



## Aïe ! J'ai une crampe

Lors du métabolisme basal de l'homme, l'énergie nécessaire provient de la transformation en milieu oxygéné du glucose en dioxyde de carbone et eau. Le dioxyde de carbone est transporté par le sang jusqu'aux poumons où il est alors éliminé par ventilation.

Lors d'un effort physique intense, les besoins énergétiques des muscles augmentent : le métabolisme basal augmente ainsi que la ventilation.

Dans certains cas, lorsque la ventilation est insuffisante, l'énergie nécessaire au fonctionnement du muscle devient insuffisante : la crampe apparaît. Il se forme, dans la cellule musculaire, de l'acide lactique qui lorsqu'il passe dans le sang, provoque une diminution locale de son pH du fait de la création en abondance de dioxyde de carbone dissous dans le sang. Cette diminution du pH sanguin déclenche des ordres hypothalamiques qui vont amplifier la ventilation.



### Transport du dioxygène dans le sang

Le sang est constitué d'un liquide plasmatique (contenant entre autres les globules et les plaquettes), qui peut être assimilé à une solution aqueuse ionique dont le pH (d'une valeur voisine de 7,4) est quasiment constant et ne peut subir que de très faibles fluctuations. Dans le cas contraire, de fortes fluctuations nuiraient gravement à la santé.

Une molécule d'hémoglobine est constituée de plusieurs sous-unités. On ne considèrera dans tout l'exercice que la sous-unité notée  $Hb_{(aq)}$ .

Le dioxygène est transporté de deux façons dans l'organisme :

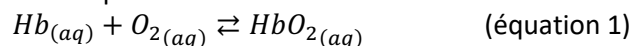
- sous forme de dioxygène dissous dans le sang que l'on note  $O_{2(aq)}$ .
- sous forme d'oxyhémoglobine que l'on notera  $HbO_{2(aq)}$ .

Le sang est assimilé à une solution aqueuse.

**Donnée :** Masse molaire de la sous-unité d'hémoglobine :  $M(Hb) = 1,6 \times 10^4 \text{ g.mol}^{-1}$

### Transport du dioxygène dans l'organisme par l'hémoglobine du sang

Au niveau des poumons, une sous-unité d'hémoglobine fixe une molécule de dioxygène pour donner une sous-unité d'oxyhémoglobine. L'équation de la réaction associée à la transformation chimique est :



1. À l'état initial, on suppose qu'un volume  $V = 100 \text{ mL}$  de sang contient une quantité de sous-unités d'hémoglobine notée  $n_0$ , un excès de dioxygène et ne contient pas de sous-unités d'oxyhémoglobine. Ce volume  $V$  de sang contient une masse  $m = 15 \text{ g}$  de sous-unités d'hémoglobine. **Calculer la quantité de matière  $n_0$  de sous-unités d'hémoglobine correspondante.**
2. **En déduire l'avancement maximum  $x_{\max}$  de la réaction. On pourra s'aider d'un tableau d'évolution du système.**
3. Le taux d'avancement final  $\tau_f$  de la réaction chimique (1) a pour valeur 0,97. **Donner la relation qui définit le taux d'avancement final  $\tau_f$  et en déduire la valeur  $x_f$  de l'avancement final.**



4. En déduire la quantité de sous-unités d'oxyhémoglobine  $\text{HbO}_2$  formée dans l'état final.
5. En une minute, le débit cardiaque moyen permet de traiter  $V_s = 5,0$  L de sang au niveau des poumons. En déduire la quantité correspondante  $n_s$  de sous-unités d'oxyhémoglobine  $\text{HbO}_2$  formées pendant une minute.

### Libération du dioxygène au niveau des organes

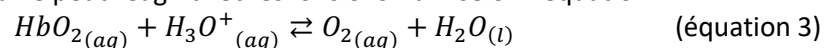
Le volume  $V$  de sang étudié dans la partie précédente arrive au niveau des tissus des organes. À ce stade une partie du dioxygène dissous est absorbée par les tissus faisant ainsi chuter la concentration en dioxygène dans le sang. Le système chimique étudié dans la partie précédente se trouve alors dans un nouvel état initial, noté état 1, tel que la concentration en dioxygène dissous est  $[\text{O}_2]_1 = 3,6 \times 10^{-5} \text{ mol.L}^{-1}$  ; celle de sous-unités d'hémoglobine est alors  $[\text{Hb}]_1 = 2,8 \times 10^{-4} \text{ mol.L}^{-1}$  et celle de sous-unités d'oxyhémoglobine est  $[\text{HbO}_2]_1 = 9,1 \times 10^{-3} \text{ mol.L}^{-1}$ .

6. Calculer la valeur du quotient de réaction  $Q_{r1}$  dans l'état 1 correspondant à l'équation (1).
7. La constante d'équilibre  $K_1$  liée à l'équation (1) a pour valeur  $K_1 = 3,0 \times 10^5$ . Dans quel sens évolue le système ?

### Et lors d'un effort musculaire ?

Au cours d'un effort, du dioxyde de carbone est formé au niveau des muscles. Il se dissout dans le sang. Le couple acide-base mis en jeu est  $\text{CO}_2, \text{H}_2\text{O} / \text{HCO}_3^-_{(aq)}$  de  $\text{pK}_a = 6,4$ .

8. Écrire l'équation notée (2) de la réaction associée à la transformation entre le dioxyde de carbone dissous et l'eau.
9. Représenter sur un diagramme les domaines de prédominance des espèces du couple  $\text{CO}_2, \text{H}_2\text{O} / \text{HCO}_3^-$ .
10. En déduire, en le justifiant, l'espèce prédominante de ce couple dans le sang au niveau des tissus pour un pH du sang égal à 7,4.
11. Pourquoi la dissolution du dioxyde de carbone provoque-t-elle une diminution du pH sanguin en l'absence d'autres réactions ?
12. Chez l'homme, le pH du sang est compris dans des limites très étroites : 7,36 à 7,42. D'autre part, l'oxyhémoglobine peut réagir avec les ions oxonium selon l'équation :



Montrer que les ions  $\text{H}_3\text{O}^+$  produit par la réaction d'équation (2) permettent la libération du dioxygène nécessaire à l'effort musculaire tout en limitant la variation de pH, vue à la question 11.



## Solution tampon

Une solution tampon est composée d'un mélange, généralement équimolaire, d'un acide faible et de sa base conjuguée. Elle présente la propriété de fixer le pH du milieu où elle se trouve à une valeur déterminée, et, telle une éponge, « d'absorber » des variations de celui-ci.

### Solution tampon et dilution

- Verser 50 mL de solution tampon  $\text{pH} = 4,0$  dans un bécher. Mesurer son pH.
  - A partir de cette solution tampon à  $\text{pH} = 4,0$  et avec le matériel disponible, préparer une solution diluée 2x, une solution diluée 4x et une solution diluée 10x. Mesurer le pH de chacune de ces solutions.
  - Faire de même à partir d'une solution tampon à  $\text{pH} = 10$ .
  - Faire de même à partir d'une solution d'acide chlorhydrique de concentration  $C_A = 1,0 \cdot 10^{-5} \text{ mol.L}^{-1}$ .
  - Faire de même à partir d'une solution de soude de concentration  $C_B = 1,0 \cdot 10^{-5} \text{ mol.L}^{-1}$ .
- 13. Conclure sur l'influence de la dilution sur le pH d'une solution tampon.**

### Solution tampon et ajout d'un acide fort

- Verser 50 mL de solution tampon  $\text{pH} = 10$  dans un bécher. Mesurer son pH.
  - A l'aide d'une burette, ajouter 1 mL de solution d'acide chlorhydrique de concentration  $C_A' = 1,0 \cdot 10^{-4} \text{ mol.L}^{-1}$ . Mesurer le nouveau pH.
  - Procéder ainsi à 4 ou 5 ajouts successifs en notant le pH obtenu à chaque fois.
  - Procéder de la même façon dans un deuxième bécher contenant 50 mL de la solution de soude de concentration  $C_B = 1,0 \cdot 10^{-5} \text{ mol.L}^{-1}$ .
- 14. Conclure sur l'influence de l'ajout d'un acide fort sur le pH d'une solution tampon.**

### Solution tampon et ajout d'une base forte

- Verser 50 mL de solution tampon  $\text{pH} = 4,0$  dans un bécher. Mesurer son pH.
  - A l'aide d'une burette, ajouter 1 mL de solution de soude de concentration  $C_B' = 1,0 \cdot 10^{-4} \text{ mol.L}^{-1}$ . Mesurer le nouveau pH.
  - Procéder ainsi à 4 ou 5 ajouts successifs en notant le pH obtenu à chaque fois.
  - Procéder de la même façon dans un deuxième bécher contenant 50 mL de la solution d'acide chlorhydrique de concentration  $C_A = 1,0 \cdot 10^{-5} \text{ mol.L}^{-1}$ .
- 15. Conclure sur l'influence de l'ajout de base forte sur le pH d'une solution tampon.**

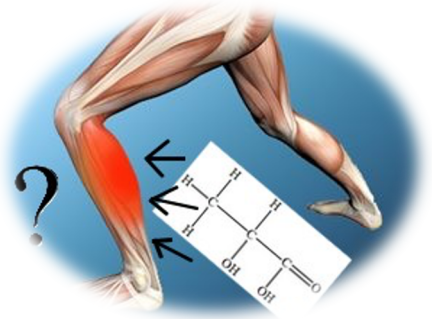


## Effet Tampon et crampe

Lors du métabolisme basal de l'homme, l'énergie nécessaire provient de la transformation en milieu oxygéné du glucose en dioxyde de carbone et eau. Le dioxyde de carbone est transporté par le sang jusqu'aux poumons où il est alors éliminé par ventilation.

Lors d'un effort physique intense, les besoins énergétiques des muscles augmentent : le métabolisme basal augmente ainsi que la ventilation.

Dans certains cas, lorsque la ventilation est insuffisante, l'énergie nécessaire au fonctionnement du muscle devient insuffisante : la crampe apparaît. Il se forme, dans la cellule musculaire, de l'acide lactique qui lorsqu'il passe dans le sang, provoque une diminution locale de son pH du fait de la création en abondance d'ions oxonium dans le sang. Parmi les mécanismes de régulation qui se mettent en place, il y a notamment un effet tampon dû à la présence du couple  $\text{CO}_2, \text{H}_2\text{O} / \text{HCO}_3^-$ .



L'acide lactique a pour formule  $\text{CH}_3\text{-CHOH-COOH}$ . Sa base conjuguée est l'ion lactate  $\text{CH}_3\text{-CHOH-COO}^-$ .

**16. Donner la formule développée de l'acide lactique ; entourer et nommer les différents groupes fonctionnels de la molécule.**

Dans la cellule musculaire, l'acide lactique est formé à partir de l'acide pyruvique de formule  $\text{CH}_3\text{-CO-COOH}$ . La transformation produite est une oxydoréduction faisant intervenir le couple acide pyruvique / acide lactique.

**17. Écrire la demi-équation électronique associée au couple. S'agit-il d'une oxydation ou d'une réduction de l'acide pyruvique dans la cellule musculaire ?**

Lorsque l'acide lactique produit dans la cellule musculaire est en partie transféré dans le sang, il réagit avec l'eau pour former sa base conjuguée et des ions oxonium.

On considère un volume  $V = 100 \text{ mL}$  de sang « après » effort dans lequel apparaît  $n_0 = 3,0 \times 10^{-4} \text{ mol}$  d'acide lactique

**18. Donner la définition d'un acide selon Brønsted.**

**19. Écrire l'équation de la réaction entre l'acide lactique et l'eau.**

**20. Donner l'expression de la constante d'acidité du couple acide lactique/ion lactate en fonction de l'avancement de cette réaction et la quantité de matière  $n_0$ .**

**21. En déduire la valeur de  $x_f$ , puis la valeur du pH sanguin au niveau du muscle.**

Les ions oxonium formés lors de cette réaction vont alors réagir avec les ions hydrogénocarbonate  $\text{HCO}_3^-$  présents dans le sang pour former du  $\text{CO}_2$  dissous ( $\text{CO}_2, \text{H}_2\text{O}$ )

**22. Écrire l'équation de la réaction entre les ions oxonium et les ions hydrogénocarbonate.**

**23. Déterminer la valeur de  $x_f$ , puis la valeur du pH sanguin après l'action des ions hydrogénocarbonate.**

Conclure sur l'action du couple  $\text{CO}_2, \text{H}_2\text{O} / \text{HCO}_3^-$  sur le pH sanguin.

**Données à 37°C, pour le sang avant l'effort :**

- $[\text{HCO}_3^-]_i = 2,7 \times 10^{-2} \text{ mol.L}^{-1}$
- $[\text{CO}_2, \text{H}_2\text{O}]_i = 1,4 \times 10^{-3} \text{ mol.L}^{-1}$
- $\text{pKa}(\text{CO}_2, \text{H}_2\text{O} / \text{HCO}_3^-) = \text{pKa}_1 = 6,1$
- $\text{pKa}(\text{acide lactique} / \text{ion lactate}) = \text{pKa}_2 = 3,6$