

Équilibre acido-basique



UE 8 PASS
2023 - 2024

Laurence Derain Dubourg

Exploration Fonctionnelle Rénale
Faculté de Médecine Lyon Est/Lyon Sud

Plan

- 1. Rappels
- 2. Contrôle de l'équilibre acido-basique dans l'organisme
- 3. Sources de production d'acides dans l'organisme
- 4. Mécanismes viscéraux de contrôle de l'équilibre acido-basique
 - Mécanismes PULMONAIRES
 - Mécanismes RÉNAUX
- 5. Principaux déséquilibres acido-basiques

Rappels

- Acidité d'une solution = $[H^+]$ libres
 - concentrations faibles : 10^{-6} à 10^{-8} mol/L
 - pour $[H^+] = 10^{-6}$ mol/l \Rightarrow pH = 6
 - pour $[H^+] = 10^{-8}$ mol/l \Rightarrow pH = 8
- $$\text{pH} = \log \frac{1}{[H^+]} = -\log [H^+]$$
- L'ion H^+ : très réactif
 - se combine rapidement aux protéines de l'organisme
 - protéines intracellulaires, enzymes et canaux membranaires
 - ↳ modification de l'activité
 - modification de l'excitabilité neuronale
 - Nécessité de régulation très précise de la concentration en H^+ libres

Rappels : acide et base

- Acide : espèce chimique capable de céder un proton
 - $AH \rightarrow A^- + H^+$
 - $HCL \rightarrow Cl^- + H^+$
- Base : espèce chimique capable d'accepter un proton
 - $B^- + H^+ \rightarrow BH$
 - $NaOH + H^+ \rightarrow Na^+ + H_2O$

Couple d'Acide et de Base conjugués

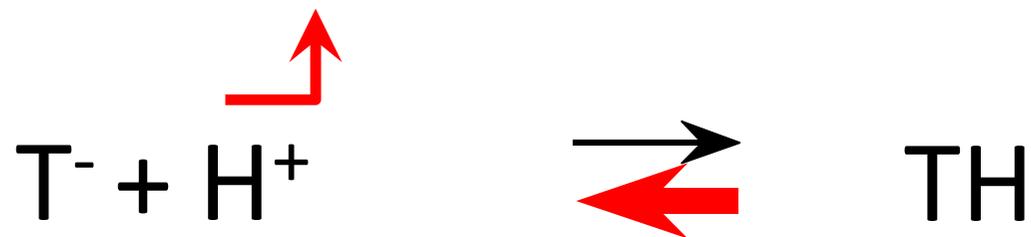
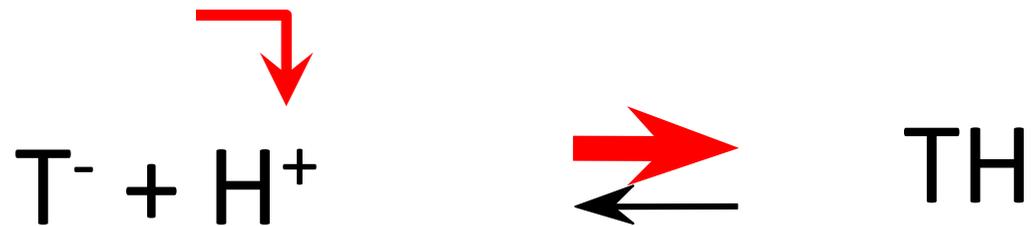
- $T^- + H^+ \rightleftharpoons TH$
 - $HPO_4^{2-} + H^+ \rightleftharpoons H_2PO_4^-$
 - $NH_3 + H^+ \rightleftharpoons NH_4^+$
- forme basique + H^+ = forme acide
- Constante de dissociation

$$K = \frac{[H^+] \times [T^-]}{[TH]}$$

- acide fort et acide faible

Substances tampons

- couple acide-base conjugué
 - capables de fixer/libérer les H^+ libres



- minimisent les variations de pH du milieu

Equation d 'Henderson-Hasselbach

$$K = \frac{[H^+] \times [T^-]}{[TH]} \qquad [H^+] = K \times \frac{[TH]}{[T^-]}$$

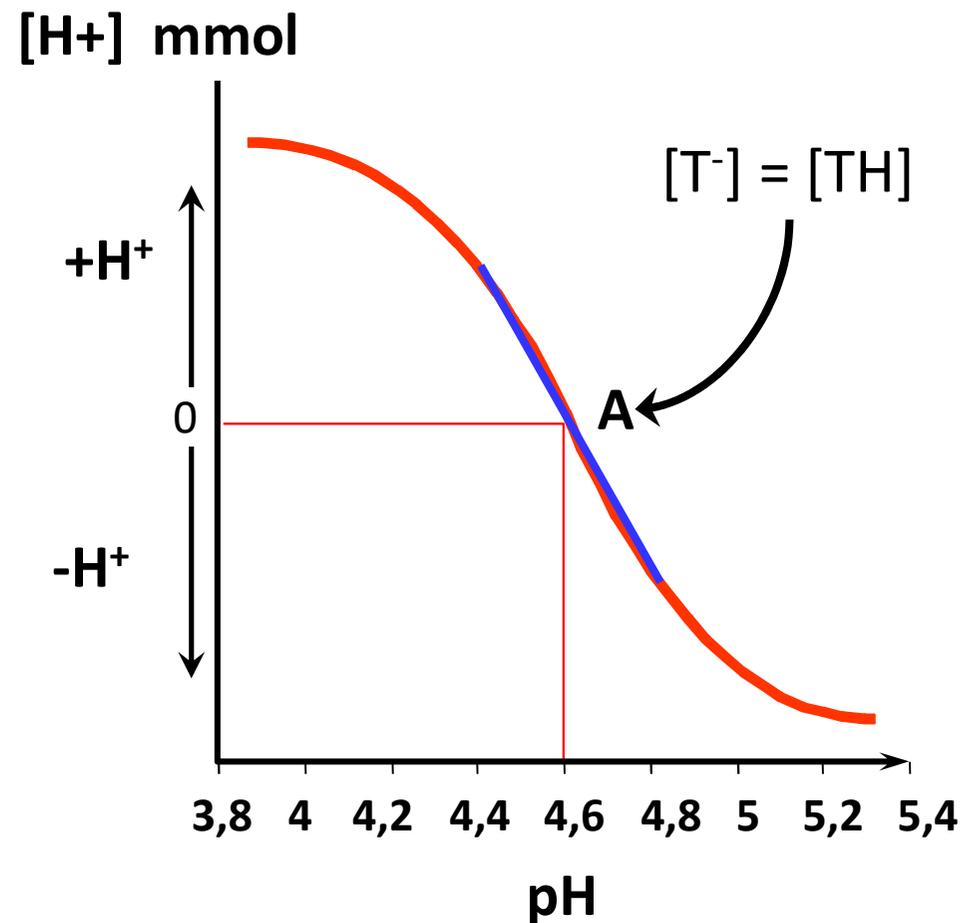
$$-\log[H^+] = -\log K - \log \frac{[TH]}{[T^-]}$$

$$pH = pK + \log \frac{[T^-]}{[TH]}$$

Efficacité d'un tampon

- Concentration dans la solution
- Valeur tampon
- pK

Courbe de titration d'un tampon



Valeur tampon = n mmol H^+ ajoutés (ou retranchés) pour un ΔpH de la solution de 1 unité

Efficacité d'un tampon

- Au point A, l'efficacité du tampon est la plus importante
- Or, au point A, $[TH] = [T^-]$

$$pH = pK + \log \frac{[T^-]}{[TH]}$$

- → au point A, $pH = pK$

Efficacité d'un tampon

- Donc, un tampon est d'autant plus efficace que son pK est proche du pH de la solution qu'il doit tamponner
- En pratique le pK doit être égal au pH de la solution ± 1 unité

Plan

- 1. Rappels
- 2. Contrôle de l'équilibre acido-basique dans l'organisme
- 3. Sources de production d'acides dans l'organisme
- 4. Mécanismes viscéraux de contrôle de l'équilibre acido-basique
 - Mécanismes PULMONAIRES
 - Mécanismes RÉNAUX
- 5. Principaux déséquilibres acido-basiques

Généralités

- ↪ Stabilité du pH

$$7,38 < \text{pH} < 7,42$$

- $\text{pH} < 7,38 = \text{ACIDOSE}$
- $\text{pH} > 7,42 = \text{ALCALOSE}$

Moyens de défense contre les déséquilibres acido-basiques

- Moyens de défense
 - mécanismes humoraux
 - tampons
 - mécanismes viscéraux
 - poumons
 - reins

1^{ère} ligne de défense
limite les grandes variations

2^{ème} ligne de défense
poumons : mécanisme rapide
reins : réponse retardée mais
complète

Moyens de défense contre les déséquilibres acido-basiques

- Moyens de défense
 - mécanismes humoraux
 - tampons
 - mécanismes viscéraux
 - poumons
 - reins

1^{ère} ligne de défense
limite les grandes variations

2^{ème} ligne de défense
poumons : mécanisme rapide
reins : réponse retardée mais
complète

Les tampons de l'organisme

Répartition des tampons dans les différents compartiments liquidiens

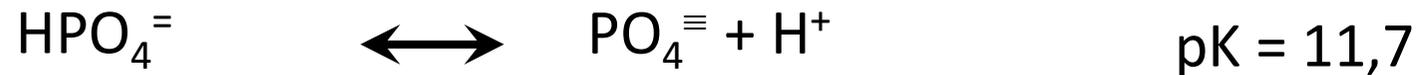
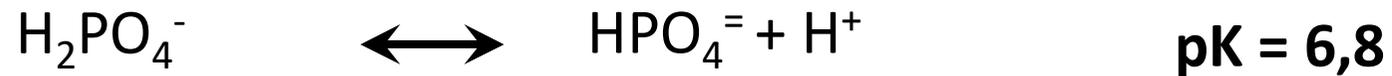
- Sang
 - Bicarbonates = 65%
 - Hémoglobine = 30%
 - Protéines = 5%
 - Phosphates = 1%

Les tampons de l'organisme

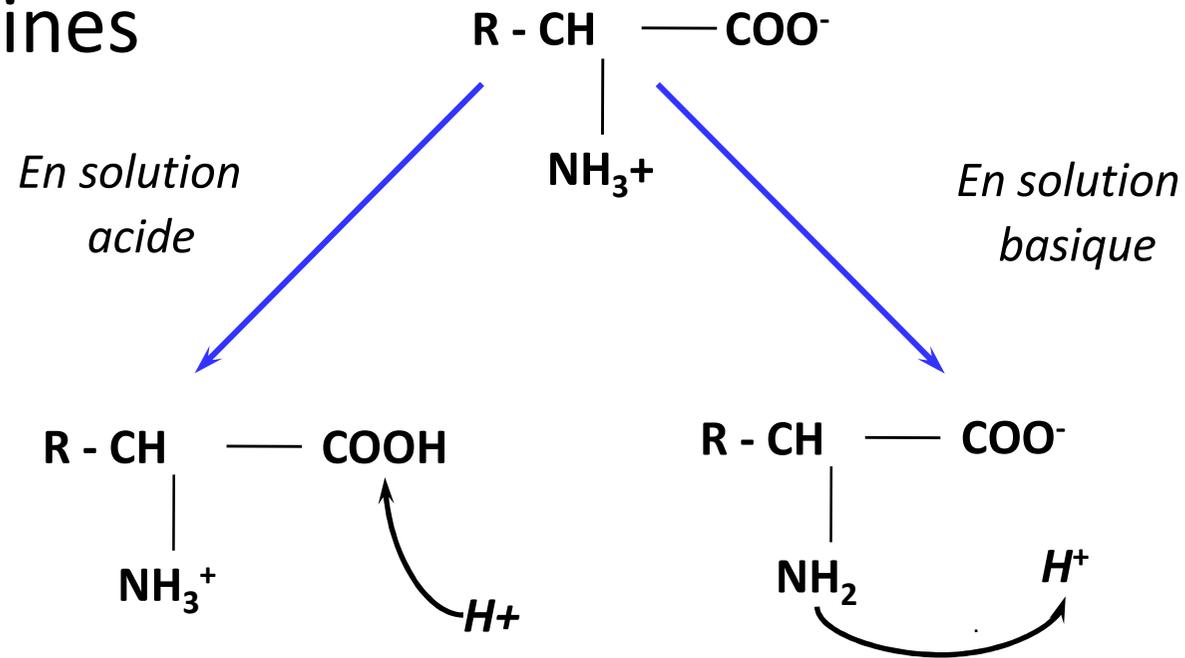
- Autres LEC
 - Bicarbonates
 - Protéines
 - Phosphates
- LIC
 - Protéines +++
 - Phosphates
- Urines
 - Ammoniaque
 - Phosphates

Caractéristiques des différents tampons

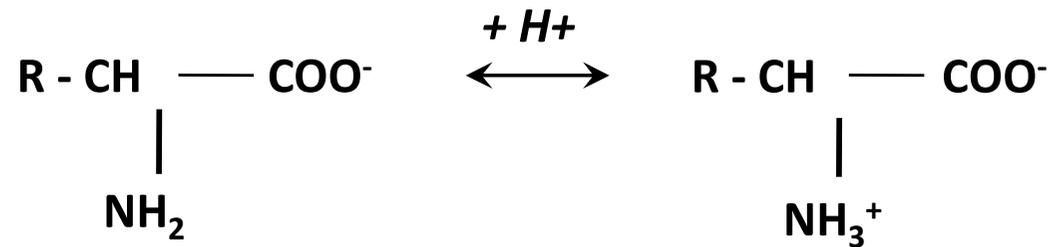
- Phosphates



• Protéines

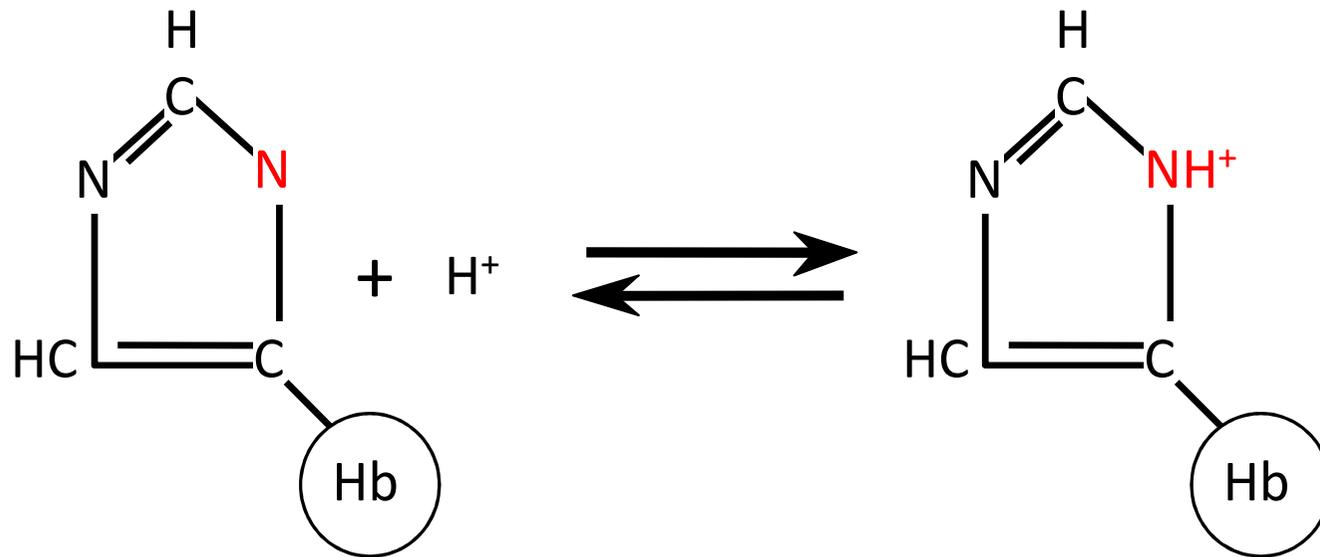


A pH physiologique



- Hémoglobine

⇒ L'action tampon de l'hémoglobine
(groupement imidazole histidine)



→ Influence de l'oxygénation sur l'action tampon de l'Hb



- le système $(\text{CO}_2)-(\text{H}_2\text{CO}_3)-(\text{HCO}_3^-)$



Anhydrase carbonique



Système ouvert : CO_2 volatile

Application de l'équation d'Henderson Hasselbach

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

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

α = coefficient de solubilité du CO_2

pCO_2 = pression partielle du CO_2

Plan

- 1. Rappels
- 2. Contrôle de l'équilibre acido-basique dans l'organisme
- 3. Sources de production d'acides dans l'organisme
- 4. Mécanismes viscéraux de contrôle de l'équilibre acido-basique
 - Mécanismes PULMONAIRES
 - Mécanismes RÉNAUX
- 5. Principaux déséquilibres acido-basiques

Acidité volatile

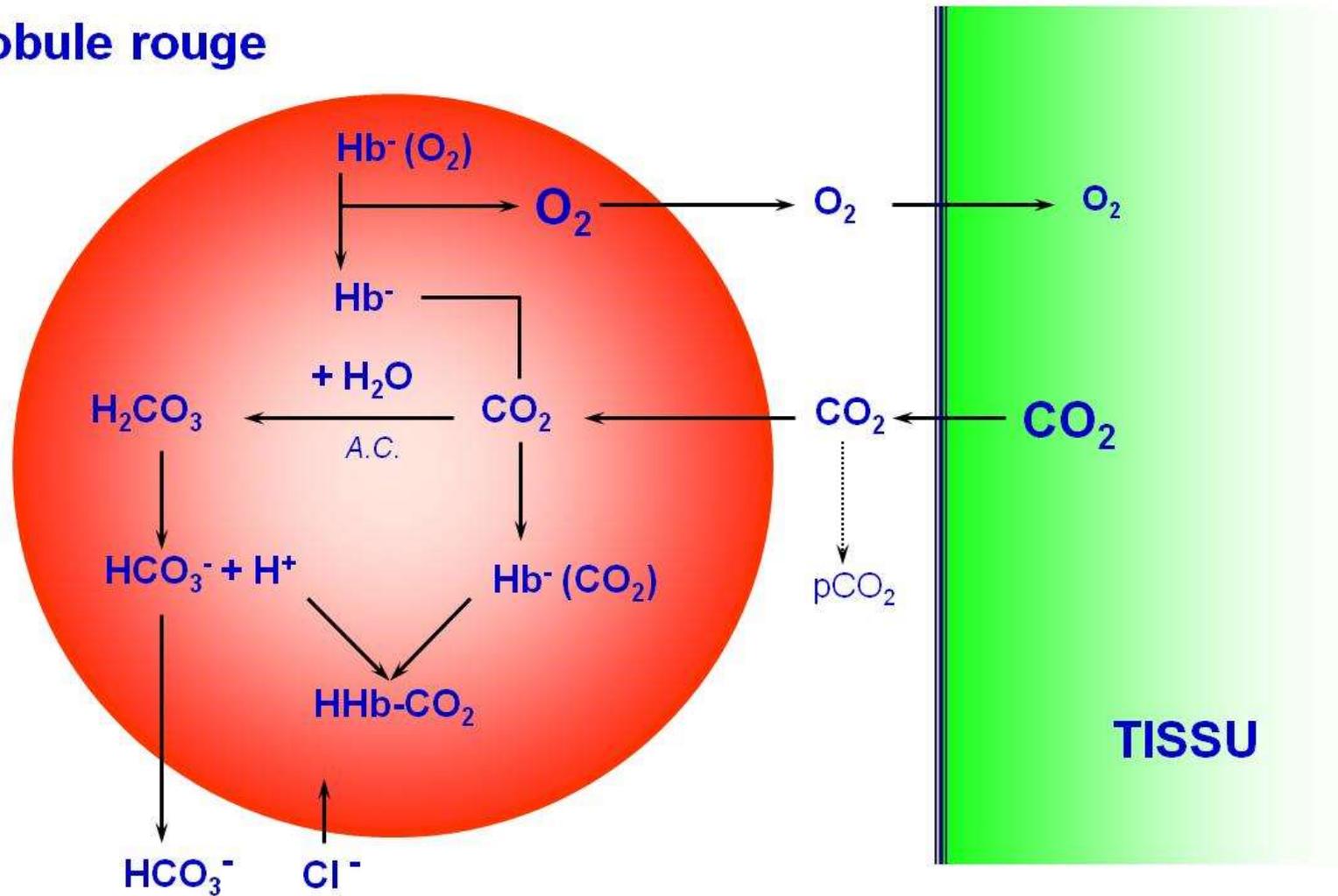
- Liée au métabolisme aérobie (dégradation glucides, lipides et protides) avec O_2 au niveau du cycle de Krebs des mitochondries: production H_2O et CO_2
- Le CO_2 est potentiellement source d'acides :
$$CO_2 + H_2O \rightarrow H_2CO_3 \rightarrow HCO_3^- + H^+$$
- Production quotidienne de $CO_2 = 15.000 \text{ mmol/j}$
- Si pas éliminés par les poumons $\rightarrow 15.000 \text{ mmol } H^+$

Acidité volatile

- Donc nécessité d'éliminer le CO_2
- Transport du CO_2 produit par les tissus jusqu'aux poumons
 - CO_2 dissous \rightarrow pCO_2
 - CO_2 combiné aux protéines :
 - les carbamino-protéines
$$\text{R-NH}_2 + \text{CO}_2 \rightleftharpoons \text{R-NH-COOH}$$
 - La carbamino-hémoglobine
$$\text{Hb} + \text{CO}_2 \rightleftharpoons \text{HbCO}_2$$

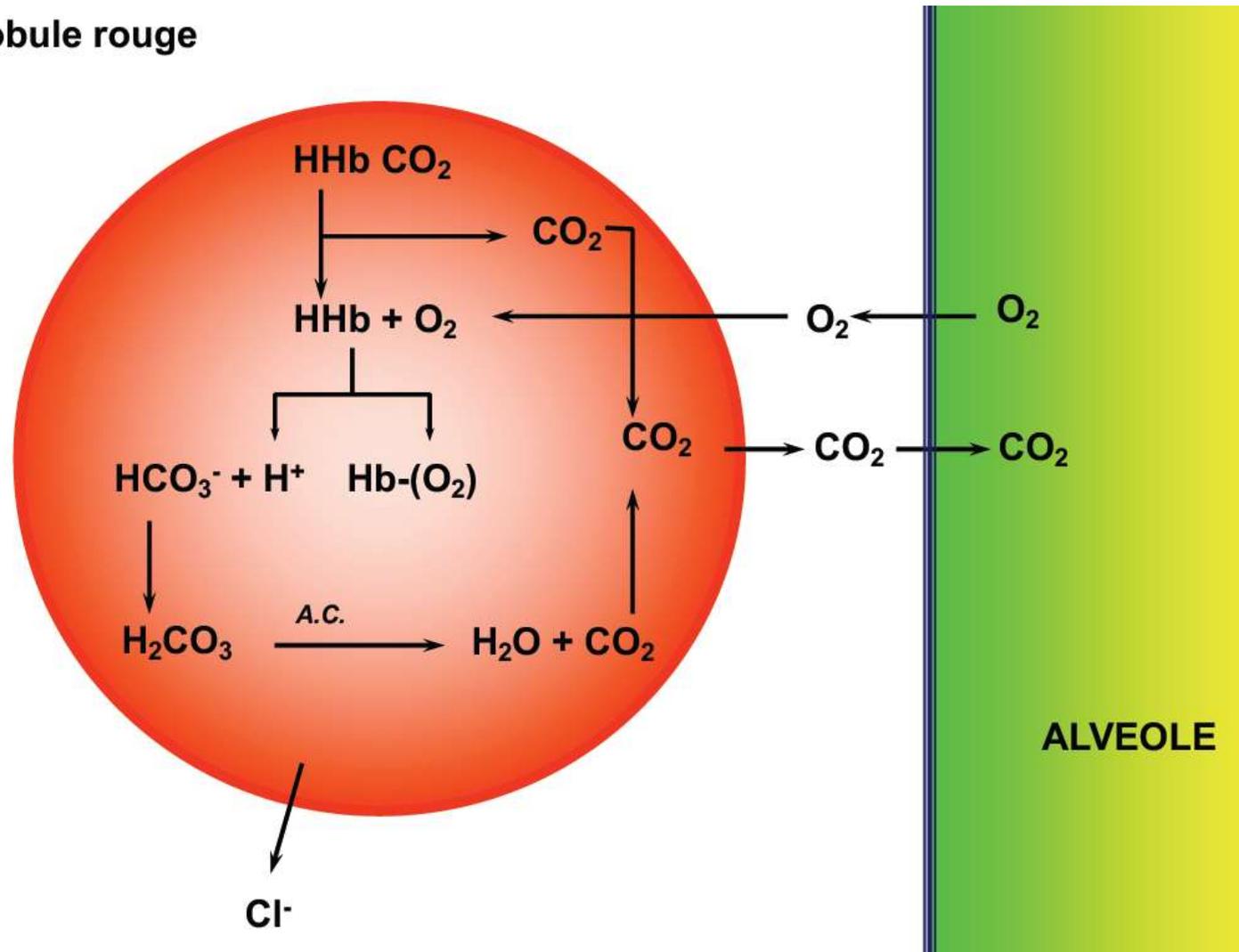
Action combinée de l'Hb

Globule rouge



Action combinée de l'Hb

Globule rouge



Acidité non volatile ou fixe

- acide sulfurique : aminoacides soufrés (cystéine/cystine, méthionine)
- acide chlorhydrique : aminoacides cationiques (lysine, arginine, histidine)
- acides organiques
 - acide lactique (si \searrow O_2)
 - acides cétoniques (si \searrow insuline, jeûne...)

→ Conditions normales : surtout alimentation (protéines)

Acidité non volatile ou fixe

- L' H^+ produit est tamponné par HCO_3^-
 - $HCO_3^- + H^+ \rightarrow CO_2 + H_2O$
- Donc
 - Production de CO_2 éliminée par les POUMONS
 - Mais consommation de HCO_3^- ... d'où nécessité de renouvellement du « stock » de HCO_3^- (réserve alcaline) = rôle du REIN

Tampon bicarbonate/acide carbonique

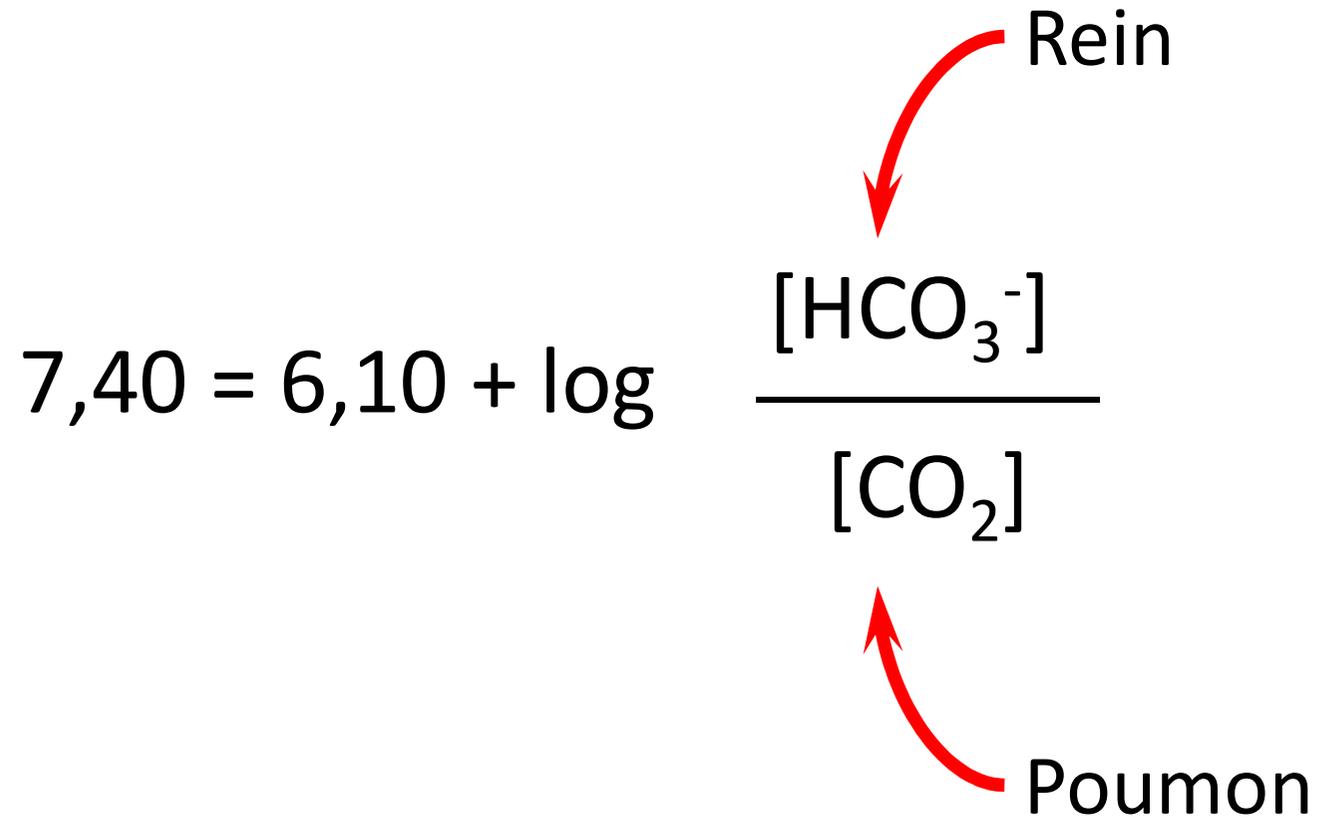
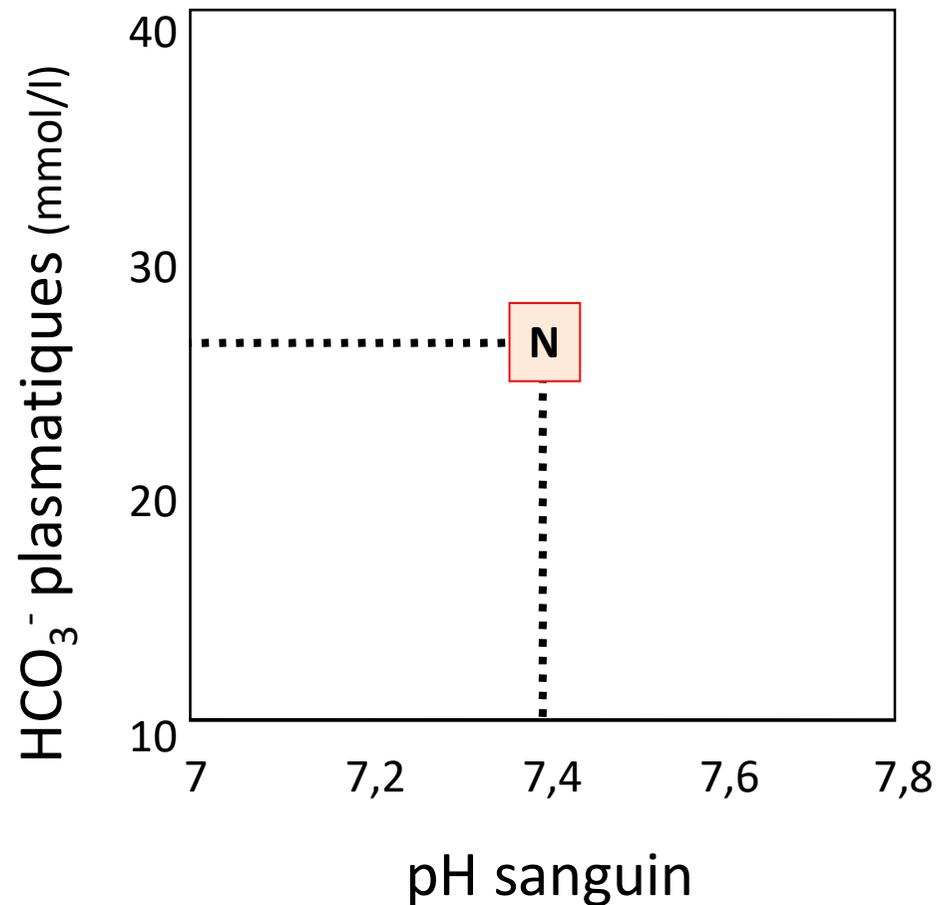


Diagramme de Davenport



- Le point N (pH normal et bicarbonate normal donc PCO₂ normale) représente l'équilibre acido-basique normal. Tous les autres points correspondent à un trouble de l'équilibre acido-basique.

- Ces autres points correspondent à des variations de la concentration des acides fixes et/ou volatils.

Donc sur gaz du sang :

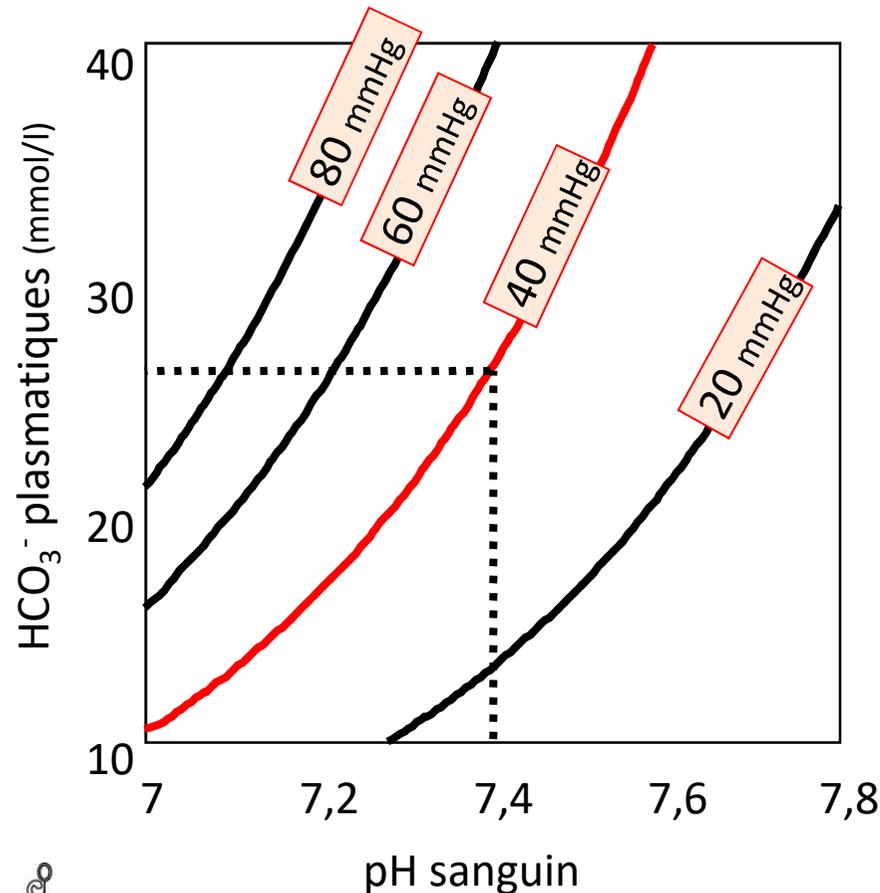
pH = 7,38-7,42

HCO₃⁻ = 22-26 mmol/L

PCO₂ = 35 - 45 mmHg

Diagramme de Davenport

Variation isolée de la concentration en acides fixes
sans modification de la concentration en acide volatil [CO_2]



$$7,40 = 6,10 + \log \frac{[\text{HCO}_3^-]}{[\text{CO}_2]}$$

$\text{PCO}_2 = \text{constante}$

D'où une famille de courbes exponentielles correspondant à différentes PCO_2 et appelées **isobares**

L'isobare normale est l'isobare qui passe par le point normal ($\text{PCO}_2 = 40$ mmHg)

Diagramme de Davenport

Variation isolée de la concentration en acides volatiles sans modification de la concentration en acides fixes

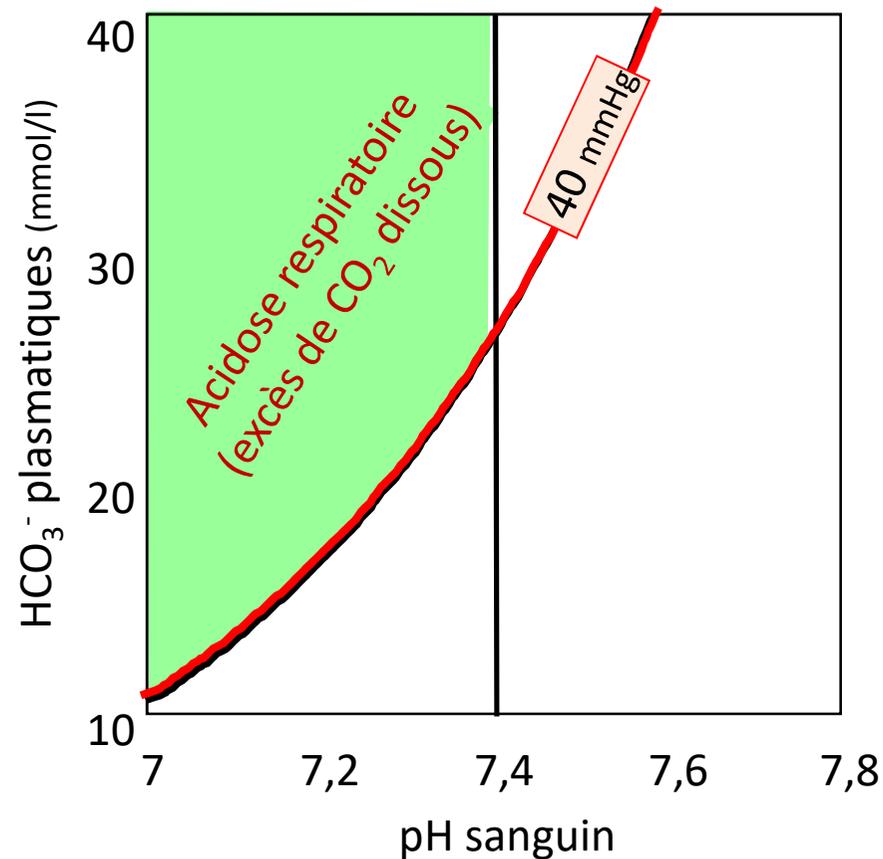


Diagramme de Davenport

Variation isolée de la concentration en acides volatiles sans modification de la concentration en acides fixes

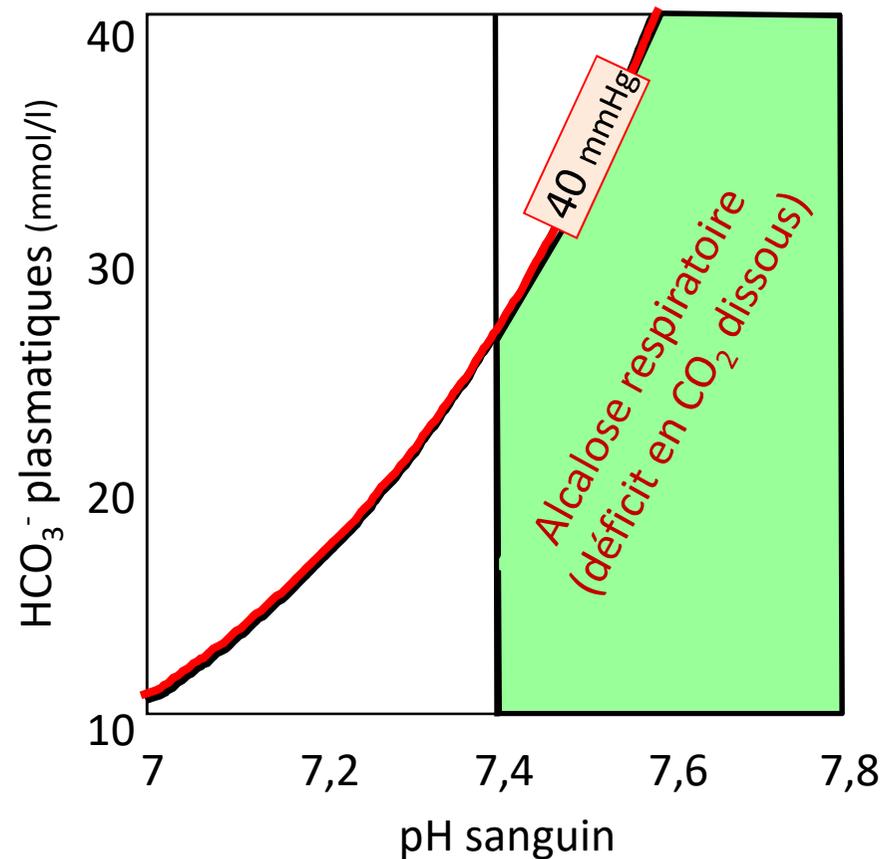


Diagramme de Davenport

« courbe » de la valeur tampon du plasma

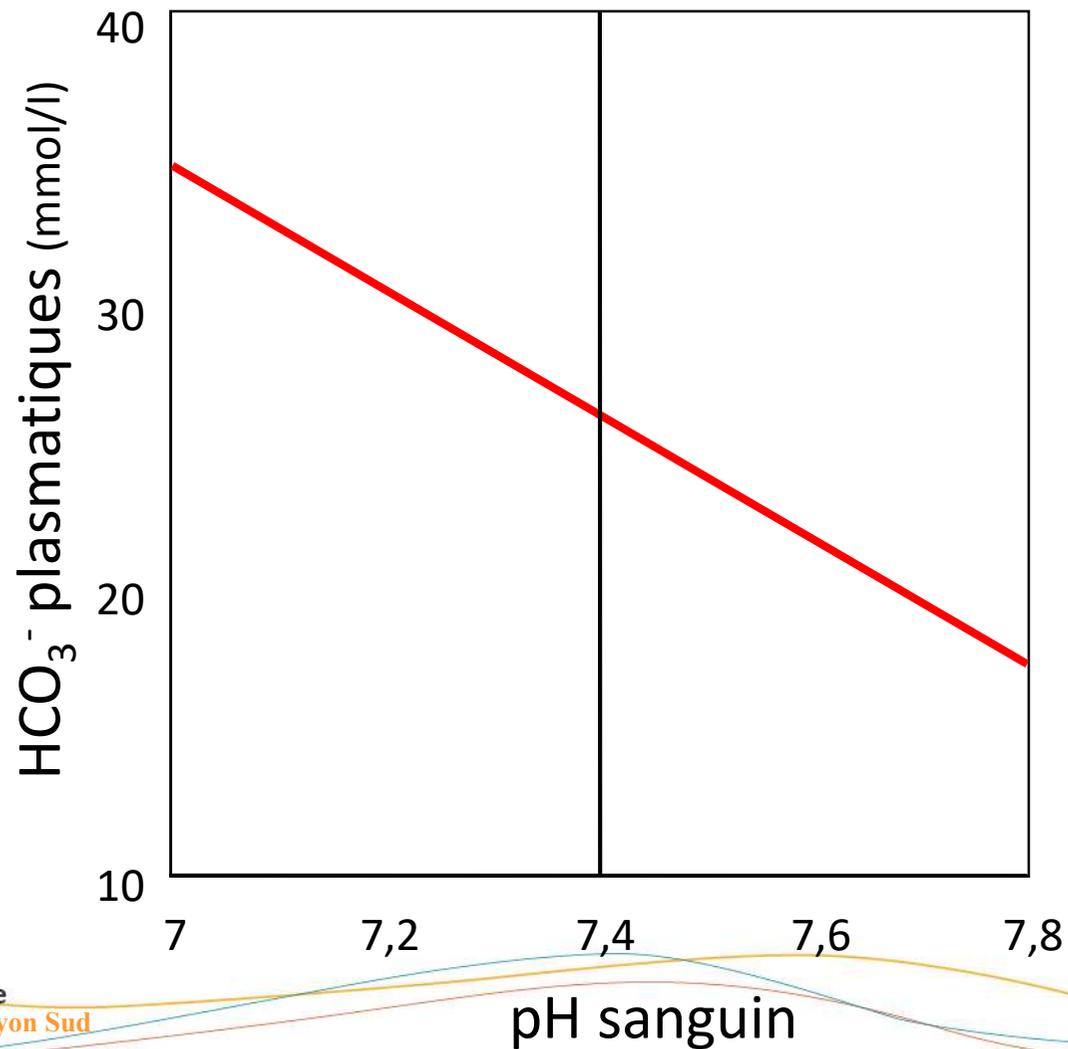


Diagramme de Davenport

Variation isolée de la concentration en acides fixes
sans modification de la concentration en acides volatiles

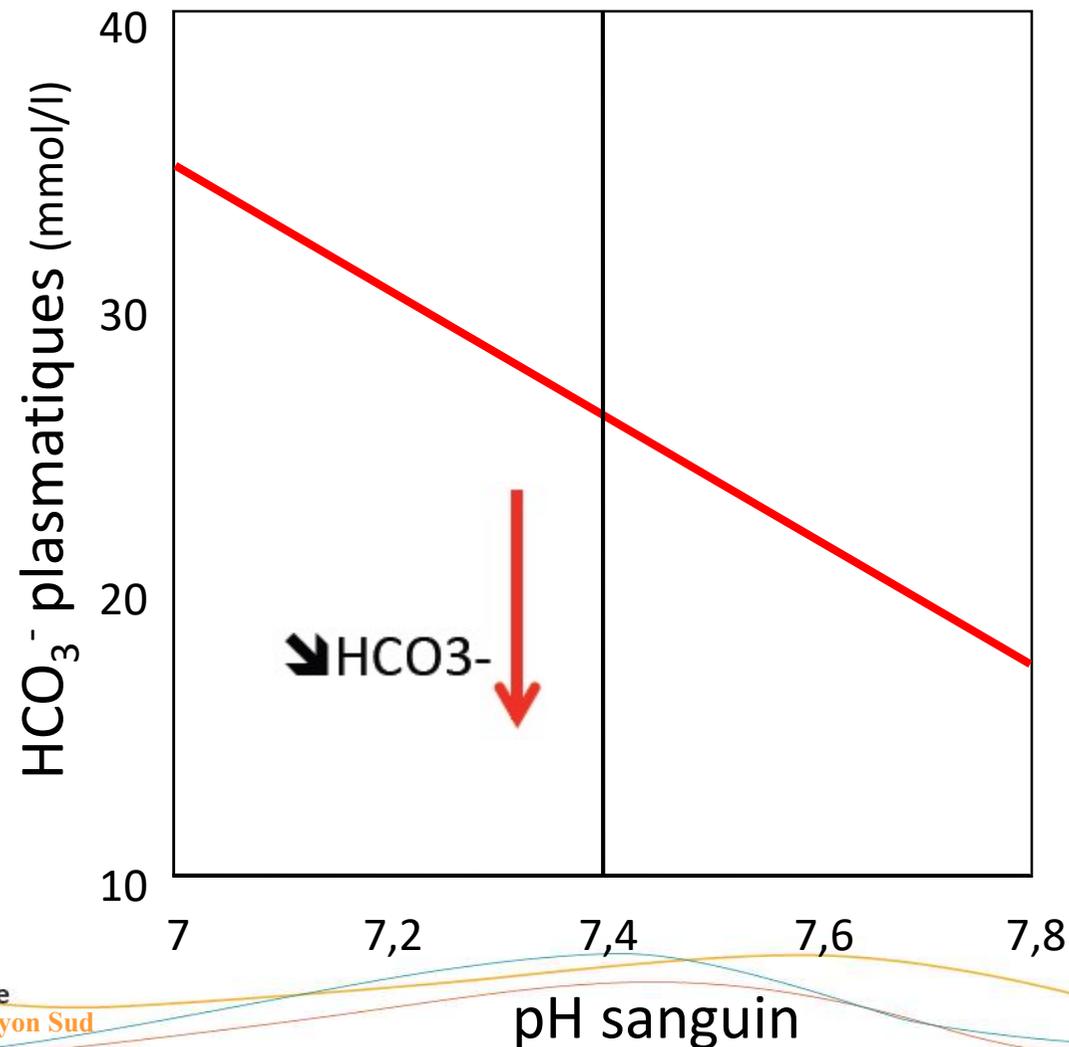


Diagramme de Davenport

Variation isolée de la concentration en acides fixes
sans modification de la concentration en acides volatiles

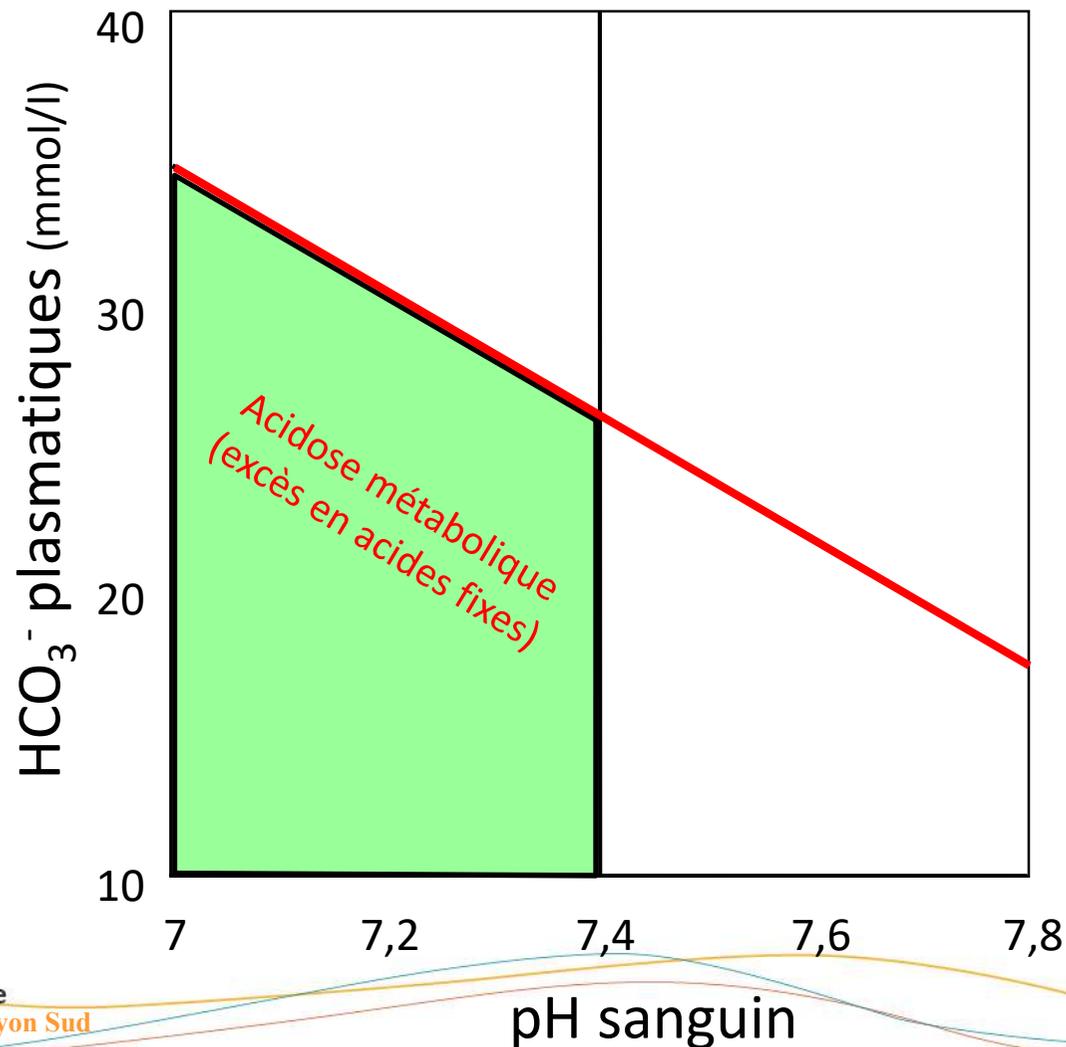


Diagramme de Davenport

Variation isolée de la concentration en acides fixes
sans modification de la concentration en acides volatiles

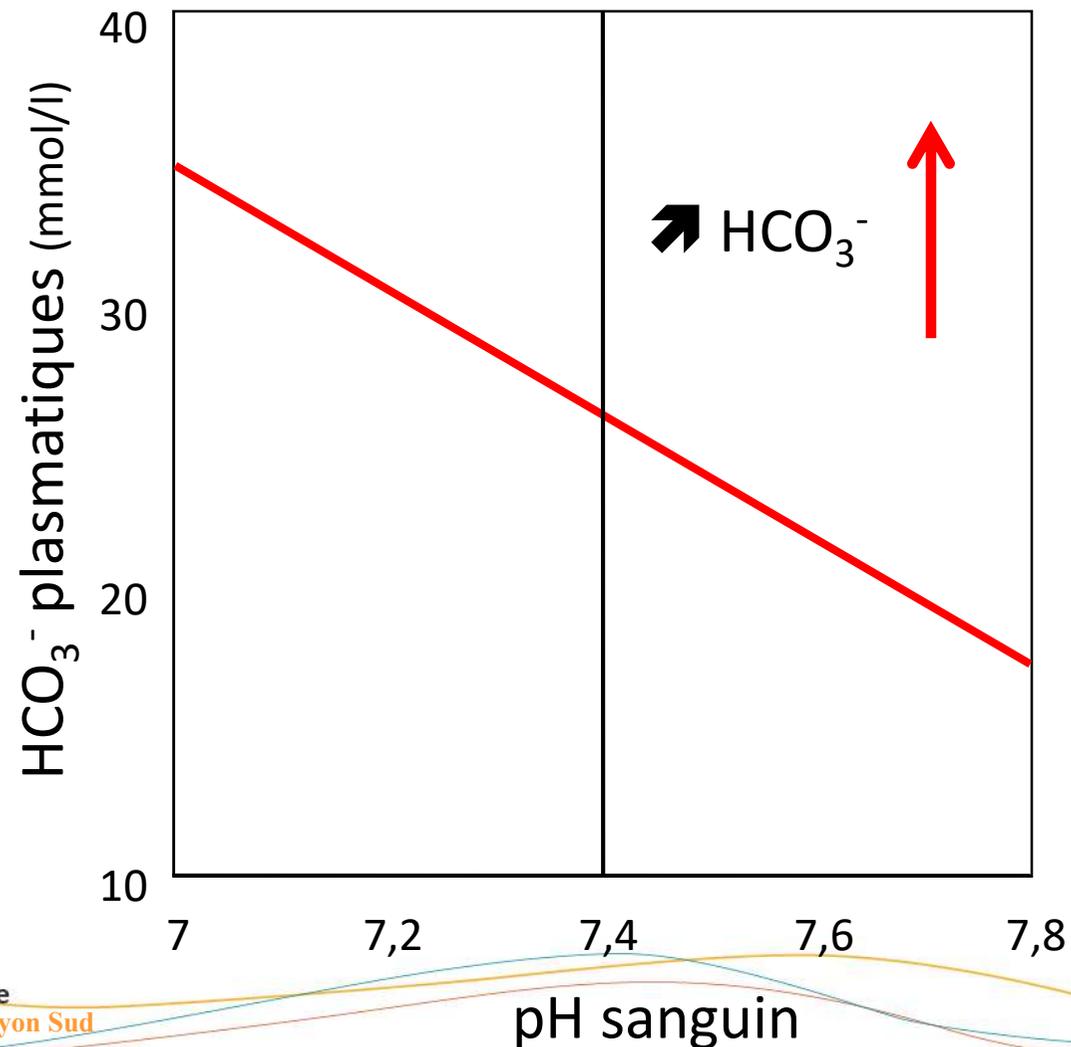


Diagramme de Davenport

Variation isolée de la concentration en acides fixes
sans modification de la concentration en acides volatiles

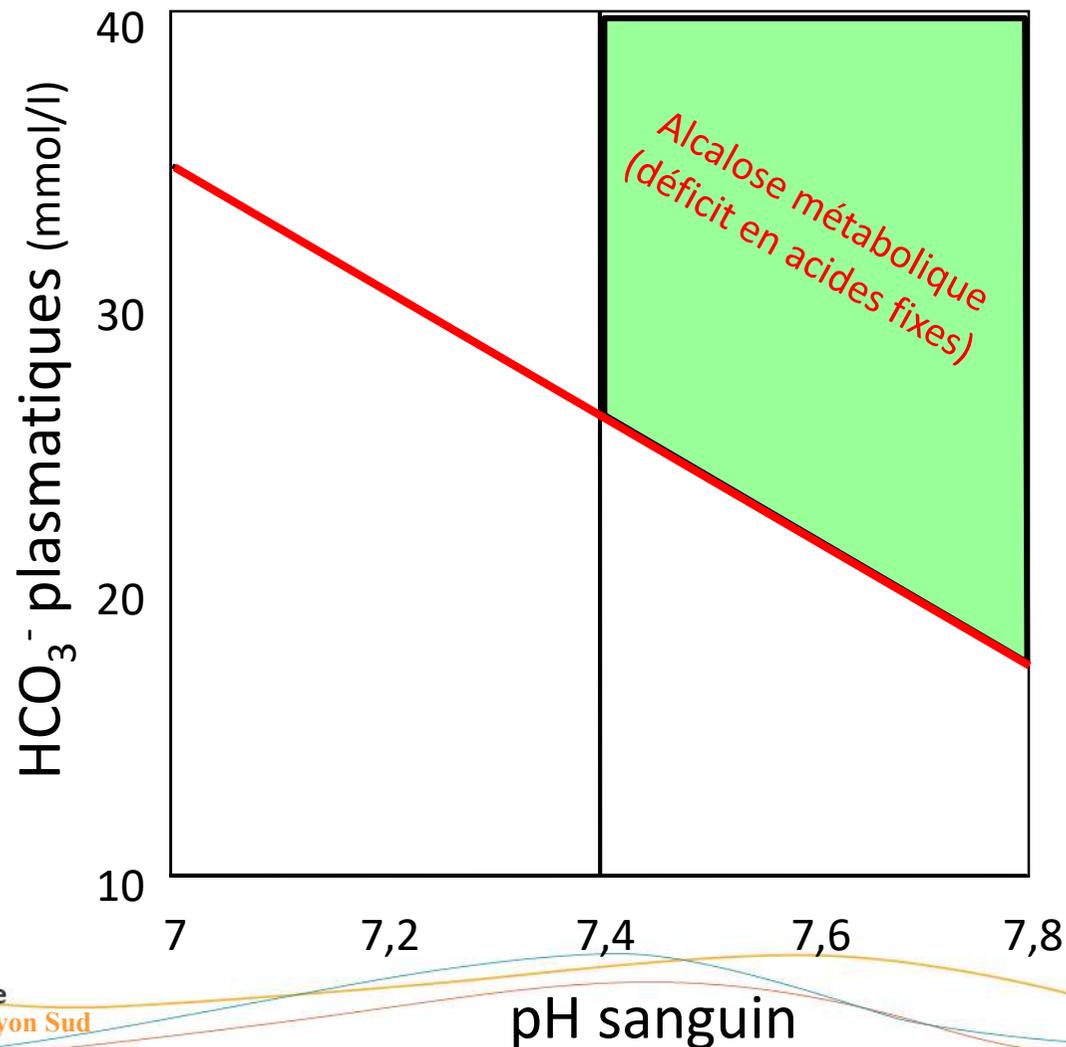
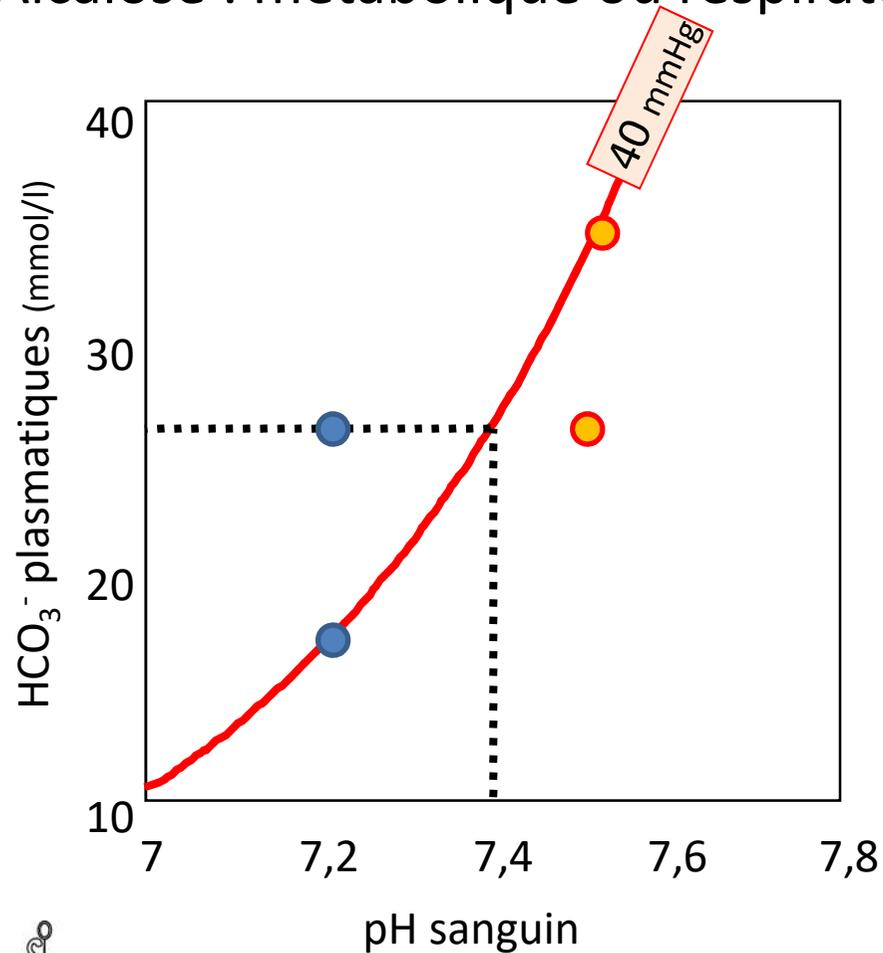


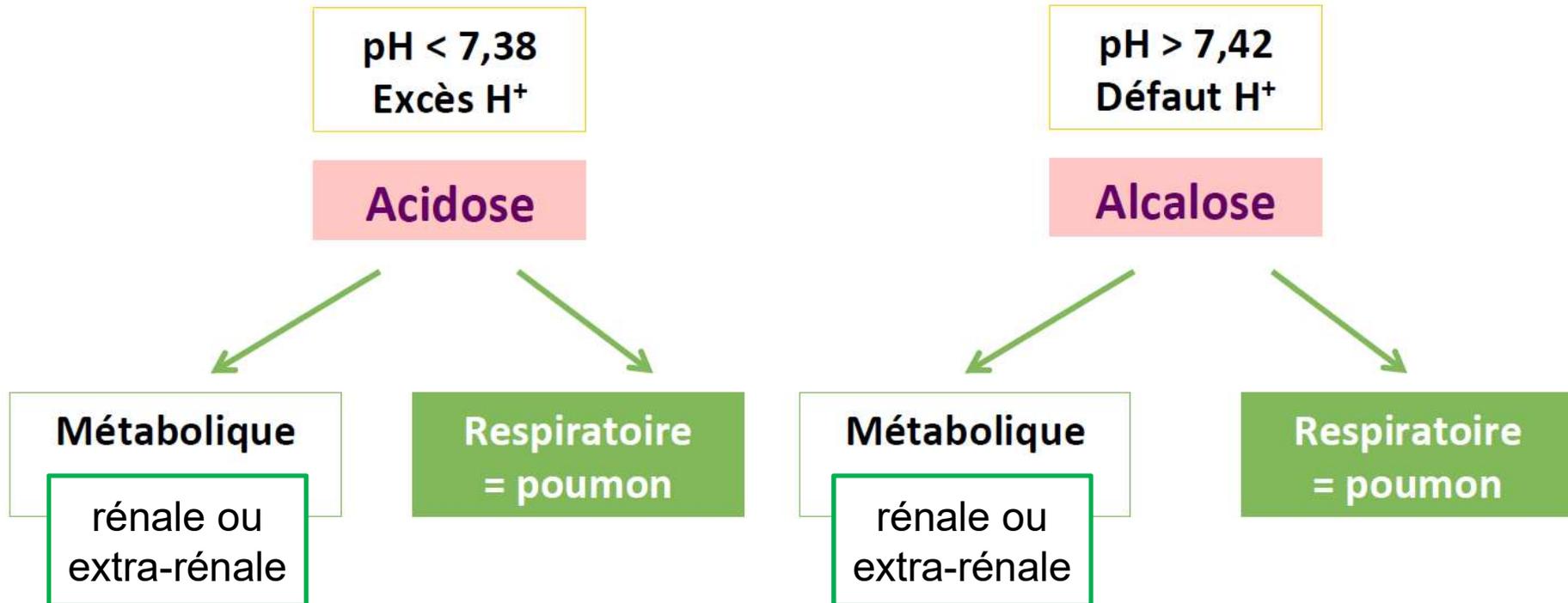
Diagramme de Davenport

Acidose : métabolique ou respiratoire?

Alcalose : métabolique ou respiratoire?



Troubles acido-basiques



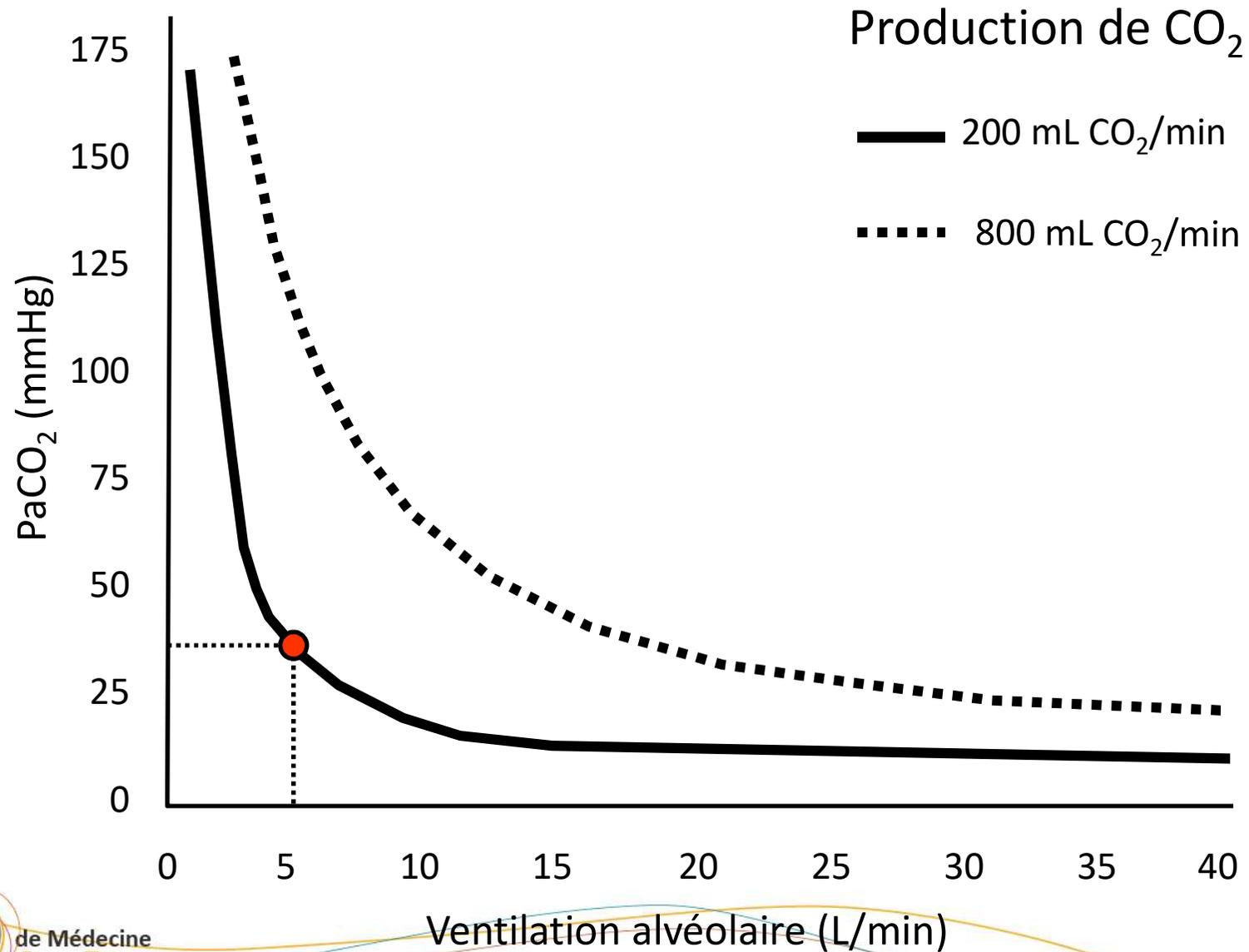
Plan

- 1. Rappels
- 2. Contrôle de l'équilibre acido-basique dans l'organisme
- 3. Sources de production d'acides dans l'organisme
- 4. Mécanismes viscéraux de contrôle de l'équilibre acido-basique
 - Mécanismes PULMONAIRES
 - Mécanismes RÉNAUX
- 5. Principaux déséquilibres acido-basiques

Plan

- 1. Rappels
- 2. Contrôle de l'équilibre acido-basique dans l'organisme
- 3. Sources de production d'acides dans l'organisme
- 4. Mécanismes viscéraux de contrôle de l'équilibre acido-basique
 - Mécanismes PULMONAIRES
 - Mécanismes RÉNAUX
- 5. Principaux déséquilibres acido-basiques

Contrôle de la pCO₂ par les poumons



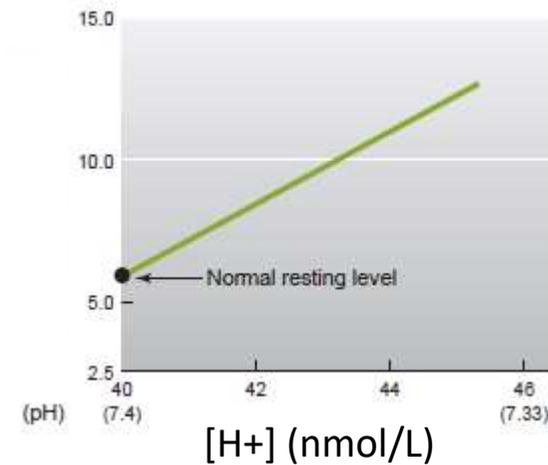
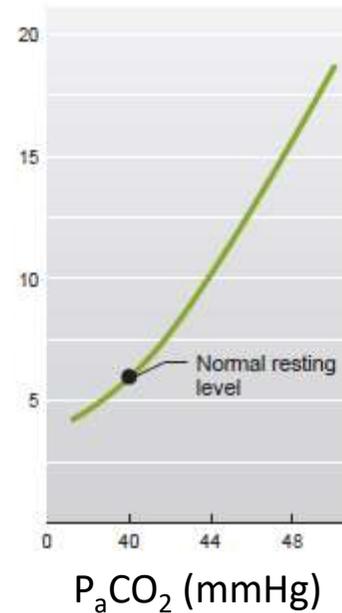
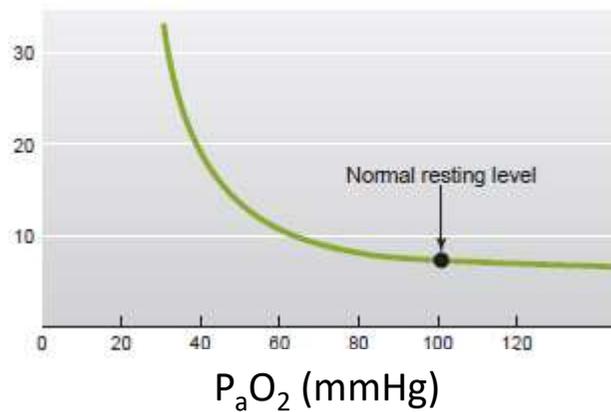
Plan

- 1. Rappels
- 2. Contrôle de l'équilibre acido-basique dans l'organisme
- 3. Sources de production d'acides dans l'organisme
- 4. Mécanismes viscéraux de contrôle de l'équilibre acido-basique
 - Mécanismes PULMONAIRES
 - Mécanismes
 - Facteurs de régulation de la ventilation pulmonaire
 - Mécanismes RÉNAUX
- 5. Principaux déséquilibres acido-basiques

Facteurs de régulation de la ventilation pulmonaire

Influence de la variation de la pO_2 , de la pCO_2 ou du pH sur la ventilation pulmonaire

ventilation alvéolaire (L/min)

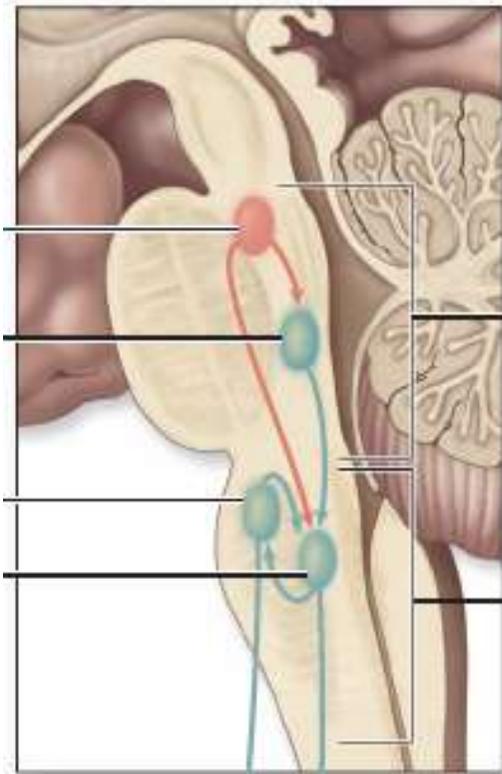


Facteurs de régulation de la ventilation pulmonaire

- la ventilation pulmonaire est stimulée par
 - L'augmentation de $p\text{CO}_2$ plasmatique
 - La baisse du pH sanguin
 - La baisse de $p\text{O}_2$ plasmatique (variation importante)
- les chémorecepteurs
 - Centraux
 - Périphériques

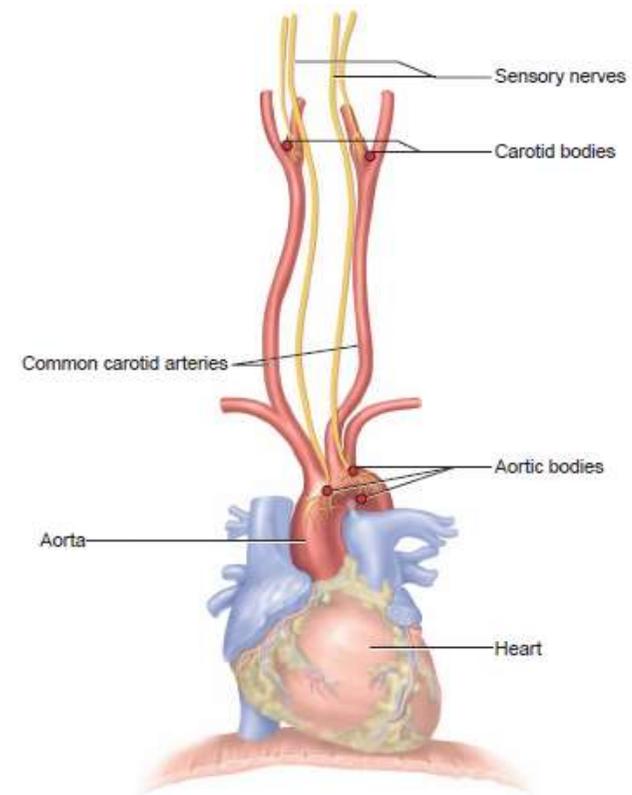
Localisation des chémorécepteurs respiratoires

Chémorécepteurs centraux



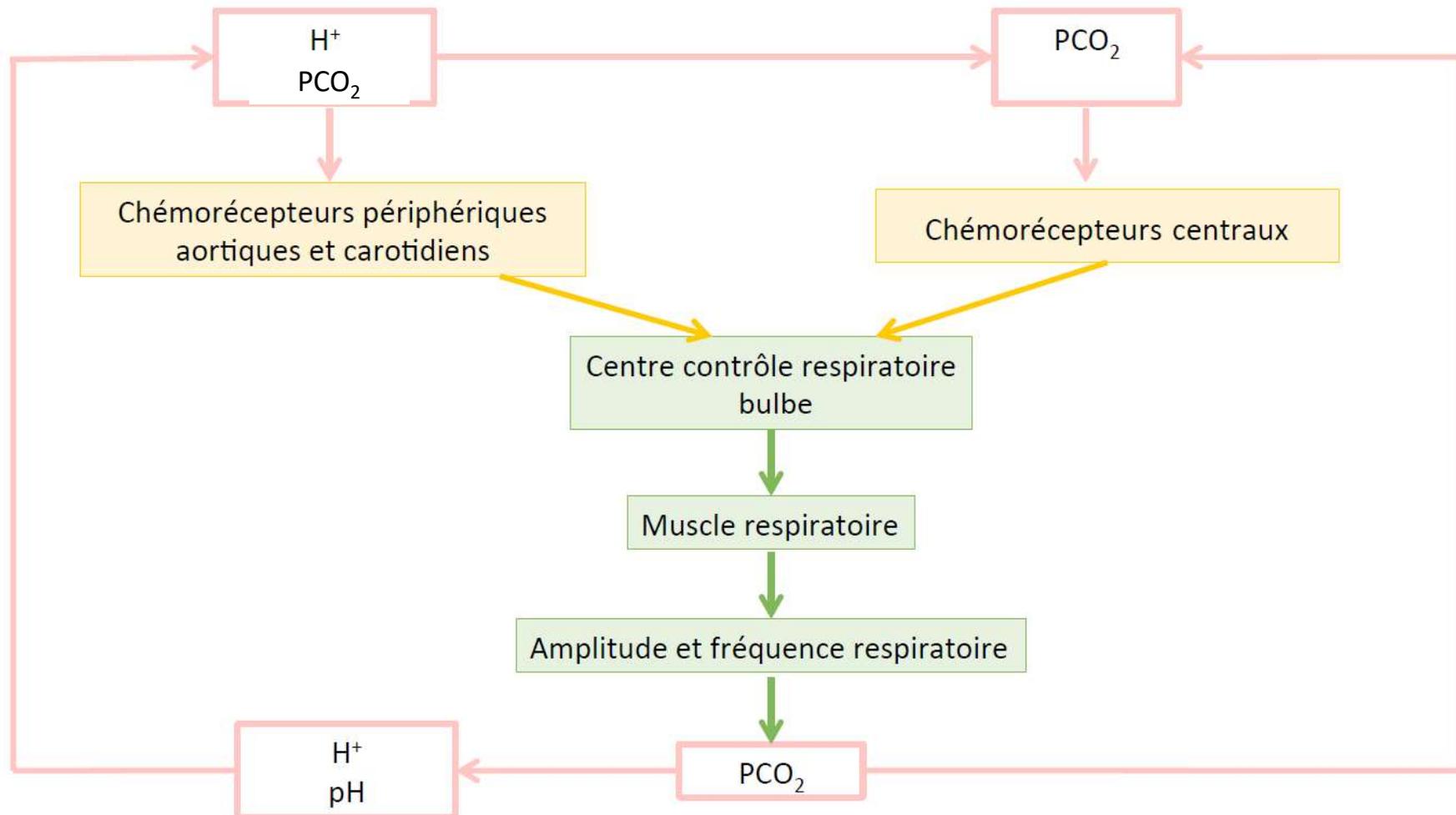
\searrow pO_2
 \nearrow pCO_2
 \searrow pH

Chémorécepteurs périphériques aortiques et carotidiens

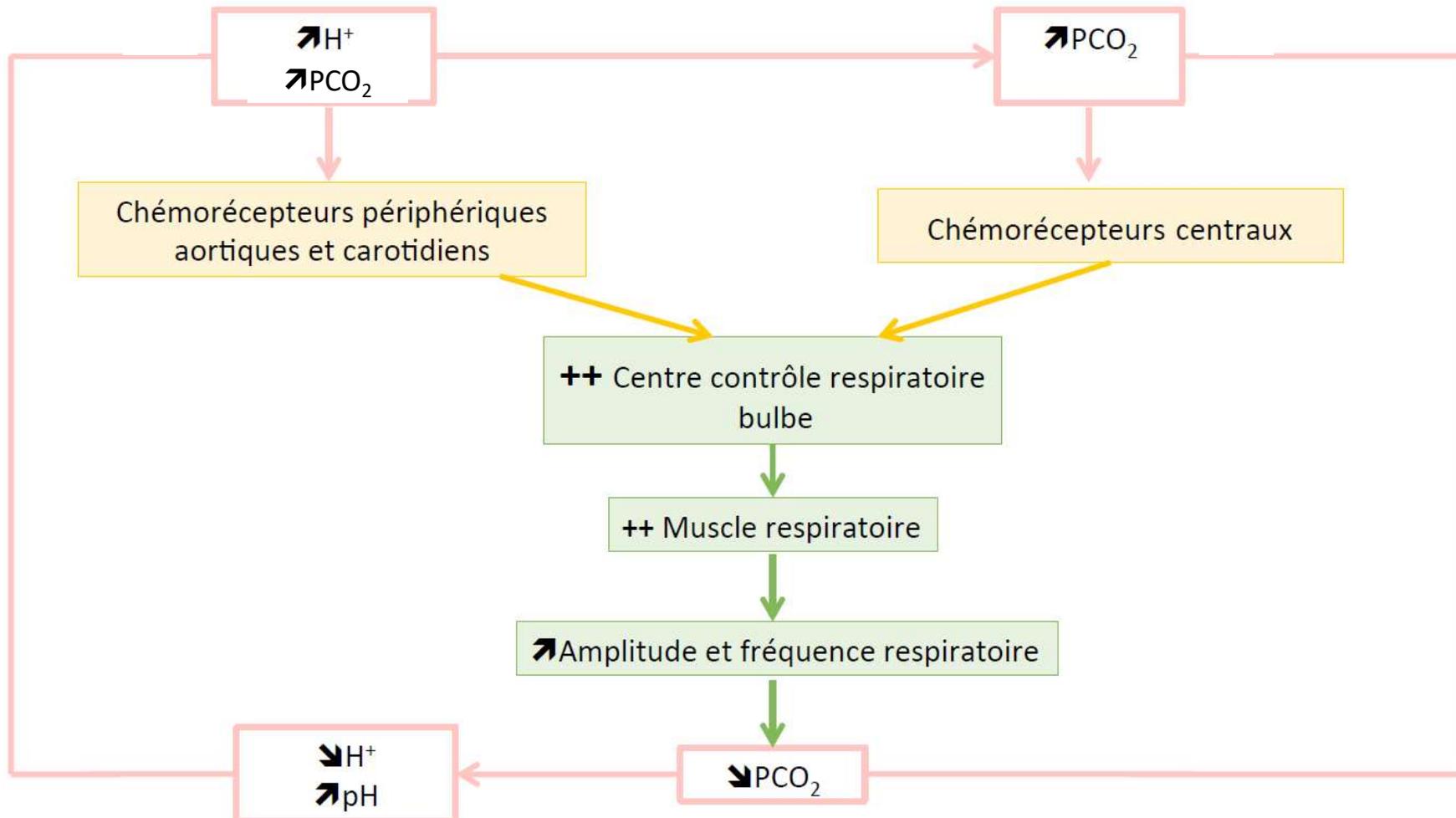


Vanders- Human physiology- 2013

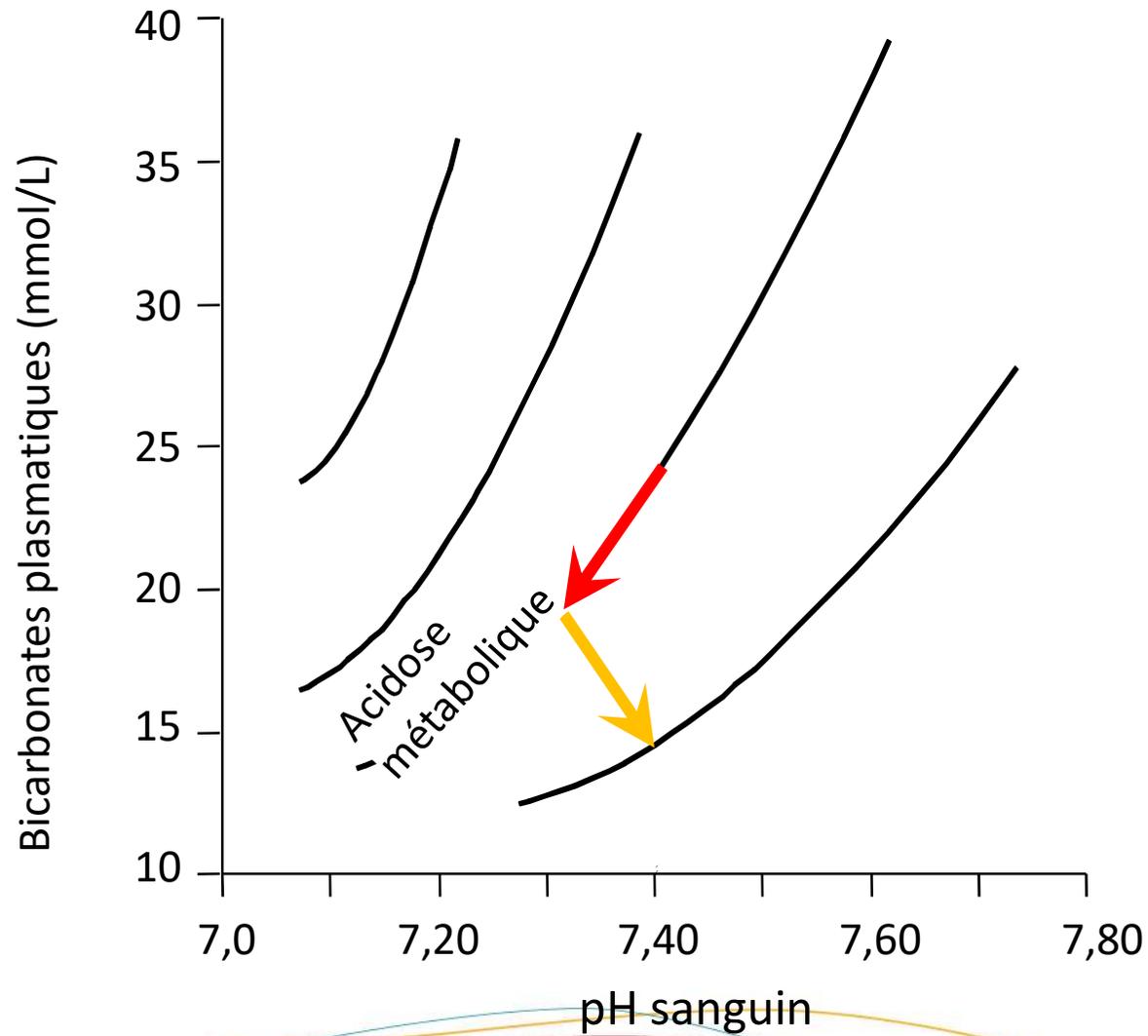
Facteurs de régulation de la ventilation



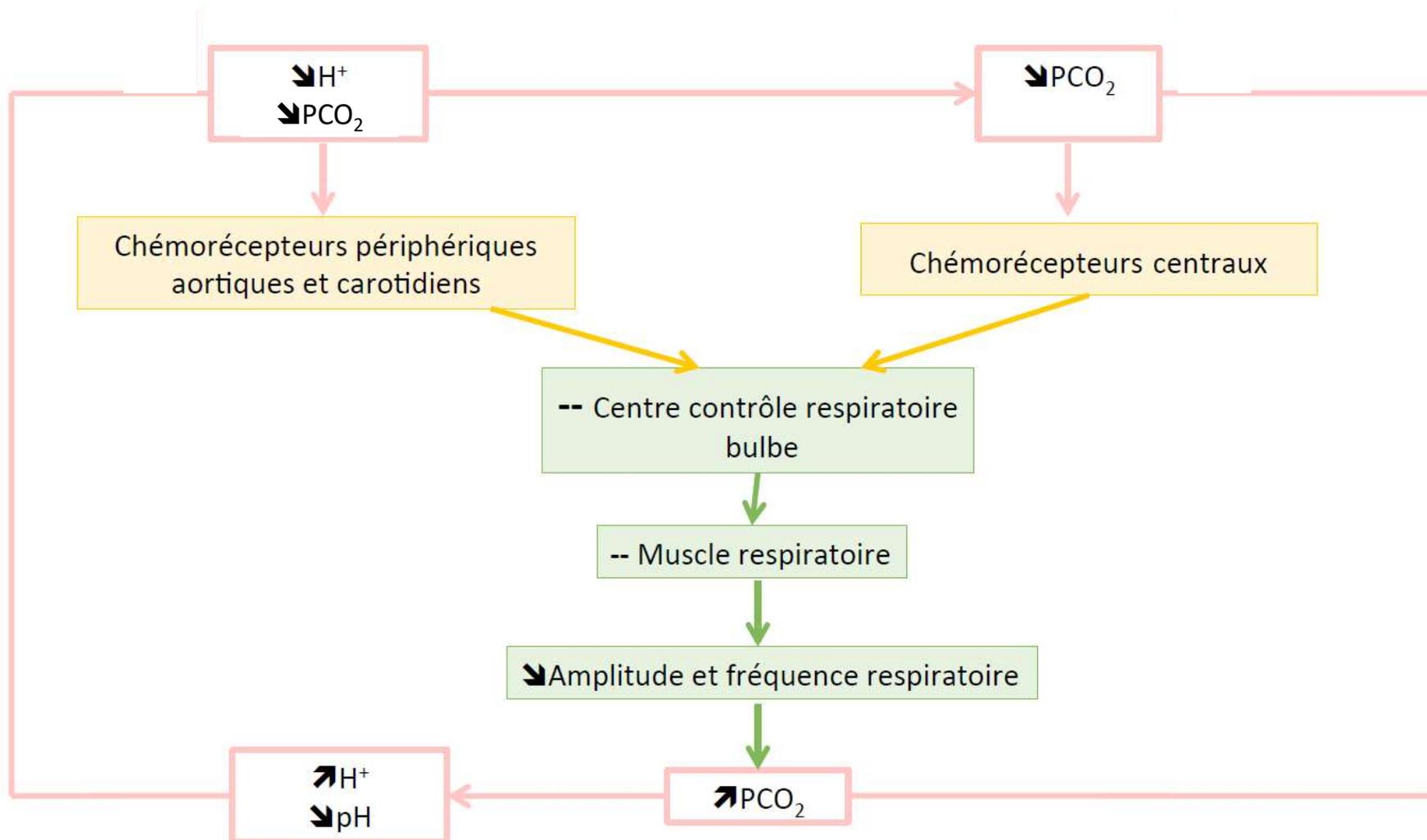
Facteurs de régulation de la ventilation



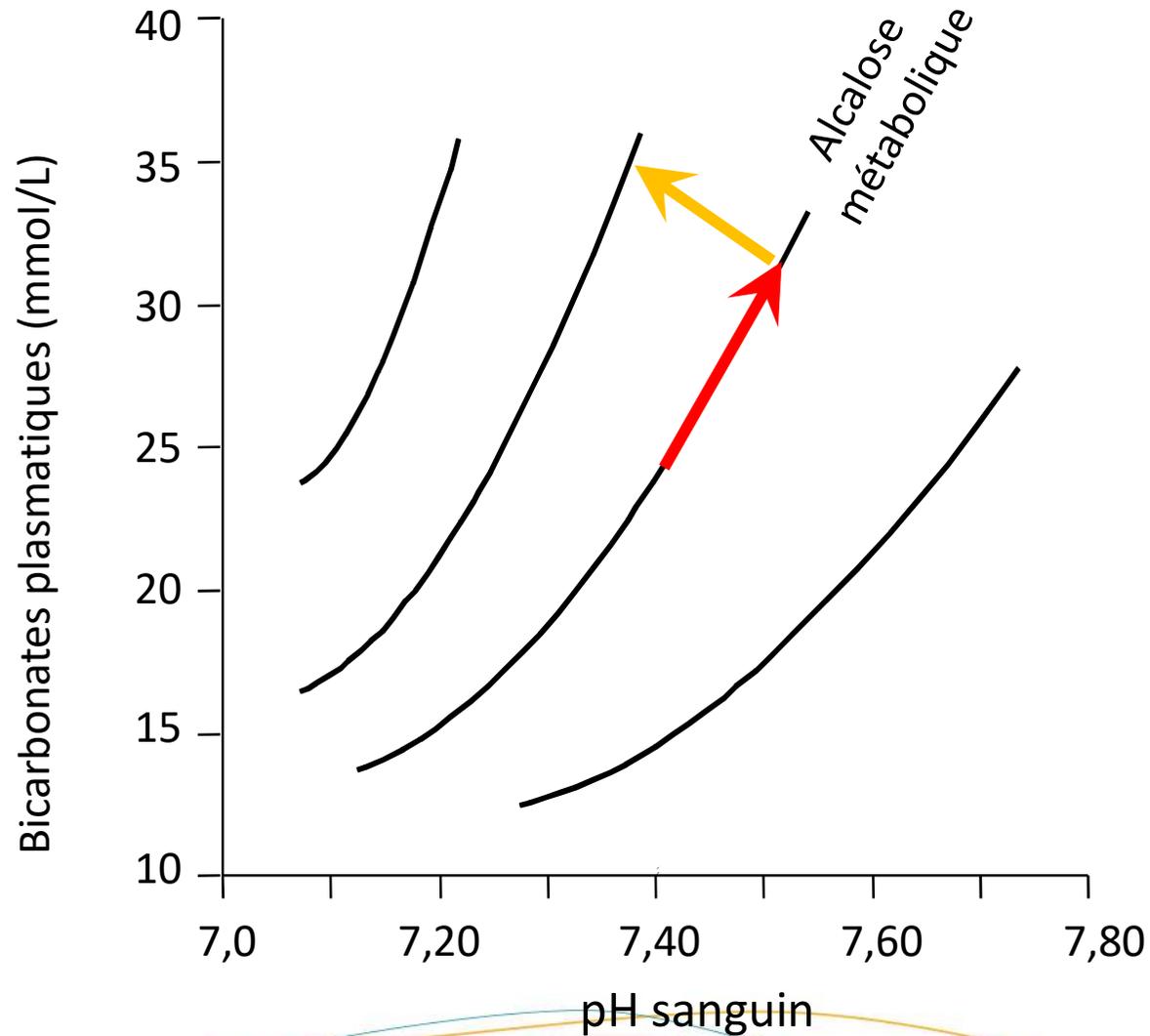
→ Perturbation initiale
→ Compensation pulmonaire



Facteurs de régulation de la ventilation

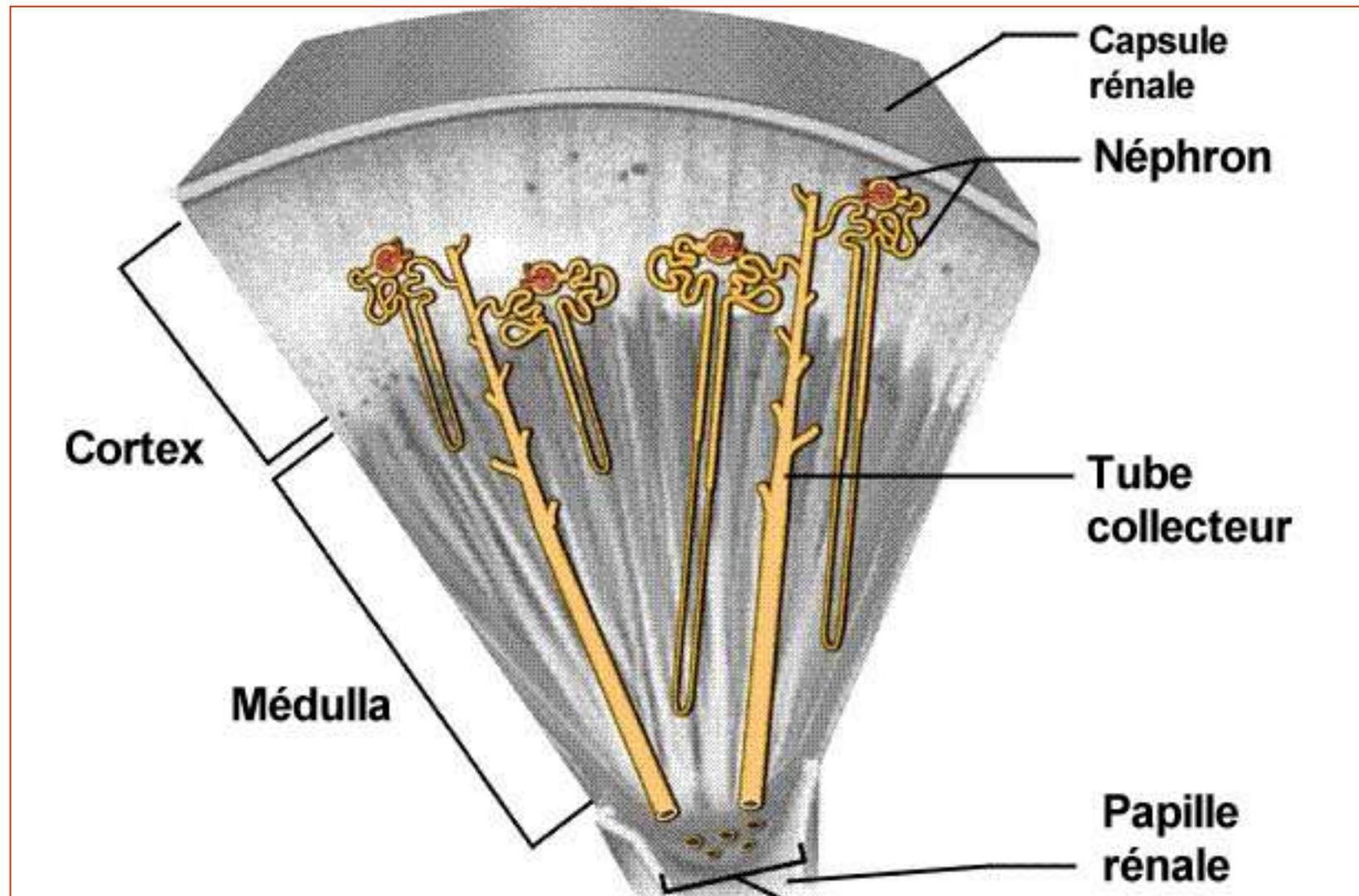


- Perturbation initiale
- Compensation pulmonaire



Plan

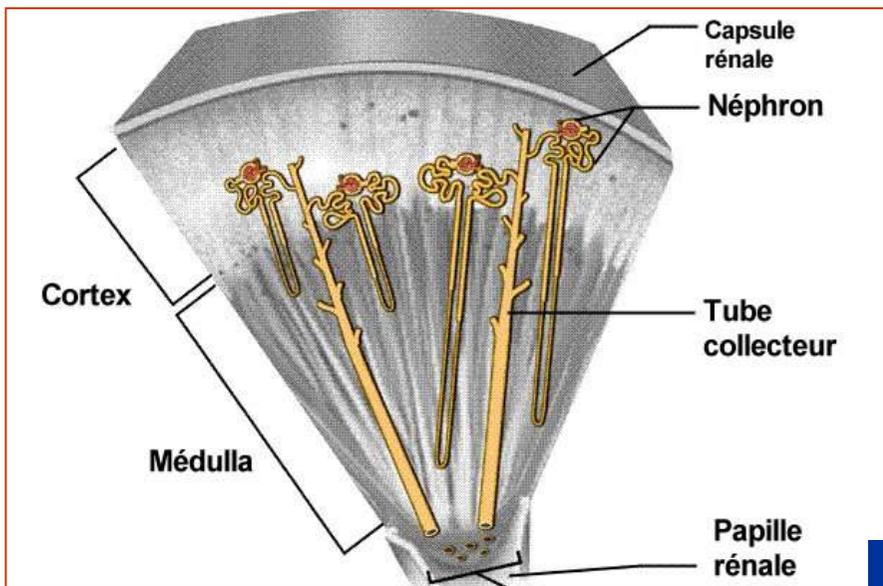
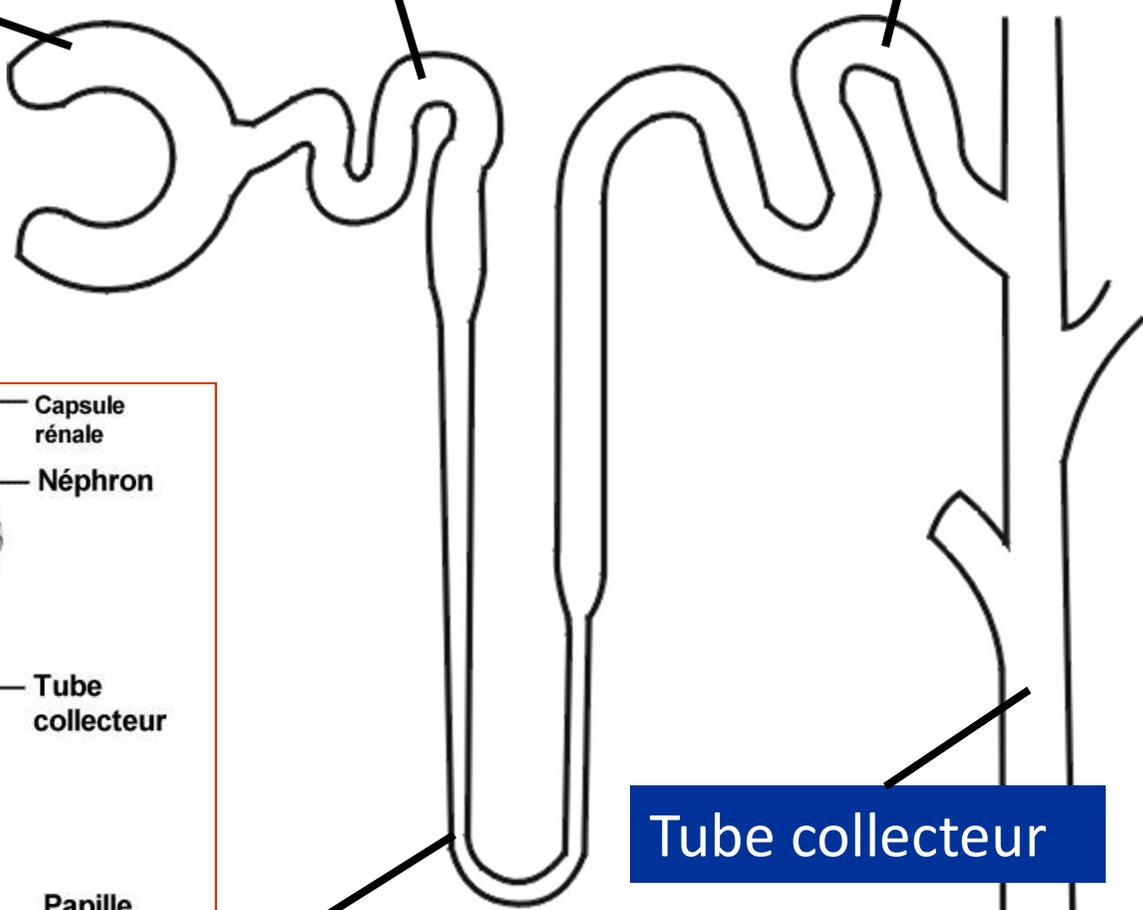
- 1. Rappels
- 2. Contrôle de l'équilibre acido-basique dans l'organisme
- 3. Sources de production d'acides dans l'organisme
- 4. Mécanismes viscéraux de contrôle de l'équilibre acido-basique
 - Mécanismes PULMONAIRES
 - Mécanismes
 - Facteurs de régulation de la ventilation pulmonaire
 - Mécanismes RÉNAUX
- 5. Principaux déséquilibres acido-basiques



Glomérule

Tube contourné proximal

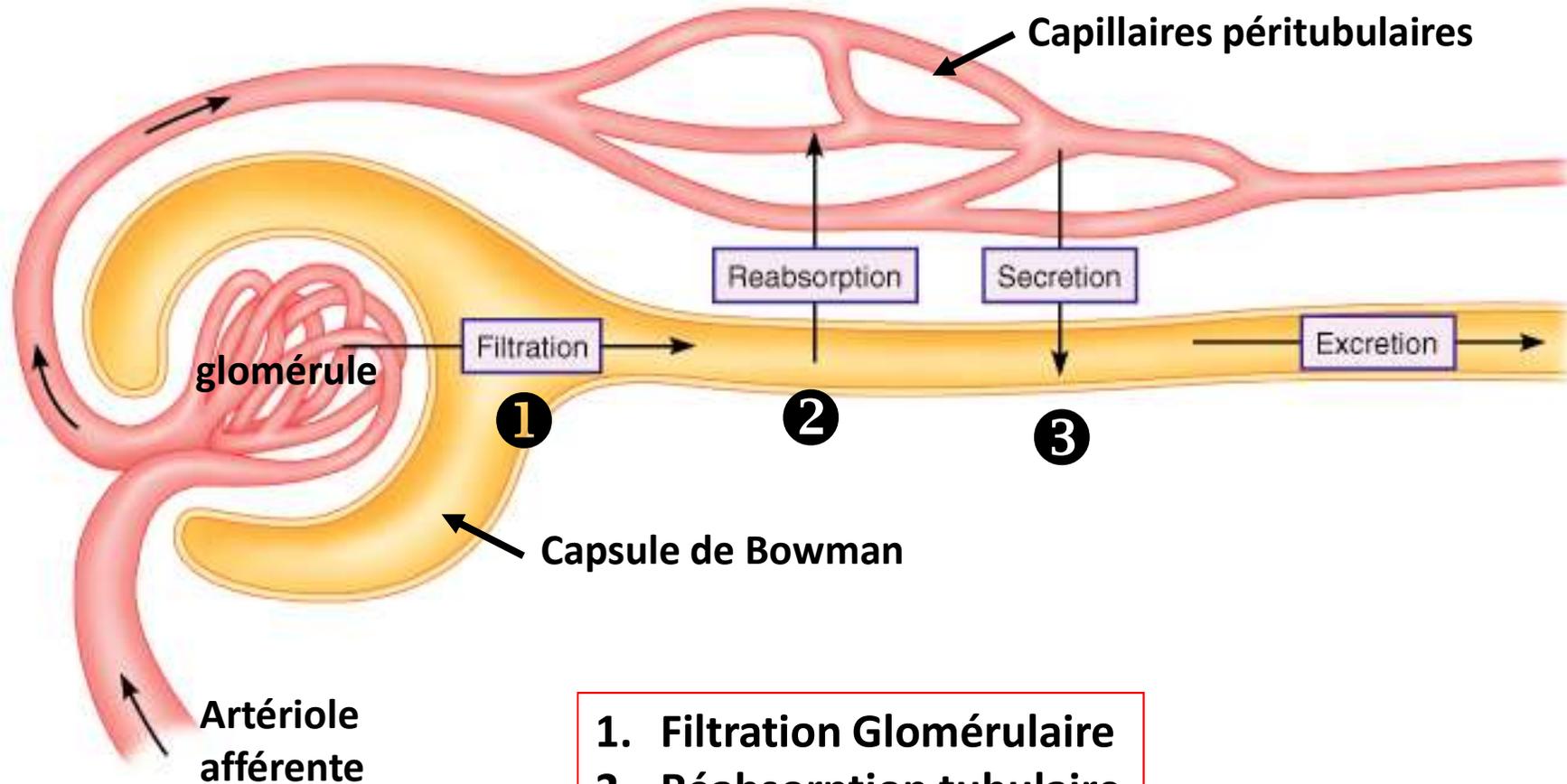
Tube contourné distal



Anse de Henlé

Tube collecteur

Mécanismes généraux de transferts néphroniques

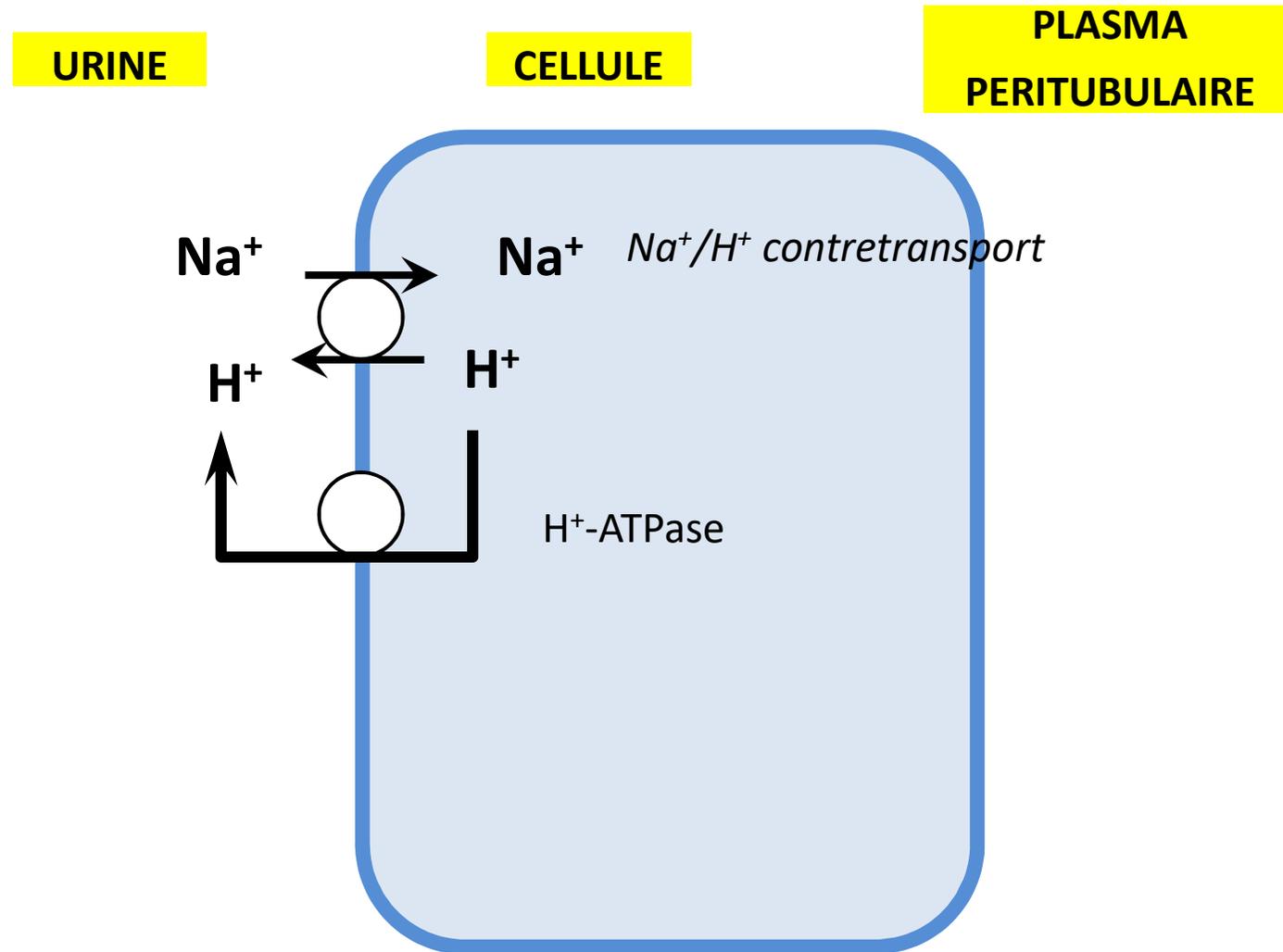


1. Filtration Glomérulaire
2. Réabsorption tubulaire
3. Sécrétion tubulaire

Plan

- 1. Rappels
- 2. Contrôle de l'équilibre acido-basique dans l'organisme
- 3. Sources de production d'acides dans l'organisme
- 4. Mécanismes viscéraux de contrôle de l'équilibre acido-basique
 - Mécanismes PULMONAIRES
 - Mécanismes RÉNAUX
 - Sécrétion urinaire des ions H⁺
 - Réabsorption des bicarbonates
 - Régénération des bicarbonates et élimination de la charge acide
- 5. Principaux déséquilibres acido-basiques

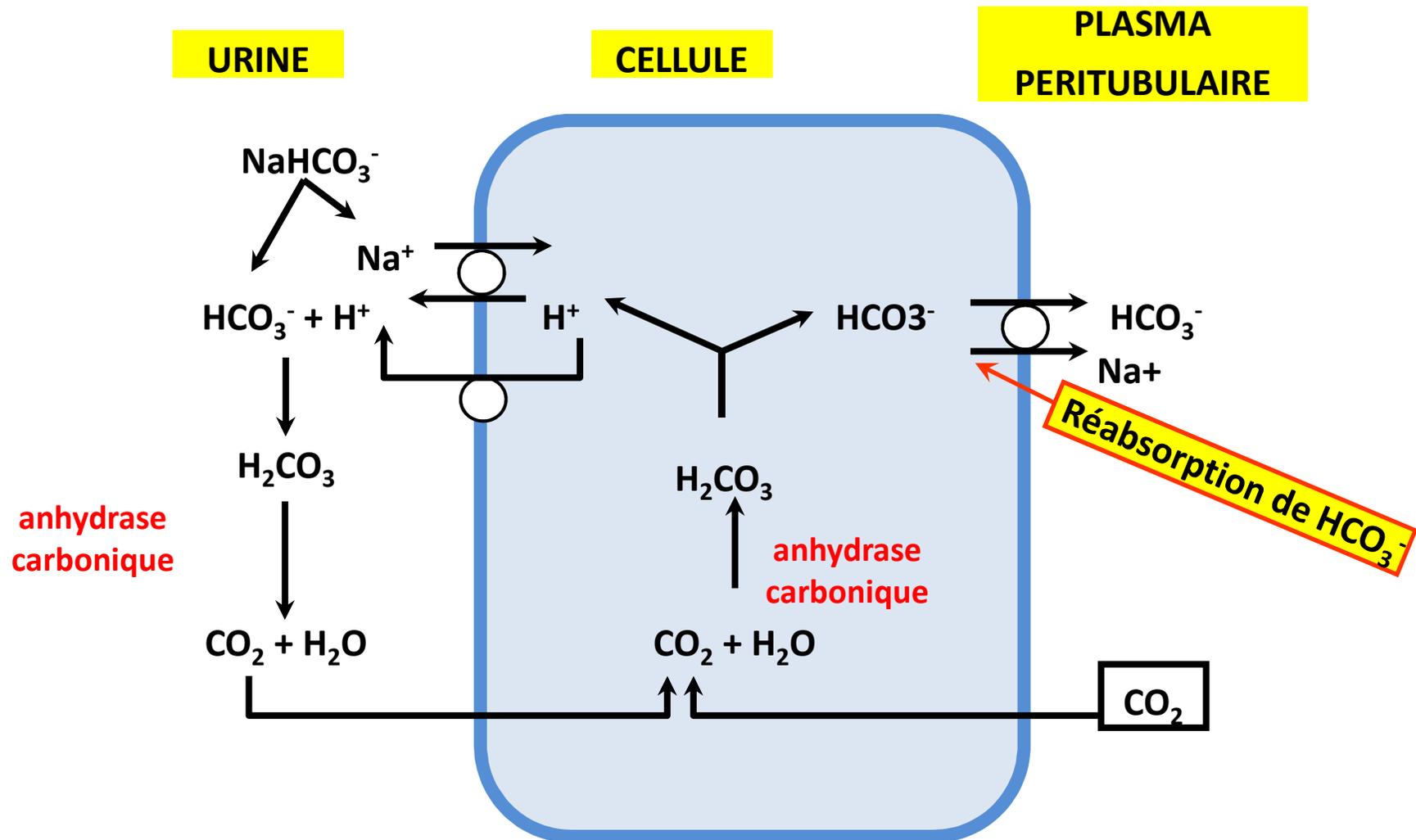
Sécrétion urinaire des protons



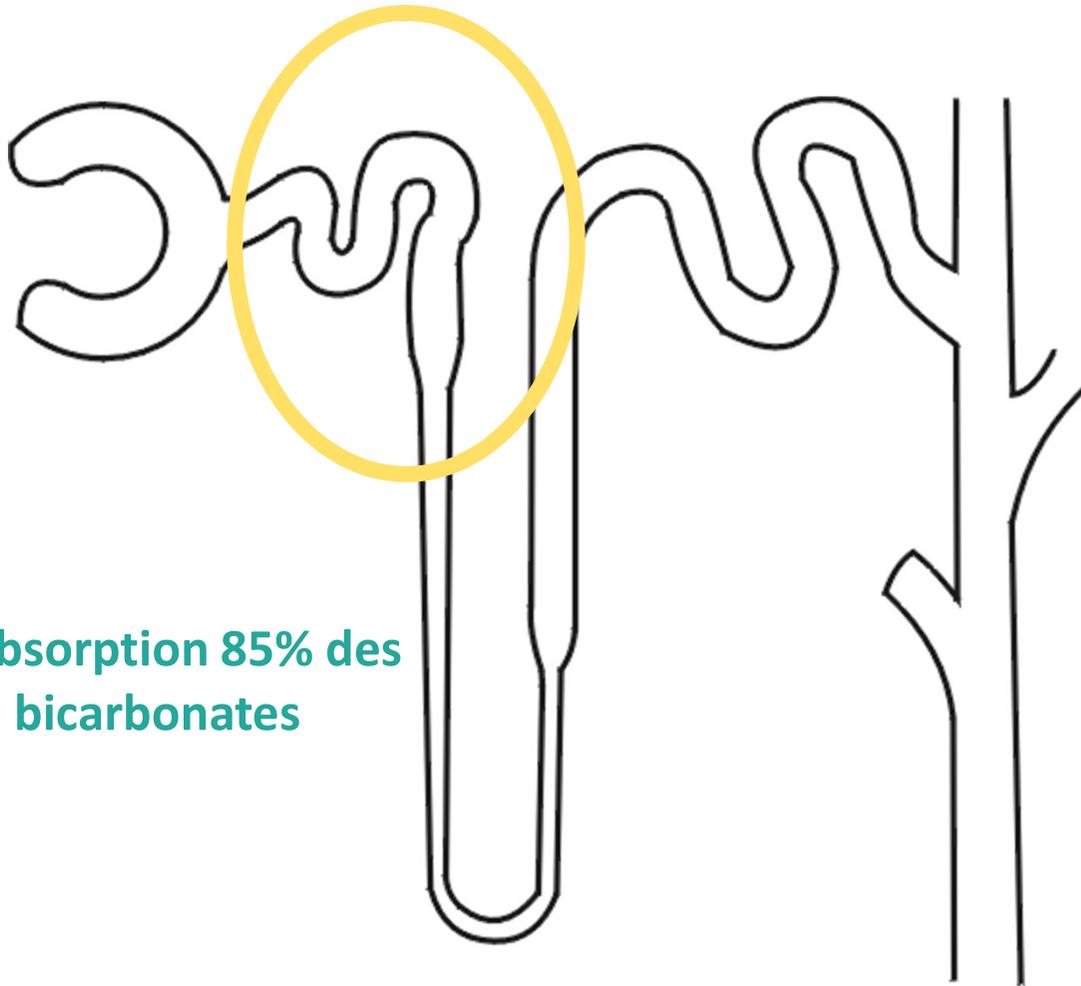
Devenir des protons sécrétés

- Réabsorption des bicarbonates

Réabsorption des bicarbonates



Rein et équilibre acide-base

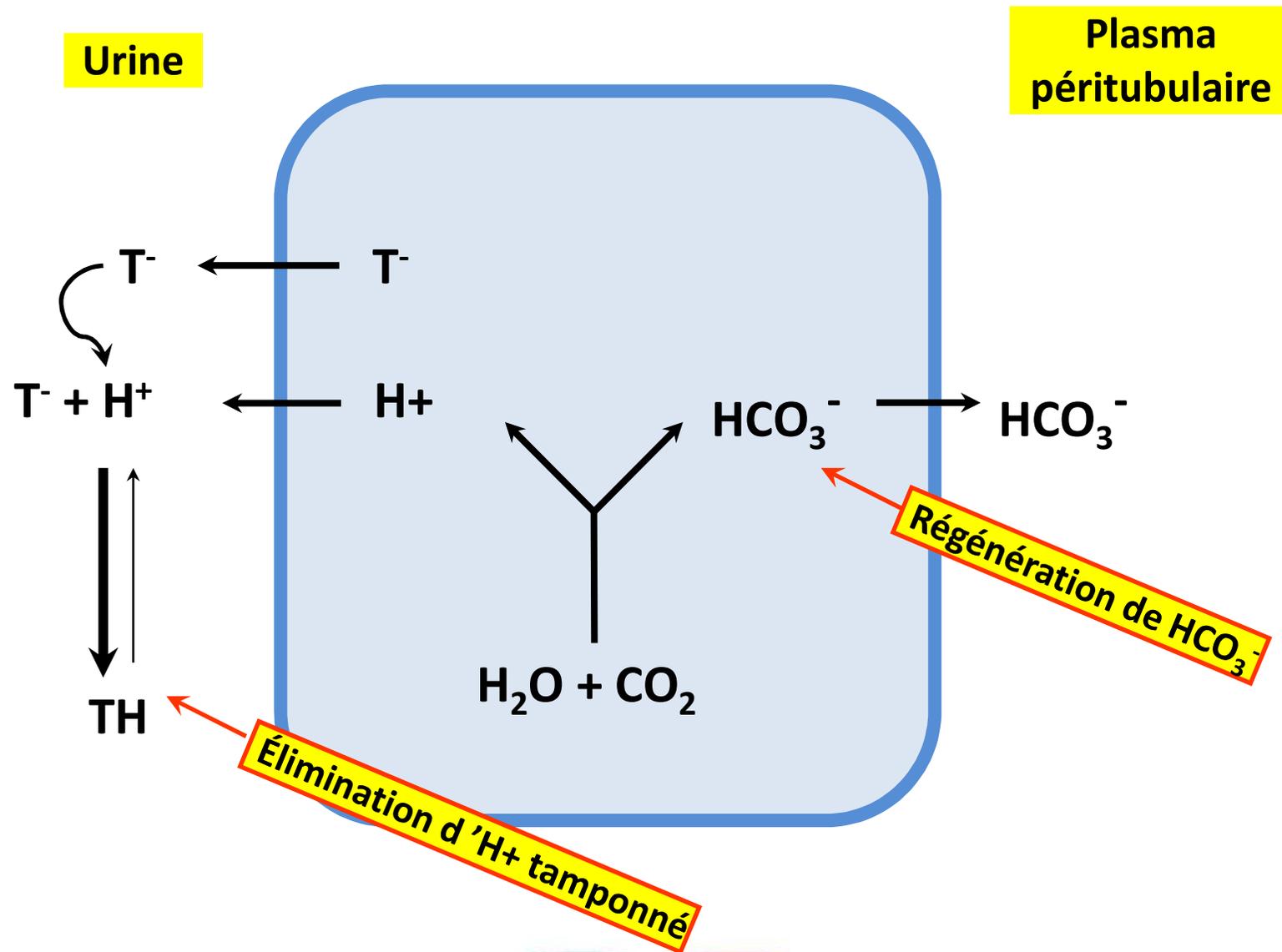


Réabsorption 85% des
bicarbonates

Devenir des protons sécrétés

- Réabsorption des bicarbonates
- Régénération des bicarbonates et élimination de la charge acide

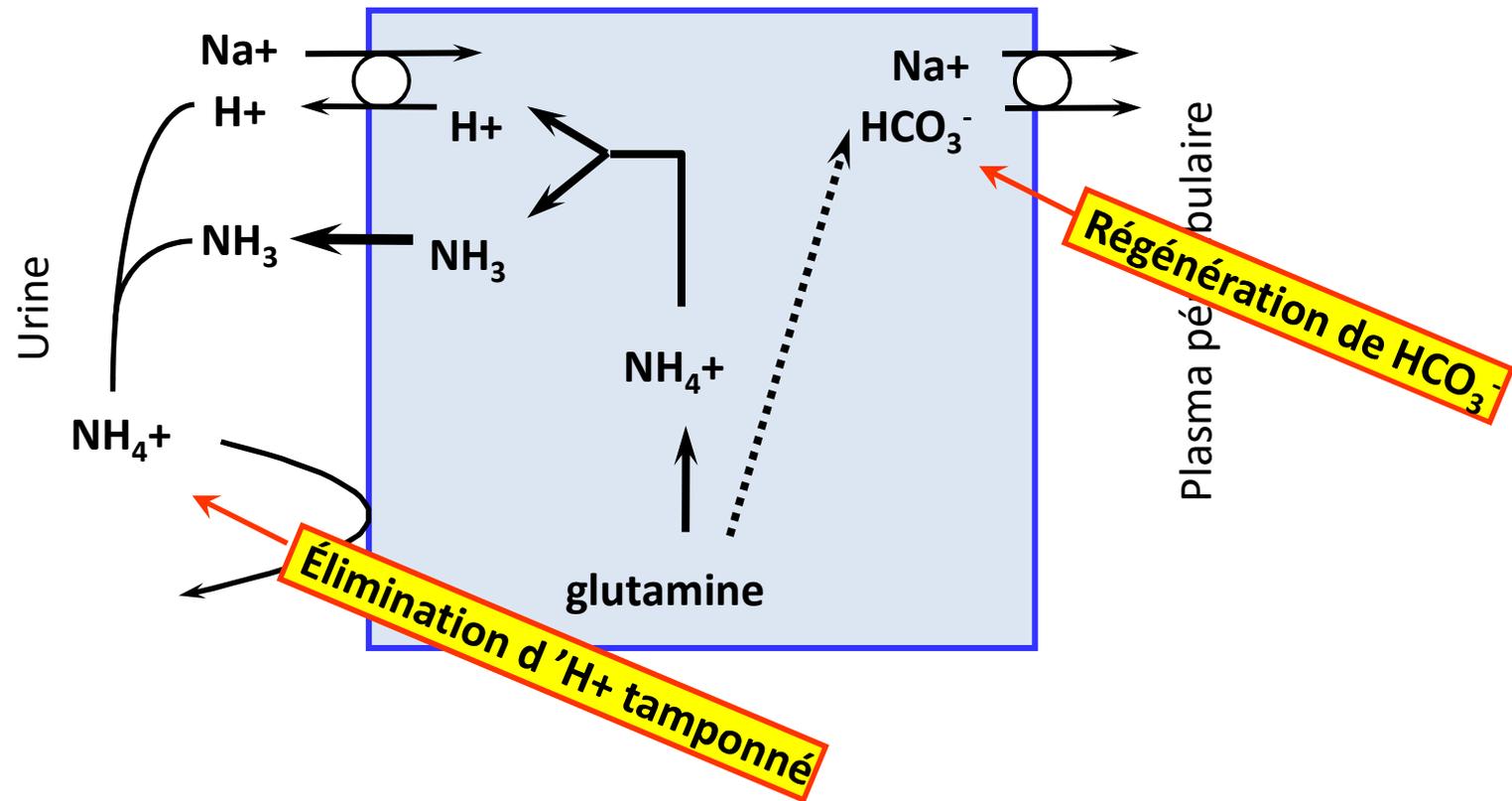
Régénération des bicar et élimination des H⁺



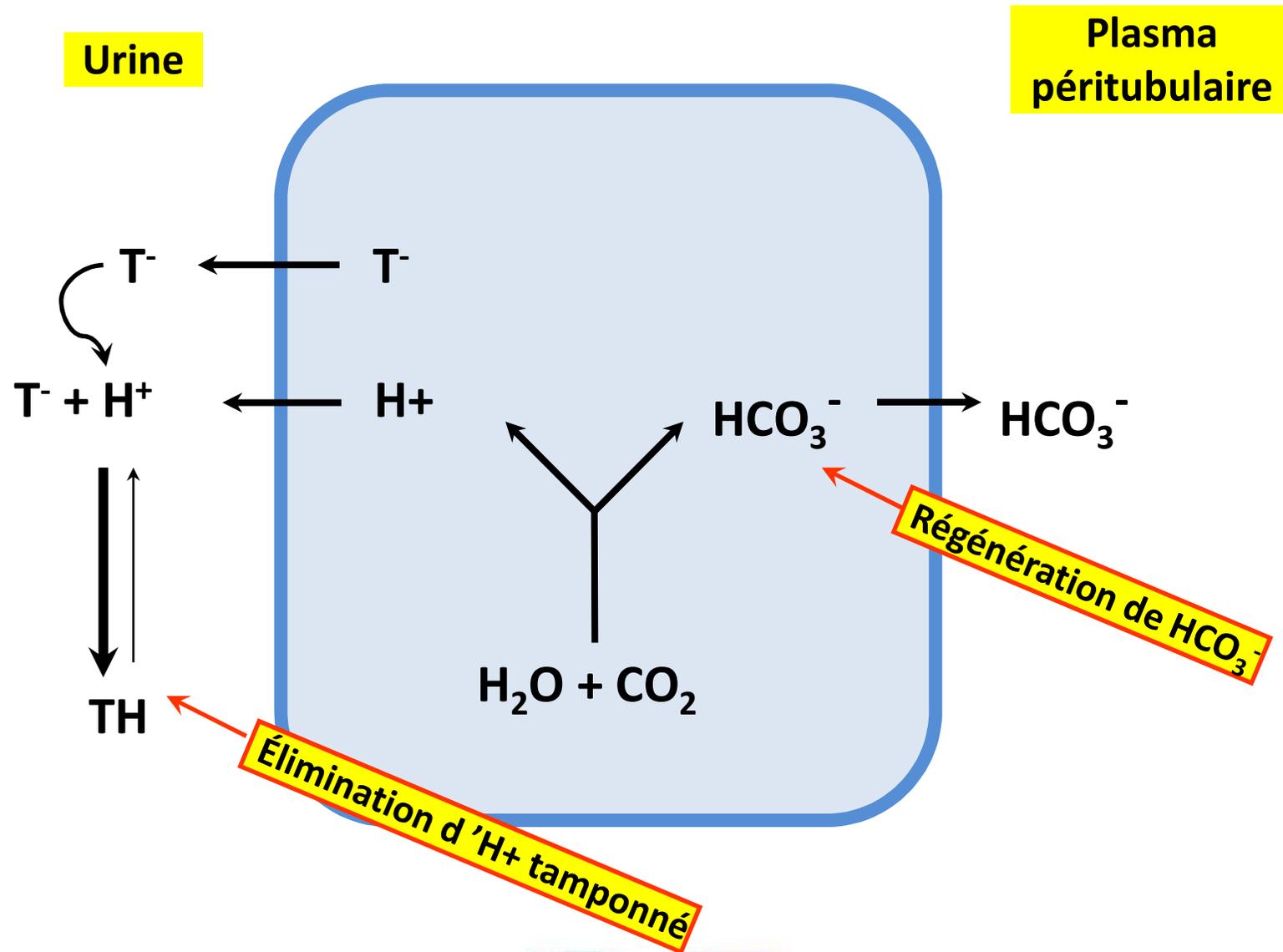
Devenir des protons sécrétés

- Réabsorption des bicarbonates
- Régénération des bicarbonates et élimination de la charge acide
 - les tampons urinaires
 - Acidité titrable
 - Ammoniaque

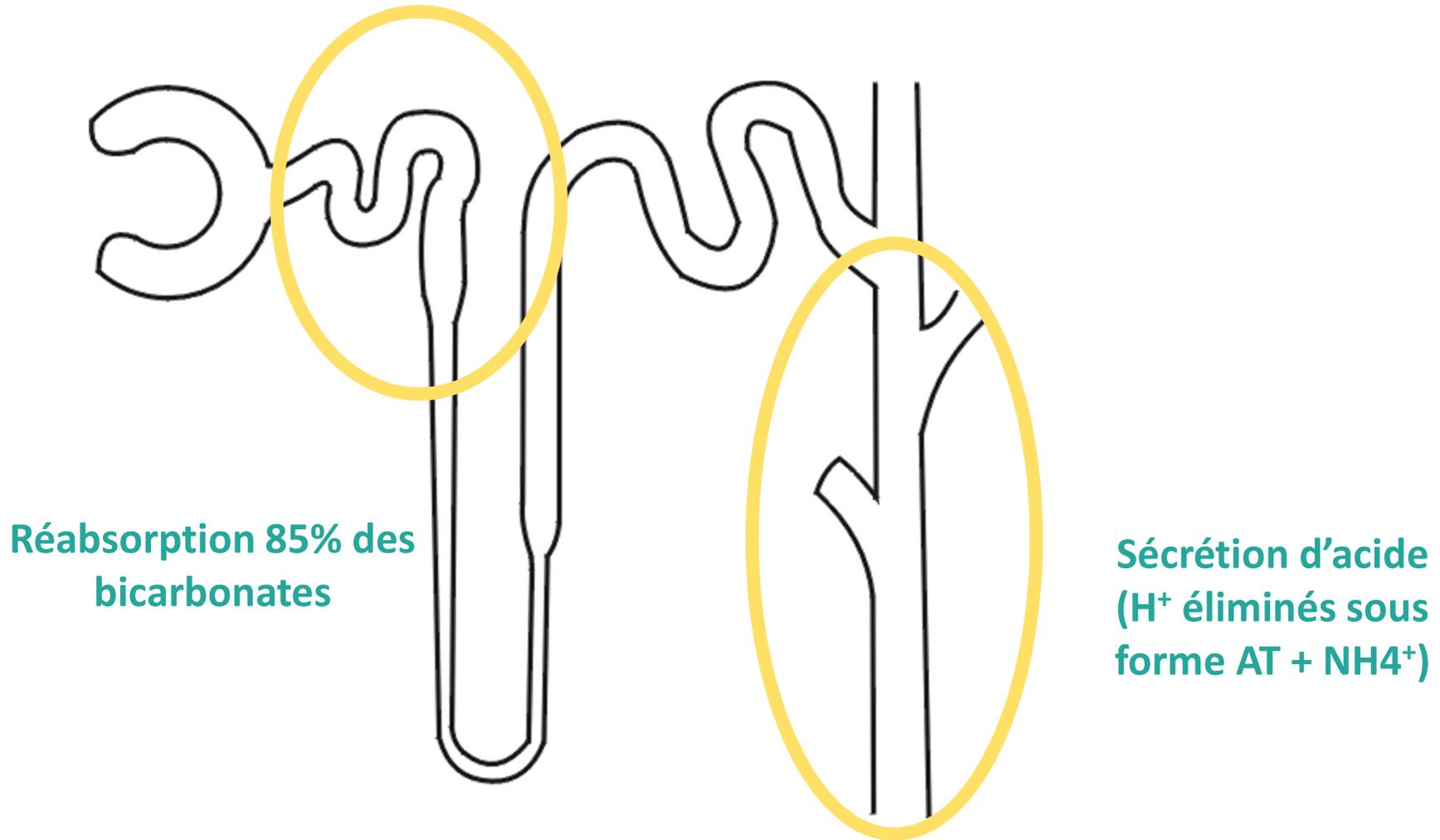
Mécanismes de l'excrétion d'ammoniaque



Régénération des bicar et élimination des H⁺



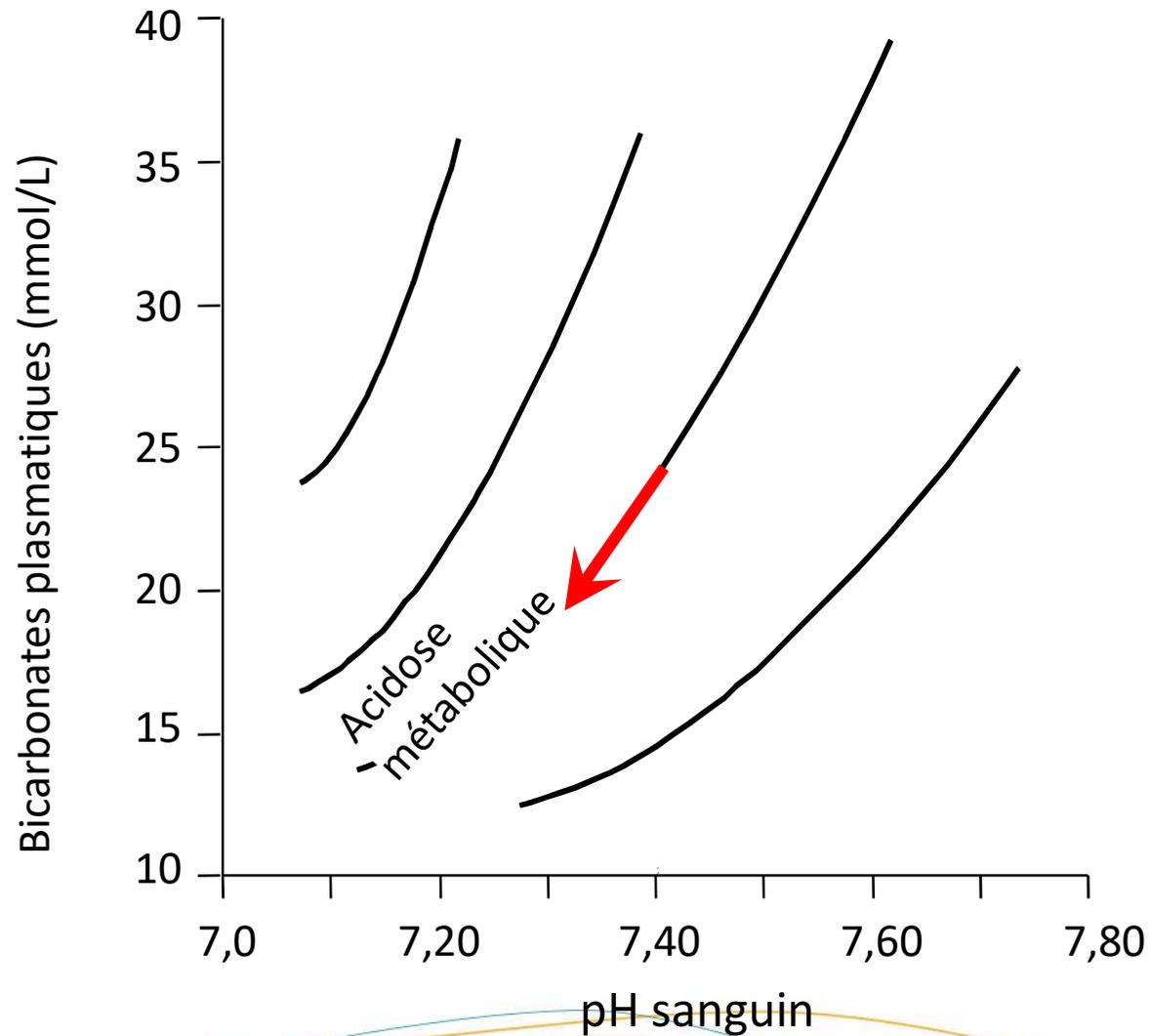
Rein et équilibre acide-base



Plan

- 1. Rappels
- 2. Contrôle de l'équilibre acido-basique dans l'organisme
- 3. Sources de production d'acides dans l'organisme
- 4. Mécanismes viscéraux de contrôle de l'équilibre acido-basique
 - Mécanismes PULMONAIRES
 - Mécanismes RÉNAUX
- 5. Principaux déséquilibres acido-basiques

-  Perturbation initiale
-  Compensation rénale
-  Compensation pulmonaire



Compensation d'une acidose métabolique

Injection de 10 mmol H⁺/L de LEC

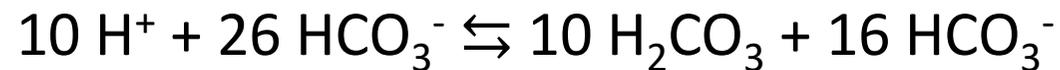
HCO₃⁻ = 26 mmol/L

α pCO₂ = 1,32 mmol/L (pCO₂ = 40)

Pas de compensation pulmonaire

Compensation d'une acidose métabolique

défense rapide : intervention du tampon $\text{NaHCO}_3/\text{H}_2\text{CO}_3$



→ $[\text{HCO}_3^-] = 16 \text{ mmol/l} - [\text{H}_2\text{CO}_3] = 10 \text{ mmol/l} - \alpha \text{ PCO}_2 = 1,32 \text{ mmol/l}$

Compensation d'une acidose métabolique

Injection de 10 mmol H⁺/L de LEC

$$\text{HCO}_3^- = 26 \text{ mmol/L}$$

$$\alpha \text{ pCO}_2 = 1,32 \text{ mmol/L (pCO}_2 = 40)$$



Pas de compensation pulmonaire



$$\text{HCO}_3^- = 16 \text{ mmol/L}$$

$$\text{H}_2\text{CO}_3 + \alpha \text{ pCO}_2 = 11,32 \text{ mmol/L}$$

$$\text{pH} = 6,1 + \log \frac{[\text{HCO}_3^-]}{\alpha \text{ PCO}_2 + [\text{H}_2\text{CO}_3]} = 6,1 + \log \frac{16}{11,32} = 6,1 + 0,15 = 6,25$$

Compensation d'une acidose métabolique

Injection de 10 mmol H⁺/L de LEC

$$\text{HCO}_3^- = 26 \text{ mmol/L}$$

$$\alpha \text{ pCO}_2 = 1,32 \text{ mmol/L (pCO}_2 = 40)$$

Pas de compensation pulmonaire

$$\text{HCO}_3^- = 16 \text{ mmol/L}$$

$$\text{H}_2\text{CO}_3 + \alpha \text{ pCO}_2 = 11,32 \text{ mmol/L}$$

$$\text{pH} = 6,25$$

Incompatible avec la vie

Compensation pulmonaire d'une acidose métabolique

Injection de 10 mmol H⁺/L de LEC

HCO₃⁻ = 26 mmol/L

α pCO₂ = 1,32 mmol/L (pCO₂ = 40)



Compensation pulmonaire partielle

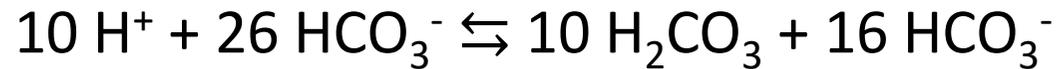


HCO₃⁻ = 16 mmol/L

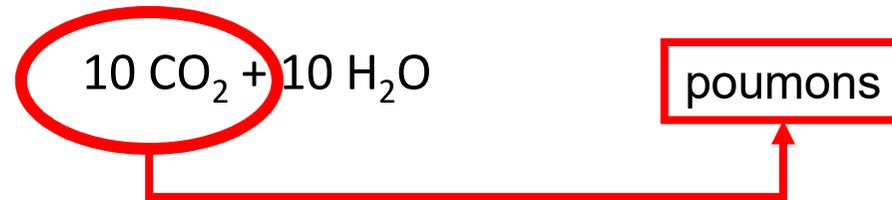
α pCO₂ = 1,32 mmol/L (pCO₂ = 40)

Compensation pulmonaire d'une acidose métabolique

intervention du tampon $\text{NaHCO}_3/\text{H}_2\text{CO}_3$



↑↓



→ $[\text{HCO}_3^-] = 16 \text{ mmol/l} - [\text{H}_2\text{CO}_3] = 0 \text{ mmol/l} - \alpha \text{ PCO}_2 = 1,32 \text{ mmol/l}$

$$\text{pH} = 6,1 + \log \frac{[\text{HCO}_3^-]}{\alpha \text{ PCO}_2 + [\text{H}_2\text{CO}_3]} = 6,1 + \log \frac{16}{1,32} = 6,1 + 1,08 = 7,18$$

Compensation pulmonaire d'une acidose métabolique

Injection de 10 mmol H⁺/L de LEC

HCO₃⁻ = 26 mmol/L

α pCO₂ = 1,32 mmol/L (pCO₂ = 40)

Compensation pulmonaire partielle

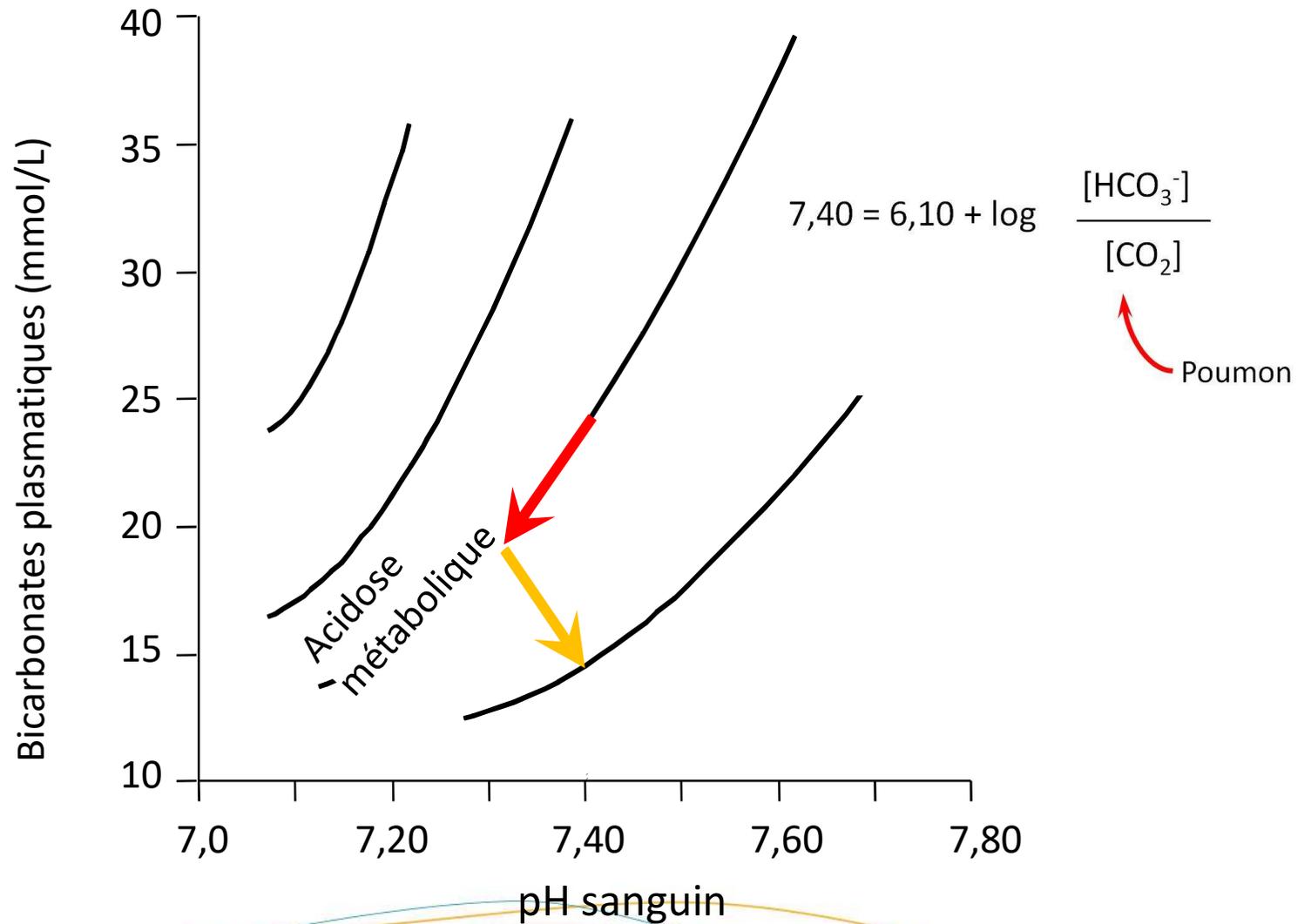
HCO₃⁻ = 16 mmol/L

α pCO₂ = 1,32 mmol/L (pCO₂ = 40)

pH = 7,18

Acidose métabolique grave

- Perturbation initiale
- Compensation rénale
- Compensation pulmonaire



Compensation pulmonaire d'une acidose métabolique

Injection de 10 mmol H⁺/L de LEC

HCO₃⁻ = 26 mmol/L

α pCO₂ = 1,32 mmol/L (pCO₂ = 40)



Compensation pulmonaire totale



HCO₃⁻ = 16 mmol/L

α pCO₂ = 0,825 mmol/L (pCO₂ = 25)

Compensation pulmonaire d'une acidose métabolique

$$\rightarrow [\text{HCO}_3^-] = 16 \text{ mmol/l} - [\text{H}_2\text{CO}_3] = 0 \text{ mmol/l} - \alpha \text{ PCO}_2 = 0,825 \text{ mmol/l}$$

$$\text{pH} = 6,1 + \log \frac{[\text{HCO}_3^-]}{\alpha \text{ PCO}_2 + [\text{H}_2\text{CO}_3]} = 6,1 + \log \frac{16}{0,825} = 6,1 + 1,29 = 7,39$$

Compensation pulmonaire d'une acidose métabolique

Injection de 10 mmol H⁺/L de LEC

HCO₃⁻ = 26 mmol/L

α pCO₂ = 1,32 mmol/L (pCO₂ = 40)

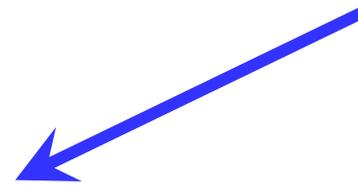
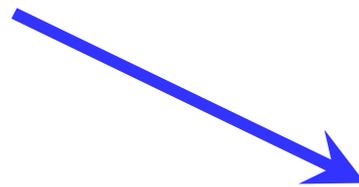


Compensation pulmonaire totale



HCO₃⁻ = 16 mmol/L

α pCO₂ = 0,825 mmol/L (pCO₂ = 25)



pH = 7,39



Acidose métabolique compensée

Troubles acido-basiques

pH < 7,38
Excès H⁺

Acidose

pH > 7,42
Défaut H⁺

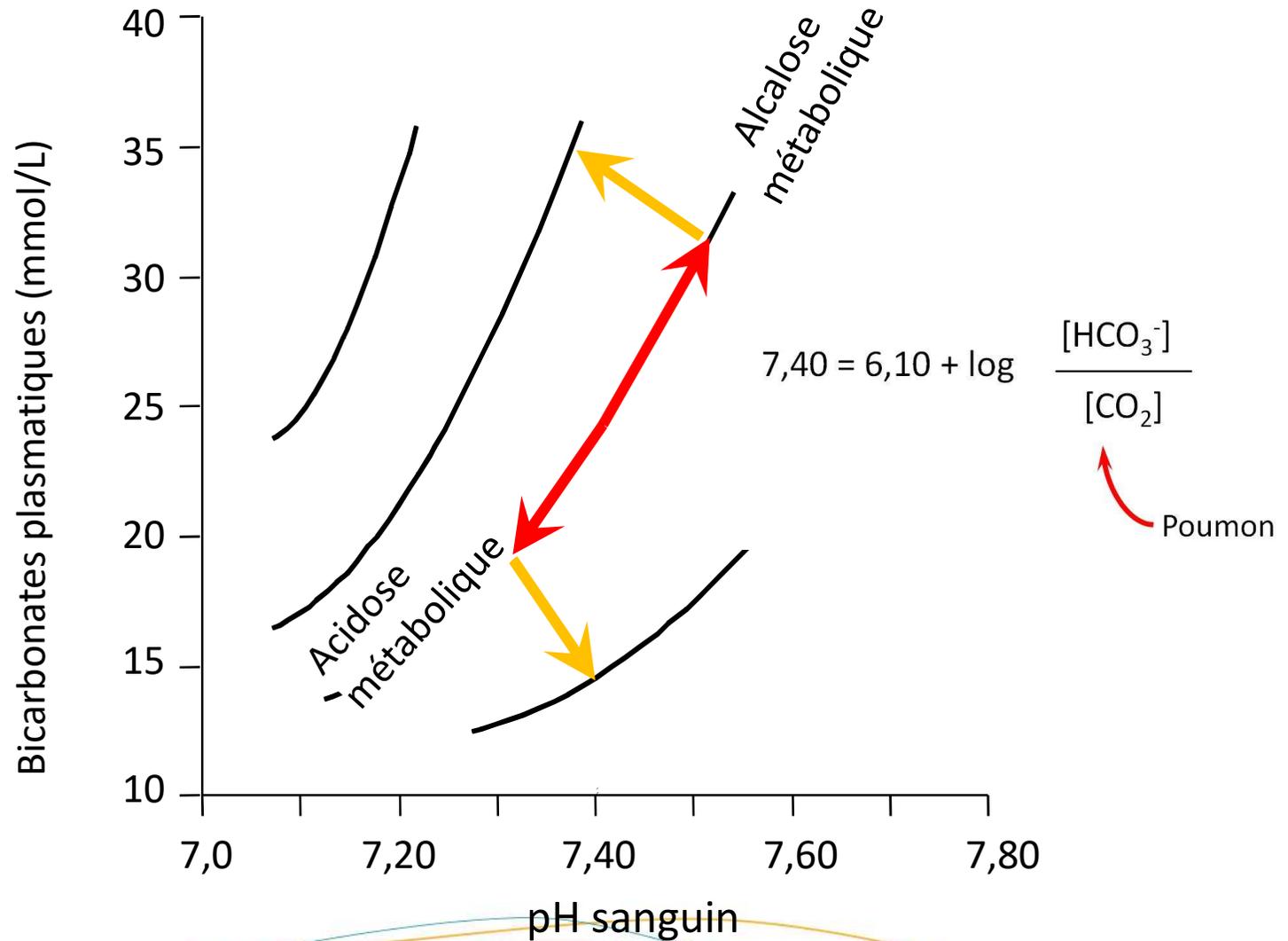
Alcalose

Métabolique

↘ HCO₃⁻

↘ PCO₂

- Perturbation initiale
- Compensation rénale
- Compensation pulmonaire



Troubles acido-basiques

pH < 7,38
Excès H⁺

Acidose



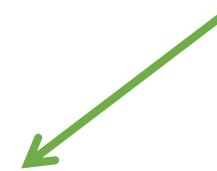
Métabolique

↘ HCO₃⁻

↘ PCO₂

pH > 7,42
Défaut H⁺

Alcalose

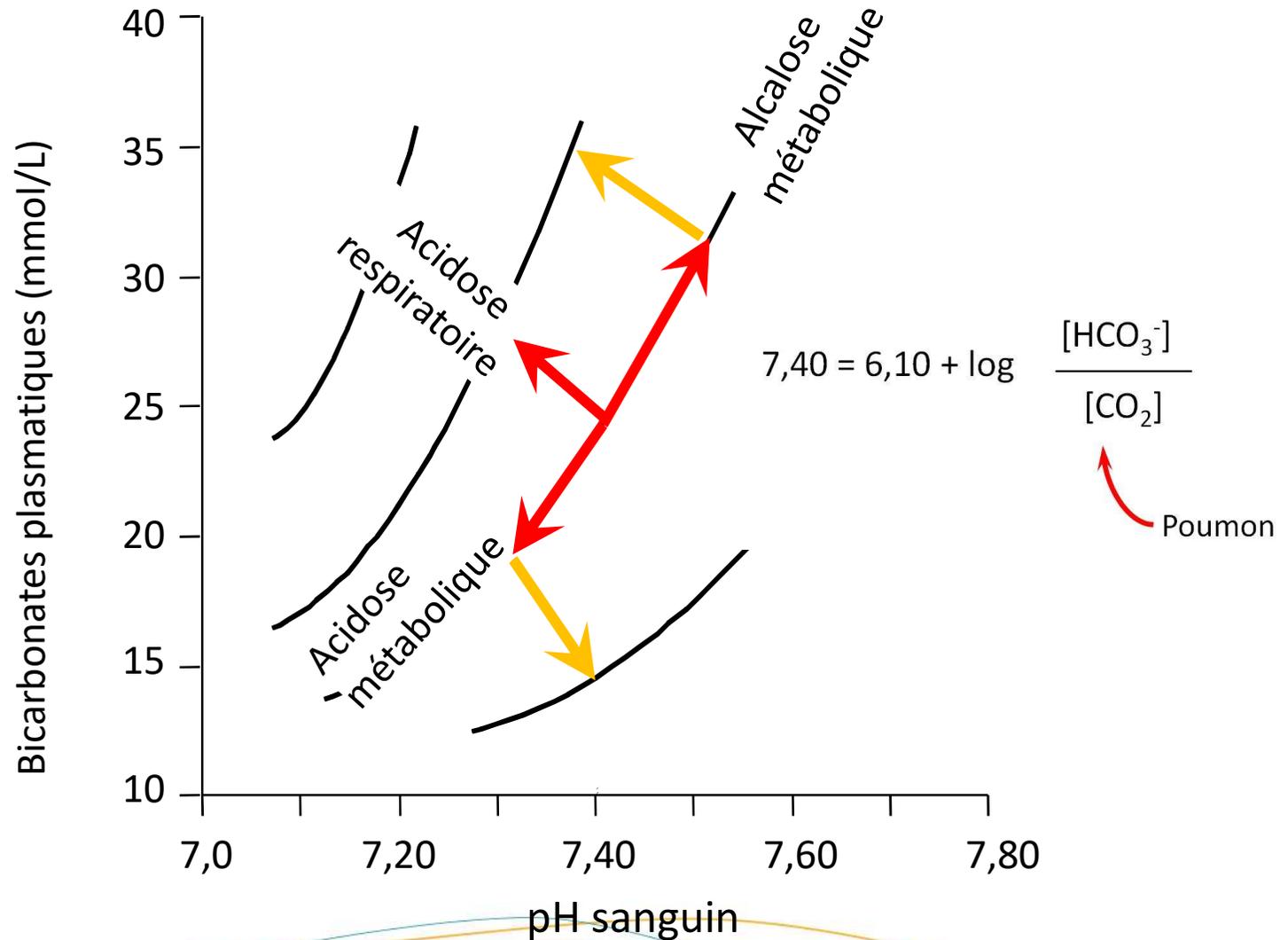


Métabolique

↗ HCO₃⁻

↗ PCO₂

- Perturbation initiale
- Compensation rénale
- Compensation pulmonaire



Compensation rénale d'une acidose respiratoire

Augmentation de $p\text{CO}_2$ à 65 mmHg

$\text{HCO}_3^- = 26 \text{ mmol/L}$

$\alpha p\text{CO}_2 = 1,32 \text{ mmol/L}$ ($p\text{CO}_2 = 40$)

Pas de compensation rénale

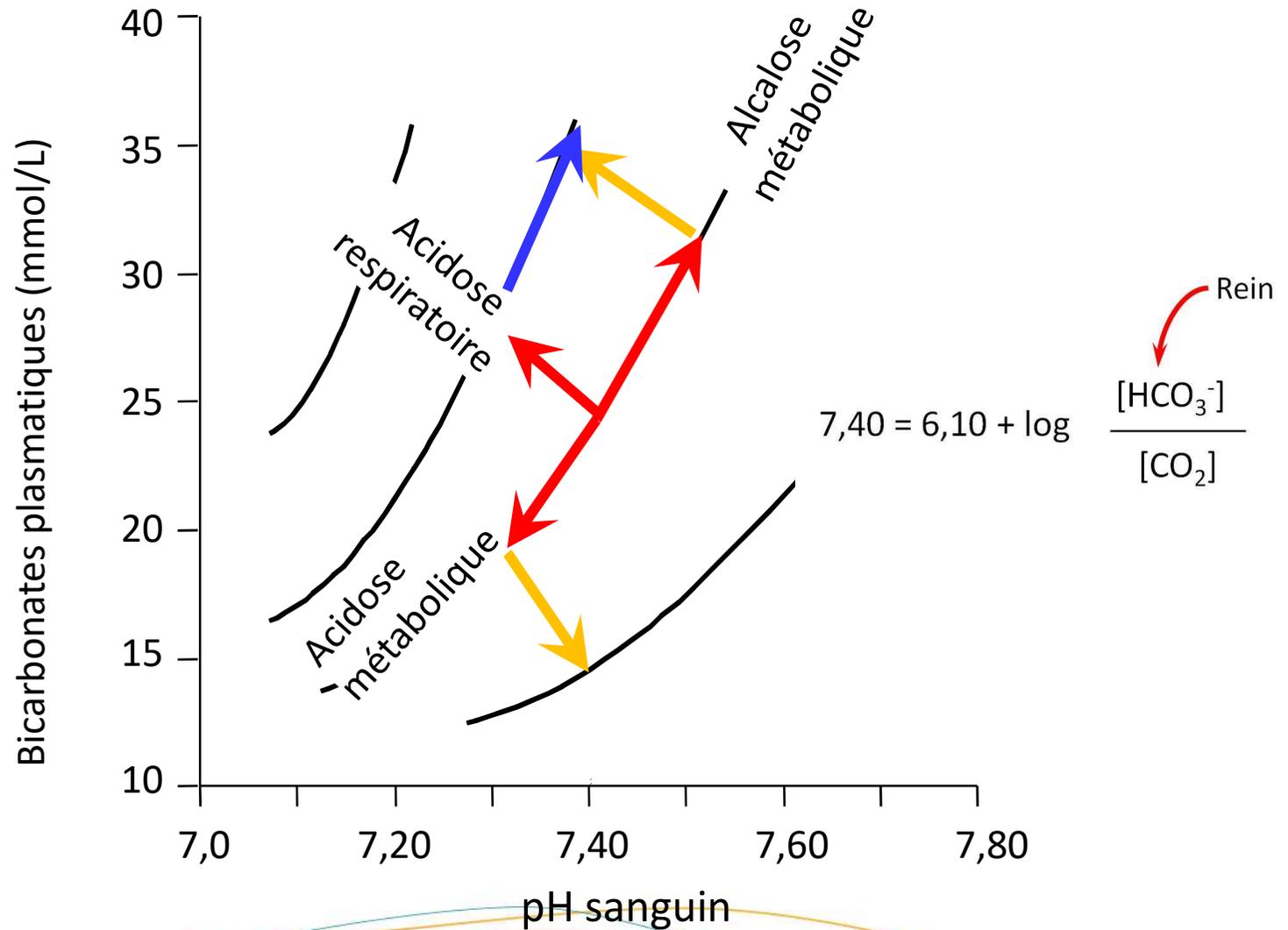
$\text{HCO}_3^- = 26 \text{ mmol/L}$

$\alpha p\text{CO}_2 = 2,14 \text{ mmol/L}$ ($p\text{CO}_2 = 65$)

$\text{pH} = 7,18$

Acidose respiratoire grave

- Perturbation initiale
- Compensation rénale
- Compensation pulmonaire



Compensation rénale d'une acidose respiratoire

Augmentation de $p\text{CO}_2$ à 65 mmHg

$\text{HCO}_3^- = 26 \text{ mmol/L}$

$\alpha p\text{CO}_2 = 1,32 \text{ mmol/L}$ ($p\text{CO}_2 = 40$)

Compensation rénale totale

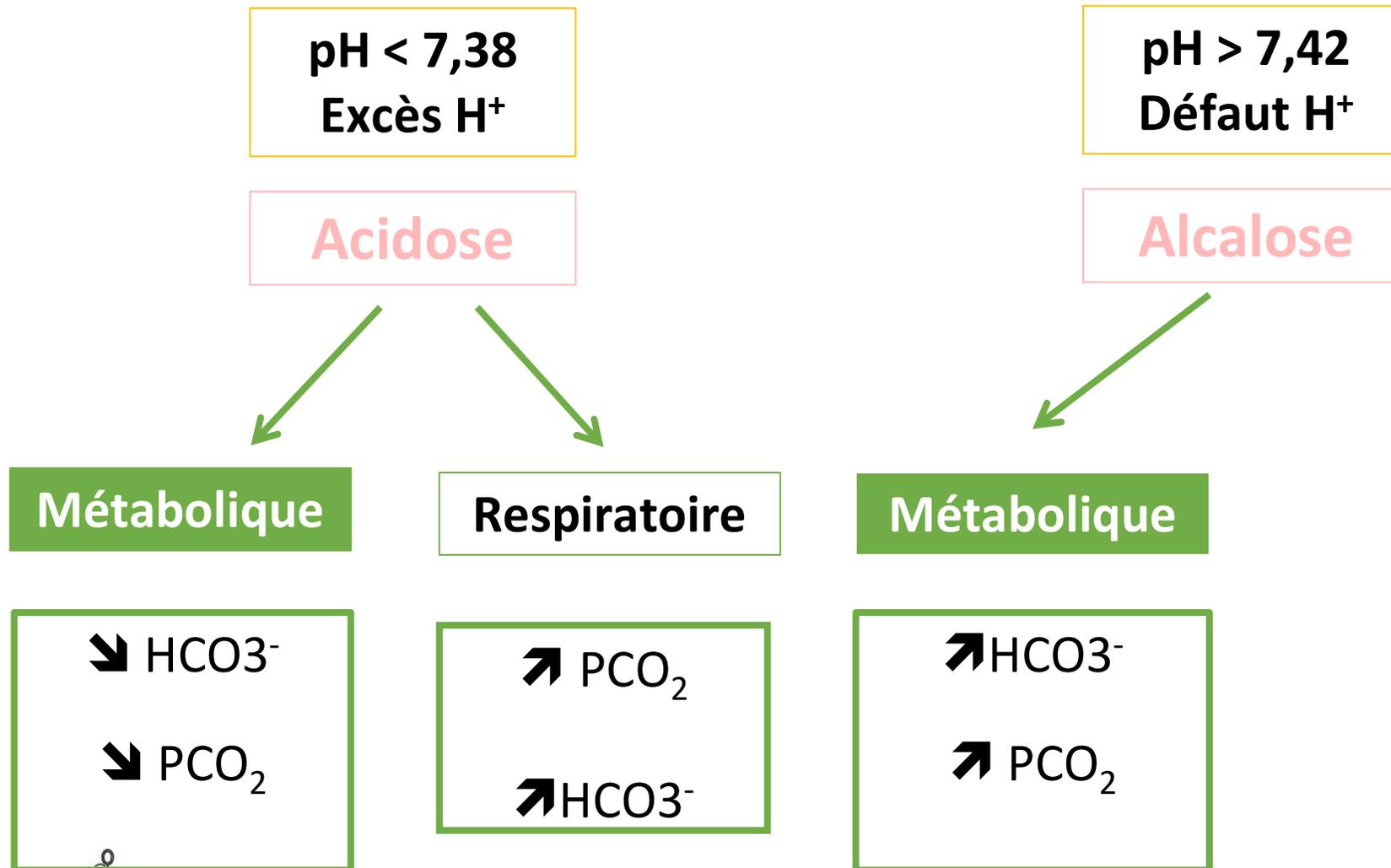
$\text{HCO}_3^- = 42 \text{ mmol/L}$

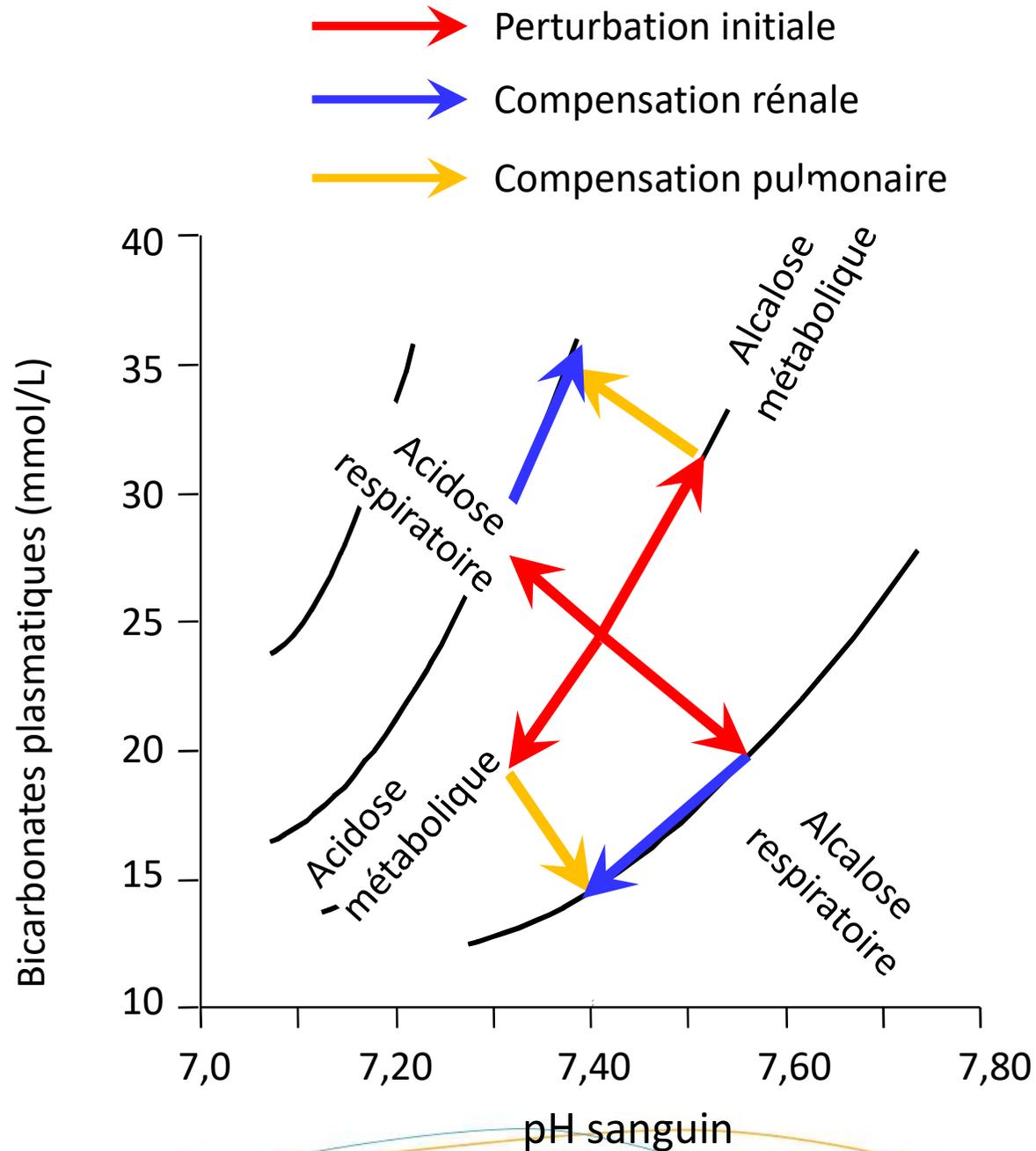
$\alpha p\text{CO}_2 = 2,14 \text{ mmol/L}$ ($p\text{CO}_2 = 65$)

$\text{pH} = 7,39$

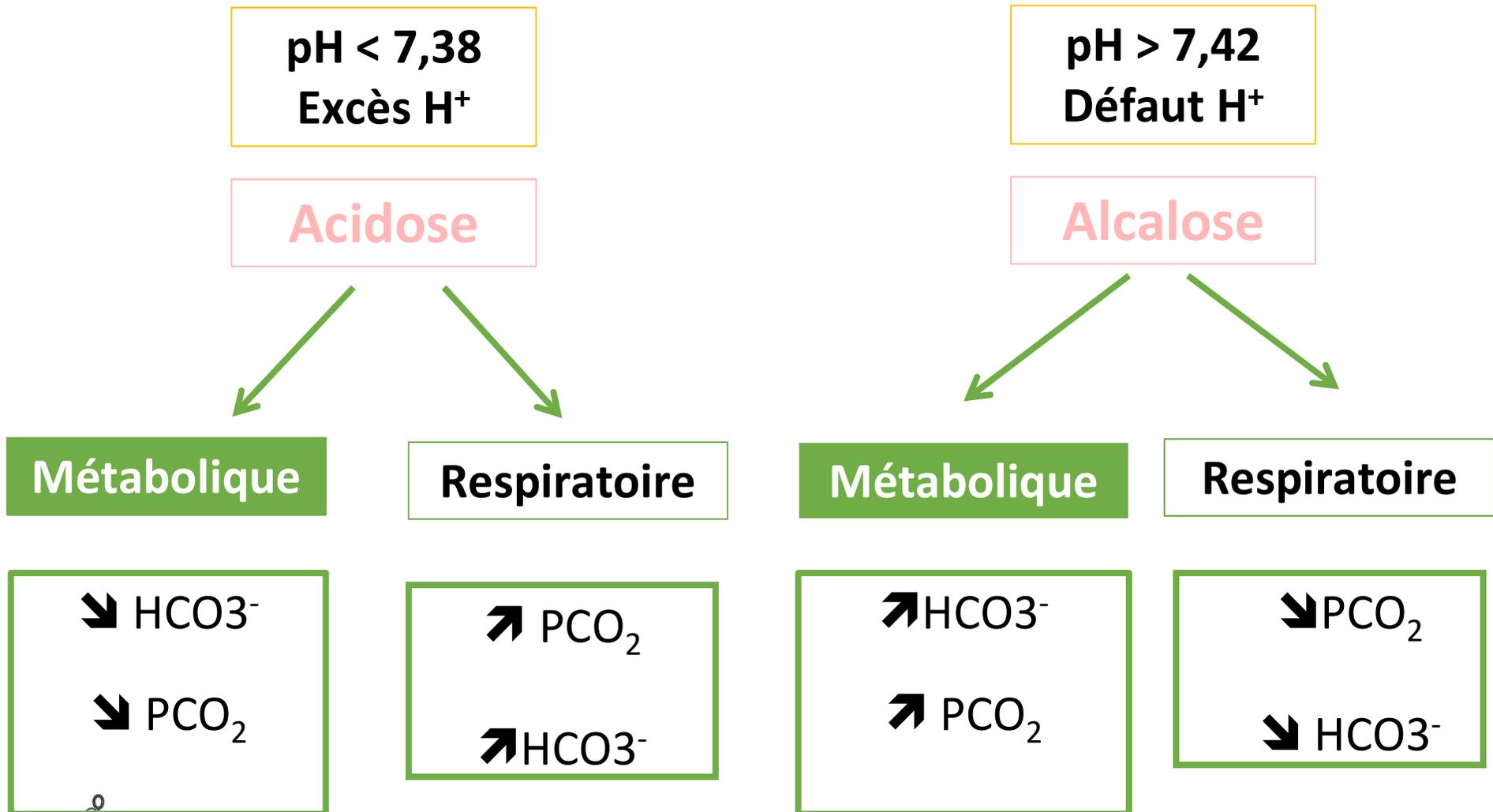
Acidose respiratoire compensée

Troubles acido-basiques

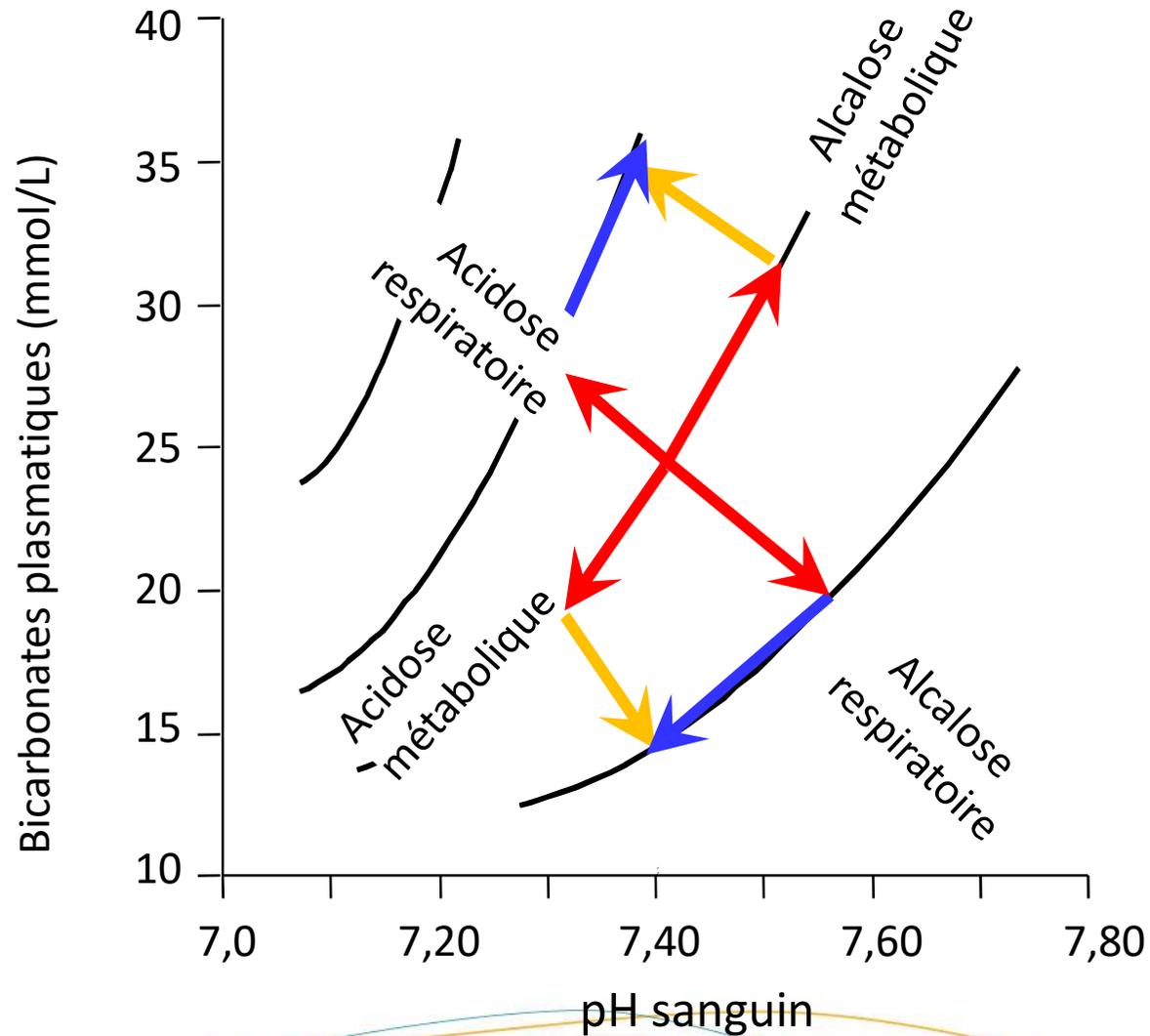




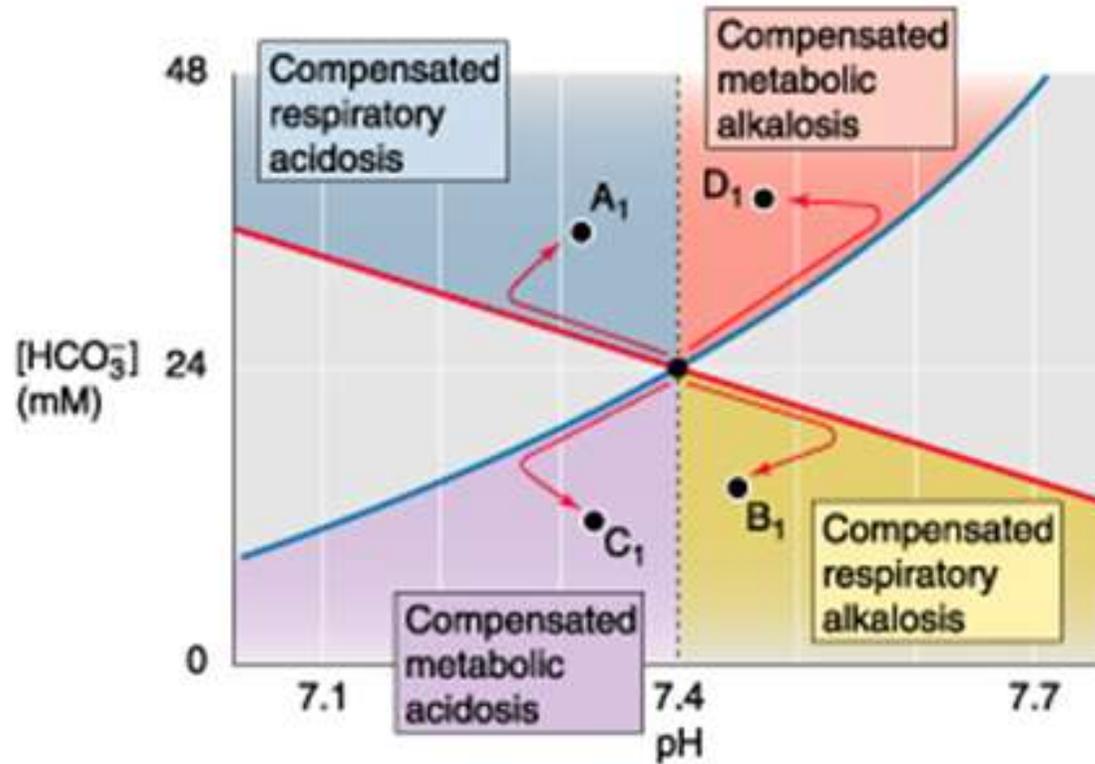
Troubles acido-basiques



- Perturbation initiale
- Compensation rénale
- Compensation pulmonaire



Principaux déséquilibres acido-basiques



Compartiments Liquidiens De l'Organisme

Équilibre acido-basique



UE8 physio

Merci pour votre attention