

## Présentation du projet

Ce projet décrit le développement d'un **automate de titrage pour la mesure de l'alcalinité (KH)** dans un aquarium récifal.

L'objectif est d'obtenir une mesure **précise, reproductible et automatisée** du KH, afin de faciliter le suivi de la stabilité chimique de l'eau.

---

## Compétences et moyens nécessaires

La réalisation complète de ce projet nécessite :

- Une **imprimante 3D** (fabrication de pièces spécifiques, supports, châssis, etc.).
- Une **fraiseuse CNC** (usinage de pièces de précision, plaques, éléments microfluidiques, etc.).
- Des compétences en **mécanique** et en **CAO** (conception des pièces, assemblage, tolérances mécaniques).
- Des connaissances en **programmation embarquée**, en particulier sur **plateforme Arduino** (pilotage des moteurs, lecture des capteurs, logique de contrôle, communication).

Ces compétences et moyens ne sont pas strictement obligatoires pour comprendre le fonctionnement de l'automate, mais ils sont fortement recommandés pour reproduire fidèlement le système présenté dans ce dépôt.

Certaines pièces proviennent de récupérations très spécifiques à un domaine et peuvent être difficiles à trouver à un prix abordable. Il sera probablement nécessaire d'adapter certains composants.

## Coût approximatif du projet :

Composant	Prix (€)
pH-mètre	160
Pompe péristaltique ×2	50
Actionneur linéaire	30
Nema8 réducteur 1/60	50
Arduino + rampe + driver	25
Bus CAN + RTC	10
Divers (aluminium, plastique...) 50	
<b>Total</b>	<b>375 €</b>

---

## Principe de la mesure (titrage acide-base)

L'alcalinité (ou dureté carbonatée, KH) est déterminée par **titrage acide-base** à l'aide d'une solution d'**acide chlorhydrique (HCl) 0,1 N**.

Le principe repose sur la neutralisation des **ions carbonates ( $\text{CO}_3^{2-}$ )** et **bicarbonates ( $\text{HCO}_3^-$ )** présents dans l'échantillon d'eau :

1. Un volume défini d'eau d'aquarium est prélevé.
2. Le **pH initial** de l'échantillon est mesuré.
3. Une solution d'HCl 0,1 N est ajoutée progressivement.
4. Le titrage est poursuivi jusqu'à atteindre un **pH de 4,5**, point de fin de titrage usuel pour l'alcalinité.
5. Le **volume total d'HCl consommé** permet de calculer le KH, en tenant compte de la normalité de l'acide et du volume d'échantillon.

---

## Architecture de l'automate

### Circuit d'échantillonnage

- **Prélèvement** : une pompe péristaltique aspire **25 mL** d'eau d'aquarium.
- **Chambre de titrage** : l'échantillon est injecté par le haut dans une **seringue de 50 mL** utilisée comme cuve de réaction.
  - La seringue est équipée :
    - d'un **agitateur magnétique** pour homogénéiser la solution pendant le titrage,
    - d'un **tuyau d'évacuation** relié à une seconde pompe péristaltique pour le vidage et le rinçage.
  - L'extrémité **conique** de la seringue limite la rétention d'eau résiduelle entre deux cycles.

### Mesure de pH

- Un **pH-mètre de qualité laboratoire** mesure régulièrement le pH de la solution dans la chambre de titrage.
- Ces mesures servent de retour pour :
  - piloter l'ajout d'HCl,
  - détecter l'atteinte du point final (pH 4,5).

### Injection d'acide (HCl 0,1 N)

L'injection d'HCl est réalisée via un **pousse-seringue de précision**, choisi de préférence à une pompe péristaltique pour garantir la fiabilité des volumes injectés.

- Mécanique :
  - Système linéaire animé par **moteur pas à pas**.
  - Utilisation d'une **seringue en verre de 500 µL** (récupération professionnelle).
- Microfluidique :
  - **Distributeur 3 voies microfluidique** en PEEK et PTFE (téflon), conçu spécifiquement pour le projet.
  - Tubulures en PEEK (récupération).
- Résolution :
  - Lors de l'approche du pH cible (4,5), l'injection se fait par **incréments de 5 µL**, ce qui permet un contrôle fin de la pente de titrage et une localisation précise du point final.

---

### Pilotage et électronique

L'ensemble du système est piloté par un **microcontrôleur Arduino** :

- Horodatage via **RTC (Real Time Clock)**.
- Communication interne via **bus CAN**.
- Protocoles de communication et de commande développés spécifiquement pour ce projet.

Le firmware gère :

- la séquence de prélèvement,
- l'agitation et les phases de rinçage,
- l'acquisition des mesures de pH,
- le pilotage du pousse-seringue (HCl),
- la détection du point de fin de titrage,
- le calcul du KH à partir du volume d'acide injecté.

---

### Calcul du KH

Le KH est calculé à partir :

- du **volume d'échantillon prélevé** (25 mL),
- du **volume d'HCl 0,1 N** injecté jusqu'à atteindre un pH de 4,5,

- de la **normalité** de la solution acide.

La formule utilisée repose sur le principe du titrage acide-base des espèces carbonatées.

- Normalité de l'HCl :  $0,1\text{ N}$  (chaque mole d'HCl fournit 1 mole de  $H^+$ ).
- Volume d'eau de l'échantillon :  $V_{\text{eau}} = 25\text{ mL} = 0,025\text{ L}$ .
- Volume d'HCl utilisé :  $V_{\text{HCl}}$ , mesuré pendant le titrage.
- KH : exprimé en  $dKH$  (degrés de dureté carbonatée) ou en mg/L de  $CaCO_3$ .

Pour obtenir le KH en  $dKH$ , on utilise la relation suivante :

$$KH\text{ (dKH)} = \frac{\text{Volume d'HCl (mL)} \times \text{Normalité de l'HCl (N)}}{\text{Volume d'eau (L)}} \times \frac{50}{17,86}$$

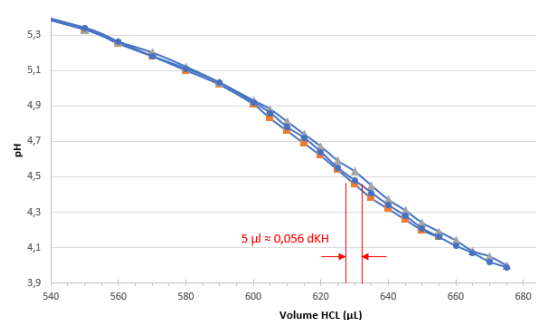
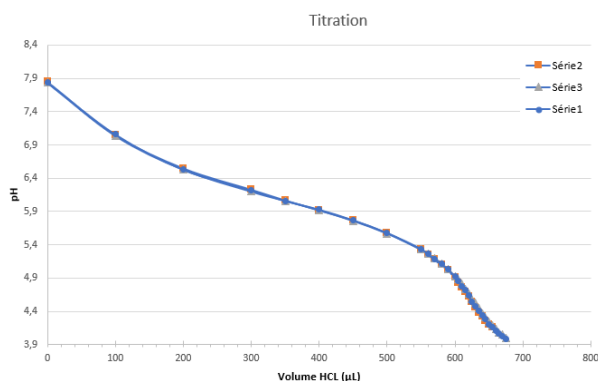
- 50 : conversion des mEq/L en  $dKH$  ( $1\text{ dKH} = 0,357\text{ mEq/L}$ ).
- 17,86 : conversion entre  $dKH$  et mg/L de  $CaCO_3$ .

### Résultats préliminaires

Les essais sont toujours en cours, mais les premiers résultats sont très encourageants :

- La courbe **pH en fonction du volume d'HCl ajouté** présente une cinétique de titrage nette et reproductible.
- La mesure répétée **trois fois** sur un même échantillon montre une **précision de l'ordre de 0,056 dKH**.
- En termes d'exactitude, la comparaison avec un test commercial (Salifert, par exemple) donne :
  - $\sim 7,15\text{ dKH}$  (test Salifert),
  - $\sim 7,11\text{ dKH}$  (automate de titrage).

L'écart observé est considéré comme tout à fait acceptable pour l'application visée en aquariophilie récifale.



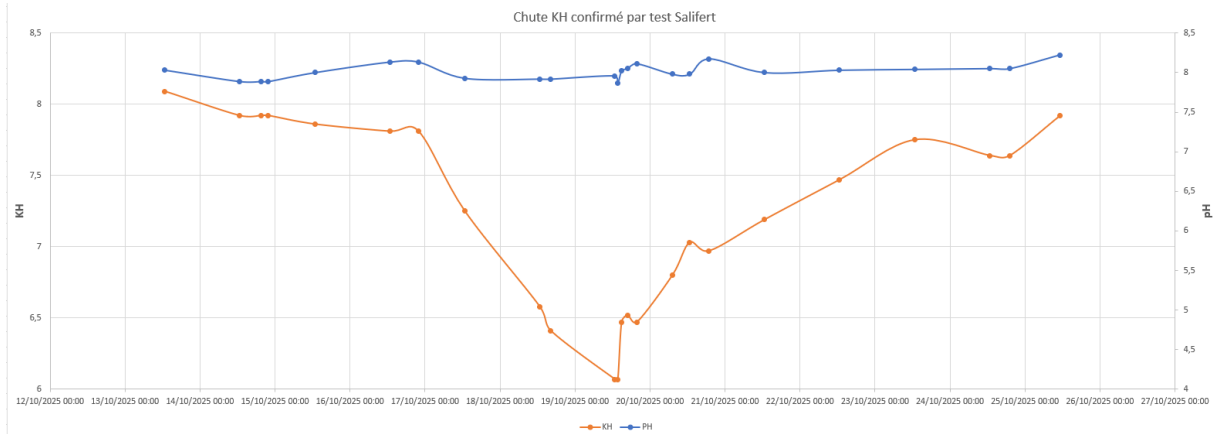
### Résultats après un an de fonctionnement

Après une année complète de fonctionnement continu, l'automate n'a présenté aucun incident technique. Les seules interventions de maintenance nécessaires ont été :

- le remplissage périodique du réservoir de réactif (fréquence dépendant du volume du réservoir et de la fréquence des mesures),
- le nettoyage de l'électrode de pH environ tous les trois mois,

- le réglage ponctuel de l'offset de mesure, de manière à aligner la valeur de KH obtenue avec celle mesurée à l'aide d'un test colorimétrique (Salifert) ou par analyse ICP.

Sur la durée, la mesure automatisée du KH s'est révélée suffisamment sensible et fiable pour détecter une chute importante du KH sur seulement quelques jours, permettant une réaction rapide et une correction précoce des paramètres de l'aquarium.



## Licence

Ce projet est distribué sous licence **MIT**.

Cela signifie en résumé :

- Vous êtes libre de **utiliser, copier, modifier, fusionner, publier, distribuer** et **vendre** le logiciel et la documentation associée.
- La seule condition principale est de **conserver le texte de la licence MIT et la mention de copyright** dans toute copie ou dérivé du projet.
- Le logiciel est fourni **“en l'état”**, sans aucune garantie d'aucune sorte. L'auteur ne peut être tenu responsable de tout dommage résultant de son utilisation.