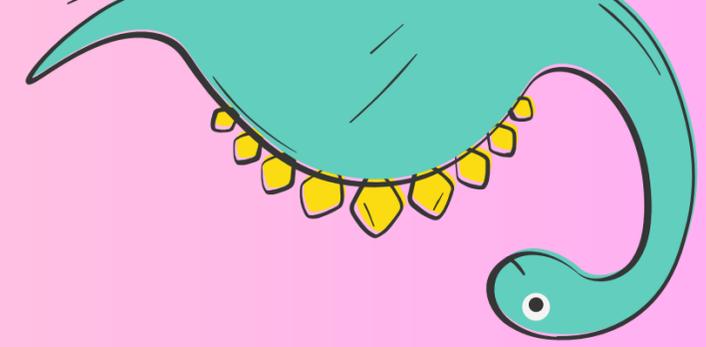
-> Phénomène **actif** utilisant les pompes $H^+ATPases$ situés aux pôles **luminiaux** des cellules rénales

La sécrétion de protons va pouvoir se faire contre le flux de diffusion soit vers l'urine primitive



Pour chaque ion H^+ sécrété, un bicarbonate est régénéré

Fixation des protons dans l'urine



La fixation des protons dans l'urine passe par deux couples acido-basiques :

- Le **couple ammonium/ammoniac a un $pK_A = 9,20$** . L'urine primitive à un pK_a inférieur. Donc la forme liée (= acide) prédomine (extrêmement efficace. Fabriqué par les reins (donc adaptation possible))
- L'**acide phosphorique à un $pK_A = 6,80$** . L'urine définitive, a un pK_A généralement inférieur. Provient de l'alimentation (donc pas adaptable)

Forme liée acide qui
prédomine (donc se lie
aux H^+ de l'urine)

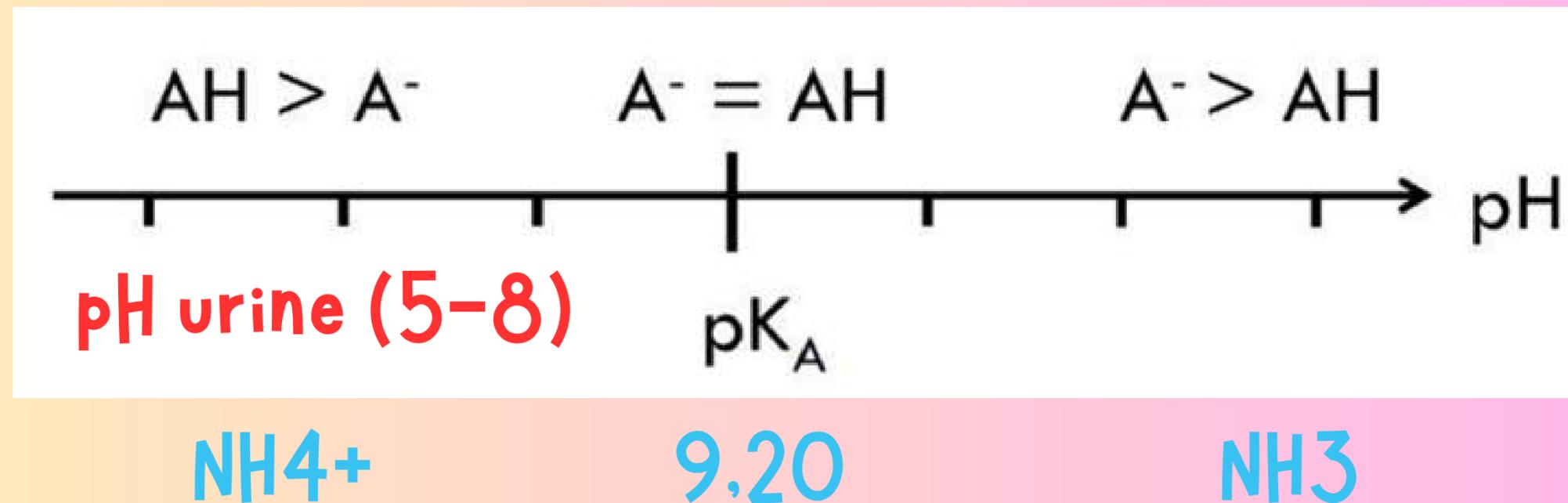
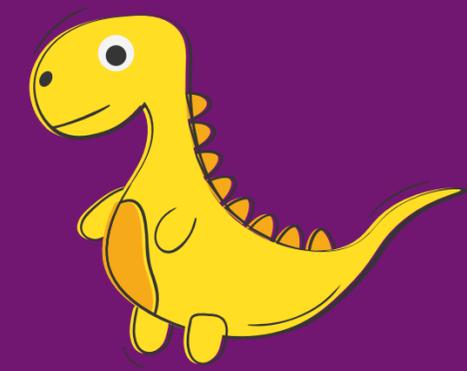


Schéma du couple ammonium / ammoniac

QCM Time



A propos de la sécrétion et fixation des protons dans l'urine, indiquez la(les) proposition(s) exacte(s) :

- A) L'ammonium est un tampon fabriqué par les reins**
- B) Physiologiquement, on ne retrouve pas de bicarbonate dans l'urine car ils sont tous réabsorbés**
- C) La forme liée (acide) du couple ammonium / ammoniac prédominera toujours dans l'urine**
- D) La sécrétion de proton dans le tubule rénal est un phénomène actif qui se fait contre le flux de diffusion**
- E) Les réponses A, B, C et D sont fausses**

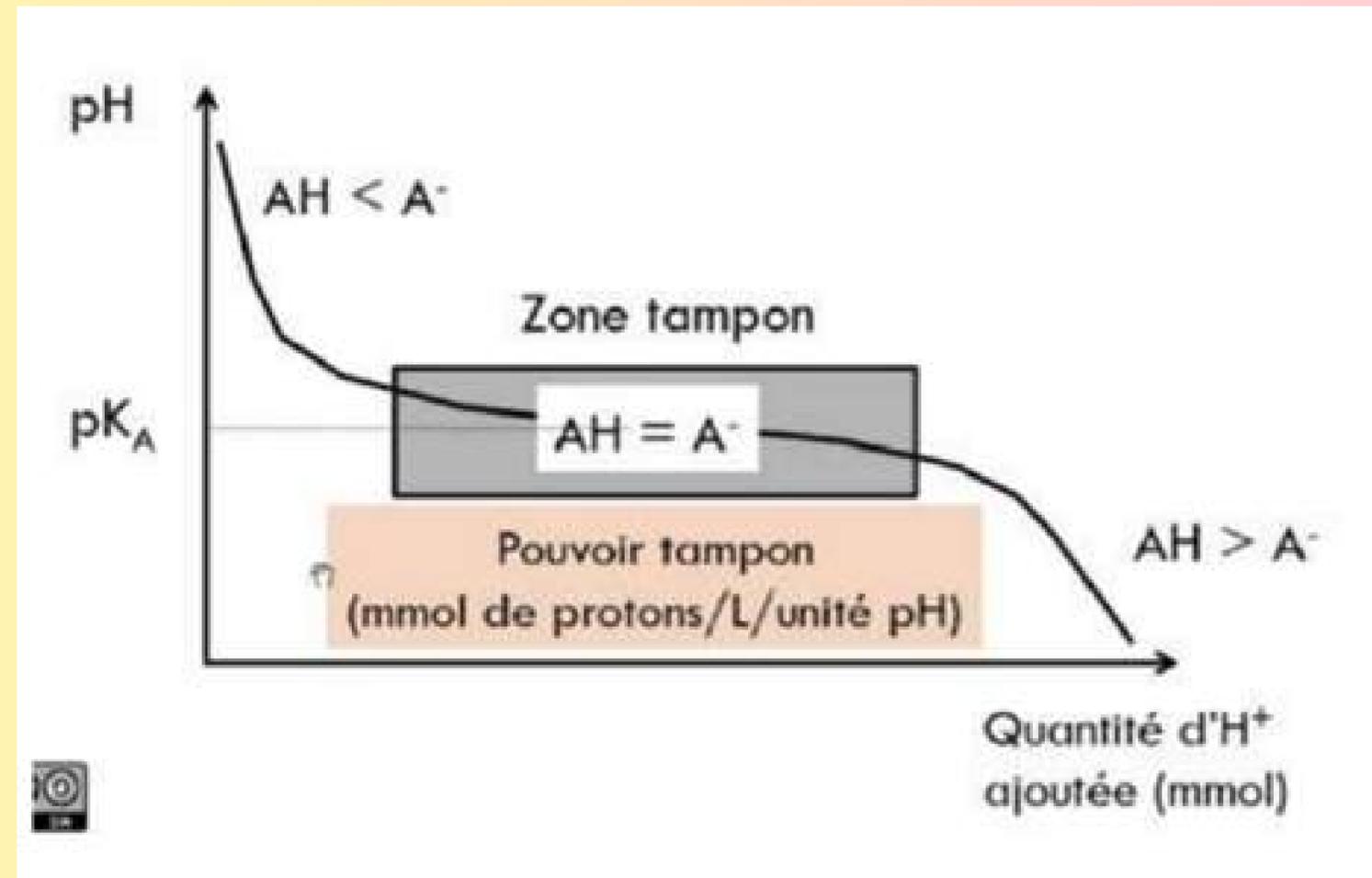
QCM Time



A propos de la sécrétion et fixation des protons dans l'urine, indiquez la(les) proposition(s) exacte(s) :

- A) Vrai
- B) Vrai
- C) Vrai
- D) Vrai
- E) Faux

Les systèmes tampons plasmatique et cellulaire



◦ Multiples

◦ Interdépendants



Zone tampon : zone proche du pK_A du couple acidobasique. C'est une zone où il faut ajouter beaucoup de protons pour faire varier très légèrement le pH

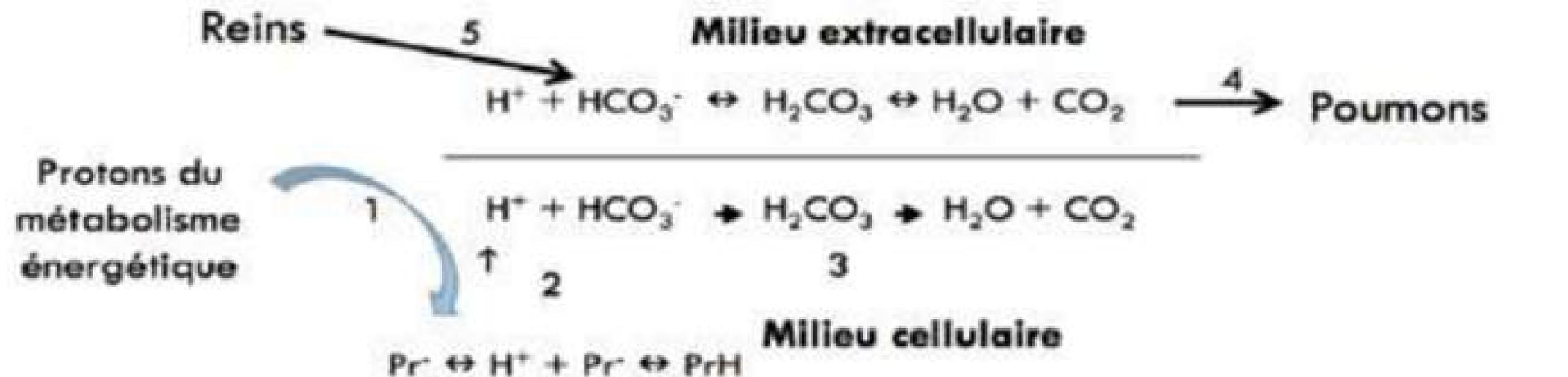
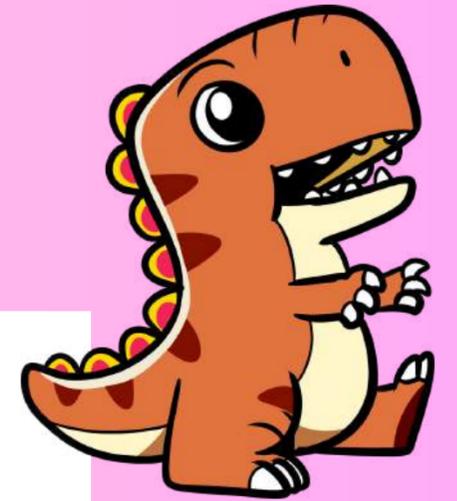
TROIS couples acidobasiques coexistent (zone tampon) large. Ces principaux tampons cellulaires et plasmatiques sont le bicarbonate (HCO₃⁻), l'acide carbonique (H₂CO₃), les protéines et acides organiques faibles

Pouvoir tampon global :

Tissu / Compartiment	Système tampon	Pouvoir tampon (<u>mmol H⁺ / L / unité de pH</u>)
<u>Milieu extracellulaire</u>	HCO ₃ ⁻ / H ₂ CO ₂	55
	Acide phosphorique	0,7
	Protéines	7
<u>Milieu cellulaire</u>	HCO ₃ ⁻ / H ₂ CO ₂	18
	Protéines	60
<u>Hématies</u>	HCO ₃ ⁻ / H ₂ CO ₂ Hémoglobine	30

++ Ils sont donc en collaboration et en équilibre afin de trapper les protons de la manière la plus efficace ++

Complémentarité des pouvoirs tampons:



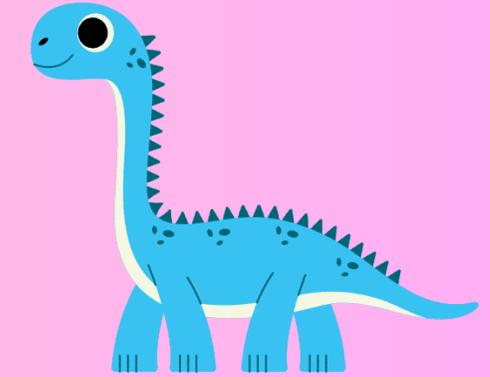
- 1/ les nouveaux protons se fixent aux groupements histidines Pr^-
- 2/ les groupements histidines Pr^- sont « déprotonés »
- 3/ les bicarbonates du milieu cellulaire sont consommés
- 4/ le CO_2 diffuse vers le milieu extracellulaire, il est éliminé par voie pulmonaire
- 5/ le HCO_3^- est restitué par les reins et gagne le milieu cellulaire

Petites questions :

- C'est quoi une zone tampon ?
- Quels sont les tampons principaux de ces différents milieu : cellulaire ? extracellulaire ? Hématies?

Pouvoir tampon d'une solution d'acide carbonique

1) Milieu fermé



Etat initial

Etat final



$$7,40 = 6,10 + \log \frac{24}{1,2}$$

$$\begin{aligned} \text{pH} &= 7,40 \\ [\text{H}^+] &= 40 \text{ nmol/L} \\ [\text{HCO}_3^-] &= 24 \text{ mmol/L} \\ \alpha P_{\text{CO}_2} &= 1,2 \end{aligned}$$

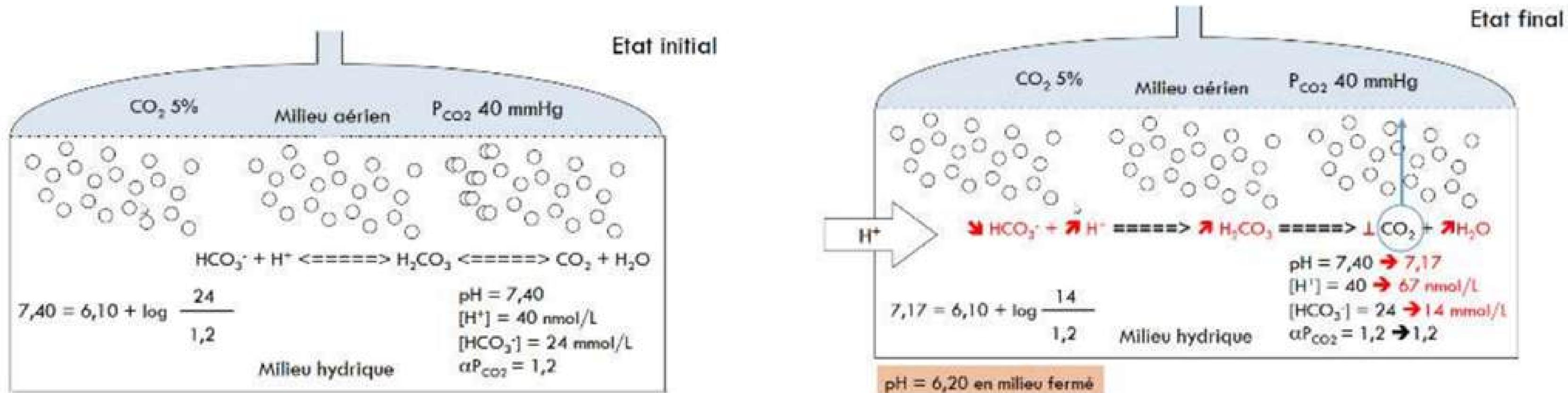


$$6,20 = 6,10 + \log \frac{14}{11,7}$$

$$\begin{aligned} \text{pH} &= 7,40 \rightarrow 6,20 \\ [\text{H}^+] &= 40 \rightarrow 630 \text{ nmol/L} \\ [\text{HCO}_3^-] &= 24 \rightarrow 14 \text{ mmol/L} \\ \alpha P_{\text{CO}_2} &= 1,2 \rightarrow 11,7 \end{aligned}$$

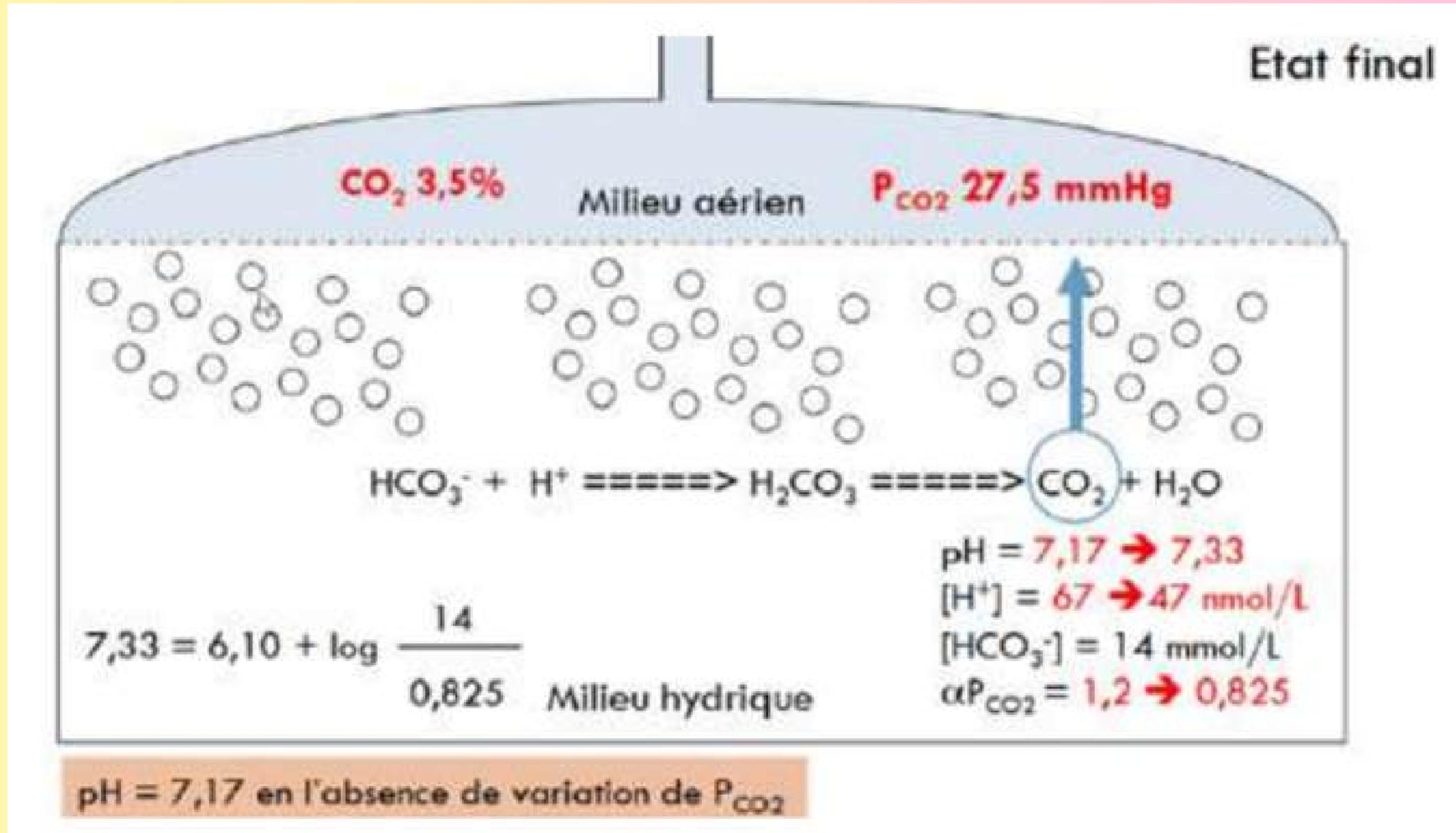
- Le CO₂ produit ne pourra pas diffuser vers l'extérieur
- [H⁺]
- pH
- Les bicarbonates ont été consommés • P_{CO₂}

2) Milieu ouvert



- Le CO₂ pourra diffuser
- Les bicarbonates vont être consommés
- Du CO₂ ET H₂O vont être produits
- H₂O, P_{CO2} ne change PAS, le pH diminue plus légèrement

3) Ajout de protons en milieu ouvert avec diminution de la pression partielle en CO₂ du milieu aérien

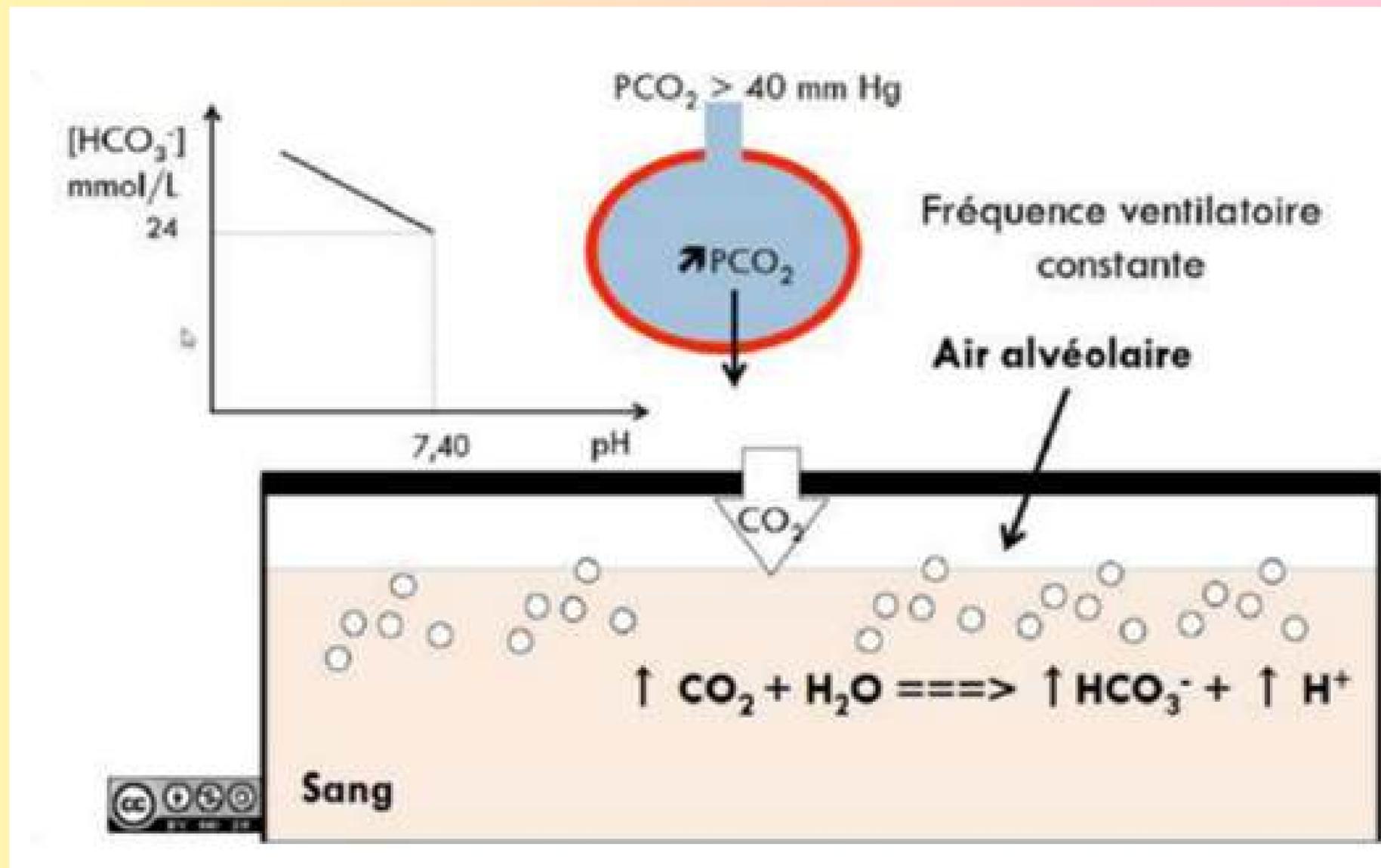


- Le CO₂ diffuse mieux
- P_{CO₂}
- Le pH diminue encore moins

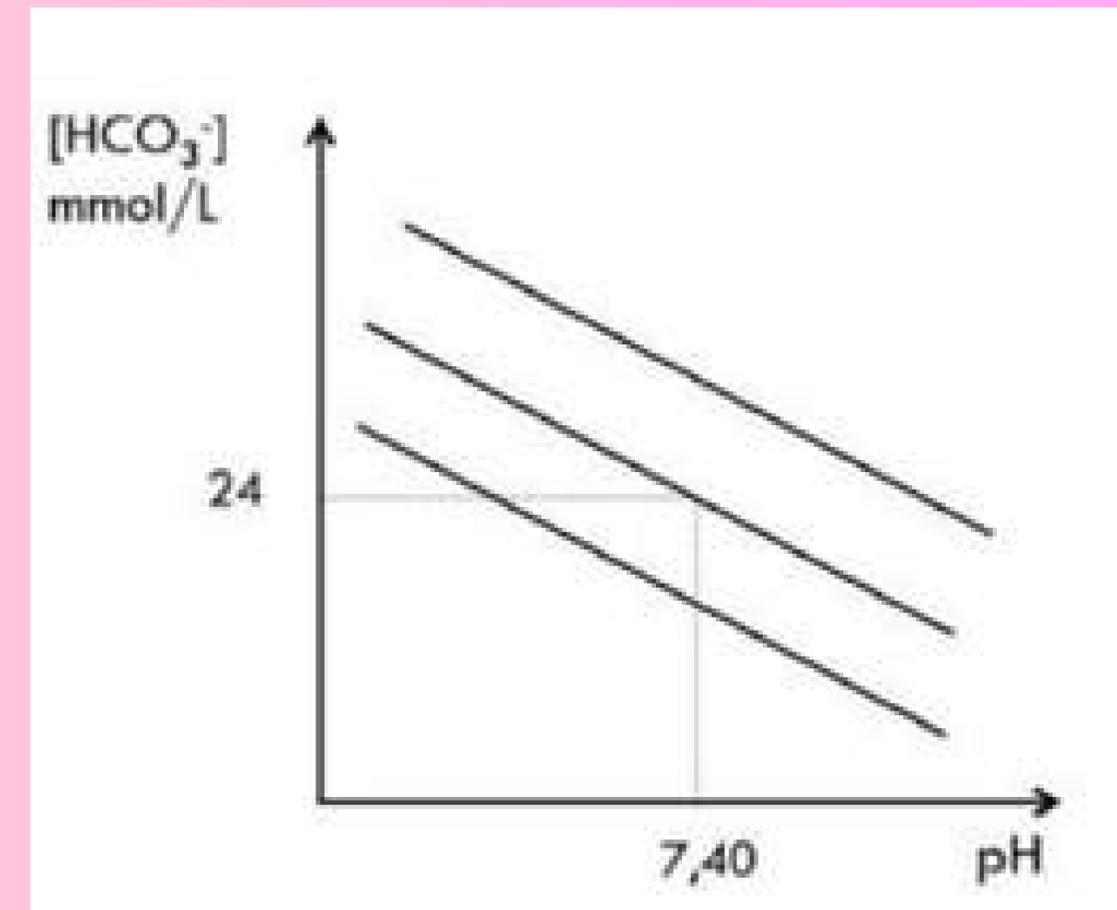
Etude du pouvoir tampon In vivo

1) Etude du pouvoir tampon de l'organisme en milieu fermé

° Situation 1 : augmentation de PCO_2



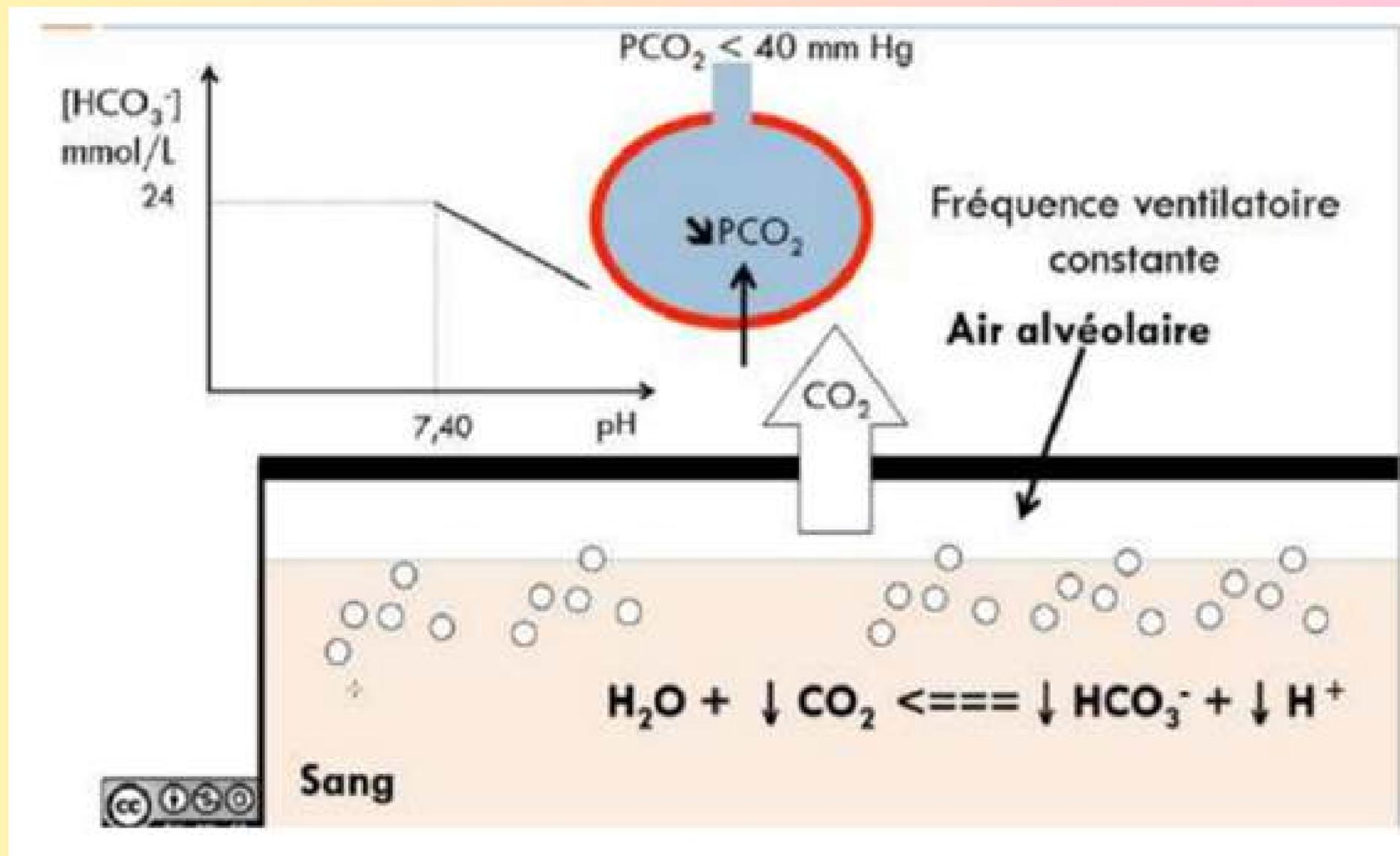
Modélisation:



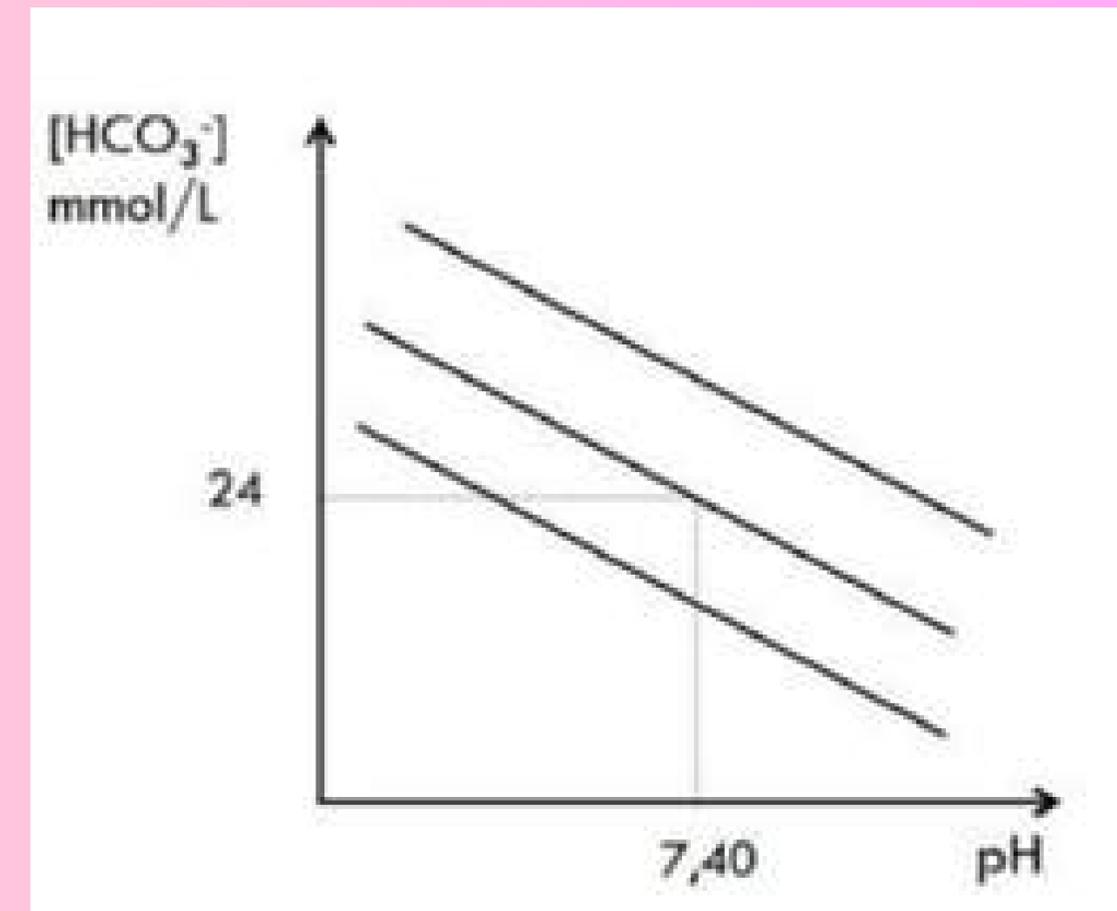
Étude du pouvoir tampon In vivo

1) Étude du pouvoir tampon de l'organisme en milieu fermé

° Situation 2 : diminution de P_{CO_2}



Modélisation:





Application en médecine (milieu fermé)

Anémie : diminution de GR (globules rouges) dans le sang et donc la diminution de l'hémoglobine (qui on le rappelle est un tampon)

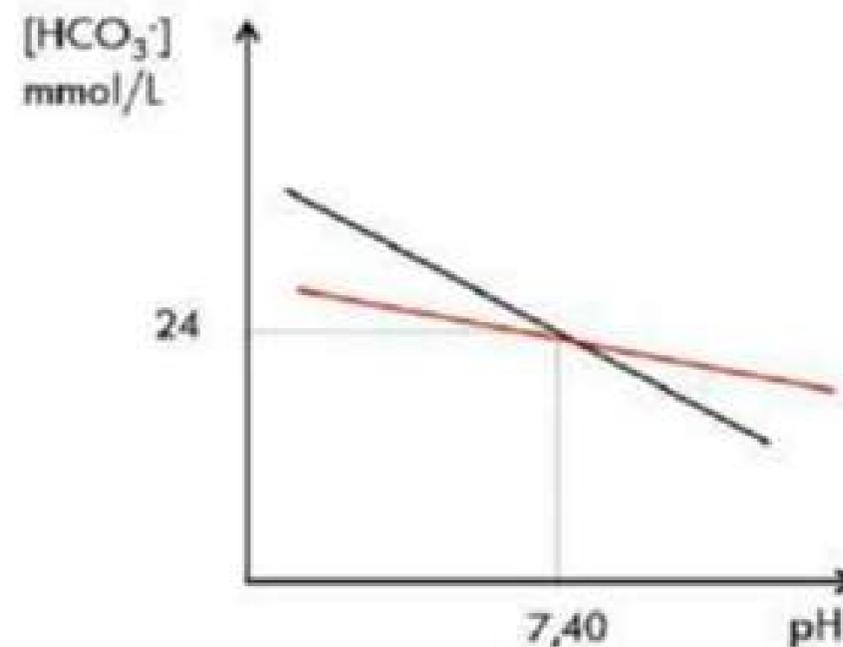
Diminution des tampons non volatils (les protéines) :

Hypoalbuminémie

Anémie =

↓ globules rouges

↓ hémoglobine



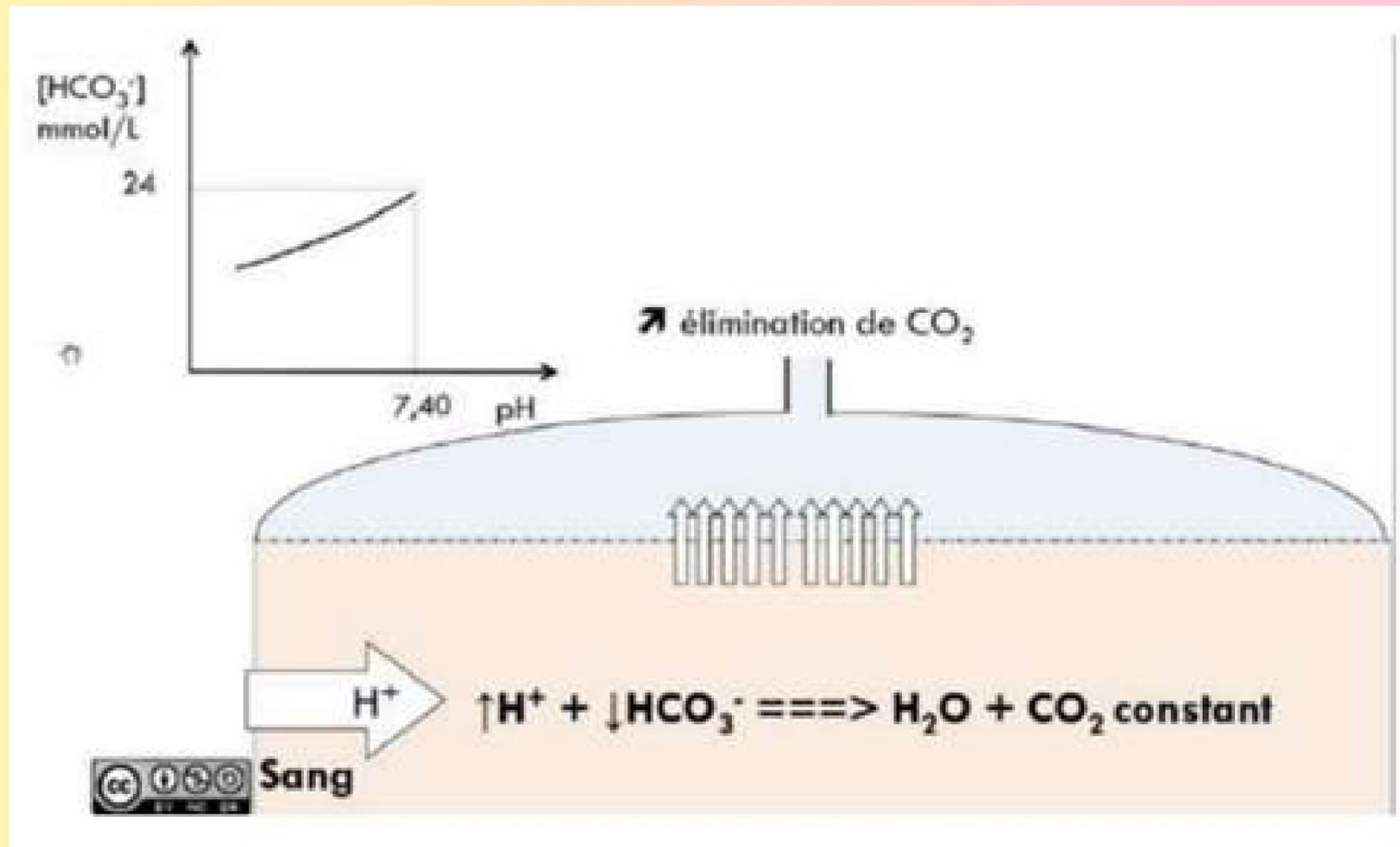
Pour la même variation de $[HCO_3^-]$, la variation du pH est plus grande.

-> Aplatissement de la relation : pour une plus faible variation de la concentration en bicarbonates, la variation de pH sera plus importante

La carence d'un des tampons entraîne de plus grandes variations du pH

2) Etude du pouvoir tampon de l'organisme en milieu ouvert

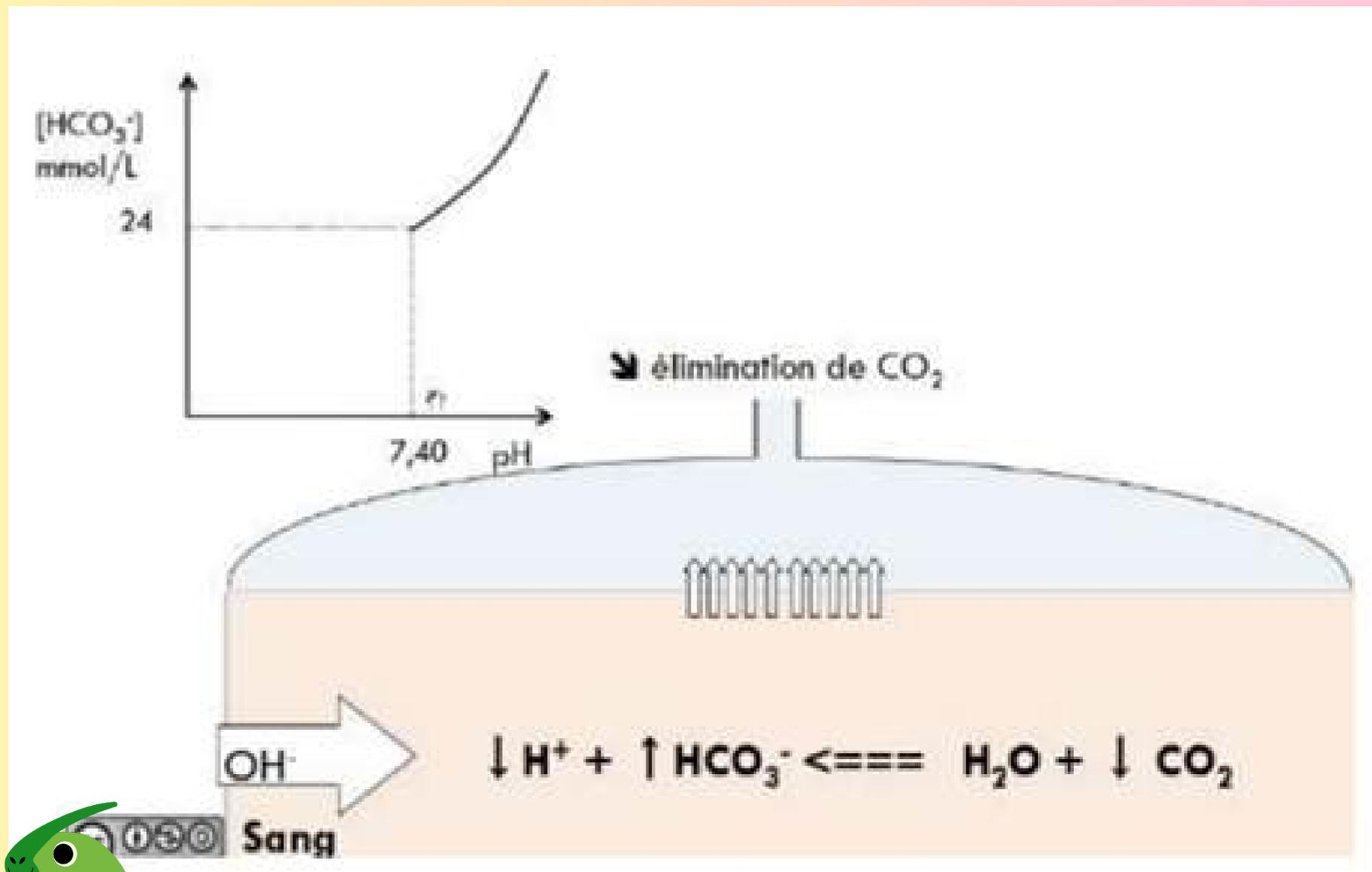
Ajout de protons :



- PCO_2 sanguine reste constante
- Equilibre déplacé vers le bas et la gauche, car on a une augmentation des protons et une diminution des bicarbonates
- La relation n'est PLUS LINEAIRE comme pour le milieu fermé

2) Etude du pouvoir tampon de l'organisme en milieu ouvert

Ajout de base :



- La quantité de protons diminue, car les ions OH^- captent les protons ($\text{OH}^- + \text{H}^+ = \text{H}_2\text{O}$).
- L'équilibre est déplacé vers le haut et la droite (augmentation des bicarbonates et du pH, la solution s'alcalinise)



QCM Time

A propos de l'étude de pouvoir tampon dans l'organisme, indiquez la(les) proposition(s) exacte(s) :

- A) En milieu fermé, quand on augmente la P_{CO_2} , la pH va beaucoup diminuer**
- B) En milieu ouvert, quand on rajoute une base (OH^-), la quantité de proton va diminuer et la quantité de bicarbonate va augmenter**
- C) En milieu fermé la relation entre bicarbonate et pH est exponentielle**
- D) En milieu ouvert, la relation entre bicarbonate et pH est linéaire**
- E) Les réponses A, B, C et D sont fausses**

QCM Time

A propos de l'étude de pouvoir tampon dans l'organisme, indiquez la(les) proposition(s) exacte(s) :

- A) **Vrai** : si on augmente P_{CO_2} en milieu fermé, le CO_2 qui ne peut pas partir va aller s'hydrater, donc cela va former plein de H^+ et plein de bicarbonate
- B) **Vrai** : si on rajoute une base OH^- , elle va aller se lier aux H^+ pour former du H_2O . Il va ensuite aller se lier au CO_2 , et donc former des H^+ (on s'en fou, ils se lient aux OH^- , donc ça ne s'acidifie pas) et des bicarbonates
- C) **Faux** : linéaire en milieu fermé
- D) **Faux** : exponentielle en milieu ouvert
- E) **Faux**

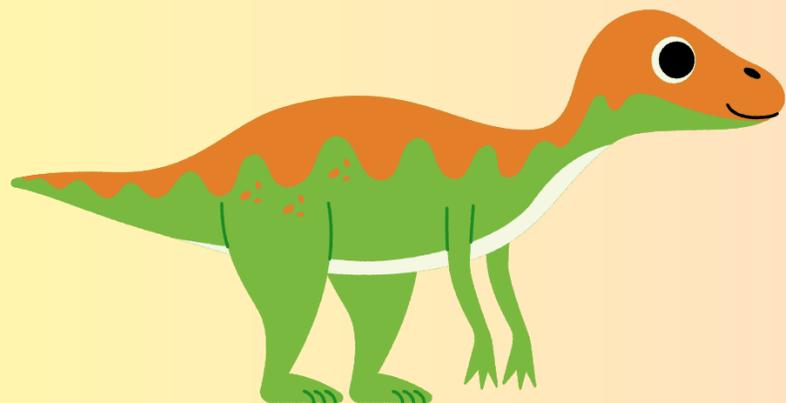
Equilibre acido-basique chez l'Homme

L'état acido-basique normal d'une personne est défini via ces 3 valeurs (à connaître par cœur les gars) :

$$7.38 < \underline{\text{pH}} < 7.42$$

$$36 \text{ mmHg} < \underline{\text{PCO}_2} < 44 \text{ mmHg}$$

$$22 \text{ mmol/L} < \underline{[\text{HCO}_3^-]} < 26 \text{ mmol/L}$$

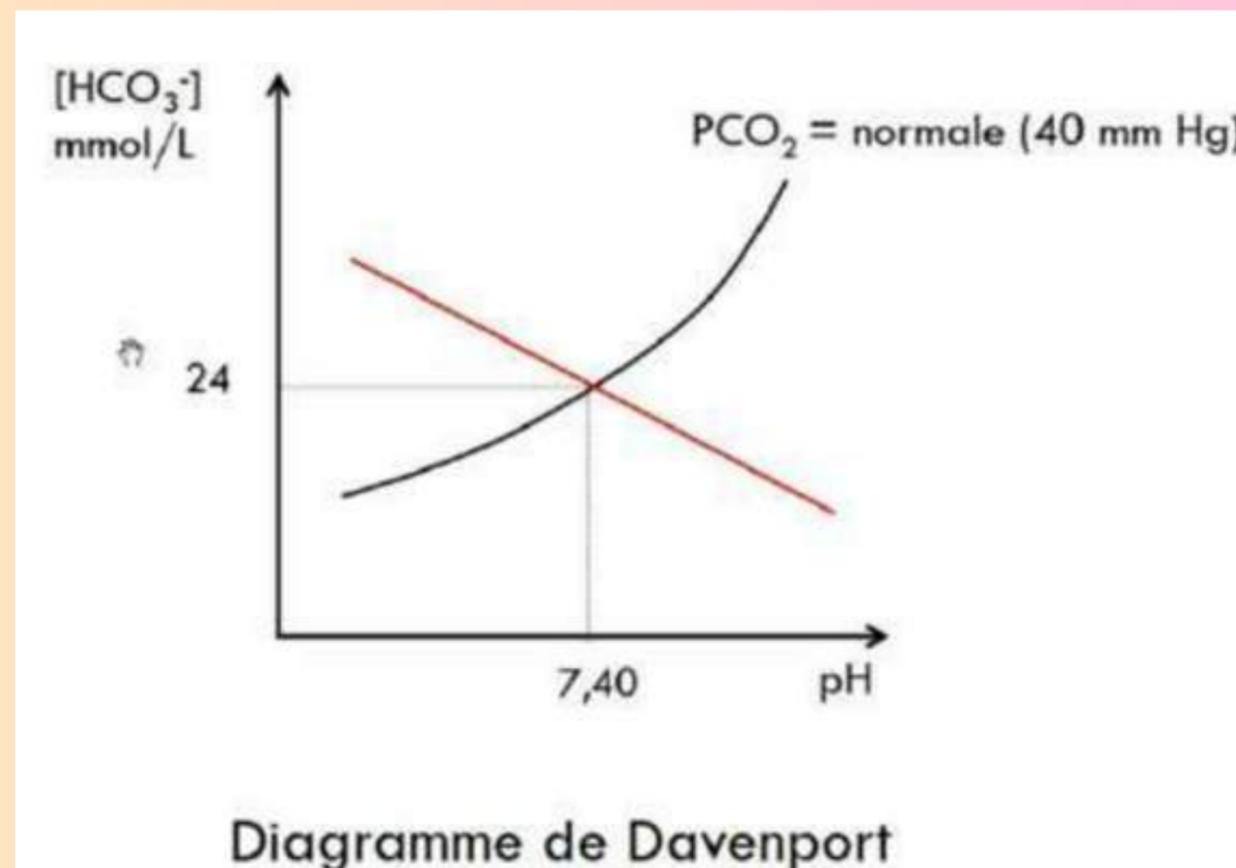


Modélisation d'HENDERSON et HASSELBACH

$$\text{pH} = \text{pKa} + \frac{[\text{HCO}_3^-]}{\alpha \text{PCO}_2}$$

Cette équation met en relation le pH du milieu extracellulaire, la concentration sanguine en bicarbonate et la PCO₂ sanguine

Diagramme de DAVENPORT (représentation graphique de la modélisation précédente)



Déséquilibres acido-Basiques

Définitions

Acidose : diminution du pH en dessous de 7,38

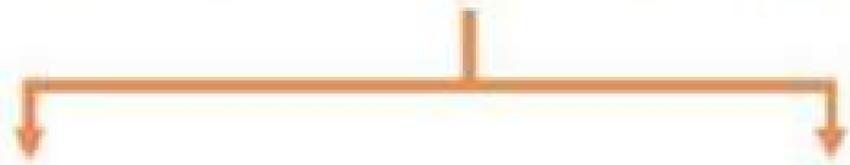
- ° Elle peut être métabolique si elle s'associe à une baisse de la concentration en bicarbonates
- ° Elle peut être respiratoire si elle s'associe à une augmentation de PCO_2

Alcalose : augmentation du pH au-delà de 7,42

- ° Elle peut être métabolique si elle s'associe à une augmentation des bicarbonates
- ° Elle peut être respiratoire si elle s'accompagne d'une baisse de la PCO_2



Acidose = ↓ pH



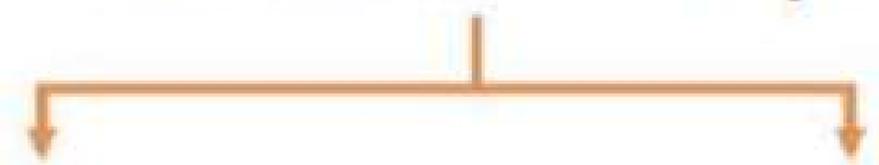
Métabolique

si ↓ $[\text{HCO}_3^-]$

Respiratoire

si ↑ PCO_2

Alcalose = ↑ pH



Métabolique

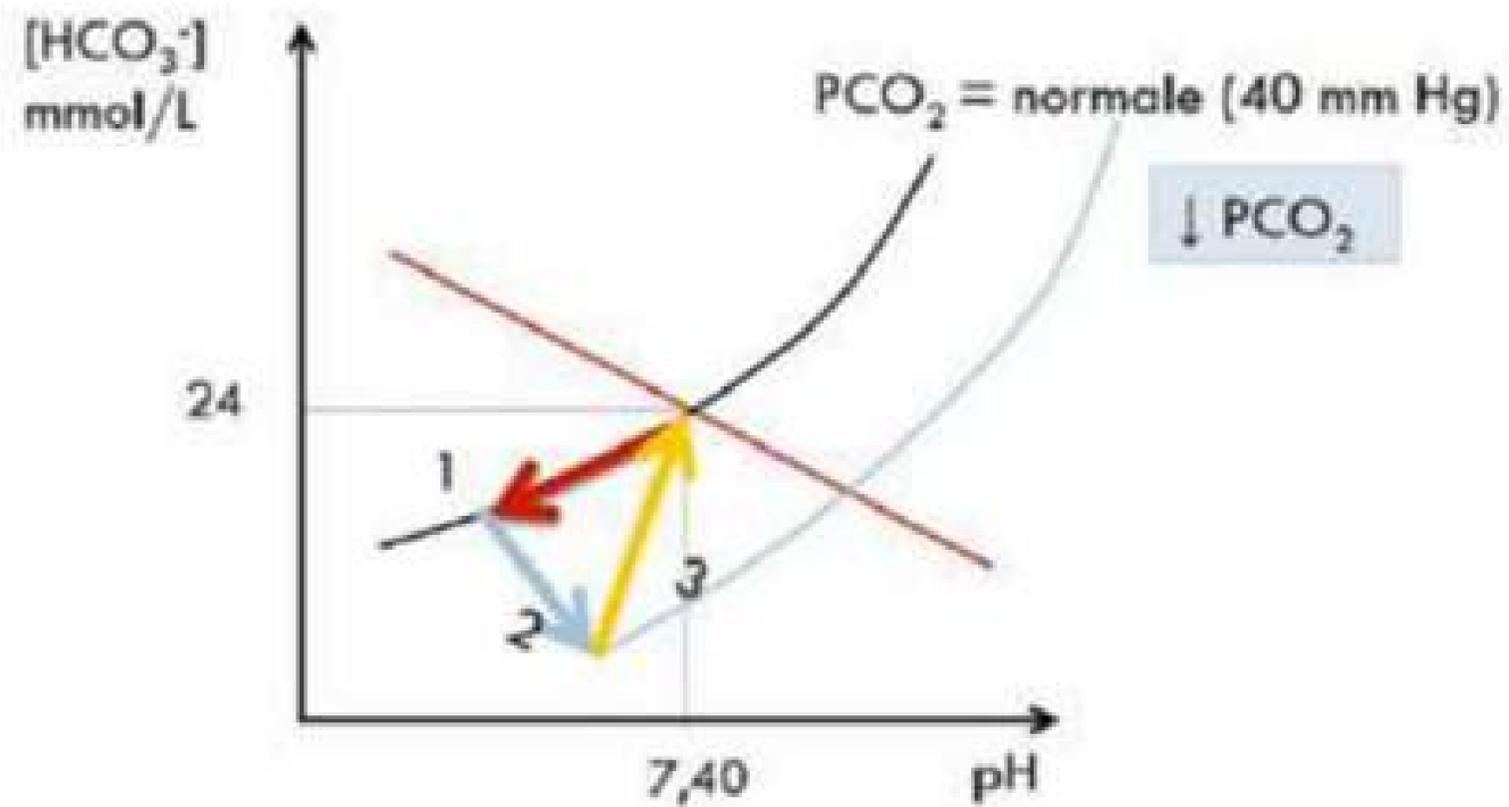
si ↑ $[\text{HCO}_3^-]$

Respiratoire

si ↓ PCO_2



Acidose métabolique :



- Phase 1 : Début de l'acidose
- Phase 2 : Adaptation des poumons
- Phase 3 : Adaptation des reins

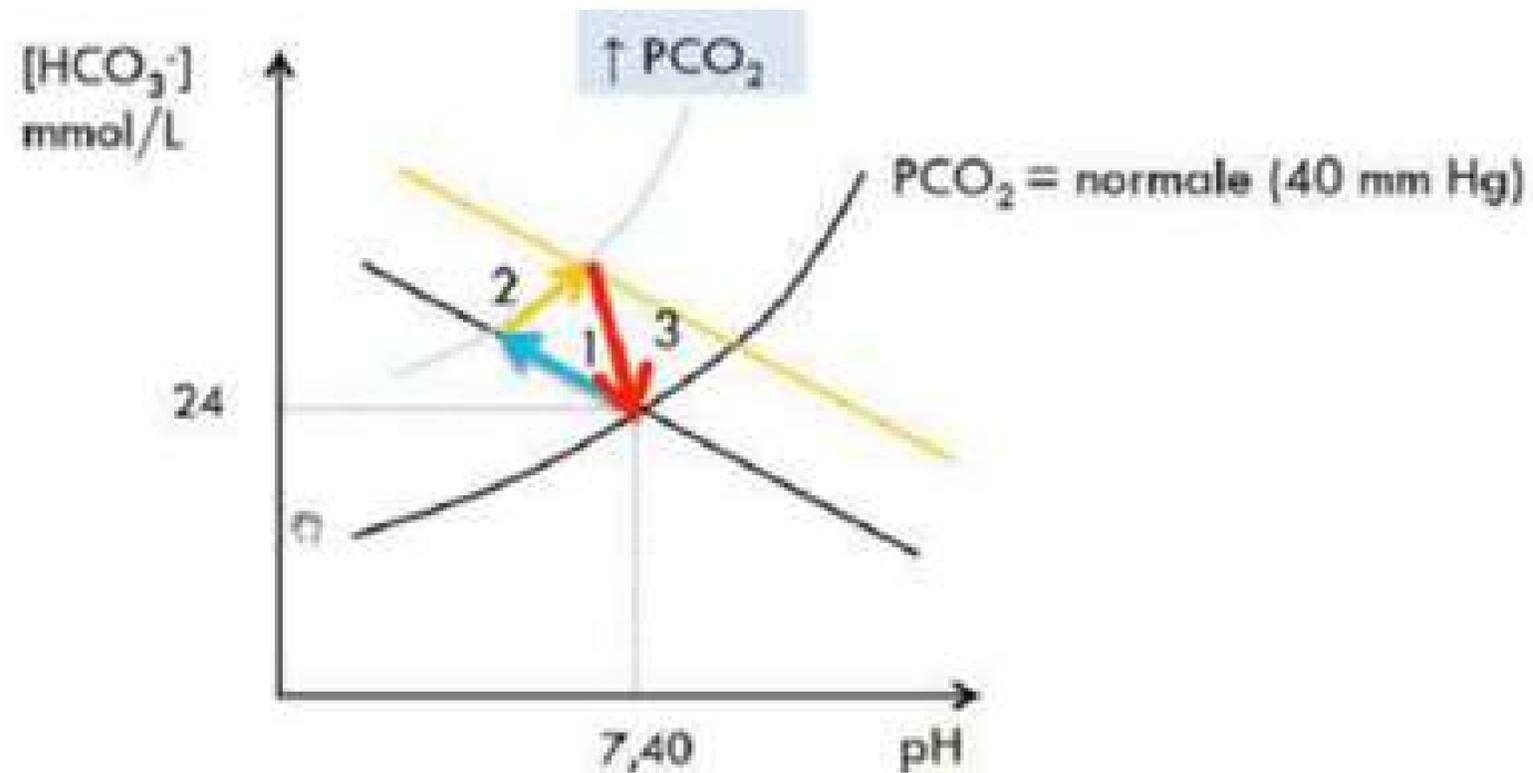
1/ acidose métabolique aiguë : $\uparrow \text{H}^+ + \downarrow \text{HCO}_3^- \leftarrow \text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O}$

2/ hyperventilation pulmonaire : $\downarrow \text{H}^+ + \downarrow \text{HCO}_3^- \rightarrow \downarrow \text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O}$

3/ augmentation de l'excrétion rénale de protons

et de la fabrication des bicarbonates : $\text{H}^+ + \uparrow \text{HCO}_3^- \rightleftharpoons \uparrow \text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O}$

Acidose respiratoire :



- Phase 1: Début de l'acidose
- Phase 2 : Adaptation des reins
- Phase 3 : Retour à la normale

1/ acidose respiratoire aiguë $\nearrow \text{H}^+ + \nearrow \text{HCO}_3^- \leftarrow \nearrow \nearrow \text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O}$

2/ augmentation de la fabrication rénale de bicarbonate $\searrow \text{H}^+ + \nearrow \text{HCO}_3^- \rightarrow \downarrow \text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O}$

3/ Disparition de la cause de l'acidose respiratoire, élimination des bicarbonates

Les étapes des différentes alcalose ne sont pas détaillées par le prof

QCM Time

Un patient arrive aux urgences, inconscient et bradypnéique (fréquence respiratoire de 7 par minute). Vous vous inquiétez de l'apparition d'un éventuel trouble acido-basique chez ce patient du fait de son état. Lequel ?

- A) Acidose respiratoire**
- B) Alcalose respiratoire**
- C) Acidose métabolique**
- D) Alcalose métabolique**
- E) Les propositions A, B, C et D sont fausses**

QCM Time

Un patient arrive aux urgences, inconscient et bradypnéique (fréquence respiratoire très faible). Vous vous inquiétez de l'apparition d'un éventuel trouble acido-basique chez ce patient du fait de son état. Lequel ?

A) **Vrai** : en effet, si la respiration est fortement ralentie, le CO₂ risque de s'accumuler dans les alvéoles et donc dans le sang, ce qui acidifierait ce-dernier et causerait donc une acidose respiratoire

B) **Faux**

C) **Faux**

D) **Faux**

E) **Faux**

QCM Time

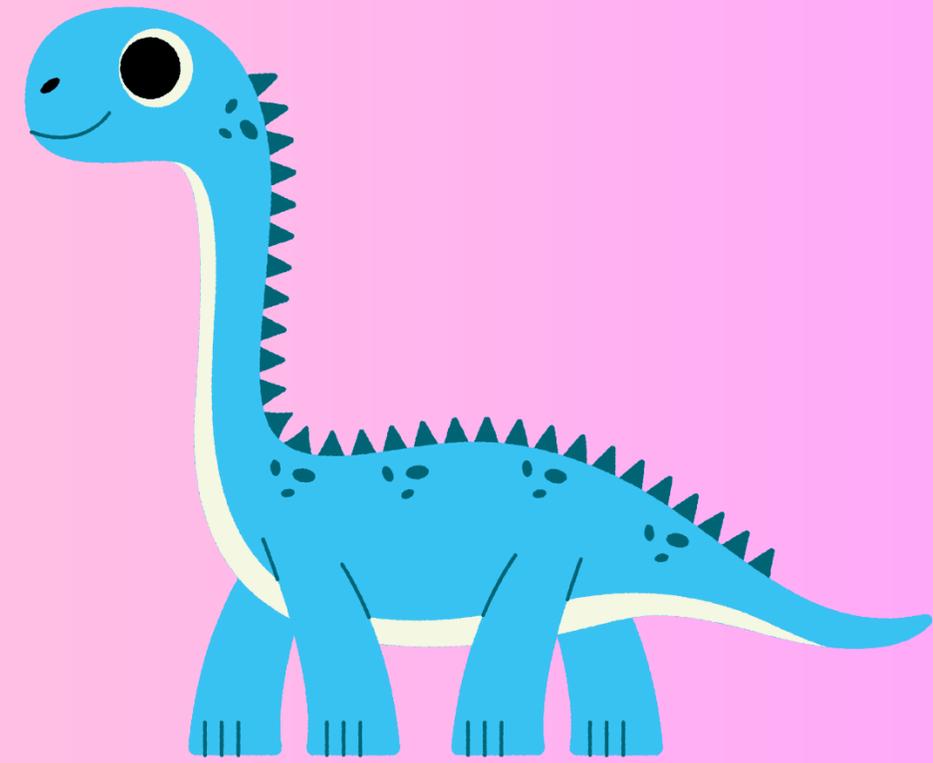
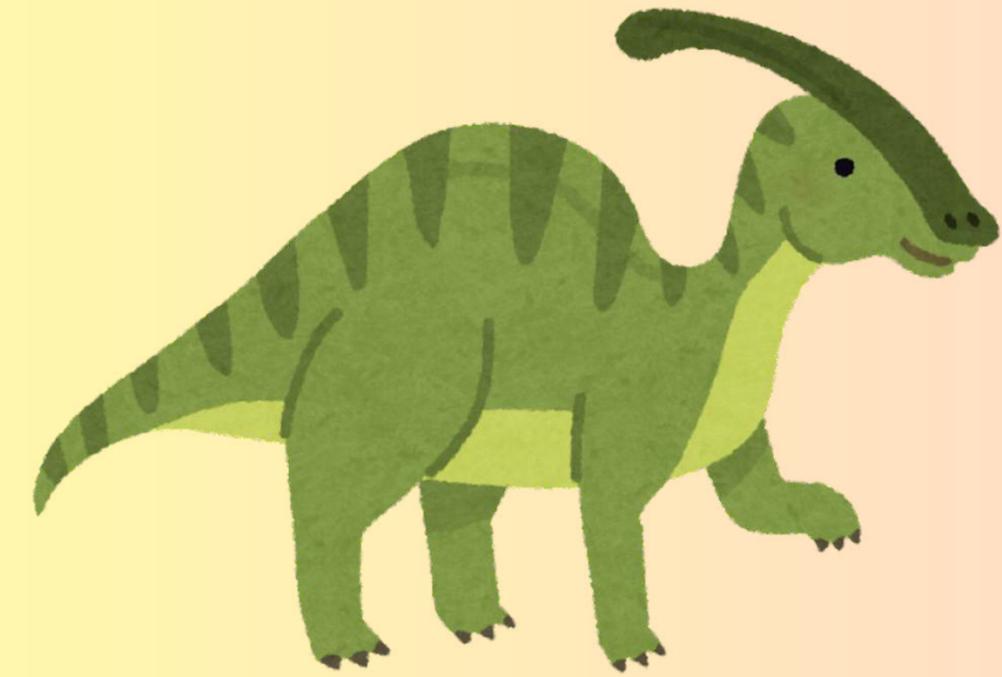
Vous recevez en consultation un patient que vous savez insuffisant rénal chronique. Vous lui aviez prescrit une prise de sang dont il vous apporte les résultats que voici : $\text{pH} = 7,31$; $\text{PCO}_2 = 31 \text{ mmHg}$; $[\text{HCO}_3^-] = 17 \text{ mmol/L}$. Quelle(s) conclusion(s) pouvez-vous faire ? (inspiré d'annales)

- A) Il est en acidose métabolique
- B) Il est en acidose respiratoire
- C) Sa prise en charge est une urgence vitale
- D) Sa fréquence respiratoire est probablement élevée
- E) Les propositions A, B, C et D sont fausses

QCM Time

Vous recevez en consultation un patient que vous savez insuffisant rénal chronique. Vous lui aviez prescrit une prise de sang dont il vous apporte les résultats que voici : $\text{pH} = 7,31$; $\text{PCO}_2 = 31 \text{ mmHg}$; $[\text{HCO}_3^-] = 17 \text{ mmol/L}$. Quelle(s) conclusion(s) pouvez-vous faire ? (inspiré d'annales)

- A) **Vrai** : même sans voir que HCO_3^- est trop faible, vous pouvez le déduire en voyant qu'il est insuffisant rénal
- B) **Faux**
- C) **Faux** : le pH n'est pas inférieur à 7
- D) **Vrai** : c'est la conséquence d'une acidose métabolique, le corps compense en hyperventilant pour éliminer plus de CO_2
- E) **Faux**



Merci à vous pour votre attention ;)

La team physio vous aime

