

Printemps des sciences 2025

Projet de communication scientifique CHIM-F-328

Systemes Dissipatifs et Réaction de Belousov-Zhabotinsky : Applications dans l'Eau et les cycles biochimiques

- Projet développé par Degan Elmi Nur, Christelle Mbida et Marco Profetto
- Encadrant : professeure Geneviève Dupont et Dario M. Escala
- Titulaires du cours CHIM-F-328 :
Yannick DE DECKER (Coordonnateur) et Jean-Christophe LELOUP

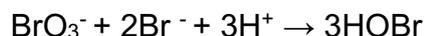
Introduction

Il y a environ cinquante ans depuis la découverte des systèmes dissipatives par Ilya Prigogine, prix Nobel en chimie de l'ULB. Il a découvert que les systèmes ouverts hors d'équilibre peuvent s'autoorganiser en dissipant de l'énergie vers l'environnement, c'est pourquoi il a inventé le terme de système dissipatif. En d'autres mots, il s'agit de systèmes qui évoluent par moyen d'échanges énergétiques avec l'extérieur jusqu'à atteindre un état stationnaire dynamique qui montre un haut degré d'organisation. Un exemple qui pourra clarifier définitivement chaque doute est la réaction de Belousov-Zhabotinsky qui montre un comportement oscillatoire dû aux variations de concentrations dans le temps et l'espace.

La réaction de Belousov-Zhabotinsky

Au cours de cette réaction, l'acide malonique est oxydé par le bromate en présence de catalyseurs comme le Cérium (IV), le Manganèse (II) ou Fer (II). La réaction peut être décomposée en 3 processus clés :

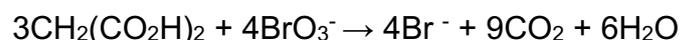
Processus A



Processus B



Processus C (permet la régénération du catalyseur Fe²⁺)



A partir de ces trois processus nous pouvons définir l'excitabilité qui reflète la dynamique de la réaction (longueur d'onde, période...). Ainsi la modification de ce paramètre engendre une modification dans la fréquence des oscillations ; pour ce faire, plusieurs paramètres peuvent rentrer en jeu :

$$\varepsilon = \frac{[\text{H}_2\text{SO}_4][\text{BrO}_3^-]}{[\text{MA}]}$$

ε = excitabilité

$[\text{H}_2\text{SO}_4]$ = concentration en acide sulfurique

$[\text{BrO}_3^-]$ = concentration en bromate

$[\text{MA}]$ = concentration en acide malonique

Les oscillations chimiques observées dans la réaction BZ présentent une analogie fondamentale avec des cycles biochimiques clés dans les systèmes vivants, tels que le cycle de Krebs ou le rythme circadien. Ces phénomènes régulent des processus vitaux, comme la production d'énergie dans les cellules et plus généralement dans le métabolisme (Figure 1), qui se caractérise par un haut degré d'auto-organisation.

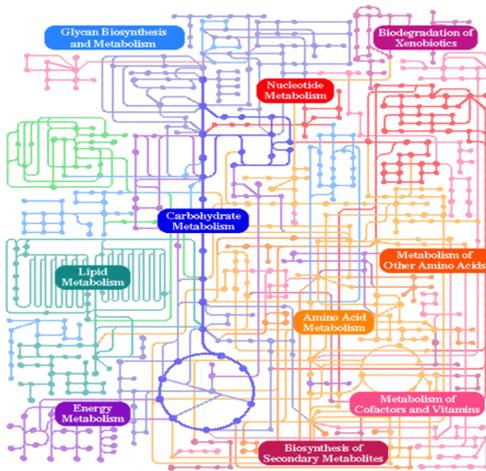


Figure 1. Schéma représentant les parcours réactionnels possibles dans le métabolisme. (yangoit, 2020)

En simulant des comportements similaires, les systèmes BZ permettent d'explorer des modèles théoriques applicables à la biologie et à la médecine. Deux modèles mathématiques sont utilisés pour décrire les dynamiques de la réaction de BZ : le Bruxellateur et l'Oregonateur (Figure 2). En se basant sur des équations différentielles non linéaires qui représentent l'évolution temporelle des concentrations des principaux réactifs, ces modèles offrent une description précise des processus chimiques mis en jeu et donc des oscillations.

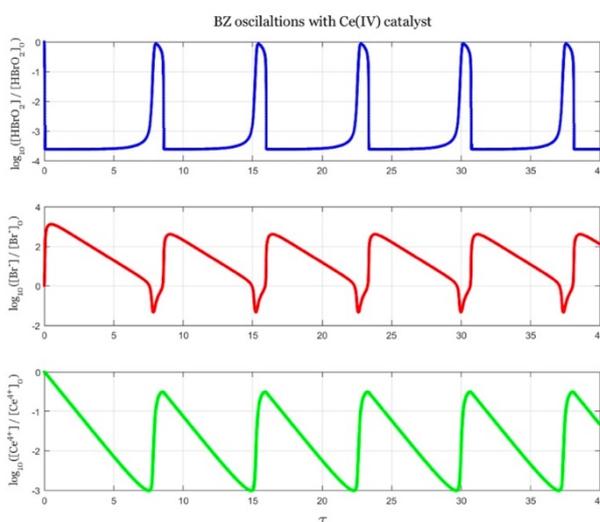


Figure 2. Schéma représentant les variations de concentrations des différents réactifs, calculées à partir du modèle de l'oregonateur. (Barzykina, 2020)

Introduction

Cette expérience a comme intérêt celui de montrer la variabilité en milieu aqueux d'un système dissipatif tel que la réaction de Belousov-Zhabotinsky. Il s'agit d'une réaction oscillante, où ce caractère se manifeste soit sous forme d'une évolution temporelle et spatiale de motifs circulaires colorés dans des boîtes de Petri, soit comme alternance de couleur d'une solution maintenue sous agitation constante. La modification de l'excitabilité, paramètre reflétant la propension aux oscillations des composés de la réaction, engendre une modification dans la fréquence des oscillations observées. Pour cela nous pouvons modifier divers paramètres, tels que la concentration en acide sulfurique. Afin d'en étudier l'influence sur le système, il suffit de constater la variation de la période d'oscillation dans le cas d'un système sous agitation, soit observer la variation de la distance entre les motifs observés dans une boîte de Pétri. Comme montré dans la **Figure 1**, pour une excitabilité élevée, on s'attend à une fréquence élevée et vice-versa.

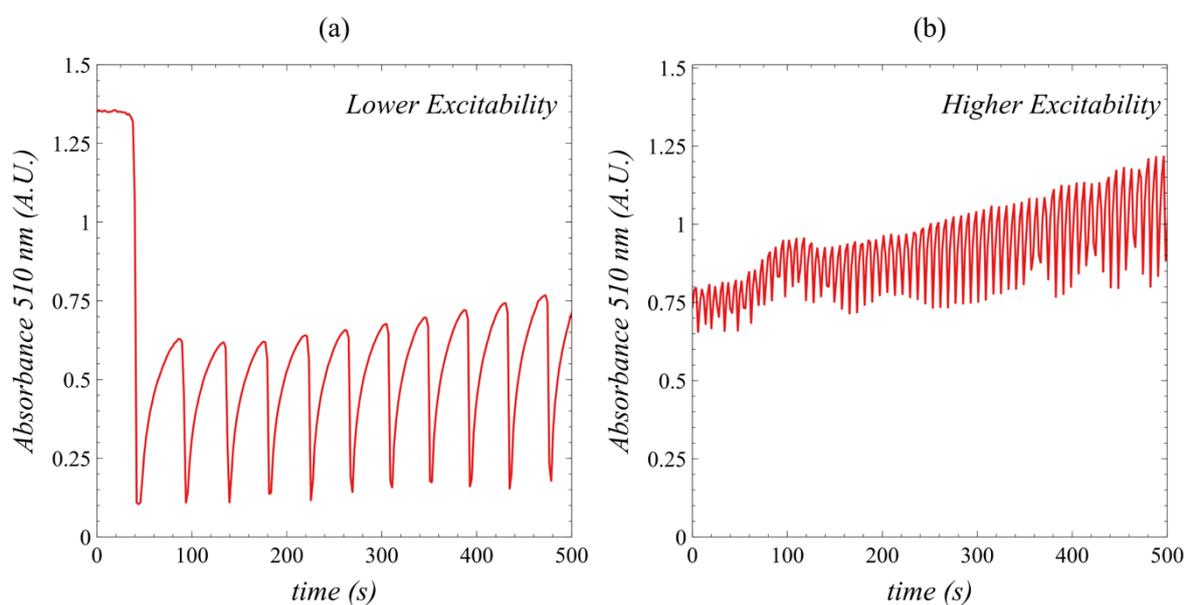


Figure 1 : graphique montrant la variation de la période d'oscillation par rapport à des systèmes avec différente excitabilité

Matériel technique:

1. Bêchers

- **3 bêchers (50 mL)** pour préparer et mélanger les solutions.
- **3 bêcher supplémentaire (100-250 mL)** pour préparer les solutions stock.

2. Barres magnétiques

- **3 unités**, adaptées aux bêchers de 50 mL.

4. Agitateur magnétique

- **3 unités**, pour mélanger uniformément les solutions sans bulles.

4. Micropipettes

- **1-10 mL** : pour les volumes élevés. (**2 unités**)
- **100-1000 µL** : pour les petits volumes précis. (**2 unités**)

5. Cônes pour micropipettes

- **Cônes jetables** correspondant aux micropipettes.

6. Boîtes de Petri

- Diamètre recommandé : **8 cm** (minimum **3 unités** pour tester plusieurs échantillons).

7. Papier absorbant

- Pour nettoyer rapidement les éventuels débordements.

8. Bouteille d'eau distillée

- Pour diluer les solutions et rincer le matériel.

9. Récipient pour déchets

- Un **bac pour déchets chimiques** (ne pas jeter la solution BZ directement dans l'évier, car la ferroïne est toxique pour les milieux aquatiques).

10. Balance analytique

- Précision : **0,01 g** (pour peser les solides comme l'acide malonique).

11. Présentoir à base lumineuse et lampe simple

- Une source lumineuse pour éclairer la solution afin de mieux observer les variations de couleurs. La première pour observer les boîtes de Pétri et la deuxième pour observer le bécher.

12. Microscope (optionnel)

- Microscope pour observer aisément les oscillation dans les boîtes de Pétri.

Matériel de sécurité

1. Gants en nitrile

2. Blouse ignifuge

3. Lunette de protection

Réactifs nécessaires :

1. **Acide malonique** ($C_3H_4O_4$, CAS : 141-82-2, MW : 104,06 g/mol)

- Préparez une solution stock à **2 M** (150-200 mL suffisent).

2. **Acide sulfurique** (H_2SO_4 , CAS : 7664-93-9, MW : 98,08 g/mol).

- Préparez une solution stock à **3M** (500 mL suffisent)

3. **Bromate de sodium** ($NaBrO_3$, CAS : 7789-38-0, MW : 150,89 g/mol)

- Préparez une solution stock à **1 M** (150-200 mL suffisent).

Remarque : Si vous utilisez du bromate de potassium ($KBrO_3$), sa solubilité maximale est d'environ **0,45 M** à température ambiante.

4. **Solution stock de Ferroïne (0,025 M)**

- Cette solution sera fournie au préalable.

N.B. Évitez les solutions commerciales, elles ne conviennent pas pour la réaction BZ.

5. **Eau distillée**

- Nécessaire pour diluer les solutions et compléter le volume final.

Quantités pour une solution finale de 10 mL :

- Trois solutions vont être préparées, avec différentes excitabilités. Pour ce faire, il convient d'utiliser 3 volumes différents de H_2SO_4 , afin d'en varier la concentration dans la réaction BZ.

• **H₂O** : 4,95 mL; 2,95 mL; 0,95 mL;

• **Acide sulfurique (3 M)** : 2,00 mL, 4,00 mL, 6,00 mL

(Concentration finale dans la réaction BZ : 0,6 M, 1,2 M, 1,8 M)

• **Acide malonique (2 M)** : 0,75 mL

(Concentration finale : 0,15 M)

• **Bromate de sodium (1 M)** : 1,5 mL

(Concentration finale : 0,15 M)

• **Ferroïne (0,025 M)** : 0,8 mL

(Concentration finale : $2,00 \times 10^{-3}$ M)

Volume total : 10 mL

Instructions de préparation:

1. Mesurez et mélangez chaque volume correspondant des solutions stock dans un bécher propre.

2. Complétez avec de l'eau distillée jusqu'à atteindre un volume final de **10 mL**.

3. Agitez avec un agitateur magnétique et noter les changement de couleur, ainsi que la période d'un changement de couleur à l'autre.

4. Versez la solution dans une boîte de Petri, en formant une couche fine (< 1 mm).

- Pour une boîte de diamètre différent, ajustez le volume en conséquence.

Remarques :

• **Stabilité** : La solution reste active pendant environ 3 heures, mais l'odeur de brome devient notable.

• **Recommandation** : Couvrez la boîte de Petri avec une seconde pour limiter l'odeur et l'évaporation.

- Pour observer les motifs, utilisez une durée maximale de **1 heure**.

Bibliographie :

- yangoit. (2020, janvier 5). Metabolismo lento? Scopriamolo insieme! *MyLab Experiment*. <https://mylabexperiment.com/metabolismo-lento-scopriamolo-insieme/>
- Barzykina, I. (2020). Chemistry and Mathematics of the Belousov–Zhabotinsky Reaction in a School Laboratory. *Journal of Chemical Education*, 97(7), 1895-1902. <https://doi.org/10.1021/acs.jchemed.9b00906>