

Régulation de l'équilibre acido-basique

Introduction

Les ions H^+ dans l'organisme

Concentration en ions H^+ remarquablement constante :

- pH du plasma artériel = 7,40 +/- 0,03
- Le sang veineux plus riche en CO_2 est un peu plus acide, pH autour de 7,35 et LCR 7,30

L'action de la plupart des enzymes et donc la vitesse des réactions biochimiques est sensible à la $[H^+]$.

⇒ pH cellulaire difficilement explorable donc surveillance du pH plasmatique

Limites extrêmes du pH compatible avec la survie = 6,80 et 7,80

Différents systèmes de régulation du pH du milieu intérieur existent

Régulation des H^+ liée à :

Apport en H^+

Fonctions rénales

- ⇒ Elimination H^+
- ⇒ Réabsorption des bicarbonates

Fonctions pulmonaires

- ⇒ Elimination CO_2
- ⇒ Absorption O_2

Dysfonctionnements si :

- ⇒ Dysfonctionnements rénal ou pulmonaire
- ⇒ Troubles métaboliques : excès de production (diabète) ou d'élimination (digestif) d' H^+

Origine des ions H⁺

Deux groupes d'acide à l'origine des H⁺

- **Acide volatil : CO₂**

Issu du catabolisme des glucides (cycle de Krebs) et aboutit à la production de CO₂ : ~ 300 L/j (13 000 mmol/j)
Transporté par les globules rouges et **élimination pulmonaire**

- **Acides fixes**

Acides fixes organiques : issus du catabolisme du glucose (première étape anaérobie) et des lipides : acides lactique, pyruvique, citrique, acides gras ...

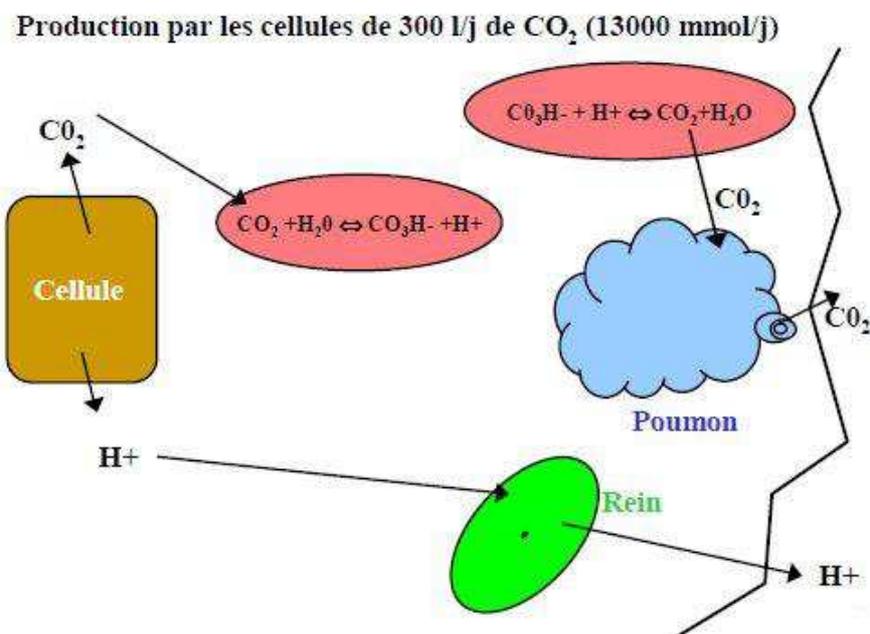
Les anions produits sont métabolisés et reprennent en charge des H⁺

⇒ Pas de charge acide nette

Acides fixes minéraux (phosphorique, sulfurique) proviennent du catabolisme des protéines alimentaires

Sources de H⁺ : 50-100 mmol/j

⇒ **Élimination rénale**



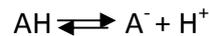
Transports des H⁺ dans l'organisme

H⁺ libres

pH = 7,40 soit [H⁺] = 40 nmol/L

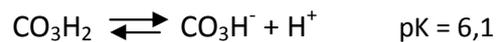
Les systèmes tampons de l'organisme

Permettent de s'opposer aux variations de pH et de transporter de grandes quantités d'H⁺
Constitués d'un acide faible ou d'une base faible en équilibre avec un de ses sels :



- **Les systèmes tampons circulants (systèmes tampons du sang)**

Le tampon acide carbonique / bicarbonate



L'acide carbonique se dissocie presque totalement en anhydre CO₂ et H₂O



Equation d'Henderson-Hasselbalch

$$pH = 6,1 + \log \frac{[CO_3H^-]}{[CO_2]}$$

CO₂ représente le CO₂ dissous en équilibre avec le CO₂ gazeux

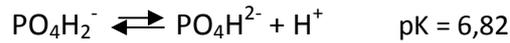
Loi de Henry : [CO₂ dissous] = k × pression partielle du CO₂ k = coef. de solubilité
 [CO₂ dissous] = 0,03 × pCO₂
 (mmol/L) (mmHg)

Si pCO₂ en kPa : [CO₂ dissous] = 0,23 × pCO₂

$$pH = 6,1 + \log \frac{[CO_3H^-]}{0,03 \times pCO_2}$$

Ce tampon est appelé « **tampon ouvert** » car [CO₃H₂] peut varier très rapidement en fonction de l'élimination pulmonaire du CO₂ (60% de l'effet tampon du sang)

Le tampon phosphate

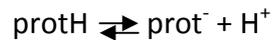


$$\text{pH} = 6,82 + \log \frac{[\text{PO}_4\text{H}^{2-}]}{[\text{PO}_4\text{H}_2^-]}$$

Faible partie de l'effet tampon du sang (environ 1%)

Important tampon urinaire

Les tampons protéiques



5% de l'effet tampon du sang

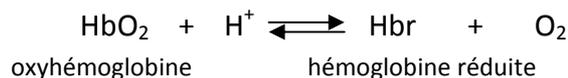
Cas particulier de l'hémoglobine

Hémoglobine : protéine intra-érythrocytaire à forte concentration (150 g/L de sang)

Dans le sang, son pouvoir tampon est 6 fois plus important que celui des protéines plasmatiques (responsable d'environ 30 % de l'effet tampon du sang).

Rôle essentiel dans le transport de l'O₂

Le pouvoir tampon est affecté par la présence ou non de l'O₂



○ L'oxygénation de Hbr libère des H⁺

Exemple : au niveau du poumon, le sang veineux s'oxygène, il y a production d'H⁺ qui avec les CO₃H⁻ vont donner du CO₃H₂ qui donnera du CO₂ qui sera éliminé, et de l'H₂O

○ Si on apporte des H⁺ à une solution d'HbO₂, de l'O₂ sera libéré

Exemple : au niveau tissulaire, le sang artériel arrive très riche en O₂. Il capte des H⁺ (produit par la cellule) pour donner de l'Hbr et libère de l'O₂ utilisé par les tissus

- **Les systèmes tampons non circulants**

80% de l'effet total

Milieu extracellulaire (circulation très lente) : tampons bicarbonates et phosphates

Milieu intracellulaire : tampons protéiques prépondérant

- **Conclusion sur les systèmes tampons**

Lors d'une agression acide :

- ⇒ 20 % des H⁺ sont neutralisés par le sang
- ⇒ 20 % par les tampons du milieu extracellulaire
- ⇒ 60 % par les tampons cellulaires (autres qu'érythrocytes)

Les tampons du sang circulant et du liquide extracellulaire sont les 1^{er} systèmes de défense contre les modifications d'H⁺, leur action est immédiate.

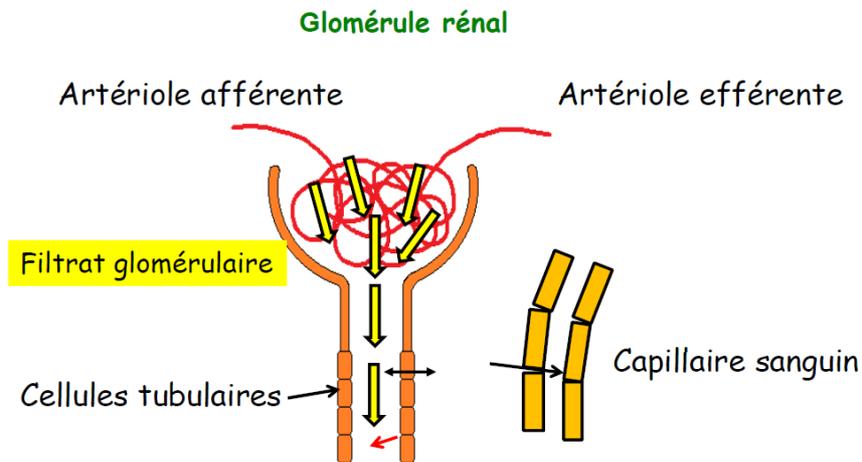
Les CO₂ et les H⁺ pourront ensuite être éliminés par les poumons ou les reins.

Rôle du rein sur l'équilibre des ions H⁺

Glomérule rénal = élément permettant la filtration de beaucoup de substances

A travers la paroi du capillaire, passage de substances sous l'action de la pression oncotique

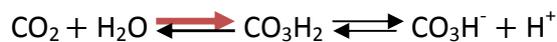
⇒ Formation du filtrat glomérulaire



Les reins fabriquent l'urine, le filtrat glomérulaire contient tous les ions filtrés CO₃H⁻, PO₄H⁻, Na⁺, Cl⁻ ...

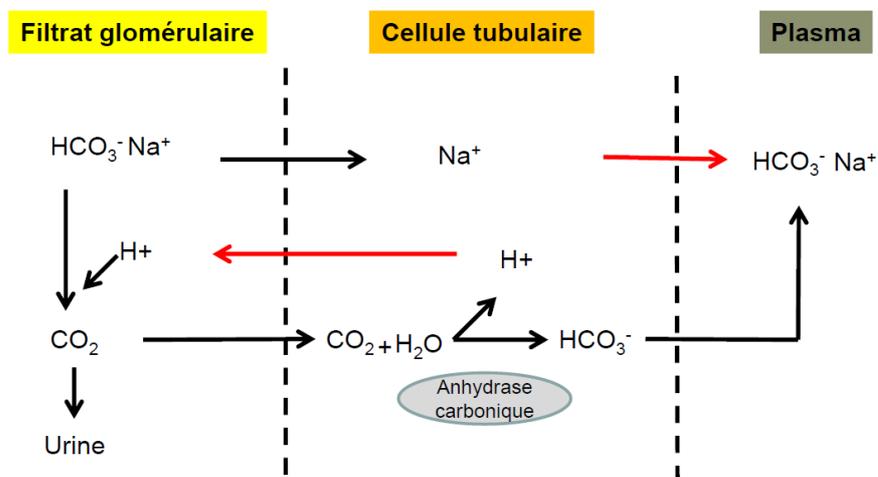
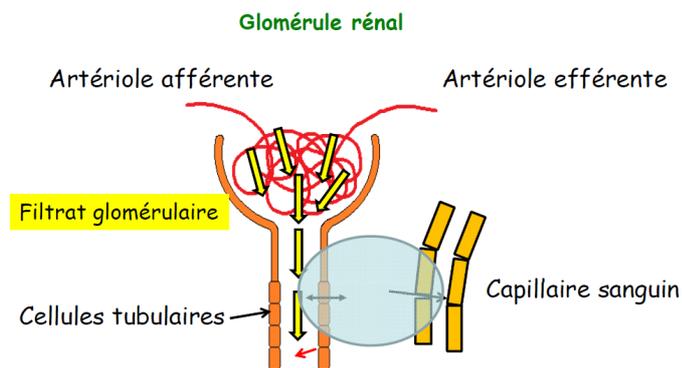


Certaines cellules tubulaires contiennent l'**anhydrase carbonique**, enzyme qui accélère l'équilibre d'hydratation du CO₂



Adaptation rénale lente sur quelques heures

« Réabsorption » des bicarbonates



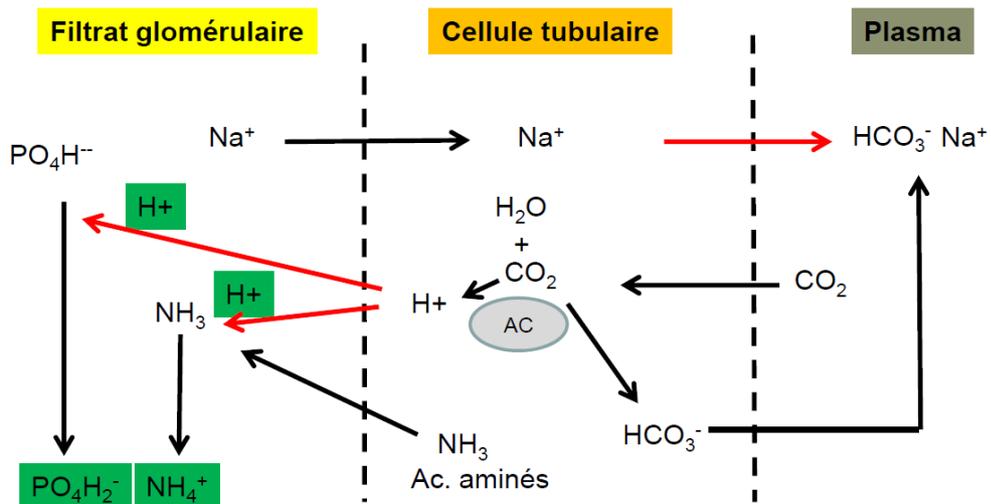
—→ Diffusion
 —→ Transport actif

Bilan : $\text{HCO}_3^- \text{Na}^+$ urinaire → $\text{HCO}_3^- \text{Na}^+$ plasmatique

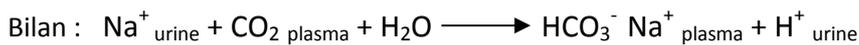
Pas réellement excrétion H^+ puisque se recombine à HCO_3^-

Limité par la possibilité de transport actif des H^+ (parfois transport actif ne suffit pas à neutraliser les HCO_3^- d'où fuite de bicarbonate et alcalinisation des urines)

Sécrétion d'H⁺ par régénération des bicarbonates



La cellule tubulaire sécrète des ions H⁺ et régénère des bicarbonates

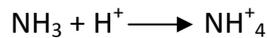


⇒ **Excrétion effective de H⁺**

Tamponnement des H⁺ par les tampons urinaires :



Tampon ammoniac/ammonium : NH₃ formé dans la cellule tubulaire à partir d'ac. aminé diffuse dans urine tubulaire



$$\text{pH} = 6,8 + \log \frac{[\text{PO}_4\text{H}^{2-}]}{[\text{PO}_4\text{H}_2^-]}$$

⇒ pH du filtrat = 7,4

$$\frac{[\text{PO}_4\text{H}^{2-}]}{[\text{PO}_4\text{H}_2^-]} = 10^{\text{pH} - \text{pK}} = 10^{0,6} = 4$$

$$\text{PO}_4\text{H}_2^- = 0,25 \cdot \text{PO}_4\text{H}^{2-}$$

⇒ pH de l'urine = 4,5

$$\frac{[\text{PO}_4\text{H}^{2-}]}{[\text{PO}_4\text{H}_2^-]} = 10^{-2,3} = 0,005$$

$$\text{PO}_4\text{H}_2^- = 200 \cdot \text{PO}_4\text{H}^{2-}$$

En passant de pH 7,4 à 4,5 le rapport $\text{PO}_4\text{H}_2^- / \text{PO}_4\text{H}^{2-}$ a été multiplié par 800

⇒ Absorption d'une grande quantité de H⁺

Rôle du poumon sur l'équilibre des ions H^+

La pression partielle du CO_2 figure au dénominateur de l'équation de Henderson Hasselbalch

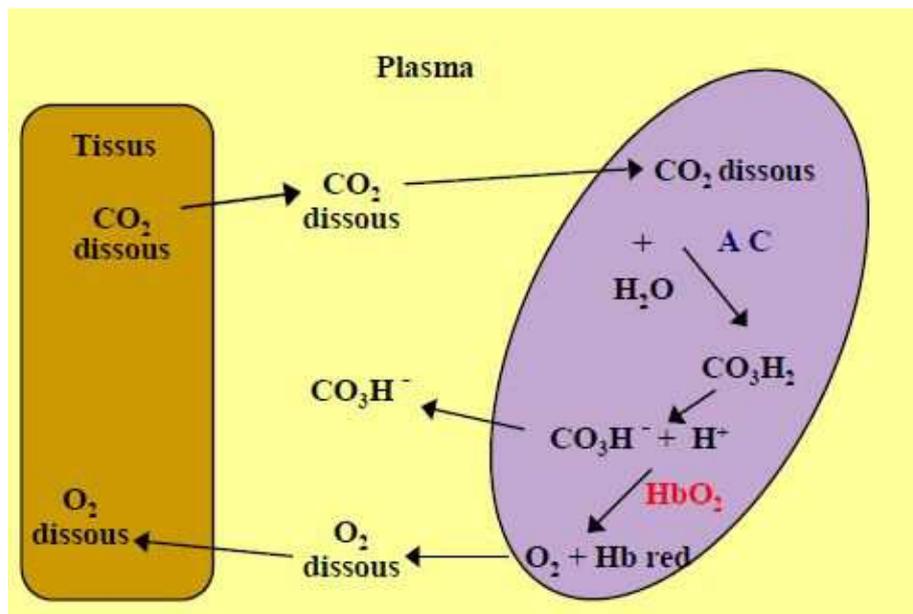
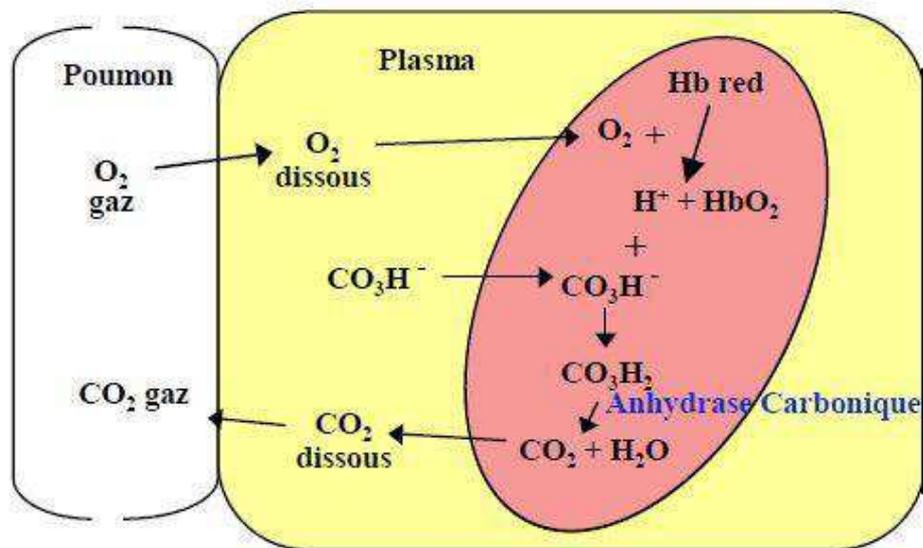
⇒ Paramètre contrôlé par la **respiration**

$$pH = 6,1 + \log \frac{[CO_3H^-]}{0,03 \times pCO_2}$$

Modification de la ventilation : **élimination ou rétention du CO_2**

La ventilation pulmonaire est contrôlée par le pH du LCR, la pO_2 , la pCO_2 et le pH du sang artériel.

Action de la respiration très rapide : quelques secondes (10-30s)



Exploration de l'équilibre acido-basique

Prélèvement et paramètres mesurés

- **Prélèvement**

- Seringue avec anticoagulant (héparine)
- A l'abri de l'air, transport rapide car le métabolisme du GR continue (glycolyse)
- Sang artériel ou artériolisé

- **Paramètres mesurés**

Sang artériel : pH = 7,40 ± 0,03

pCO₂ = 40 ± 3 mmHg

pO₂ = 95 ± 3 mmHg

Paramètres déduits

Bicarbonates (vrais) déduits avec la relation de Handerson – Hasselbach

$$CO_3H^- = 10^{pH-6,1} \times 0,03 \times pCO_2$$

Réserve alcaline : [CO₃H⁻] du plasma (séparé des GR et ramené à pH = 7,40)

CO₂ plasmatique total : CO₂ dissous + CO₃H⁻ = 0,03.pCO₂ + CO₃H⁻

Excès de base : quantité d'H⁺ nécessaire pour ramener 1L de sang complet (dans les conditions de prélèvement) à pH=7,40 et pCO₂ = 40 mmHg à 37°C

Remarque : bases tampons du sang (CO₃H⁻, Pr⁻ plasm, HbO₂⁻, PO₄H²⁻) = 48 mmol/L

⇒ Si > 48 : excès de base

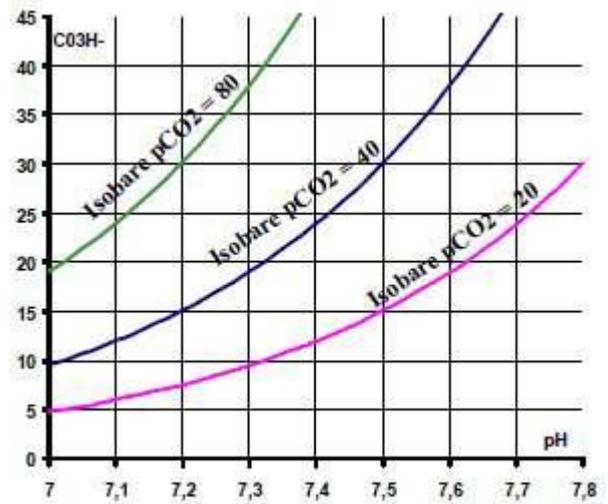
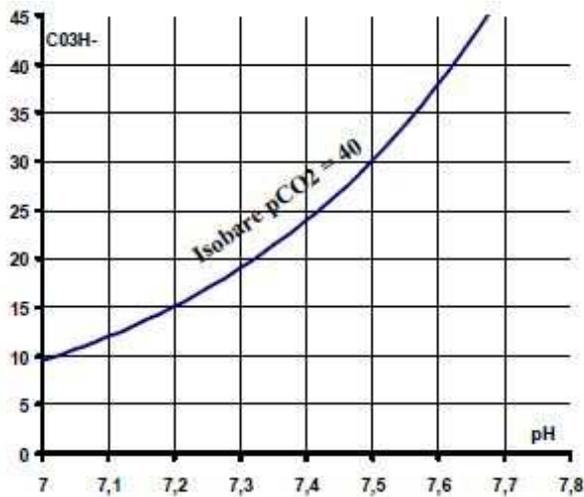
⇒ Si < 48 : déficit de base

Le diagramme pH – bicarbonates

- Diagramme de Davenport

Relation unissant HCO_3^- et pH à quantité d'acide volatil donnée ($p\text{CO}_2$ constante) et quantité d'acide fixe variable.

$$\text{CO}_3\text{H}^- = 10^{p\text{H}-6,1} \times 0,03 \times p\text{CO}_2$$

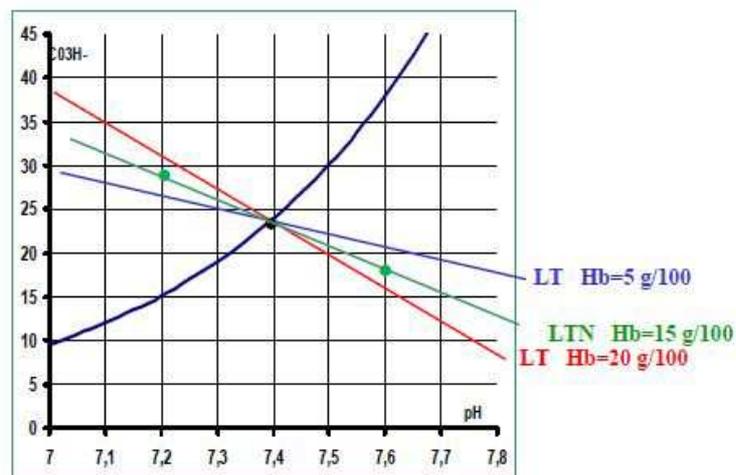


- La ligne tampon normale

Relation unissant HCO_3^- et pH à la quantité d'acide fixe donnée (et $p\text{CO}_2$ variable) : ligne tampon normale

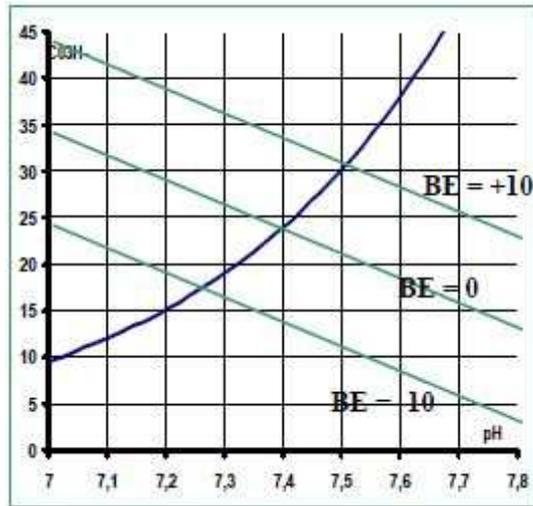
Implique la mise en jeu des seuls tampons fermés.

Droite qui exprime les variations de pH et de $[\text{HCO}_3^-]$ quand on titre le sang par l'acide faible volatil CO_2 (quand on le soumet à différentes pressions $p\text{CO}_2$).



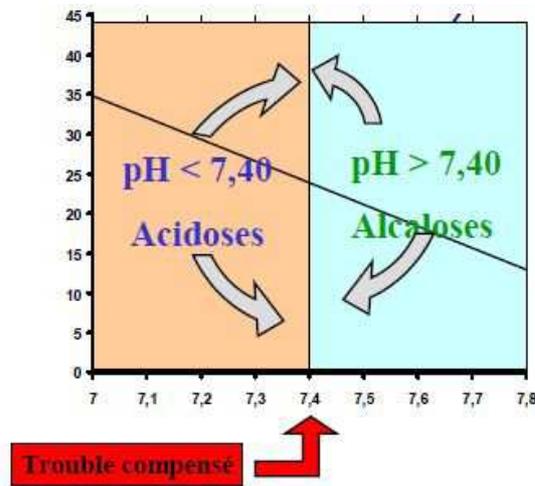
- **Excès ou déficit de base**

Les tampons du sang gardent la même efficacité quel que soit l'excès ou le déficit de base.
La ligne tampon reste parallèle ce qu'elle était en l'absence de BE.



- **Acidoses et alcaloses**

Les systèmes tampons vont réagir pour ramener le pH à 7,40
⇒ On dit que le trouble est compensé

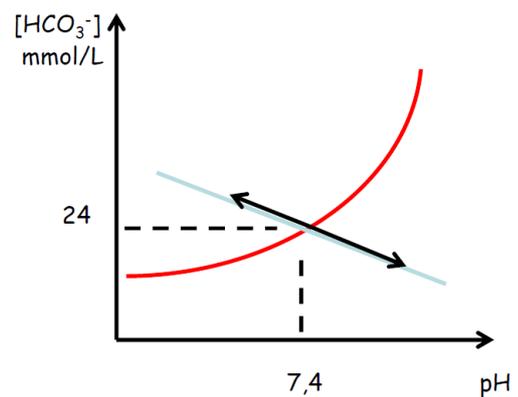


Déplacement sur la LTN ou sur une parallèle

⇒ **Trouble respiratoire pur**

Déplacement le long de l'iso pCO₂

⇒ **Trouble métabolique pur**



Perturbation de l'équilibre acido-basique

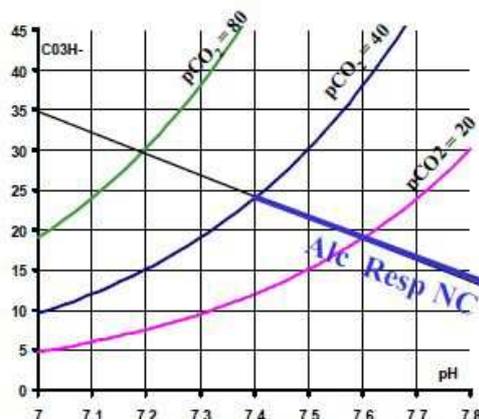
Troubles respiratoire

- Hyperventilation**

Elimination de CO_2 donc diminution de $p\text{CO}_2$
 $\Rightarrow \text{CO}_3\text{H}^- + \text{H}^+ \rightarrow \text{CO}_3\text{H}_2 \rightarrow \text{CO}_2$ (équilibre)

Causes :

- Hyperexcitation des centres resp.
- Diminution de la $p\text{CO}_2$



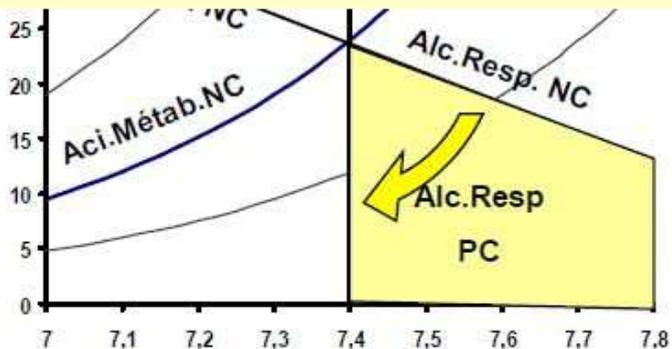
$p\text{CO}_2 \downarrow$
 $\downarrow \text{H}^+$ $\downarrow \text{CO}_3\text{H}^-$

Alcalose Respiratoire Non Compensée

\Rightarrow Alcalose respiratoire partiellement ou totalement compensée

- **Alcalose Respiratoire** : $p\text{CO}_2 \downarrow$ $\downarrow \text{H}^+$ $\downarrow \text{CO}_3\text{H}^-$
- CO_3H^- diminuent dans le filtrat glomérulaire
 - Élimination des H^+ diminue
 - H^+ augmentent dans le plasma

Intervention du rein



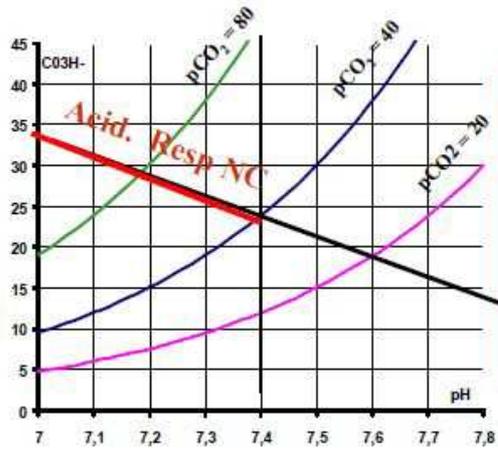
- **Hypoventilation**

Rétention de CO_2 et augmentation de pCO_2



Causes :

- Atteinte des centres resp.
- Déficience muscle resp.
- Obstruction des voies resp.

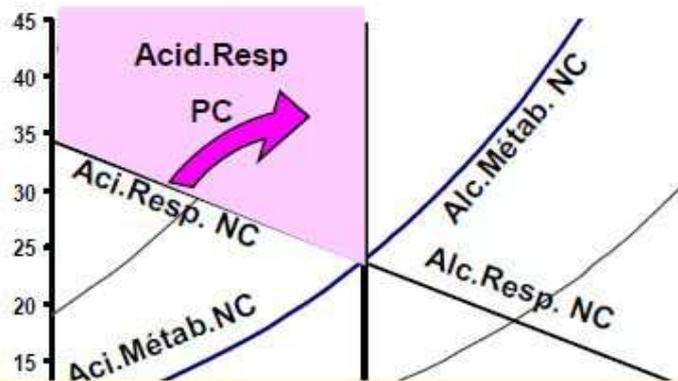


$\text{pCO}_2 \uparrow$
 $\uparrow \text{H}^+ \quad \uparrow \text{CO}_3\text{H}^-$

*Acidose Respiratoire
 Non Compensée*

⇒ **Acidose respiratoire partiellement ou totalement compensée**

Intervention du rein

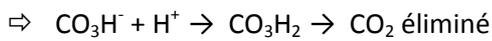


- Acidose Respiratoire : $\text{pCO}_2 \uparrow \quad \uparrow \text{H}^+ \quad \uparrow \text{CO}_3\text{H}^-$
- CO_3H^- augmentent dans le filtrat glomérulaire
 - Sécrétion $\text{H}^+ \uparrow$ et $\text{H}^+ \downarrow$ dans le plasma
 - CO_3H^- réabsorbés \uparrow

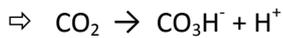
Troubles métaboliques

- **Augmentation d'acides ou diminution de bases (poumon normal)**

H⁺ augmente

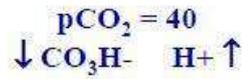
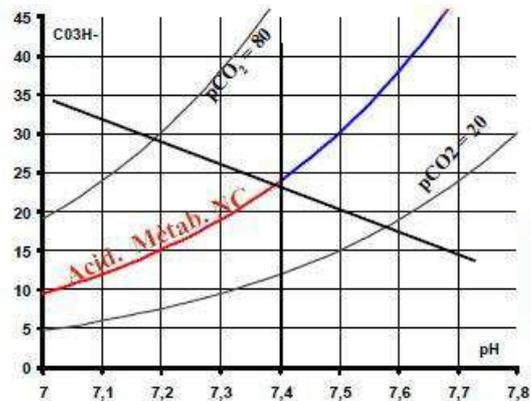


CO₃H⁻ diminue



Causes :

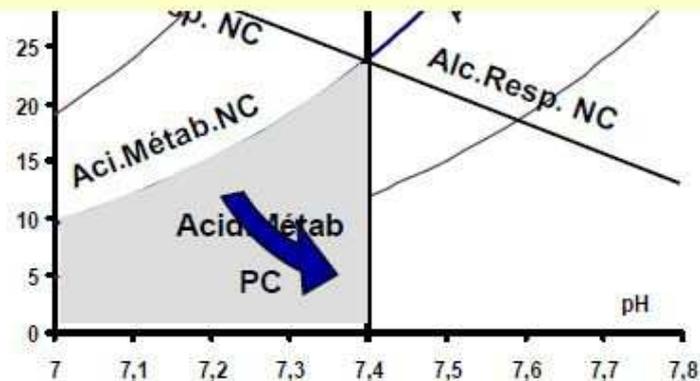
- Excès de production : acidocétose diabétique
- Excès d'apport : intoxication aspirine
- Excès d'élimination des CO₃H⁻ : fuite digestive (diarrhea abondante), blocage de la réabsorption



*Acidose
 Métabolique
 Non Compensée*

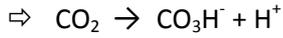
⇒ **Acidose métabolique partiellement compensée (voire totalement)**

- Acidose Métabolique : $\uparrow \text{H}^+ \quad \text{pCO}_2 = 40 \quad \downarrow \text{CO}_3\text{H}^-$
- Réponse pulmonaire : hyperventilation pour diminuer H⁺
 - $\text{pCO}_2 \downarrow$
 - H^+ et $\text{CO}_3\text{H}^- \downarrow$



• Diminution d'acides ou augmentation de base (poumon normal)

H⁺ diminue

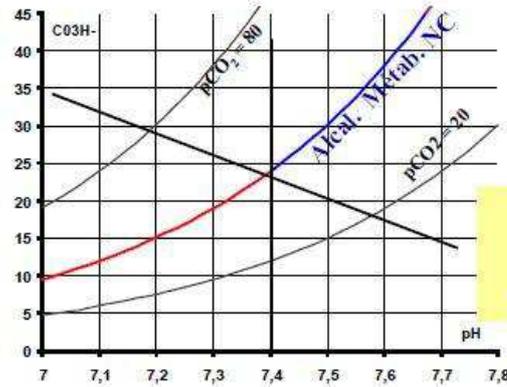


CO₃H⁻ augmente



Causes :

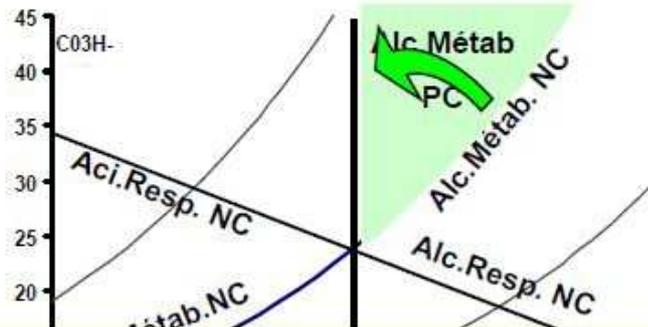
- Excès d'élimination : vomissement
- Apport trop important de bicarbonate : perfusion excessive de sérum bicarbonate



pH ↑
pCO₂ = 40
↑ CO₃H⁻

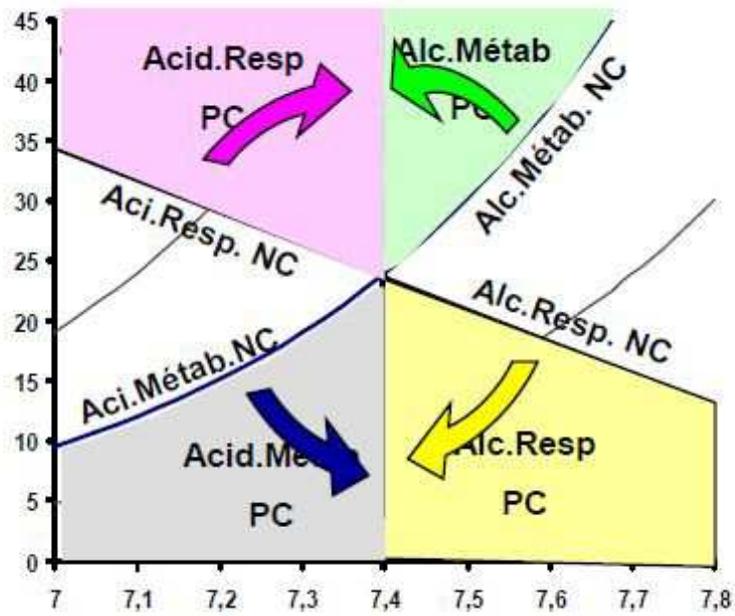
Alcalose
Métabolique
Non Compensée

⇒ Alcalose métabolique partiellement compensée (voire totalement)



- Alcalose Métabolique : ↓ H⁺ pCO₂ = 40 ↑ CO₃H⁻
- Réponse pulmonaire : hypoventilation pour augmenter H⁺
 - pCO₂ ↑
 - H⁺ et CO₃H⁻ ↑

Résumé



Les troubles mixtes

Alcalose mixte : association d'une alcalose métabolique et d'une alcalose respiratoire

Acidose mixte : association d'une acidose métabolique et d'une acidose respiratoire

Cas de traumatismes thoraciques : troubles rénal et pulmonaire

⇒ Ventilation ou dialyse

