

« La chimie de l'eau des grands lacs africains »

(Document accompagnateur : Fichier Excel « sel africain v.2 »)

Auteurs : **Michel Lévesque, B.Sc., M.Sc.A.**
michel.levesque@cegeptr.qc.ca
Martial Rhéaume, B.Sc.
rheaume.martial@cscapitale.qc.ca

Note légale

Cet article est libre de tout droit d'auteur et peut être diffusé dans le grand public. Il s'accompagne d'un programme Excel, construit à l'aide de la suite Office 2000 de Microsoft. Il ne doit pas servir à des fins commerciales autres que pour publication ou distribution à l'intérieur de revues spécialisées ou sites web dont l'accès est gratuit. Nous pensons qu'il serait juste et équitable de recevoir gracieusement une copie de tout document contenant notre article. Nos coordonnées postales seront fournies par courriel.

Introduction

Lorsque nous naviguons sur le web, nous retrouvons une multitude de recettes permettant de reproduire plus ou moins fidèlement la qualité des eaux des lacs Malawi et Tanganyika d'Afrique. La majorité d'entre elles sont fournies sur une base empirique et ne sont pratiquement pas accompagnées d'explication suffisante à la réelle compréhension de l'action de chacune des composantes chimiques. Nous tenterons dans cet article d'expliquer les bases de la chimie conduisant à cette compréhension tout en fournissant un outil de travail permettant de simuler le résultat de l'ajout de différents sels commerciaux relativement faciles d'accès au grand public.

Quelques définitions essentielles

Tout aquariophile non-débutant est familier avec les tests de base que sont le pH, le GH et le KH. Mais qu'en ait-il de leur définition et des concepts chimiques sous-entendus...

Le **pH** se définit par la concentration des ions hydrogènes présent en solution aqueuse. Ces ions sont de polarité positive et l'abréviation prévue pour les illustrer est **H⁺**. La concentration utilisée pour fin de calcul du pH est la **Molarité**, qui consiste dans le ratio entre le nombre de mole d'ions H⁺ sur le volume de la solution aqueuse dans lesquels ils se trouvent. Ce ratio nous amène donc à calculer le nombre d'ions sur une base unitaire, soit le nombre de moles de H⁺ (1 mole contient 6,0221 x 10²³ atomes) pour un litre de solution, moles/l. Ainsi donc par définition le pH est égal à :

$$\text{Équ. 1 } \text{pH} = -\text{Log} [\text{H}^+]$$

L'utilisation des crochets [] indique que nous sommes en présence d'une concentration. L'échelle de pH se situe normalement entre 1 et 14, pour l'aquariophile, la zone entre 6 et 9 est la plus probable tout dépendant des espèces en présences dans le bac.

Le **GH** consiste en la **dureté totale**, c'est à dire la somme de la **dureté calcique** et de la **dureté magnésique**, exprimé en degré allemand, **dH**. La dureté calcique est occasionnée par la présence d'ions calcium, Ca⁺², alors que la dureté magnésique est provoquée par la présence d'ions magnésium en solution, Mg⁺², dans une solution aqueuse. Pour calculer le GH, il est nécessaire de connaître la concentration des ions calcium et magnésium. Cette concentration peut être exprimée en moles/l, mais un poids peut y être associé, le poids en gramme d'une mole d'une espèce donnée s'appel le poids moléculaire, **PM** :

Ions	PM
Ca ⁺²	40,08
Mg ⁺²	24,305

Comme les quantités d'ions calcium et magnésium sont sommes toutes minimes, il convient d'utiliser le millième de mole, soit la **millimole** ou **mmole**, ainsi que le milligramme ou mg. Une millimole de Ca⁺² pèse donc 40,08 milligrammes. Si nous connaissons la concentration en mg/l de Ca⁺² et de Mg⁺², il est possible de calculer le GH.

Le degré allemand, dH, correspond à la mesure plus conventionnelle de 17,8 ppm de CaCO₃. Une difficulté est ici rencontrée du fait que nous devons ramener le poids de Ca⁺² et de Mg⁺² en équivalent de carbonate de calcium, soit en ppm CaCO₃. Pour ce faire, il suffit de considérer que pour chaque mole de Ca⁺² ou de Mg⁺², doit se rattacher une mole de CO₃⁻² et qu'un ppm est égale à 1 mg/litre. Le poids moléculaire du carbonate, CO₃⁻², est de 59,993 g. Sachant cela nous sommes prêts pour le calcul de la dureté en ppm CaCO₃:

Soit une solution de 1 litre contenant 10 mg de Ca⁺² et de 35 mg de Mg⁺², calculer la dureté totale de cette solution :

- 1- Trouvons le poids de carbonate associé au calcium et au magnésium. Nous devons passer par le nombre de mole (cf. ci-dessus)

Concentration, mg/l ÷ PM, mg/l = mmole

Ca⁺²

1 mmole = 40,08 mg

10 mg/l ÷ 40,08 mg = 0,2451 mmole/l de Ca⁺²

Mg⁺²

1 mmole = 24,305 mg

35 mg/l ÷ 24,305 mg = 1,4400 mmole/l de Mg⁺²

Transformation en ppm de CaCO₃ : 0,2451 mmole/l de Ca⁺² associées à 0,2451 mmole CO₃⁻²
1,4400 mmole/l de Mg⁺² associées à 1,4400 mmole/l de CO₃⁻²

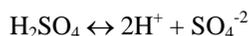
1 mmole de CO₃⁻² pèse 59,993 mg, alors 1,4400 mmoles x 59,993 mg/mmoles donnent 86,39 mg de CO₃⁻² associés au Mg⁺². Puis 0,2451 moles/l donnent 14,70 mg de carbonate associé au 10 mg de Ca⁺². Nous avons donc au total :

10 + 14,70 mg CaCO₃, soit 24,70 mg pour 1 litre, puis 86,39 + 35 mg de MgCO₃, soit 121,39 mg/l. Il faut maintenant transformer le MgCO₃ en CaCO₃ en utilisant le ratio des PM de ces molécules. Soit PM CaCO₃/PM MgCO₃ de (40,08+59,993) / (24,305+59,993) = 1,187. Alors 121,39 mg MgCO₃ x 1,187 = 144,09 mg CaCO₃.

Le poids total en CaCO₃ est donc de 24,70 + 144,09 = 168,79 mg/l ou ppm de CaCO₃.

Le GH est de 168,69/17,8 soit 9,48 dH.

WOW! Que de calcul ! Nous avons fait par exprès en utilisant les formes conventionnelles des concentrations. Il est possible de simplifier le tout en utilisant une forme moins usuelle en aquariophilie, mais comment donc plus pratique. Il s'agit du **milliéquivalent** par litre, **méq/l**. L'avantage du méq/l, est qu'il présuppose nécessairement que pour chaque méq/l d'ions positifs correspond le même nombre de méq/l d'ions négatifs, peut importe leur valence, ce qui n'est pas le cas pour les moles. Ainsi lorsque nous balançons un équilibre chimique les calculs sont simplifiés. Par définition un équivalent correspond au nombre d'électron de valence entrant en réaction et pouvant être aussi bien donné que reçu par une espèce chimique. Voici un exemple :



Nous avons une mole d'acide sulfurique qui nous fournit 2 moles d'ions hydrogène et une mole d'ions sulfate. Mais, une mole d'acide sulfurique correspond à 2 équivalents d'électron pouvant réagir et pouvant donner du sulfate, laissant 2 moles d'hydrogène en déficit d'électron. Il y a donc 2 équivalents d'acide sulfurique qui se dissocie en 2 équivalents d'hydrogène et 2 équivalents de sulfate ou si l'on divise tout par deux, un équivalent de chaque espèce.

Par définition, un méq/l correspond au produit de la concentration, mg/l, par la valence, le tout divisé par le poids moléculaire :

$$\text{Équ. 2} \quad \text{méq/l} = \frac{[\text{mg/l} \times \text{valence}]}{\text{PM}}$$

Pour s'y retrouver facilement, reprenons le cas du calcium. Le PM du Ca⁺² est de 40,08 g pour une mole ou de 40,08 mg pour une mmole. Choisissons délibérément de travailler avec le PM en mg. Appliquant l'équation 2 avec 40,08 mg et 2 électrons de valence, nous trouvons 2 méq/l. Cela veut dire qu'une mmole de Ca⁺² fournit 2 méq/l d'ions calcium. Il en est de même pour le Mg⁺² et le CO₃⁻². De plus, un méq/l d'ions Ca⁺² ou Mg⁺² s'associe à un méq/l d'ions CO₃⁻². Ce qui est intéressant donc, c'est que l'on peut intervertir les ions Ca⁺² et Mg⁺² peut importe leur PM respectif en utilisant les méq pour les associer aux carbonates, ce qui réduit considérablement les calculs. Le tableau 1 illustre la relation entre le PM, en mg, et les méq. De plus il fournit un facteur de multiplication de la concentration en mg/l pour trouver le nombre de méq/l correspondant pour les espèces trouvées dans une eau naturelle.

Tableau 1 Relation entre le poids moléculaire, en mg, et le nombre de milliéquivalent.

Espèce chimique	PM, mg	méq.	méq/l = mg/l X facteur
H ⁺	1,00794	1,00794	0,99212
Na ⁺	22,9898	22,9898	0,04350
K ⁺	39,0983	39,0983	0,02558
Ca ⁺²	40,08	20,04	0,04990
Mg ⁺²	24,305	12,1525	0,08229
HCO ₃ ⁻	61,00094	61,00094	0,01639
CO ₃ ⁻²	59,993	29,9965	0,03334
Cl ⁻	35,453	35,453	0,02821
SO ₄ ⁻²	96,036	48,018	0,02083

Du tableau 1, nous pouvons déduire qu'un méq. de CaCO₃ pèse 20,04 + 29,9965 = 50,3965 mg ou environ 50 ppm. Dans notre exemple de tout à l'heure, nous avons :

- 10 mg/l Ca⁺², soit 10 x 0,04990 = 0,4990 méq/l
- 35 mg/l de Mg⁺², soit 35 x 0,08229 = 2,8802 méq/l
- Un totale de 3,3792 méq/l d'ions calcium et magnésium associés à autant de méq/l d'ions carbonates.
- Donc 3,3792 méq/l de CaCO₃ soit 3,3792 x 50 = 168,96 ppm CaCO₃. La légère différence de résultat vient des chiffres significatifs et du facteur 50 au lieu de 50,3965.

Il est maintenant facile de calculer la dureté calcique et magnésique, en ppm CaCO₃. Il suffit de multiplier le nombre de méq/l de chacun par 50. Dans notre exemple :

- 10 mg/l Ca⁺² donnent 0,4990 x 50 = 24,95 ppm CaCO₃ de dureté calcique.
- 35 mg/l Mg⁺² donnent 2,8802 x 50 = 144,01 ppm CaCO₃ de dureté magnésique.

Un autre raccourci possible est de multiplier les quantités de Ca⁺² et Mg⁺² en ppm, respectivement par 2,4968 et 4,1174, pour ainsi obtenir leur équivalent en dureté calcique et magnésique sous forme de ppm de CaCO₃. De plus si le GH et la dureté calcique sont connus, la dureté magnésique peut être obtenue en soustrayant la dureté calcique du GH en autant que tout soit exprimée en ppm de CaCO₃.

Le **KH** correspond, en allemand, à la dureté carbonatée exprimée en dH. Cette définition est lourde de conséquence, car elle n'est pas appliquée en aquariophilie. La véritable dureté carbonatée est associée à la notion de **dureté temporaire**. C'est la concentration des espèces Ca^{+2} et Mg^{+2} associées aux ions carbonates et bicarbonates. Sous l'effet d'une ébullition, une eau alcaline et dure laissera un dépôt de CaCO_3 et MgCO_3 , ce qui diminuera l'alcalinité et la dureté de cette eau si elle était récupérée dans un autre récipient après refroidissement., d'où l'appellation temporaire. En pratique, nous mesurons l'**alcalinité** et nous appelons le résultat le KH, ce qui est une erreur. L'alcalinité est généralement mesurée en méq/l. Elle se définit comme suit :

$$\text{Équ. 3} \quad \text{Alcalinité, méq/l} = [\text{HCO}_3^-] + [\text{CO}_3^{-2}] + [\text{OH}^-] - [\text{H}^+]$$

La concentration des espèces entrant dans la définition de l'alcalinité doit être exprimée en méq/l. Dans les bacs africains, l'alcalinité ramenée en ppm de CaCO_3 est toujours supérieure à la dureté totale exprimée dans les mêmes dimensions, ce qui implique que la dureté carbonatée est égale à la dureté totale puisque tous les ions calcium et magnésium peuvent être associés aux ions carbonates et bicarbonates. Donc, si nous étions puristes, $\text{KH} = \text{GH} < \text{Alcalinité}$.

Notons au passage qu'en France, le KH s'exprime en degré français, °f, et est désigné par l'appellation **TAC**. Pour convertir le TAC en degré allemand, dH, il faut multiplier le TAC par 0,56. De même, le GH exprimé en degré français est désigné par l'appellation **TH**. Pour convertir le TAC en degré allemand, dH, il faut aussi multiplier le TH par 0,56.

Notions avancées de chimie des eaux naturelles

Avant de continuer et de parler de la composition des eaux des grands lacs africains, nous vous invitons à explorer quelques notions avancées de chimie afin de mieux saisir l'essentiel des calculs utilisés afin de caractériser ces eaux.

Dans un aquarium, il existe un équilibre entre le gaz carbonique dissous, CO_2aq et les espèces HCO_3^- et CO_3^{-2} . En fait, il y a un équilibre entre le CO_2aq et l'acide carbonique, H_2CO_3 , mais ce dernier est très peu présent sous cette forme et la majorité du gaz carbonique se retrouve sous forme de CO_2aq . Certains représentent ces deux formes sous l'appellation H_2CO_3^* .

Il est possible de représenter les équilibres chimiques présents dans l'aquarium sous forme d'équation. Dans ces équations la concentration des espèces est directement reliée à une **constante d'équilibre, K**. Cette constante ne varie qu'en fonction de la température et de l'activité ionique des espèces chimiques. L'activité ionique, quant à elle, définit la réactivité ou l'activité réelle des substances chimiques, ce qui dépend de la concentration et de la force ionique du milieu. Ainsi, à 25 °C, nous avons :

$$\text{Équ. 4} \quad K_{a1} = \frac{[\text{H}_2\text{CO}_3^*]}{[\text{H}^+][\text{HCO}_3^-]} = 4,45 \times 10^{-7}$$

$$\text{Équ. 5} \quad K_{a2} = \frac{[\text{H}^+][\text{CO}_3^{-2}]}{[\text{HCO}_3^-]} = 4,69 \times 10^{-11}$$

Si nous ajoutons du CO_2g dans l'eau, les équilibres doivent être respectés et ainsi la concentration des différentes espèces HCO_3^- , CO_3^{-2} et H_2CO_3^* varieront en conséquence. La somme totale de ces espèces est invariable et se nomme **TCO₂**, à moins qu'il y est modification extérieure au milieu, comme l'ajout de sels ou de CO_2 .

Tillmans et Heublein (1912) ont développé une équation reliant l'alcalinité et le CO_2 dissous dans l'eau au pH. Ils y sont arrivés en utilisant les définitions des équilibres montrés par les équations 4 et 5 et la définition de l'alcalinité pour un pH inférieur à 8,3. Sous ce pH, l'alcalinité est formée principalement d'ions HCO_3^- . La formule est la suivante :

$$\text{Équ. 6} \quad pH = 7 - \text{Log} \left(\frac{3}{0,61} \right) \times \frac{[CO_2aq]}{[Alcalinité]}$$

Les aquariophiles connaissent une autre forme de cette formule, reliant cette fois le CO₂ au pH et au KH :

$$\text{Équ. 7} \quad CO_2 = 3 \times KH \times 10^{(7-pH)}$$

Dans cette dernière équation, le CO₂ est exprimé en ppm et le KH en dH. Mais attention, cette forme de l'équation laisse sous-entendre que la modification volontaire du pH induit un taux de CO₂ tel que désiré, ce qui est complètement faux. C'est le pH qui s'ajuste à un taux de CO₂ et un KH, connus et mesurés.

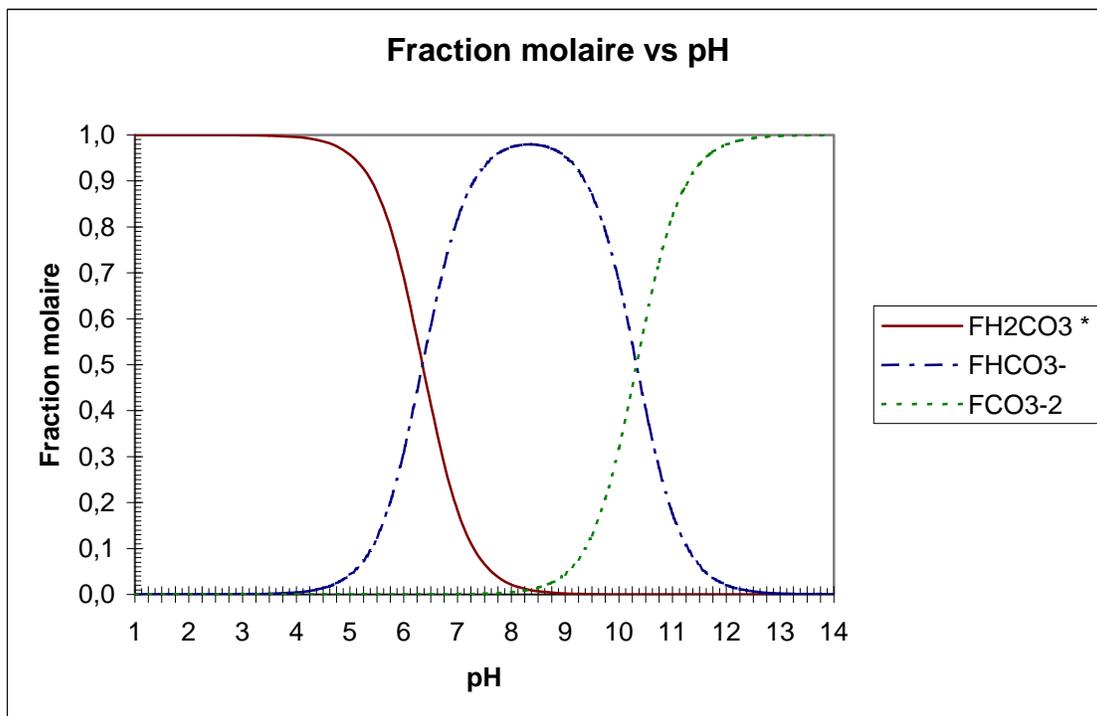
Lorsque nous sommes à l'équilibre, si nous mesurons la concentration de HCO₃⁻ et CO₃⁻², il est possible de calculer le pH selon l'équation suivante, mais attention, nous devons être à l'équilibre, il ne suffit pas d'ajouter une quantité x et y de HCO₃⁻ et de CO₃⁻² puis d'introduire ces quantités dans la formule :

$$\text{Équ. 8} \quad pH = 10,33 + \text{Log} \left(\frac{[CO_3^{-2}]}{[HCO_3^{-}]}\right)$$

Les concentrations utilisées dans l'équation 8 doivent être en moles/l.

Nous pouvons caractériser encore davantage notre eau à l'équilibre en calculant la **fraction molaire, α**, des espèces HCO₃⁻, CO₃⁻² et H₂CO₃*. Cette fraction dépend du pH, tel que l'illustre le graphique 1 :

Graphique 1 Fraction molaire des espèces HCO₃⁻, CO₃⁻² et H₂CO₃*, dans une eau en équilibre.



Près de pH 8,3, la forme carbonate débute son apparition alors qu'il y a disparition presque complète du CO₂. Dans un Bac africain, la prédominance des ions HCO₃⁻ est importante. Cependant, dans un bac du type Tanganyika, les ions CO₃⁻² ne sont plus négligeables.

Sous forme d'équations, les fractions molaires s'expriment ainsi :

$$\text{Équ. 9 } \alpha H_2CO_3 = \frac{[H^+]^2}{([H^+]^2 + [H^+]K_{a1} + K_{a1}K_{a2})}$$

$$\text{Équ. 10 } \alpha H_2CO_3 = \frac{[H_2CO_3]}{TCO_2}$$

$$\text{Équ. 11 } \alpha HCO_3^- = \frac{[H^+]K_{a1}}{([H^+]^2 + [H^+]K_{a1} + K_{a1}K_{a2})}$$

$$\text{Équ. 12 } \alpha HCO_3^- = \frac{[HCO_3^-]}{TCO_2}$$

$$\text{Équ. 13 } \alpha CO_3^{-2} = \frac{K_{a1}K_{a2}}{([H^+]^2 + [H^+]K_{a1} + K_{a1}K_{a2})}$$

$$\text{Équ. 14 } \alpha CO_3^{-2} = \frac{[CO_3^{-2}]}{TCO_2}$$

Il est aussi possible de déduire une des trois fractions à partir des deux autres, puisque leur somme doit être égale à 1. Nous pouvons aussi retrouver le TCO_2 et les concentrations de HCO_3^- et CO_3^{-2} avec la relation de Revelle et ainsi, dans un système d'équations dont il existe plusieurs inconnues, réussir à retrouver les fractions des différentes espèces. L'équation de Revelle s'exprime ainsi, avec le TCO_2 en mole/l et l'alcalinité en équ/l :

$$\text{Équ. 15 } TCO_2 = [\text{Alcalinité}] \times \frac{[H^+] / K_{a1} + K_{a2} / [H^+] + 1}{1 + 2K_{a2} / [H^+]}$$

Un autre facteur à considérer est le pH de saturation de nos sels de calcium et de magnésium. Il s'agit du pH requis pour obtenir la saturation de notre milieu aqueux en $CaCO_3$ et $MgCO_3$. Au-delà de ce pH, ces sels seront présents sous forme solide. En deçà de ce pH, ces sels existent sous forme ionique et dissous. Le pH de saturation provient des équilibres existant entre le Ca^{+2} ou le Mg^{+2} avec le CO_3^{-2} , ainsi que le CO_3^{-2} et le HCO_3^- . La formule générale, sous un pH inférieur à 8,33 est :

$$\text{Équ. 16 } pH_s = (pK_{a2} - pK_{sp}) + pIon + pAlcalinité$$

Soit,

$$\text{Équ. 17 } pH_{sCa^{+2}} = 2,18 - \text{Log } [Ca^{+2}] - \text{Log } [HCO_3^-]$$

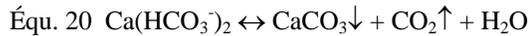
$$\text{Équ. 18 } pH_{sMg^{+2}} = 5,74 - \text{Log } [Mg^{+2}] - \text{Log } [HCO_3^-]$$

Comme le pH est possiblement autour ou au-dessus de 8,33 pour nos bacs africains, il est difficile d'utiliser ces formules avec rigueur, notamment pour le calcium dont le pH de saturation est souvent voisin de ce pH. Cependant, elles nous donnent une indication du seuil ou la saturation de nos sels peut survenir. Ainsi donc, l'apparition de fines particules blanches dans nos bacs peut être diagnostiquée plus aisément. Mais pour les aquariophiles chevronnés, voici l'équation générale (Ca^{+2} peut être intervertit avec Mg^{+2}) :

$$\text{Équ. 19 } pH_s = (pK_{a2} - pK_{sp}) + pCa^{+2} + p \left[\text{Alcalinité} + [H^+] - \frac{K_w}{[H^+]} \right] + \text{Log} \left[1 + \frac{2K_s}{[H^+]} \right]$$

Pour un pH_s situé entre 6,5 et 9,5, l'équation 19 se simplifie pour donner l'équation 16.

L'importance du Ca^{+2} ou du Mg^{+2} pour l'obtention d'un tampon bien équilibré et le maintien d'un pH stable est reliée à la relation existant entre le taux de CO_2aq , la quantité de CaCO_3 ou de MgCO_3 et la production de $\text{Ca}(\text{HCO}_3^-)_2$ et $\text{Mg}(\text{HCO}_3^-)_2$, comme l'illustre l'exemple suivant :



Une augmentation du CO_2 provoquera la dissolution du CaCO_3 et/ou MgCO_3 et la production de bicarbonate. La production de bicarbonate accroît la capacité tampon et ce phénomène se poursuit tant qu'il y a des sels carbonatés solides. La venue de CO_2 dans un bac n'a alors que peu d'effet sur le pH dans ces circonstances. La constante d'équilibre pour l'équation 20 et son équivalent pour le magnésium correspond à ce que l'on appelle le produit de solubilité, K_{sp} . Les $\text{p}K_{sp}$ pour le carbonate de calcium et le carbonate de magnésium sont respectivement de $0,87 \times 10^{-8}$ et $2,6 \times 10^{-5}$.

Les caractéristiques chimiques des lacs Malawi et Tanganyika

Les sources d'information ayant été utilisées pour déduire les informations qui vont suivre sont indiquées dans la bibliographie. Nous nous référons au programme Excel fourni avec cet article en désignant la feuille de travail ayant servi aux calculs et à la présentation des résultats. Il faut mentionner que plusieurs calculs utilisent les informations retrouvées sur la feuille « Data », comme les poids moléculaires, les densités, les équivalences meq et mg...

Les données pour le lac Tanganyika sont assez bien connues et distribuées sur le web. On retrouve les analyses de Talling et aussi de Brichard, complétées par d'autres données de P. Burnel entre autres. Les résultats pour Brichard ont été transformés dans la feuille « Analyses Brichard » de manière à pouvoir comparer les résultats des différents auteurs. Pour le lac Malawi, c'est moins évident, la principale source d'information demeure Talling avec Watson. En général, sur le web, les données sont redondantes et se ramènent au premier auteur. Nous avons eu aussi la chance de recevoir une communication de M. Mangaliso Gondwe (Limnology Research Officer SADC/GEF Project) de Malawi (référence 5).

Le tableau 2 présente nos résultats suite à l'analyse des données recueillies, dans la feuille de travail « Composition du web ». Sous la rubrique « Source » du tableau, les numéros font références à la bibliographie.

Tableau 2 Composition et caractéristiques chimiques des lacs Malawi et Tanganyika

Source	1	2	3	5	1	2	3	4
Lac	Malawi				Tanganyika			
pH	7,8-8,5	8,5-8,6			8,5-9,2	8,66-9,06		
$\mu\text{S/cm}$	200-300	210-220			600-620	606-620		
TAC degré f	10-14				30			
TH degré f	7-10				12-19			
TS mg/l						460		
Somme Cation meq/l		2,45				7,3-7,46		
Somme Anion meq/l		2,5-2,59				7,25-7,71		
Na mg/l		21	12,9-13,5	18,2-20,10		57-63,6	57-64,2	59,6958
K mg/l		6,4	4,2	5,25-6,40		18-35,5	18-35,5	32,931
Ca mg/l		16,4-19,8	16,4-20,7	17,2-20,3		9,2-17,6	9,2-17,6	12,0152
Mg mg/l		4,7-8,8	7,3-8,8	6,8-7,85		39,2-43,3	41,6-43,7	41,5184
$\text{HCO}_3 + \text{CO}_3$, meq/l		2,36-2,58	1,9-2,6			6,02-6,81	6,0-7,0	6,4839
Cl mg/l		3,57-4,3	3,6-4,3			20,9-36,6	20,9-28,3	28,2543
SO_4 mg/l		5,5	11,1-16,7			7,2-15,3	7,2-15,3	5,1341
SiO_2 mg/l dissous		1,1-4				0,3-6,6		
$\text{PO}_4\text{-P}$ $\mu\text{g/l}$		<7-30				7		

Il faut comprendre que le lieu de l'échantillonnage ayant servi au analyse de l'eau est très variable et peut influencer les résultats. La proximité d'un affluent peut diminuer la dureté et le pH par exemple.

Dans un deuxième temps nous avons effectué une analyse plus poussée basée sur la moyenne des résultats du tableau 2. Les notes numériques entre parenthèse correspondent à une information reliée aux calculs effectués et ces notes sont données ici, suite au tableau 3. La feuille de calcul de référence est « Analyse du web » et nous vous invitons à la consulter pour les quelques particularités de calculs non énoncées dans les notes.

Tableau 3 Analyses chimiques avancées des lacs Malawi et Tanganyika

Source	1	2	3	5	1	2	3	4
Lac	Malawi				Tanganyika			
GH, dH (1)	4,8	4,1	4,5	4,3	8,7	11,4	11,7	11,3
GH, ppm CaCO ₃ (2)	84,7	72,9	79,4	76,9	154,5	203,2	208,9	200,8
KH, dH (3)	6,7	6,9	6,3	0,0	16,8	18,0	18,3	18,2
KH, ppm CaCO ₃ (2)	119,6	123,5	112,5	0	299,0	321	325	324,20
[H ⁺], moles/l (4)	7,0795E-09	2,8184E-09			1,4125E-09	1,3804E-09		
[OH ⁻], moles/l (5)	1,4125E-06	3,5481E-06			7,0795E-06	7,2444E-06		
Alcalinité, meq/l (6)		2,47	2,25			6,42	6,5	6,48
Alcalinité, ppm CaCO ₃ (7)		123,5	112,5			321	325	324,20
Alcalinité, mmoles/l (6a)		2,43				6,22		
Dureté calcique, ppm CaCO ₃ (8)		45,2	46,3	46,8		33,4	33,4	30,0
Dureté magnésique, ppm CaCO ₃ (9)		27,8	33,1	30,2		169,7	175,5	170,8
Dureté total, ppm CaCO ₃ (10)		72,9	79,4	76,9	154,5	203,2	208,9	200,8
Fraction molaire H ₂ CO ₃ * (11)	0,0156	0,0062			0,0031	0,0030		
Fraction molaire HCO ₃ ⁻ (12)	0,9780	0,9775			0,9649	0,9642		
Fraction molaire CO ₃ ⁻² (13)	0,0065	0,0163			0,0320	0,0328		
Total CO ₂ aq, mmoles/l (14)		2,4454				6,2344		
H ₂ CO ₃ *, meq/l (15)		0,0151				0,0186		
CO ₂ , ppm (15a)		0,6663				0,8207		
HCO ₃ ⁻ , meq/l (16)		2,3870				6,0047		
CO ₃ ⁻² , meq/l (17)		0,0794				0,4080		
H ₂ CO ₃ *, ppm CaCO ₃		0,7570				0,9324		
HCO ₃ ⁻ , ppm CaCO ₃		119,3506				300,2362		
CO ₃ ⁻² , ppm CaCO ₃		3,9722				20,4017		
pH calculé (18)		8,55				8,86		
pHs Ca+2 (19)		8,14				7,86		
pHs Mg+2 (19a)		11,91				10,72		
Na ⁺ meq/l		0,9135	0,5742	0,8330		2,6231	2,6361	2,5968
K ⁺ meq/l		0,1637	0,1074	0,1491		0,6843	0,6843	0,8424
Ca+2 meq/l		0,9032	0,9256	0,9356		0,6687	0,6687	0,5996
Mg+2 meq/l		0,5555	0,6624	0,6032		3,3945	3,5097	3,4165
Cl ⁻ meq/l		0,1111	0,1114			0,8110	0,6940	0,7971
SO ₄ ⁻² meq/l		0,1146	0,2895			0,2343	0,2343	0,1069
Somme anion calculé, meq/l		2,6957	2,6510			7,4654	7,4283	7,3879
Somme cation calculé, meq/l		2,5359	2,2697			7,3704	7,4987	7,4552
Ratio Ca+2/Mg+2 (de meq/l)		1,63	1,40	1,55		0,20	0,19	0,18
Ratio Na ⁺ /K ⁺ (de meq/l)		5,58	5,34	5,59		3,83	3,85	3,08
Ratio HCO ₃ ⁻ /CO ₃ ⁻ (de moles/l)		60,09				29,43		
Ratio HCO ₃ ⁻ /CO ₃ ⁻ (de meq/l)		30,05				14,72		

Note:

- 1- $\text{GH} = 0,56 \times \text{TH}$, ou la somme de la dureté Ca^{+2} et Mg^{+2} exprimé en ppm CaCO_3 divisée par 17,8
- 2- $\text{ppm CaCO}_3 = \text{dH} \times 17,8$
- 3- $\text{KH} = 0,56 \times \text{TAC}$, ou l'alcalinité en ppm CaCO_3 divisée par 17,8
- 4- $\text{pH} = -\text{Log} [\text{H}^+]$, d'où $10^{-\text{pH}} = [\text{H}^+]$
- 5- $\text{pH} + \text{pOH} = 14$, alors $14 - \text{pH} = \text{pOH}$ et $10^{-\text{pOH}} = [\text{OH}^-]$
- 6- Alcalinité, $\text{meq/l} = [\text{HCO}_3^-] + [\text{CO}_3^{2-}] + [\text{OH}^-] - [\text{H}^+]$, avec les concentrations utilisées en meq/l
- 6a- Alcalinité, $\text{mmoles/l} = [\text{HCO}_3^-] + 0,5[\text{CO}_3^{2-}] + [\text{OH}^-] - [\text{H}^+]$, avec les concentrations utilisées en meq/l
- 7- Alcalinité, $\text{ppm CaCO}_3 = \text{Alcalinité en meq/l} \times 50$
- 8- Ca^{+2} , $\text{meq/l} = \text{mg/l} \times 0,04990$ et Ca^{+2} , $\text{meq/l} \times 50 = \text{ppm CaCO}_3$
- 9- Mg^{+2} , $\text{meq/l} = \text{mg/l} \times 0,08229$ et Mg^{+2} , $\text{meq/l} \times 50 = \text{ppm CaCO}_3$
- 10- Dureté calcique + dureté magnésique, en ppm CaCO_3
- 11- H_2CO_3^* comprend CO_2aq dissous et H_2CO_3 . Ce dernier est négligeable devant CO_2aq

$$\text{Fraction H}_2\text{CO}_3^* = [\text{H}^+]^2 / ([\text{H}^+]^2 + [\text{H}^+] \times \text{K}_{a1} + \text{K}_{a1} \times \text{K}_{a2})$$

$$\text{K}_{a1} = [\text{H}^+][\text{HCO}_3^-] / [\text{H}_2\text{CO}_3^*], \text{ soit } 4,45 \times 10^{-7}$$

$$\text{K}_{a2} = [\text{H}^+][\text{CO}_3^{2-}] / [\text{HCO}_3^-], \text{ soit } 4,69 \times 10^{-11}$$
- 12- Fraction $\text{HCO}_3^- = [\text{H}^+] \times \text{K}_{a1} / ([\text{H}^+]^2 + [\text{H}^+] \times \text{K}_{a1} + \text{K}_{a1} \times \text{K}_{a2})$
- 13- Fraction $\text{CO}_3^{2-} = \text{K}_{a1} \times \text{K}_{a2} / ([\text{H}^+]^2 + [\text{H}^+] \times \text{K}_{a1} + \text{K}_{a1} \times \text{K}_{a2})$
- 14- Relation de Revelle : TCO_2aq , en $\text{mmole/l} = \text{Alcalinité, eq/l} \times ((([\text{H}^+]/\text{K}_{a1}) + (\text{K}_{a2}/[\text{H}^+]) + 1) / ((1 + (2\text{K}_{a2}/[\text{H}^+])) \times 1000$
- 15- $[\text{H}_2\text{CO}_3^*] = \text{TCO}_2\text{aq} \times \text{Fraction H}_2\text{CO}_3^*$
- 15a- $\text{ppm CO}_2 = \text{mmoles CO}_2^* \times 44,0098$ ou approx. $\text{ppm CO}_2 = \text{mmoles H}_2\text{CO}_3^* \times 44,0098$
- 16- $[\text{HCO}_3^-] = (\text{Alcalinité} - [\text{OH}^-] + [\text{H}^+]) / (1 + (2\text{K}_{a2}/[\text{H}^+]))$, tout est en eq/l , ou $[\text{HCO}_3^-] = \text{TCO}_2\text{aq} \times \text{Fraction HCO}_3^-$
- 17- $[\text{CO}_3^{2-}] = (\text{Alcalinité} - [\text{OH}^-] + [\text{H}^+]) / (([\text{H}^+]/2\text{K}_{a2}) + 1)$, tout est en eq/l , ou $[\text{CO}_3^{2-}] = \text{TCO}_2\text{aq} \times \text{Fraction CO}_3^{2-}$
- 18- $\text{pH} = 10,33 + \text{Log} (\text{CO}_3^{2-}/\text{HCO}_3^-)$, tout en moles/l
- 19- $\text{pHs Ca}^{+2} = 2,18 - \text{Log}[\text{Ca}^{+2}] - \text{Log} [\text{Alcalinité}]$, tout en moles/l
- 19a- $\text{pHs Mg}^{+2} = 5,74 - \text{Log}[\text{Mg}^{+2}] - \text{Log}[\text{Alcalinité}]$, tout en moles/l

Nous pouvons remarquer quelques faits très intéressants en jetant un coup d'œil au tableau 3 :

1. La dureté du lac Malawi est inférieure à ce qui est normalement considéré sur plusieurs sites web.
2. La dureté calcique est supérieure à la dureté magnésique pour le lac Malawi et c'est le contraire pour le lac Tanganyika. En aquariophilie cela a son importance, car plusieurs préfèrent une dureté magnésique supérieure à la dureté calcique pour obtenir un ratio de 4/1 et 5/1 respectivement pour les lacs Malawi et Tanganyika afin de mieux respecter le métabolisme des plantes et des poissons. Notons au passage que pour l'eau salée ce ratio est identique à celui du lac Tanganyika.
3. Le KH est supérieur au GH si le KH est égale à l'alcalinité.
4. L'alcalinité du Tanganyika se rapproche de celle des bacs d'eau salée.
5. Le taux de CO_2 est faible.
6. Le pH de saturation pour le Mg^{+2} est toujours supérieur au pH des lacs, donc pas de problèmes de précipitation pour celui-ci.
7. Le pH de saturation pour le Ca^{+2} est légèrement inférieur au pH des lacs, donc présence de roches calcaires.
8. Le ratio Na^+/K^+ est différent dans les deux lacs. Il est de 5,6 pour le lac Malawi et de 3,8 pour le lac Tanganyika.

La simulation des eaux des lacs Malawi et Tanganyika

Dans le fichier Excel il existe trois simulations :

1. Feuille « Simulation » utilisant l'eau de l'aqueduc de Trois-Rivières, Qc.
2. Feuille « Simulation (2) » utilisant de l'eau osmosée.
3. Feuille « Simulation (3) » utilisant l'eau de l'aqueduc de Québec, Qc.

Dans ces simulations on retrouve les caractéristiques chimiques moyennes des lacs, celle de l'eau ajoutée dans le bac, les valeurs désirées par la simulation (identiques aux valeurs moyennes) et les valeurs obtenues

par la simulation. Nous avons basé la simulation sur l'utilisation des produits chimiques suivants (dont les caractéristiques se retrouvent dans la feuille « Data »):

1. $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$
2. NaHCO_3
3. $\text{Na}_2\text{CO}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$
4. $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$

En rouge, nous devons mettre la quantité, en mg, de produit chimique à ajouter pour un litre d'eau, pour chacun des lacs. La méthode résumée pour l'obtention des résultats est la suivante :

Avec le pH du Lac (Malawi ou Tanganyika):

- 1- Calcul des fractions alpha pour HCO_3^- , CO_3^{2-} et H_2CO_3^*
- 2- Calcul du TCO_2 (bilan de masse des composantes HCO_3^- , CO_3^{2-} et H_2CO_3^*)
- 3- Calcul des concentrations HCO_3^- , CO_3^{2-} et H_2CO_3^* .

Avec l'eau à ajouter (ville ou osmosée) et son pH:

- 1- Même démarche que le lac.

Avec la simulation (ne pas confondre avec optimisation, la vraie simulation est dans les colonnes E et F)

- 1- Calcul du TCO_2 en tenant compte de l'eau ajoutée et des ajouts chimiques.
- 2- Déduction des fractions alpha.
- 3- Calcul de la fraction alpha CO_2 avec la formule 1- (sommées des fractions HCO_3^- et CO_3^{2-}).
- 4- Calcul du CO_2 à partir du TCO_2 et de sa fraction.
- 5- Calcul HCO_3^- et CO_3^{2-} à partir des ajouts (eau et sels).
- 6- Calcul du pH en tenant compte du HCO_3^- et CO_3^{2-} à l'équilibre.

Nous voyons qu'il est impossible de faire correspondre les valeurs de H_2CO_3^* et HCO_3^- de la simulation avec les valeurs du lacs. La formation de CO_2 trouvée devrait se rééquilibrer afin d'obtenir la valeur des lacs, après le repos de l'eau avec ses sels pour au moins 24 heures, ainsi qu'une bonne agitation et aération dans le bac. Si le rééquilibrage ne se fait pas, le pH final sera différent et on peut le déduire par itération en utilisant les colonnes « Optimisation » G22:G36 et H22:H36. C'est à dire que le pH trouvé par calcul précédemment va servir pour recalculer les fractions alpha. Ces fractions sont différentes de la simulation car elles ne sont pas déduites mais calculer directement à partir du pH et non pas des ajouts chimiques. Nous pensons qu'il faut faire correspondre ces colonnes avec celles de la simulation. Par exemple, si nous visons un pH de 8,3 par exemple pour le Malawi. On voit que le CO_3^{2-} est similaire dans la simulation et l'optimisation. Cependant, le HCO_3^- est plus faible et le H_2CO_3^* est plus élevé dans la simulation, ce qui donne un ppm de CO_2 de 8 environ. Si le pH est encore modifié suite au rééquilibrage du CO_2aq , alors il faut trouver le moyen de faire correspondre les colonnes de simulation et d'optimisation, ce qui équivaut à une routine d'itération jusqu'à l'atteinte de valeurs cible, puisque le pH changera en E44 et F44 et que cette valeur est reportée en G22 et H22. Si nous faisons cela, les valeurs suivantes, en mg, sont trouvées pour le lac Malawi :

	Valeurs simulées	Valeurs optimisées
NaHCO_3	180	500
$\text{Na}_2\text{CO}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$	2.75	2.5
pH	8.31	7.85
Alcalinité, ppm	118	308

Le programme est conçu pour que l'utilisateur puisse modifier les caractéristiques de l'eau ajoutée. Cependant, seul les cellules déjà remplies peuvent être modifiées sous peine d'erreur d'adressage. Ainsi, si nous connaissons le pH, le GH, la dureté calcique et la dureté magnésique ainsi que le KH nous pouvons modifier les champs ou cellules appropriés de D3 :D20 des feuilles de simulation. Les tests commerciaux

aquariophiles, notamment ceux utilisés en milieu marin, sont adéquats pour les bacs africains dont le pH oscille autour de 8,3, et permettent entre autre de mesurer séparément la dureté calcique et magnésique. Voici comment procéder :

1. Mettre le pH mesuré dans la cellule D3.
2. Connaissant la dureté calcique et le GH, calculer la dureté magnésique, ou mieux, la mesurer. La dureté calcique en ppm CaCO_3 divisé par 2,4968 donne le Ca^{+2} en ppm à mettre dans la cellule D14. Le GH en ppm CaCO_3 moins la dureté calcique en ppm CaCO_3 donne la dureté magnésique en ppm de CaCO_3 . Diviser la dureté magnésique en ppm CaCO_3 par 4,1174 donne la quantité de Mg^{+2} en ppm, cette valeur doit être mise dans la cellule D15. Note : les degrés allemands, dH, sont convertis en ppm CaCO_3 en multipliant par 17,8. Plusieurs tests en eau salée donne le Ca^{+2} et le Mg^{+2} en ppm directement. Si le Mg^{+2} en ppm n'est pas disponible, alors $\text{Mg}^{+2} = [\text{GH} - (\text{Ca}^{+2} \times 2,4968)] / 4,1174$.
3. Si vous connaissez l'alcalinité en meq/l, mettre sa valeur dans la cellule D16. Si le KH est mesuré en ppm CaCO_3 (voir note sur degré allemand ci-dessus), diviser cette valeur par 50 donne le nombre de meq/l de CaCO_3 ou, ce qui revient au même (puisque la nature chimique en meq/l n'importe pas), le nombre de meq/l d'alcalinité. Cette dernière valeur est à mettre dans la cellule D16.

Les tableaux 4, 5 et 6 présentes les valeurs moyennes des caractéristiques chimiques pour les lacs, puis les valeurs des caractéristiques chimiques pour l'eau de Trois-Rivières, l'eau osmosée et l'eau de la ville de Québec. Les tableaux 7, 8 et 9 présentes nos résultats de simulation pour l'eau de Trois-Rivières, l'eau osmosée et l'eau de la ville de Québec, de même que respectivement les quantités de produits chimiques ajoutés sont présentées dans les tableaux 10 à 12.

Tableau 4 Simulation avec l'eau de Trois-Rivières, Qc

Lac	Valeurs moyennes selon les différentes sources répertoriées			Valeurs désirées par simul.	
	Malawi	Tanganyika	T-R, Qc	Malawi	Tanganyika
pH	8,3	8,9	7,2	8,3	8,9
$\mu\text{S}/\text{cm}$	215	611	47,2	215	611
TAC degré f	12,0	30,0		12,0	30,0
TH degré f	8,5	15,5		8,5	15,5
KH degré dH (à partir du TAC)	6,7	16,8		6,7	16,8
GH degré dH (à partir du TH)	4,8	8,7		4,8	8,7
TS mg/l		460			460
Somme Cation meq/l	2,45	7,3800		2,45	7,3800
Somme Anion meq/l	2,55	7,4800		2,55	7,4800
Na mg/l	20,08	60,3		20,08	60,3
K mg/l	5,48	29,8		5,48	29,8
Ca mg/l	18,47	12,7	6,8	18,47	12,7
Mg mg/l	7,38	41,8	1,1	7,38	41,8
$\text{HCO}_3 + \text{CO}_3$, meq/l **	2,36	6,47	0,17	2,36	6,47
Cl mg/l	3,94	27,2		3,94	27,2
SO_4 mg/l	9,70	9,2		9,70	9,2
SiO_2 mg/l dissous	2,55	3,5		2,55	3,5
$\text{PO}_4\text{-P}$ $\mu\text{g}/\text{l}$	18,50	7,0	0,451	18,50	7,0

Tableau 5 Simulation avec l'eau osmosée

Valeurs moyennes selon les différentes sources répertoriées				Valeurs désirées par simul.	
Lac	Malawi	Tanganyika	Eau Osmosée	Malawi	Tanganyika
pH	8,3	8,9	7,2	8,3	8,9
µS/cm	215	611		215	611
TAC degré f	12,0	30,0		12,0	30,0
TH degré f	8,5	15,5		8,5	15,5
KH degré dH (à partir du TAC)	6,7	16,8		6,7	16,8
GH degré dH (à partir du TH)	4,8	8,7		4,8	8,7
TS mg/l		460			460
Somme Cation meq/l	2,45	7,3800		2,45	7,3800
Somme Anion meq/l	2,55	7,4800		2,55	7,4800
Na mg/l	20,08	60,3		20,08	60,3
K mg/l	5,48	29,8		5,48	29,8
Ca mg/l	18,47	12,7	0,0	18,47	12,7
Mg mg/l	7,38	41,8	0,0	7,38	41,8
HCO ₃ + CO ₃ , meq/l **	2,36	6,47	0,00	2,36	6,47
Cl mg/l	3,94	27,2		3,94	27,2
SO ₄ mg/l	9,70	9,2		9,70	9,2
SiO ₂ mg/l dissous	2,55	3,5		2,55	3,5
PO ₄ -P µg/l	18,50	7,0		18,50	7,0

Tableau 6 Simulation avec l'eau de la ville de Québec, Qc

Valeurs moyennes selon les différentes sources répertoriées				Valeurs désirées par simul.	
Lac	Malawi	Tanganyika	Québec, Qc	Malawi	Tanganyika
pH	8,3	8,9	7,1	8,3	8,9
µS/cm	215	611		215	611
TAC degré f	12,0	30,0		12,0	30,0
TH degré f	8,5	15,5		8,5	15,5
KH degré dH (à partir du TAC)	6,7	16,8		6,7	16,8
GH degré dH (à partir du TH)	4,8	8,7		4,8	8,7
TS mg/l		460			460
Somme Cation meq/l	2,45	7,3800		2,45	7,3800
Somme Anion meq/l	2,55	7,4800		2,55	7,4800
Na mg/l	20,08	60,3		20,08	60,3
K mg/l	5,48	29,8		5,48	29,8
Ca mg/l	18,47	12,7	23,23	18,47	12,7
Mg mg/l	7,38	41,8	4,86	7,38	41,8
HCO ₃ + CO ₃ , meq/l **	2,36	6,47	0,46	2,36	6,47
Cl mg/l	3,94	27,2		3,94	27,2
SO ₄ mg/l	9,70	9,2		9,70	9,2
SiO ₂ mg/l dissous	2,55	3,5		2,55	3,5
PO ₄ -P µg/l	18,50	7,0		18,50	7,0

Tableau 7 Simulation avec l'eau de Trois-Rivières, Qc

Lac	Résultats d'analyses			Valeurs obtenues par simul.	
	Malawi	Tanganyika	T-R, Qc	Malawi	Tanganyika
GH, dH (note 1)	4,3	11,4	1,2	4,3	11,3
GH, ppm CaCO3 (note 2)	76,4	203,7	21,3	75,9	200,8
KH, dH (note 3)	6,6	18,2	0,5	6,6	18,5
KH, ppm CaCO3 (note 2)	118	323,5	8,7	118,1	329,7
[H+], moles/l (note 4)	5,01187E-09	1,41254E-09	6,30957E-08	4,85613E-09	1,43373E-09
[OH-], moles/l (note 5)	1,99526E-06	7,07946E-06	1,58489E-07	2,05925E-06	6,97482E-06
Alcalinité, meq/l (note 6)	2,36	6,47	0,17	2,36	6,59
Alcalinité, ppm CaCO3 (note 7)	118,0	323,5	8,7	118,1	329,7
Dureté calcique, ppm CaCO3 (note 8)	46,1	31,7	17,0	45,2	24,0
Dureté magnésique, ppm CaCO3 (note 9)	30,4	172,0	4,4	30,7	176,8
Dureté totale, ppm CaCO3 (note 10)	76,4	203,7	21,3	75,9	200,8
Fraction molaire H2CO3* (note 11)	0,0110	0,0031	0,1241	0,0782	0,0301
Fraction molaire HCO3- (note 12)	0,9798	0,9649	0,8752	0,9130	0,9392
Fraction molaire CO3-2 (note 13)	0,0092	0,0320	0,0007	0,0088	0,0306
Total CO2 aq, mmoles/l (note 14)	2,3644	6,2878	0,1985	2,5369	6,5846
H2CO3*, meq/l (note 15)	0,0261	0,0193	0,0246	0,1985	0,1985
CO2, ppm (note 15a)	1,1483	0,8476	1,0842	8,7362	8,7362
HCO3-, meq/l (note 16)	2,3147	6,0605	0,1736	2,3161	6,1844
CO3-2, meq/l (note 17)	0,0433	0,4024	0,0003	0,0446	0,4035
H2CO3*, ppm CaCO3	1,3046	0,9629	1,2317	9,9253	9,9253
HCO3-, ppm CaCO3	115,7345	303,0237	8,6823	115,8041	309,2184
CO3-2, ppm CaCO3	2,1660	20,1224	0,0129	2,2308	20,1757
pH calculé (note 18)	8,30	8,85	7,20	8,31	8,84
pHs Ca+2 (note 19)	8,15	7,90	9,71	8,16	8,01
pHs Mg+2 (note 19a)	11,89	10,72	13,86	11,89	10,70
Na+ meq/l	0,8735	2,6231		2,1873	6,4155
K+ meq/l	0,1402	0,7633		0,1476	0,7780
Ca+2 meq/l	0,9217	0,6342	0,3393	0,9034	0,4803
Mg+2 meq/l	0,6073	3,4405	0,0872	0,6147	3,5359
Cl- meq/l	0,1111	0,7673		0,6918	0,9141
SO4-2 meq/l	0,2021	0,1918		0,5275	3,4493
Somme anion, meq/l	2,6732	7,4292		3,5821	10,9582
Somme cation, meq/l	2,5426	7,4611		3,8530	11,2098
Ratio Ca+2/Mg+2 (de meq/l)	1,52	0,18	3,89	1,47	0,14
Ratio Na+/K+ (de meq/l)	6,23	3,44		14,82	8,25
Ratio HCO3-/CO3- (de moles/l)	106,86	30,12	1345,32	103,82	30,65
Ratio HCO3-/CO3- (de meq/l)	53,43	15,06	672,66	51,91	15,33
Ratio HCO3-/CO3- (de moles/l) du tampon				96,60	29,81
Ratio HCO3-/CO3- (de meq/l) du tampon				48,30	14,91

Tableau 8 Simulation avec l'eau osmosée

Lac	Résultats d'analyses			Valeurs obtenues par simul.	
	Malawi	Tanganyika	T-R, Qc	Malawi	Tanganyika
GH, dH (note 1)	4,3	11,4	0,0	4,4	11,5
GH, ppm CaCO3 (note 2)	76,4	203,7	0,0	78,3	204,2
KH, dH (note 3)	6,6	18,2	0,0	6,5	18,0
KH, ppm CaCO3 (note 2)	118	323,5	0	115,4	321,1
[H+], moles/l (note 4)	5,01187E-09	1,41254E-09	6,30957E-08	4,76902E-09	1,39434E-09
[OH-], moles/l (note 5)	1,99526E-06	7,07946E-06	1,58489E-07	2,09687E-06	7,17184E-06
Alcalinité, meq/l (note 6)	2,36	6,47	0,00	2,31	6,42
Alcalinité, ppm CaCO3 (note 7)	118,0	323,5	0	115,4	321,1
Dureté calcique, ppm CaCO3 (note 8)	46,1	31,7	0,0	45,8	31,7
Dureté magnésique, ppm CaCO3 (note 9)	30,4	172,0	0,0	32,5	172,4
Dureté totale, ppm CaCO3 (note 10)	76,4	203,7	0,0	78,3	204,2
Fraction molaire H2CO3* (note 11)	0,0110	0,0031	0,1241	0,0000	0,0000
Fraction molaire HCO3- (note 12)	0,9798	0,9649	0,8752	0,9903	0,9675
Fraction molaire CO3-2 (note 13)	0,0092	0,0320	0,0007	0,0097	0,0325
Total CO2 aq, mmoles/l (note 14)	2,3644	6,2878	0,0000	2,2835	6,2123
H2CO3*, meq/l (note 15)	0,0261	0,0193	0,0000	0,0000	0,0000
CO2, ppm (note 15a)	1,1483	0,8476	0,0000	0,0000	0,0000
HCO3-, meq/l (note 16)	2,3147	6,0605	-0,0001	2,2614	6,0106
CO3-2, meq/l (note 17)	0,0433	0,4024	0,0000	0,0444	0,4033
H2CO3*, ppm CaCO3	1,3046	0,9629	0,0000	0,0000	0,0000
HCO3-, ppm CaCO3	115,7345	303,0237	-0,0048	113,0682	300,5313
CO3-2, ppm CaCO3	2,1660	20,1224	0,0000	2,2179	20,1628
pH calculé (note 18)	8,30	8,85	7,20	8,32	8,86
pHs Ca+2 (note 19)	8,15	7,90	#NOMBRE!	8,16	7,90
pHs Mg+2 (note 19a)	11,89	10,72	#NOMBRE!	11,87	10,72
Na+ meq/l	0,8735	2,6231		2,3064	6,4155
K+ meq/l	0,1402	0,7633		0,1476	0,7780
Ca+2 meq/l	0,9217	0,6342	0,0000	0,9167	0,6346
Mg+2 meq/l	0,6073	3,4405	0,0000	0,6492	3,4487
Cl- meq/l	0,1111	0,7673		1,0319	1,3902
SO4-2 meq/l	0,2021	0,1918		0,6493	3,4493
Somme anion, meq/l	2,6732	7,4292		3,9890	11,2606
Somme cation, meq/l	2,5426	7,4611		4,0198	11,2769
Ratio Ca+2/Mg+2 (de meq/l)	1,52	0,18	#DIV/0!	1,41	0,18
Ratio Na+/K+ (de meq/l)	6,23	3,44		15,63	8,25
Ratio HCO3-/CO3- (de moles/l)	106,86	30,12	1345,32	101,96	29,81
Ratio HCO3-/CO3- (de meq/l)	53,43	15,06	672,66	50,98	14,91
Ratio HCO3-/CO3- (de moles/l) du tampon				101,96	29,81
Ratio HCO3-/CO3- (de meq/l) du tampon				50,98	14,91

Tableau 9 Simulation avec l'eau de la ville de Québec, Qc

Lac	Résultats d'analyses			Valeurs obtenues par simul.	
	Malawi	Tanganyika	T-R, Qc	Malawi	Tanganyika
GH, dH (note 1)	4,3	11,4	4,4	4,4	11,4
GH, ppm CaCO3 (note 2)	76,4	203,7	78,0	78,0	203,7
KH, dH (note 3)	6,6	18,2	1,3	6,6	18,2
KH, ppm CaCO3 (note 2)	118	323,5	23	117,4	323,7
[H+], moles/l (note 4)	5,01187E-09	1,41254E-09	7,94328E-08	5,27451E-09	1,60902E-09
[OH-], moles/l (note 5)	1,99526E-06	7,07946E-06	1,25893E-07	1,89591E-06	6,21495E-06
Alcalinité, meq/l (note 6)	2,36	6,47	0,46	2,35	6,47
Alcalinité, ppm CaCO3 (note 7)	118,0	323,5	23	117,4	323,7
Dureté calcique, ppm CaCO3 (note 8)	46,1	31,7	58,0	58,0	58,0
Dureté magnésique, ppm CaCO3 (note 9)	30,4	172,0	20,0	20,0	145,8
Dureté totale, ppm CaCO3 (note 10)	76,4	203,7	78,0	78,0	203,7
Fraction molaire H2CO3* (note 11)	0,0110	0,0031	0,1514	0,1890	0,0793
Fraction molaire HCO3- (note 12)	0,9798	0,9649	0,8481	0,8039	0,8947
Fraction molaire CO3-2 (note 13)	0,0092	0,0320	0,0005	0,0071	0,0260
Total CO2 aq, mmol/l (note 14)	2,3644	6,2878	0,5417	2,8665	6,8325
H2CO3*, meq/l (note 15)	0,0261	0,0193	0,0820	0,5417	0,5417
CO2, ppm (note 15a)	1,1483	0,8476	3,6094	23,8420	23,8420
HCO3-, meq/l (note 16)	2,3147	6,0605	0,4594	2,3043	6,1131
CO3-2, meq/l (note 17)	0,0433	0,4024	0,0005	0,0409	0,3554
H2CO3*, ppm CaCO3	1,3046	0,9629	4,1007	27,0871	27,0871
HCO3-, ppm CaCO3	115,7345	303,0237	22,9706	115,2143	305,6530
CO3-2, ppm CaCO3	2,1660	20,1224	0,0271	2,0434	17,7704
pH calculé (note 18)	8,30	8,85	7,10	8,28	8,79
pHs Ca+2 (note 19)	8,15	7,90	8,75	8,05	7,63
pHs Mg+2 (note 19a)	11,89	10,72	12,78	12,08	10,79
Na+ meq/l	0,8735	2,6231		1,8857	6,0100
K+ meq/l	0,1402	0,7633		0,1476	0,7780
Ca+2 meq/l	0,9217	0,6342	1,1592	1,1592	1,1592
Mg+2 meq/l	0,6073	3,4405	0,3999	0,3999	2,9155
Cl- meq/l	0,1111	0,7673		0,1476	0,7780
SO4-2 meq/l	0,2021	0,1918		0,0000	0,0000
Somme anion, meq/l	2,6732	7,4292		2,4946	9,7686
Somme cation, meq/l	2,5426	7,4611		3,5923	10,8626
Ratio Ca+2/Mg+2 (de meq/l)	1,52	0,18	2,90	2,90	0,40
Ratio Na+/K+ (de meq/l)	6,23	3,44		12,78	7,72
Ratio HCO3-/CO3- (de moles/l)	106,86	30,12	1693,66	112,77	34,40
Ratio HCO3-/CO3- (de meq/l)	53,43	15,06	846,83	56,38	17,20
Ratio HCO3-/CO3- (de moles/l) du tampon				91,50	31,86
Ratio HCO3-/CO3- (de meq/l) du tampon				45,75	15,93

Tableau 10 Calcul de la quantité de produits chimiques à ajouter pour la simulation (T-R)

Simulation	Malawi		Tanganyika	
	mg pour 1 litre	ml pour 100litres	mg pour 1 litre	ml pour 100litres
MgSO4*7H2O	65	3,869	425	25,298
NaHCO3	180	8,337	505	23,390
Na2CO3*H2O	2,75	0,122	25	1,111
NaCl	0	0,000	0	0,000
KCl	11	0,554	58	2,923
CaCl2*2H2O	40	4,790	10	1,198
CaSO4*2H2O	0	0,000	0	0,000

Tableau 11 Calcul de la quantité de produits chimiques à ajouter pour la simulation (osmosée)

Simulation	Malawi		Tanganyika	
	mg pour 1 litre	ml pour 100litres	mg pour 1 litre	ml pour 100litres
MgSO4*7H2O	80	4,762	425	25,298
NaHCO3	190	8,800	505	23,390
Na2CO3*H2O	2,75	0,122	25	1,111
NaCl	0	0,000	0	0,000
KCl	11	0,554	58	2,923
CaCl2*2H2O	65	7,784	45	5,389
CaSO4*2H2O	0	0,000	0	0,000

Tableau 12 Calcul de la quantité de produits chimiques à ajouter pour la simulation (Québec)

Simulation	Malawi		Tanganyika	
	mg pour 1 litre	ml pour 100litres	mg pour 1 litre	ml pour 100litres
MgSO4*7H2O	0	0,000	310	0,000
NaHCO3	155	7,179	475	22,001
Na2CO3*H2O	2,5	0,111	22	0,978
NaCl	0	0,000	0	0,000
KCl	11	0,554	58	2,923
CaCl2*2H2O	0	0,000	0	0,000
CaSO4*2H2O	0	0,000	0	0,000

Comme nous pouvons le remarquer, le cas de la ville de Québec est particulier. L'alcalinité et la dureté sont élevées ce qui complique la simulation. Cette eau est plus propice à héberger des poissons du Tanganyika que pour le Malawi.

Nous pouvons aussi observer des déséquilibres au niveau des ions Na⁺, K⁺, Cl⁻ et SO₄⁻² entre autres. Il est encore possible de corriger un peu cela, mais au détriment d'un coût ne justifiant pas ce changement. L'utilisation de Ca(HCO₃)₂ entre autre pourrait être recommandée. Quelques modifications au programme permettraient aussi de simuler une eau salée, qui comme on peut le constater est assez près (mais de loin tout de même) à l'eau du Tanganyika.

Conclusion

Il n'est pas aisé de reproduire exactement la qualité des eaux des grands lacs africains. Nous pouvons cependant nous en approcher. Nous espérons que notre article aura su vous plaire, être instructif et vous aider dans la formulation de vos eaux pour bacs africains. Nous demeurons disponibles et ouverts à toutes critiques concernant ce travail. Si l'apport des lecteurs peut permettre la correction ou l'ajout d'informations supplémentaires, il nous fera plaisir d'étudier les demandes en ce sens.

Nous tenons à remercier tous ceux qui auront la gentillesse de distribuer ou d'héberger nos documents via leur site web. Merci à tous ceux qui ont su contribuer à donner le goût de l'aquariophilie via les nombreux sites web actuellement en service.

Bibliographie

- 1- Source web : Les pages web de Pé Point - <http://perso.club-internet.fr/burnel/page1p.html> - tiré originalement du Guide des Cichlidés publié par l'AFC.
- 2- Source web : The Cichlid Fishes of Lake Malawi, Africa - <http://www.connix.com/~mko/mwfishes.htm> - tiré originalement de Talling, J.F. et Tallings, I.B.; "The Chemical Composition of African Lake Waters", Int. Rev. Ges. Hydrobiol., Vol. 50, Numéro 3, pp. 421-463 (1965).
- 3- Source web (le site est maintenant fermé) Watson, Ian; "Water Hardness and Fish Physiology", British Cichlid Association, 1999 tiré originalement de Talling, J.F. et Tallings, I.B.; "The Chemical Composition of African Lake Waters", Int. Rev. Ges. Hydrobiol., Vol. 50, Numéro 3, pp. 421-463 (1965).
- 4- Source web : Nestor's Home - <http://www.mindspring.com/~nestor10/text/rifttxt.htm> - tiré originalement de Brichard's Fishes of Lake Tanganyika, par Dr. Kuferath (source incomplète).
- 5- Communication personnelle. Gondwe, Mangaliso, Limnology Research officer SADC/GEF PROJECT - Données collectées entre juin 1996 et juillet 1999.
- 6- Dussart, B. – Limnologie – L'Étude des eaux continentales, Gauthier-Villars, 1966 (Paris).