

# EQUILIBRE ACIDO-BASIQUE

## I. Généralités

### A) Couple acide-base

- ❖  $H_2O$  est une molécule faiblement ionisée en  $H^+$  et  $OH^-$  et avec un équilibre :  $[H^+] = [OH^-] = 10^{-7} \text{ mol/L}$  ou  $100 \text{ nmol/L}$  à  $25^\circ\text{C}$ .

La constante de dissociation de l'eau par rapport à l'eau pure permet de calculer cette ionisation :

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

#### Etat acido-basique

- ♥ Solution neutre  $\rightarrow [H^+] = 100 \text{ nmol/L}$
- ♥ Solution acide  $\rightarrow [H^+] > 100 \text{ nmol/L}$
- ♥ Solution basique  $\rightarrow [H^+] < 100 \text{ nmol/L}$

- ❖ Un couple acido-basique est une molécule capable dans l'eau de déplacer l'équilibre entre les ions  $H^+$  et les ions  $OH^-$ .

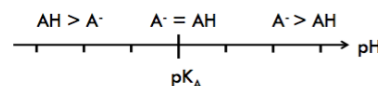
Remarque : Un acide (AH) est une espèce chimique capable de céder un ou plusieurs protons  $H^+$  / Une base ( $A^-$ ) est une espèce chimique capable de capter un ou plusieurs protons  $H^+$ .

La constante de dissociation d'un couple acide/base nous amène à une formule de PH :

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

Rappel : Au  $pK_A$  on a autant d'anions ( $A^- = \text{base}$ ) que de molécules entières ( $AH = \text{acide}$ )

Pr Favre



Le tutorat est gratuit. Toute reproduction ou vente est interdite.

Dans la pratique, pour les PH on utilise une échelle logarithmique car il existe une importante hétérogénéité de concentration de protons dans les fluides biologiques (peut varier d'un facteur  $10^7$ )

	Concentration de protons	Valeur du pH	
Dans l'estomac	100 mmol/L	1	
	10 μmol/L	5	
	100 nmol/L	7	
	50 nmol/L	7,30	Dans les cellules
	40 nmol/L	7,40	Dans le milieu extracellulaire
Dans l'urine	32 nmol/L	7,50	
	25 nmol/L	7,60	
	10 nmol/L	8	

Les valeurs de mémoriser ici, hétérogénéité

**Les fonctions cellulaires sont influencées par l'état acido-basique d'où la nécessité d'une fine régulation**

Le PH influe sur des fonctions vitales de l'organisme :

- Ouverture des canaux membranaires
- Vitesse des interactions enzymatiques
- Interaction entre les protéines (modification de forme)
- Transport de l'oxygène par l'hémoglobine

**Le PH du milieu extracellulaire varie peu : 7,38 à 7,42**

Cependant, l'organisme est soumis en permanence à une « charge acide » due au métabolisme énergétique (phosphorylation oxydative ++).

Ce métabolisme produit principalement des protons qui vont donner du  $CO_2$  (car  $H^+ + HCO_3^- \leftrightarrow H_2CO_3 \leftrightarrow CO_2 + H_2O$ ) mais aussi des acides lactiques, sulfuriques, corps cétoniques.. Le  $CO_2$  sera éliminé par les poumons alors que les protons libres seront associés à des anions organiques et éliminés par les reins sous forme d'ammonium ou d'acide phosphorique.

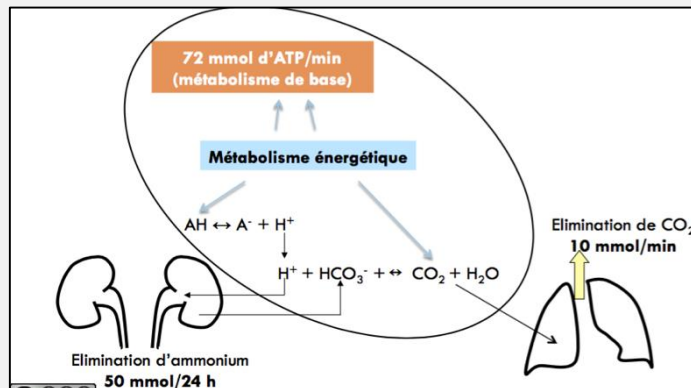
FlowD

## B) Rôle des reins et des poumons

- ❖ L'équilibre acido-basique est régulé par les reins et les poumons dans différentes situations physiologiques.

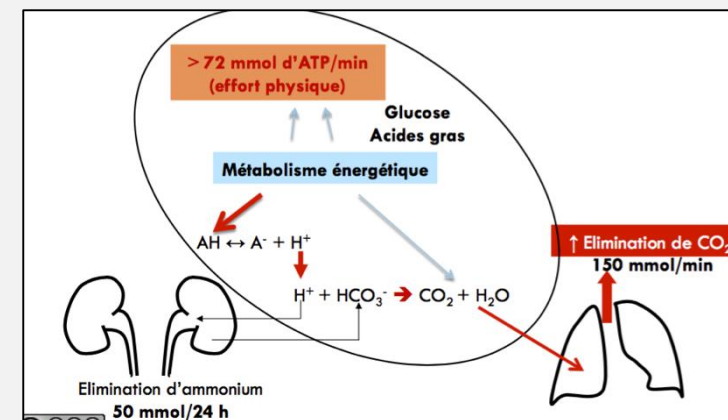
### AU REPOS

- On parle de **métabolisme de base** (à distance des repas, neutralité thermique, détente musculaire) qui nécessite une production d'ATP d'environ 72 mmol/min par lipolyse principalement mais rejette des protons  $H^+$
- La production de protons va modifier l'équilibre dynamique ( $H^+ + HCO_3^- \leftrightarrow H_2CO_3 \leftrightarrow CO_2 + H_2O$ ) dans le sens de la production de  $CO_2$  qui va être éliminé par les poumons (essentiel de la production au repos)
- AU REPOS : les reins peuvent **sécréter les protons dans les urines et rejeter des bicarbonates ( $HCO_3^-$ ) dans le sang**. Recyclage ++
- Les protons sécrétés dans l'urine primitive, s'associent à des bases comme l'ammoniac ( $NH_3$ ) pour donner de l'ammonium ( $NH_4^+$ ) soluble.



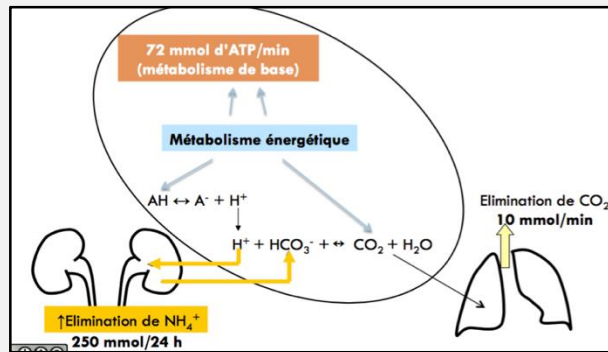
### A L'EFFORT

- La demande énergétique augmente de même que la production de protons  $H^+$  accélérant la vitesse de réaction :  $H^+ + HCO_3^- \leftrightarrow H_2CO_3 \leftrightarrow CO_2 + H_2O$ . Les protons sont chélatés par des bicarbonates ( $HCO_3^-$ ).
- Adaptation des poumons qui augmentent la fréquence ventilatoire d'un facteur 15 maximum** ce qui permet **d'éliminer les protons sous forme de  $CO_2$** .
- On évite ainsi une acidose par accumulation de protons dans le milieu extracellulaire.
- ATTENTION : LES REINS NE S'ADAPTENT PAS DURANT L'EFFORT**



## A L'ARRET DE L'EFFORT

- On revient progressivement au métabolisme de base → Le travail rénal intervient **à distance de l'effort**.
- Le rein augmente sa capacité de sécrétion des protons et fabrique des bicarbonates qu'il rejette dans le milieu extracellulaire.
- Le  $\text{NH}_4^+$  résultant du trappage des protons par le  $\text{NH}_3$  dans l'urine primitive, **augmente d'un facteur 5 au maximum**.
- ON PARLE DE COUPLAGE FONCTIONNEL POUMON/REIN ABOUTISSANT A UN EQUILIBRE ACIDO-BASIQUE.**



- ❖ **Le couple bicarbonate/proton est au cœur de la régulation du PH du sang et des cellules.**

$\text{H}_2\text{CO}_3$  = coefficient de solubilité ( $\alpha$ ) x pression partielle du  $\text{CO}_2$ . La **régulation de la  $\text{PCO}_2$  et des bicarbonates permet une régulation de la concentration de protons donc du PH.**

Les bicarbonates sont fabriqués par les reins

$$\text{pH} = 6,10 + \log \frac{[\text{HCO}_3^-]}{[\text{H}_2\text{CO}_3]} = 6,10 + \log \frac{[\text{HCO}_3^-]}{\alpha \text{ PCO}_2}$$

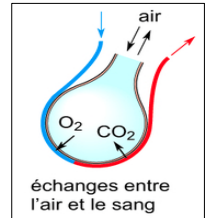
$\text{H}_2\text{CO}_3 = \text{H}_2\text{O} + \text{CO}_2$

Le gaz carbonique est éliminé par les poumons

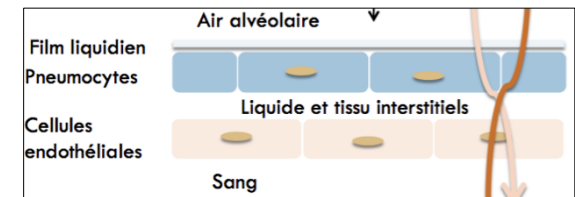
## II. Acide carbonique

### A) Les alvéoles pulmonaires

- ❖ **L'hématose (oxygénation) et l'épuration du  $\text{CO}_2$  va se faire au niveau de la membrane alvéolo-capillaire de l'alvéole pulmonaire.**



Elle est composée de la surface vers l'intérieur d'un film liquidien, d'une couche de pneumocytes, du liquide interstitiel et enfin des cellules endothéliales bordant les capillaires.



Les échanges gazeux se font selon la **loi de FICK**. La diffusion du  $\text{CO}_2$  de du sang vers l'air va alors s'exprimer :

$$\frac{S \times \Delta \text{PCO}_2}{e}$$

$S$  : surface d'échange de la membrane/  $\Delta \text{PCO}_2$  : gradient de pression partielle du  $\text{CO}_2$  entre l'air et le sang/  $e$  : épaisseur de la membrane alvéolo-capillaire.

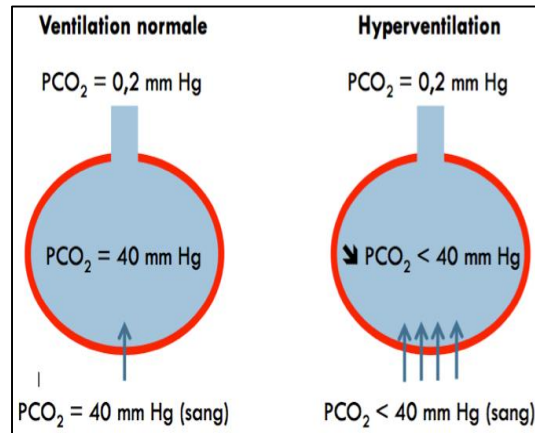
Pathologie : lors d'un œdème pulmonaire, l'épaisseur de la membrane alvéolo-capillaire va augmenter à cause de l'épanchement de liquide dans le tissu interstitiel. Les échanges gazeux et notamment l'oxygénation du sang sont ralentis, ce qui produit une sensation d'essoufflement = Dyspnée.

### B) Diffusion du $\text{CO}_2$ et ventilation

Le renouvellement de l'air alvéolaire à partir de l'air atmosphérique permet de faire baisser la  $\text{PCO}_2$  de l'air alvéolaire et donc d'augmenter le gradient de diffusion du  $\text{CO}_2$  du sang vers l'alvéole.

La  $PCO_2$  alvéolaire et la  $PCO_2$  sanguine sont en équilibre alors qu'il existe un gradient énorme entre l'air atmosphérique et l'air alvéolaire.

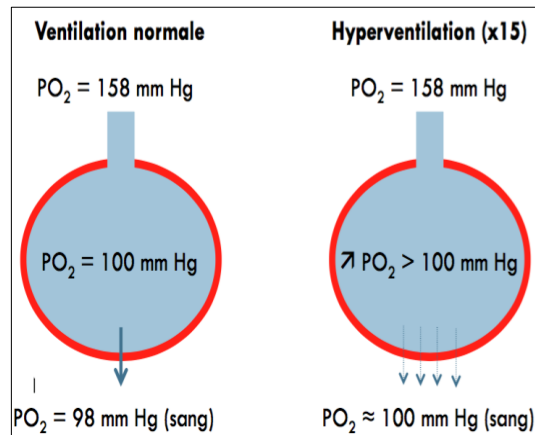
En cas d'**hyperventilation**,  $\nearrow$  diffusion du  $CO_2$  vers l'extérieur  $\Rightarrow$   $\searrow$   $PCO_2$  alvéolaire  $\Rightarrow$   $\nearrow$  diffusion  $CO_2$  du sang vers l'alvéole.



Pathologie : En cas d'acidose métabolique, on observe une hyperventilation réflexe (activation des capteurs de PH dans le tronc cérébral). Le trouble ventilatoire secondaire à l'acidose métabolique s'appelle la dyspnée de Kausmaul (= augmentation de la Fq ventilatoire + mouvements amples et symétriques du thorax).

### C) Diffusion de l' $O_2$ et ventilation

Contrairement au  $CO_2$ , il existe un faible gradient de  $PO_2$  entre l'air alvéolaire et atmosphérique. Le renouvellement de l'air alvéolaire à partir de l'air atmosphérique **augmente peu la  $PO_2$**  dans les alvéoles. **Cela explique qu'en cas d'hyperventilation, il y aura une forte épuration en  $CO_2$  mais une faible augmentation de la  $PO_2$  sanguine +++.**



### L'HYPERVENTILATION DIMINUE BEAUCOUP LA $PCO_2$ DANS LE SANG SANS AFFECTER SIGNIFICATIVEMENT LA $PO_2$ .

Influence de la  $PO_2$  atmosphérique :

Quand on monte en altitude, on a une diminution de la  $PO_2$  atmosphérique qui a un impact sur l'oxygénation du sang. On peut se retrouver en **hypoxie**. Cela agit directement sur l'activité musculaire qui est directement dépendante de la consommation d'oxygène. Pour pallier à ce phénomène, les personnes qui vivent en altitude augmentent leur hémoglobine par augmentation des globules rouges  $\Rightarrow$   **$\nearrow$  chances de captation de l' $O_2$ .**

Pathologie : Crise de tétanie

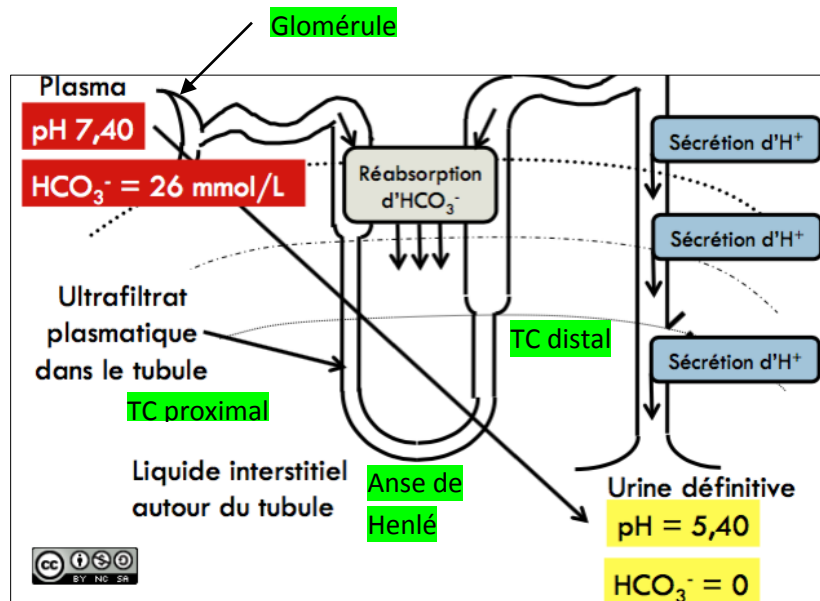
Le  $Ca^{2+}$  et les  $H^+$  sont en équilibre dynamique avec les anions protéiques selon l'équation :  $H^+ + Ca^{2+} + Pr^- \rightarrow PrCa + PrH$ .

L'hyperventilation favorise l'élimination du  $CO_2$  et donc de protons  $H^+$ . Cela libère des sites anioniques de protéines disponibles pour le calcium ionisé. On a donc une **diminution de la calcémie ionisée** entravant le fonctionnement des muscles striés squelettiques. On observe des spasmes, fasciculations, contractures par anomalies de la relaxation du muscle strié squelettique.

### D) Reins et bicarbonates

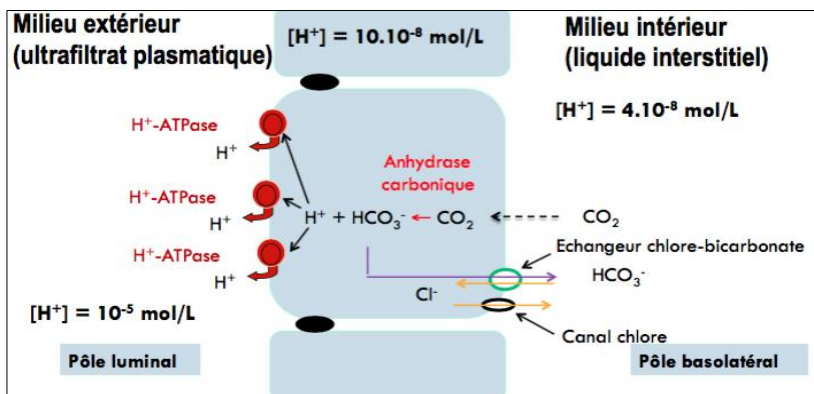
Les reins réabsorbent les bicarbonates plasmatiques filtrés dans les glomérules et sécrètent des protons dans l'urine primitive grâce à des pompes à proton ( $H^+$ /ATPase). Les protons sécrétés ne restent pas à l'état libre mais s'associent avec la base de 2 principaux couples acido-basiques de l'urine : **l'acide phosphorique et l'ammoniac.**

**FINALEMENT, ON PEUT DIRE QU'EN SECRETANT DES PROTONS, LE REIN FABRIQUE DES BICARBONATES POUR L'ORGANISME ++**



- L'unité fonctionnelle du rein est le néphron qui filtre le plasma. Dans l'ordre on a : le glomérule, le tube contourné proximal, l'anse de Henlé, le tube contourné distal qui se jette dans le tube collecteur d'urine.
- **La composition de l'urine est modifiée au cours de son trajet dans le néphron par le travail des cellules épithéliales (pompe  $H^+$ /ATPase) qui sécrètent des protons (acidifient l'urine) et réabsorbent les bicarbonates.**
- La sécrétion de protons est **modulable** car permet la régulation du PH du milieu intérieur.

### E) Sécrétion rénale de protons



- **Fabrication des protons** : A partir de  $CO_2$  qui diffuse librement du milieu intérieur vers la cellule et qui constitue la principale charge acide de l'organisme. **L'Anhydrase carbonique catalyse l'hydratation du  $CO_2$  pour produire des protons et du bicarbonate.**
- **Devenir des protons** : Les pompes  $H^+$ /ATPase situées **au pôle luminal** des cellules épithéliales font sortir de manière active (**contre le gradient de concentration de  $H^+$** ) les protons vers le milieu extérieur.
- **Les bicarbonates ( $HCO_3^-$ )** : Retournent dans le milieu intérieur via un échangeur chlore/bicarbonate du **côté basolatéral** de la cellule.
- **Les ions chlore** : diffusent passivement selon leur potentiel chimique via un canal du côté basolatéral.

**A ce niveau, l'épithélium est serré, il n'y a pas de passage paracellulaire d'eau ou d'ions.**

Les protons vont ensuite se fixer sur des anions organiques comme l'acide phosphorique ( $HPO_4^{2-}$ ). Son  $PK_a = 6,80$  ce qui explique que sa forme  $A^-$  prédomine au niveau du glomérule ( $PH=7,40$ ) et permet donc la captation d'un maximum de protons.

Tout au long du conduit, l'urine s'acidifie ce qui explique que la forme  $AH$  prédomine.

**Les protons  $H^+$  sécrétés sont donc éliminés grâce au fonctionnement du couple  $H_2PO_4^-/H_2PO_4^{2-}$ . Il se passe la même chose pour le couple ammonium/ammoniac ( $NH_3/NH_4^+$ ).**

### F) Capacité rénale à fabriquer des bicarbonates (variable)

Le couple  $NH_3/NH_4^+$  est le principal accepteur de protons de l'urine. En effet, l'ammoniac est facilement renouvelable car c'est **un gaz qui diffuse librement selon son gradient de concentration**. La baisse de  $NH_3$  crée un gradient favorable à la l'entrée de nouvelles molécules qui vont pouvoir attraper des  $H^+$ .

**$NH_4^+ = 75\%$  des bicarbonates  $\rightarrow$  Augmentation possible de la production x5**  
 **$H_2PO_4^- = 25\%$  des bicarbonates  $\rightarrow$  Pas d'augmentation possible.**



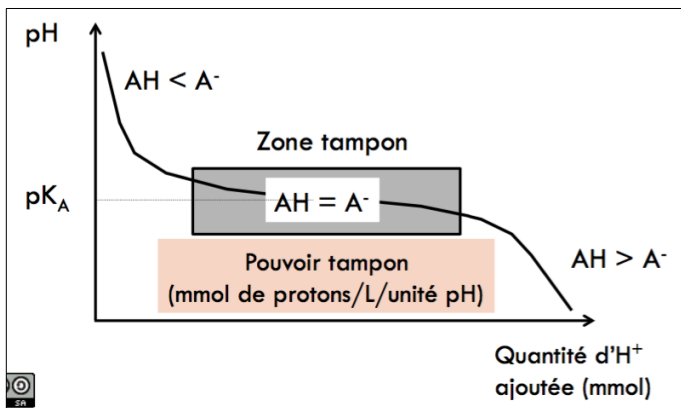
### III. Pouvoir tampon

- De manière passive, l'organisme limite les variations de pH des cellules et du milieu extracellulaire par des systèmes tampons.

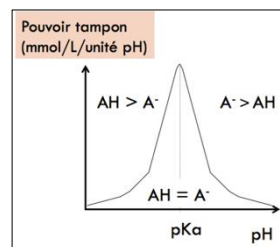
**Tampon :** Couple acido-basique dont la capacité de fixer des protons limite les variations de pH des milieux extracellulaire et cellulaire.

**Pouvoir tampon :** Quantité de protons fixés par un couple acido-basique **par unité pH et par litre de solution**.

#### A) Zone tampon d'un couple acido-basique

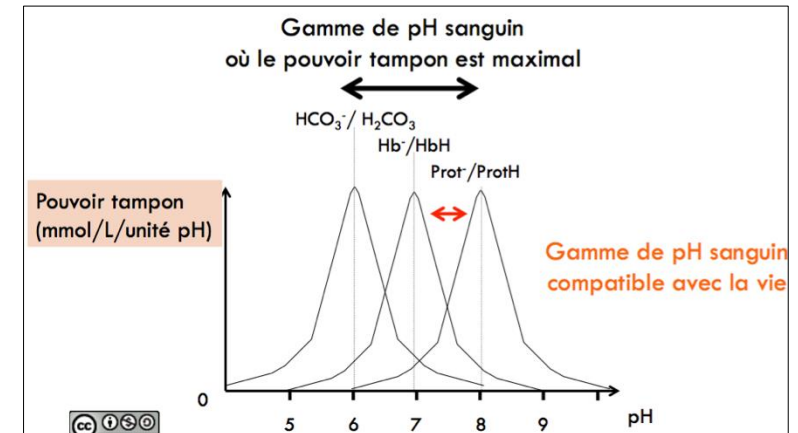


- On exprime le PH en fonction de la quantité de protons.
- Quand  $PH = PKa$ , on a autant de base ( $A^-$ ) que d'acide ( $AH$ ).
- Plus on ajoute de protons plus la forme  $AH$  devient majoritaire.
- On remarque que cette relation présente une zone horizontale qui nécessite l'ajout de beaucoup de protons pour faire varier qu'un peu le pH : c'est ce qui définit la **zone tampon**.
- Le pouvoir tampon d'un couple acide/base est maximum pour  $PH=PKa$ .



#### B) Tampons sanguins

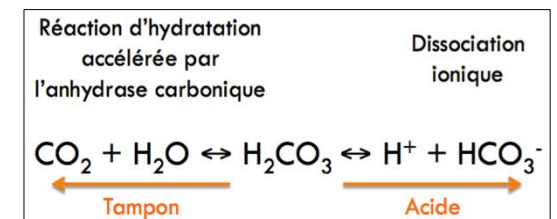
- Le sang utilise 3 tampons avec des  $PKa$  différents ce qui va permettre dans un certain intervalle de PH de maintenir un pouvoir tampon maximal.



- Les 3 tampons principaux du sang sont :
  - Bicarbonate/acide carbonique ( $HCO_3^-/H_2CO_3$ )
  - Hémoglobine ( $Hb/HbH$ )
  - Protéines ( $Prot/ProtH$ ) : Albumine ++

On constate que les tampons ont tendance à protéger d'avantage de l'acidose.

Rmq : L'acide carbonique ( $H_2CO_3$ ) est un couple acido-basique qui peut à la fois acidifier le milieu et jouer le rôle de tampon dans l'organisme.



### C) Nature des tampons

#### **TAMPON BICARBONATE = TAMPON VOLATIL**

Le CO<sub>2</sub> issu de la réaction :  $\text{H}^+ + \text{HCO}_3^- \rightarrow \text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O}$  a une liberté de diffusion quasi totale ce qui lui permet d'être expiré par les poumons provoquant une diminution de la masse acido-basique dans l'organisme.

**C'est pourquoi on dit que le tampon bicarbonate, qui forme du CO<sub>2</sub> pour contrer la charge acide, est un tampon volatil car « en aval » de la réaction le CO<sub>2</sub> s'échappe.**

En considérant une concentration de bicarbonate moyenne noté  $[\text{HCO}_3^-]$  moyenne dans le sang & les cellules égale à 25 mmol/l et une distribution moyenne globalement égale à 50% du poids du corps chez un individu standard (70 kg), on peut estimer que la quantité de tampon bicarbonate utilisée pour tamponner le pH de l'organisme est telle que :

$$\text{Quantité de HCO}_3^- = 70 \text{ kg} \times 0,5 \times 25 \text{ mmol} = 1050 \text{ mmol}$$

#### **AUTRES TAMPONS = TAMPONS FIXES**

La plupart de ces tampons ont une nature protéique et restent bloqués dans l'organisme faisant que la masse acide-base de ce tampon reste relativement constante. Les tampons fixes acceptent ou relarguent les protons mais n'ont pas besoin d'être éliminés. Exemple des protéines qui acceptent les protons sur leur résidu histidine.

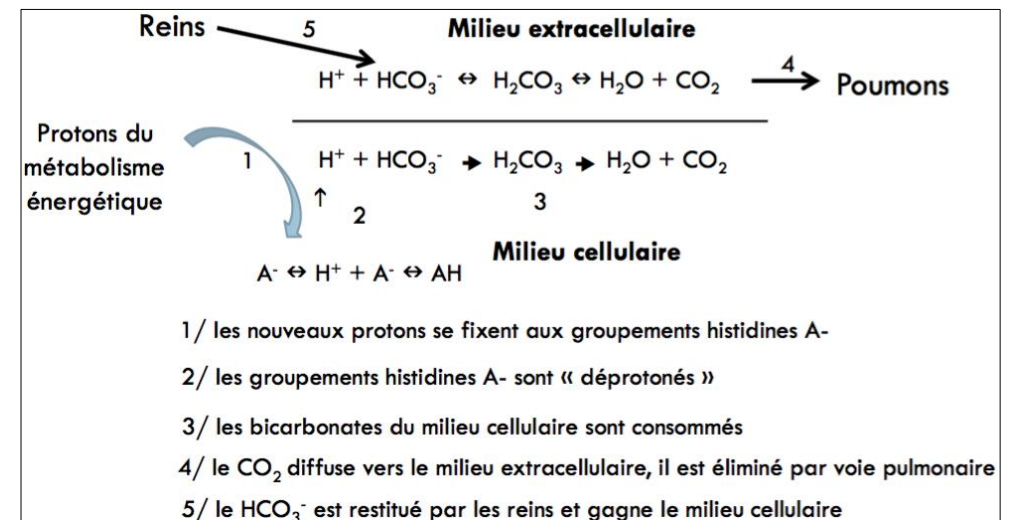
Un individu de 70 kg peut fixer 1200 mmoles de protons sur ses protéines.

- On considère l'hémoglobine comme un secteur à part.

- Le métabolisme cellulaire (oxydation++) acidifie le milieu, cela explique la présence importante de protéines intracellulaires dont le rôle sera de trapper les protons issus de l'oxydation.

Tissu/ compartiment	Système tampon	Pouvoir tampon (mmoles H <sup>+</sup> /l/unité pH)
Milieu extracellulaire	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> /H <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>	55
	Acide phosphorique	0,5
	Protéines	7
Milieu cellulaire	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> /H <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>	18
	Protéines	60
Hématies	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> /H <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> Hémoglobine	30

- Le milieu cellulaire et le milieu extracellulaire travaillent ensemble pour gérer le métabolisme.



Les protons peuvent modifier la conformation structurale des protéines. Heureusement elles sont rapidement déprotonées grâce à la présence de bicarbonates qui permettent de préserver l'intégrité de leurs propriétés structurales et/ou fonctionnelles.

## D) Rôle fondamental de l'acide carbonique

L'acide carbonique assure l'essentiel du pouvoir tampon dans le milieu extracellulaire. **C'est le seul secteur qui est accessible à des mesures.**

Si on reprend l'équation de tout à l'heure, sachant que le PKa et le coefficient de solubilité du CO<sub>2</sub> dans l'eau sont des paramètres connus, on voit qu'on peut mesurer deux choses : **le pH et la PCO<sub>2</sub>.**

$$pH = pK_a + \log \frac{[HCO_3^-]}{\alpha PCO_2}$$

Ces mesures vont nous permettre de calculer aisément le 3<sup>ème</sup> terme : la **concentration en bicarbonates du milieu extracellulaire.**

## E) Application en médecine

✓ Le dosage de la concentration d'H <sup>+</sup>	✓ La mesure de la PCO <sub>2</sub>	✓ Le calcul de la concentration d'HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>
Précision < 1% Valeur normale = 7,38-7,42	Précision ≈ 5 à 10 % Valeur normale = 36-44 mmHg	Précision ≈ 5 à 10 % Valeur normale = 22-26 mmol/L

**Gazométrie :** Le prélèvement sanguin se fait à l'aide d'une seringue avec **anticoagulant** dans l'artère radiale généralement. Il faut chasser les bulles d'air pour éviter la baisse de la PCO<sub>2</sub> au contact de l'air. La seringue est conservée dans la glace car **les hématies respirent** = consomment d'O<sub>2</sub> et rejettent de CO<sub>2</sub> faisant diminuer le PH sanguin.

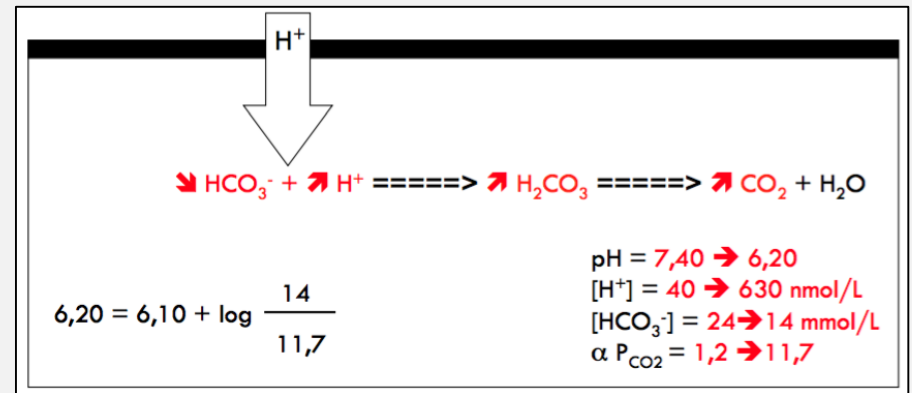


## IV. Analyse du pouvoir tampon

### A) Solution contenant de l'acide carbonique

#### Pouvoir tampon de l'acide carbonique en milieu fermé

- On place un liquide dans une cuve hermétique dans laquelle se trouve du bicarbonate en équilibre avec le CO<sub>2</sub> + H<sub>2</sub>O.
- On ajoute 10 mmol de protons dans la **solution initiale qui possède un PH=7,40**

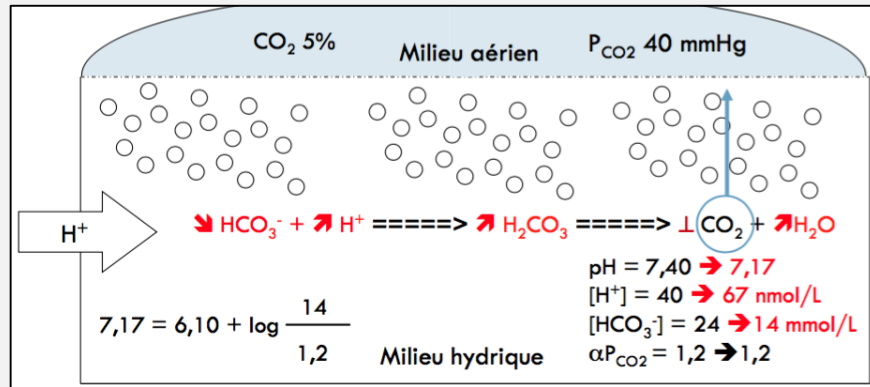


- L'ajout de protons déplace l'équilibre de la réaction vers la formation de CO<sub>2</sub> car **les protons sont « consommés » par les bicarbonates qui voient leur concentration passer de 24 à 14 mmol/L.**
- La PCO<sub>2</sub> augmente d'un facteur 10 mais le coefficient de solubilité ne change pas.
- Cela a pour conséquence une modification de l'équation de départ avec une diminution du PH de plus d'une unité passant de 7,40 à 6,20.



### Pouvoir tampon de l'acide carbonique en milieu ouvert

- On se trouve dans les mêmes conditions expérimentales mais cette fois ci, on se place dans une cuve en contact avec l'air atmosphérique.
- La  $PCO_2$  est en équilibre avec le milieu aérien à 40mmHg (assimilable à l'air alvéolaire)

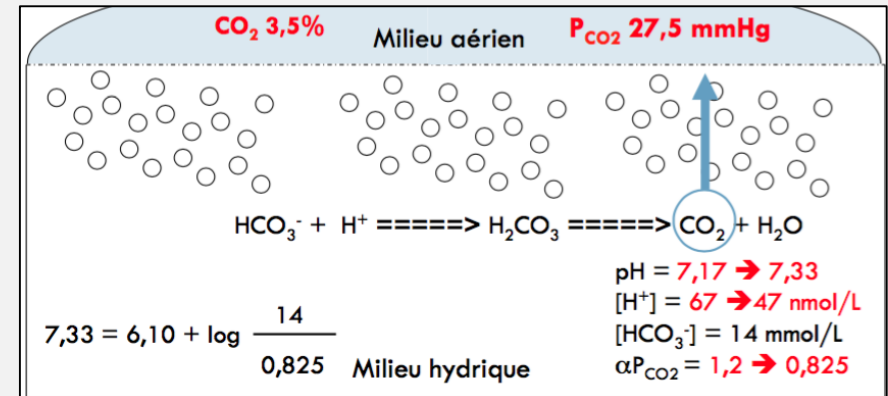


- Les protons vont se fixer naturellement sur les bicarbonates ce qui déplace l'équilibre de la réaction vers la formation de CO<sub>2</sub> qui est expiré par les poumons.
- Les bicarbonates sont largement consommés mais la  $PCO_2$  est inchangée car elle s'équilibre avec le milieu aérien.
- L'échappement du CO<sub>2</sub> en fonction de son gradient de concentration permet de capter beaucoup plus de protons en amont de la réaction.
- Contrairement à un milieu fermé, la  $PCO_2$  n'augmente pas, ce qui explique que la variation de PH est seulement due à la consommation des bicarbonates → Le PH varie peu passant de 7,40 à 7,17.

Simplement en faisant communiquer le liquide avec le milieu aérien on a augmenté le pouvoir tampon de l'acide carbonique.

### Diminution de la PCO<sub>2</sub>

- Lorsque qu'on ventile, on diminue la  $PCO_2$  alvéolaire Cfpag4 (=milieu aérien sur le schéma).



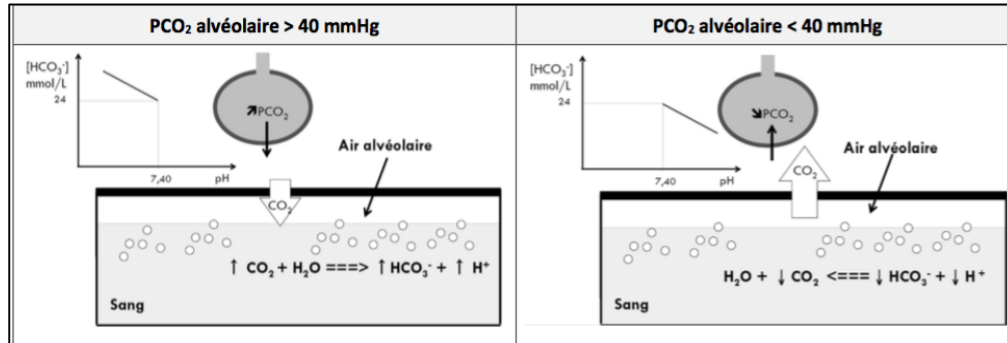
- On crée donc un gradient important favorable à la diffusion du CO<sub>2</sub> du milieu hydrique vers le milieu aérien qui s'échappe donc plus facilement.
- On diminue donc la quantité de protons SANS toucher à la concentration des bicarbonates !
- C'est ce que font les poumons en hyperventilant cela entraîne cette fois ci une augmentation de PH qui passe de 7,17 à 7,33 grâce à la diminution simple de la  $PCO_2$  alvéolaire.

### Qu'est-ce que je dois retenir ?

- ♥ Le sang est au contact de l'air alvéolaire : l'organisme utilise le tampon bicarbonate en milieu ouvert.
- ♥ La diffusion du CO<sub>2</sub> vers l'extérieur de l'organisme augmente avec la fréquence ventilatoire.

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

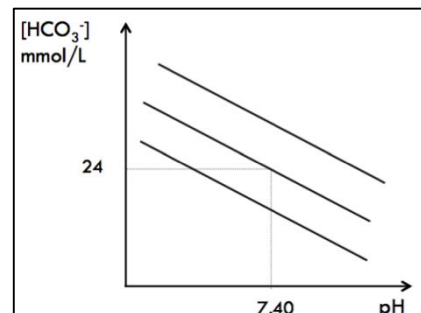
On expérimente chez un animal ventilé artificiellement. Ici, on se met en situation fermée : le sang de l'animal est en contact avec l'air alvéolaire dans un système hermétique dont la PCO<sub>2</sub> est contrôlé par le respirateur.



- Quand on augmente la PCO<sub>2</sub> dans l'air alvéolaire on favorise la diffusion du CO<sub>2</sub> de l'air vers le sang. On augmente donc le CO<sub>2</sub> dissout : H<sup>+</sup> / HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> est augmenté en conséquence par cet ajout. Et c'est l'inverse qui se produit quand on diminue la PCO<sub>2</sub> alvéolaire, les protons sont chélatés par l'HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> et le pH ↑.

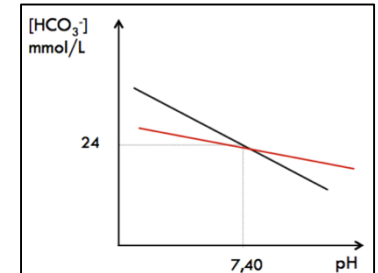
**En situation fermée, la relation entre la bicarbonatémie et le pH est linéaire.**

$[HCO_3^-] = 24 - k(pH - 7,40)$  où k représente le pouvoir tampon des tampons non volatils. Si on modélise différents systèmes on peut voir sur le diagramme que selon la PCO<sub>2</sub> choisit on va avoir des droites qui se superposent avec la même pente.

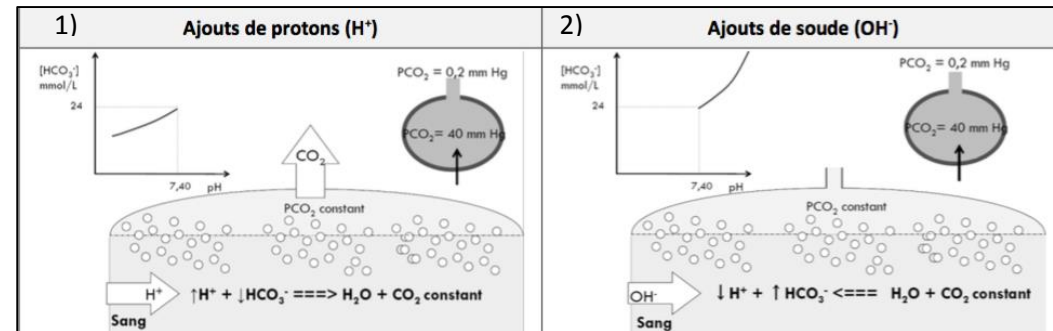


**Pathologie :** En cas d'hypoalbuminémie (baisse des protéines sanguines) ou d'anémie (diminution des globules rouges et donc de l'hémoglobine), on a une baisse du pouvoir tampon des tampons fixes. La pente de la relation s'aplatit.

**Pour la même variation de PCO<sub>2</sub> la variation de PH est plus grande.**



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

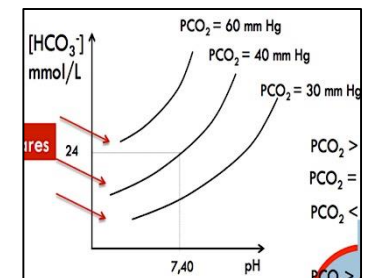


- 1) On ajoute des protons qui vont être consommés par des bicarbonates. On a une augmentation de la PCO<sub>2</sub> qui va être compensée par la diffusion du CO<sub>2</sub> vers l'air alvéolaire pour être ensuite expiré par les poumons. La PCO<sub>2</sub> reste alors constante car le CO<sub>2</sub> diffuse selon son gradient de concentration.
- 2) Cette fois ci on ajoute de l'OH<sup>-</sup>, base forte. Cela conduit à une diminution brutale des H<sup>+</sup> qui sont chélatés par la base forte. Cela déplace l'équilibre de la réaction vers la création de H<sup>+</sup> et de bicarbonates. On observe alors une augmentation des bicarbonates.

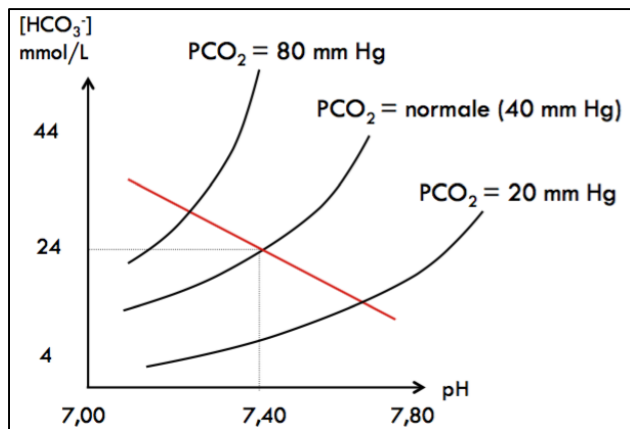
**En situation ouverte, la relation entre la bicarbonatémie et le pH est exponentielle :**

$$[HCO_3^-] = \alpha PCO_2 \times 10^{(pH - 6,10)}$$

Ici chaque courbe est à une isobare différente c'est à dire à une pression constante en CO<sub>2</sub>.

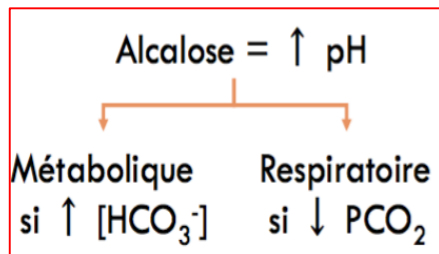
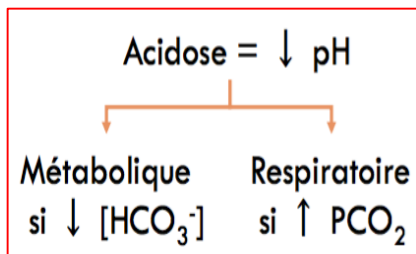


## D) Modélisation chez l'homme : Diagramme de Davenport



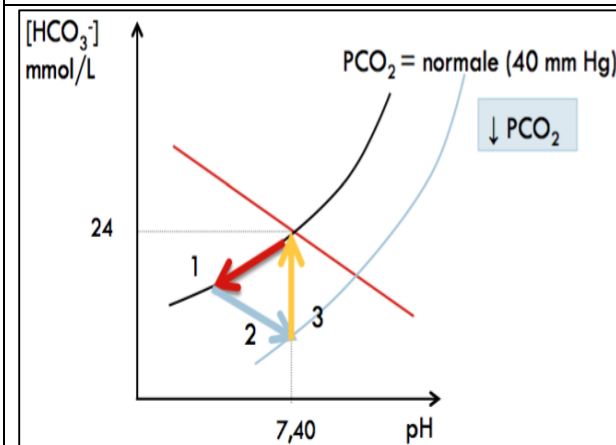
Henderson et Hasselbach ont attribué un rôle central à l'acide carbonique pour modéliser les variations pathologiques de l'état acido-basique grâce à ce diagramme.

- La courbe rouge représente les **tampons fixes** c'est à dire les tampons en milieu fermé.
- L'exponentielle en noir représente les **tampons volatils** c'est à dire les tampons en milieu ouvert.
- L'intersection de ces deux courbes se trouve à PH=7,40, la norme chez l'Homme. **Lors de troubles pathologiques, ce point va se déplacer.**
- Définition des déséquilibres acido-basiques :



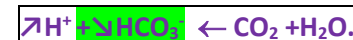
On va maintenant décrire leur compensation par l'organisme grâce au diagramme

## Acidose métabolique



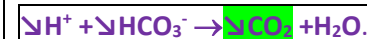
### 1) Acidose métabolique

aigue :



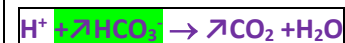
Baisse initiale des bicarbonates qui va déplacer l'équilibre **le long de la courbe isobare**. (car milieu ouvert)

### 2) Hyperventilation pulmonaire :



A court terme, l'hyperventilation élimine les protons sous forme de CO<sub>2</sub>. Cela consomme des bicarbonates supplémentaires mais le PH remonte. On voit que l'hyperventilation nous a fait **changer de courbe isobare** car la PCO<sub>2</sub> a diminué.

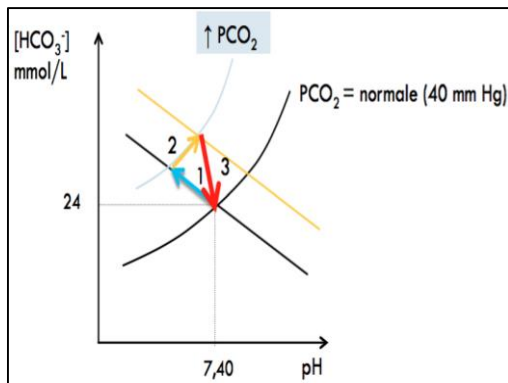
### 3) Augmentation de l'excrétion rénale de protons et de la fabrication des bicarbonates :



Le rein effectue son boulot et remplace les bicarbonates qui ont été consommé pour pallier à l'acidose. Finalement la carence en HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> est compensée. **Il n'y a alors plus aucune raison d'hyperventiler et on rejoint l'isobare normale à 40 mmHg.**

*Si la cause du désordre n'est pas identifiée et résolue, on reste en état d'hyperventilation. C'est notamment le cas chez la personne insuffisance rénale qui n'arrive pas à compenser l'acidose.*

## Acidose métabolique

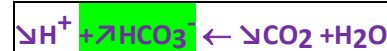


### 1) Acidose respiratoire aigue :



L'hypoventilation entraîne une augmentation de la  $\text{PCO}_2$  (diminution de l'élimination du  $\text{CO}_2$ ). On passe à une **isobare supérieure** en se déplaçant le long de la courbe des tampons fixes.

### 2) Augmentation fabrication rénale de bicarbonates :



Le rein compense dès qu'il le peut en augmentant les bicarbonates (chélation de  $\text{H}^+$ ) et en augmentant l'excrétion de  $\text{H}^+$  dans les urines. On a une augmentation du PH mais **on reste sur la même isobare**.

### 3) Disparition de la cause d'acidose respiratoire / Elimination des bicarbonates :

On élimine les bicarbonates en trop (qui étaient là pour capter les  $\text{H}^+$ ). On repasse à une ventilation normale car il y a disparition de la cause d'acidose respiratoire. On **retrouve l'isobare de départ à 40mmHg** et un PH normal de 7,40.

*Remarque : Ce type d'acidose peut se retrouver dans une atmosphère confinée où la  $\text{PCO}_2$  aérienne est élevée. Par exemple lors d'incendies.*

## E) Applications en médecine (QCM ++)

### ❖ Acidose métabolique :

**Perte de bicarbonates :** **diarrhées++**, fuites rénales. Le duodénum contient des bicarbonates qui lors de l'augmentation du transit sont éliminés (donc diminution du PH).

➤ **bicarbonates par augmentation de production d'acides non volatils :** C'est le cas dans **l'acido-cétose diabétique** ( $\nearrow$  corps cétoniques), acidose lactique (métabolisme anaérobie) .. Ils sont utilisés pour tamponner des  $\text{H}^+$ .

**Insuffisance rénale :** On a une diminution de la production des bicarbonates.

### ❖ Acidose respiratoire :

**Diminution de la surface d'échange alvéolo-capillaire :** On a une diminution de la diffusion du  $\text{CO}_2$  qui entraîne une  $\nearrow \text{PCO}_2$  donc changement d'isobare et baisse du PH. **Pathologie : Emphysème** = Dans l'emphysème on voit des bulles qui remplacent le parenchyme pulmonaire normal ( $\nearrow$  volume résiduel Cf Spirométrie). Elles sont donc responsables d'une amputation de la surface d'échange alvéolaire

**Diminution de la force musculaire (myopathie++) :** On observe une hypoventilation donc  $\nearrow \text{PCO}_2$  et diminution du PH.

### ❖ Alcalose métabolique :

**Excès de sécrétion rénale de protons :** restitution accrue des bicarbonates.  
**Apports accrus de bicarbonates intraveineux (réanimation)**

### ❖ Alcalose respiratoire :

**Augmentation de la ventilation notamment lors d'une crise de tétanie ou par ventilation mécanique (réanimation) :** augmentation de la diffusion du  $\text{CO}_2$ .