

Exercice 01 : L'Aquarium Récifal – (09 points)

Depuis décembre 2019, le Parc Zoologique de Paris accueille un requin bambou. Il vit dans un aquarium qui cherche à reproduire l'environnement naturel de cette espèce.

Cet aquarium, dit récifal, est un bac marin destiné à héberger un écosystème très riche : coraux, crustacés et nombreux poissons tous originaires des eaux peu profondes des côtes de Madagascar. Cet écosystème est complexe et fragile. Plusieurs paramètres sont à contrôler pour maintenir l'équilibre du milieu et assurer le bien-être des différentes espèces vivantes qui y cohabitent.



Aquarium récifal MHN- F.-G. Grandin

Le but de cet exercice est d'étudier l'influence de certains de ces paramètres, pH et salinité, ainsi que des méthodes de traitement de l'eau.

Données à 25 °C :

- couples acide/base associés au dioxyde de carbone dissous ($\text{CO}_2, \text{H}_2\text{O}(\text{aq})$) :
 $(\text{CO}_2, \text{H}_2\text{O}(\text{aq}))/\text{HCO}_3^-(\text{aq})$: $\text{p}K_{\text{A}1} = 6,4$;
 $\text{HCO}_3^-(\text{aq})/\text{CO}_3^{2-}(\text{aq})$: $\text{p}K_{\text{A}2} = 10,3$;

- masse molaire atomique de l'ion chlorure : $M(\text{Cl}^-) = 35,5 \text{ g} \cdot \text{mol}^{-1}$;

- conductivités molaires ioniques :

Ion	Ag^+	NO_3^-	Na^+	Cl^-
$\lambda \text{ (mS} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{mol}^{-1})$	6,19	7,14	5,01	7,63

- numéros atomiques et électronégativités :

	Hydrogène	Carbone	Oxygène
Z (numéro atomique)	1	6	8
χ (électronégativité)	2,20	2,55	3,44

1. Régulation de l'acidité

Dans un aquarium, le pH de l'eau est une grandeur à surveiller. Sa valeur doit rester proche d'une valeur optimale qui dépend des espèces vivantes présentes. Pour l'aquarium récifal, le pH optimal vaut 8,1. En journée, la photosynthèse végétale augmente naturellement le pH, qui diminue ensuite pendant la nuit. Les différentes espèces vivantes de l'aquarium peuvent s'acclimater à des variations de la valeur du pH si elles restent faibles.

1.1. Indiquer ce qui peut être mis en œuvre si la valeur du pH devient trop élevée dans l'aquarium.

On peut considérer que l'eau de l'aquarium se comporte comme une solution tampon.

1.2. Citer les propriétés d'une solution tampon. Justifier l'utilisation d'une telle solution dans l'aquarium récifal.

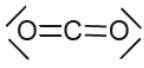
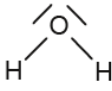
Un diffuseur permet de réguler précisément la valeur du pH de l'aquarium en injectant au besoin du dioxyde de carbone à l'état gazeux dans l'aquarium.

Le dioxyde de carbone, $\text{CO}_2(\text{g})$, se dissout faiblement dans l'eau de l'aquarium. Il devient du dioxyde de carbone dissous ($\text{CO}_2, \text{H}_2\text{O}(\text{aq})$) qui peut se dissocier partiellement en ions hydrogénocarbonate $\text{HCO}_3^-(\text{aq})$ et en ions carbonate $\text{CO}_3^{2-}(\text{aq})$.



Diffuseur de CO_2
 (<http://www.aquarium-aquariophilie.com>)

Le schéma de Lewis de la molécule de dioxyde de carbone et celui de la molécule d'eau sont donnés ci-dessous.

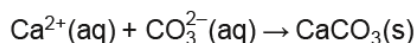
Molécule		
Structure spatiale	linéaire	coudée

1.3. En s'appuyant notamment sur les électronégativités des atomes, justifier la faible solubilité du dioxyde de carbone dans l'eau.

1.4. Indiquer, parmi les espèces acido-basiques associées au dioxyde de carbone dissous, celles qui sont des acides de Brønsted et celles qui sont des bases de Brønsted.

1.5. En précisant la démarche suivie, indiquer, parmi les espèces acido-basiques associées au dioxyde de carbone dissous, celle(s) qui prédomine(nt) dans l'aquarium récifal.

Le squelette et la coquille des coraux sont constitués de calcaire, c'est-à-dire de carbonate de calcium $\text{CaCO}_3(\text{s})$, qui se forme suivant une transformation modélisée par l'équation de réaction suivante :



1.6. Expliquer pourquoi l'utilisation d'un diffuseur de CO_2 dans l'aquarium peut freiner la formation du squelette et de la coquille des coraux.

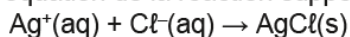
2. Contrôle de la salinité

Dans un aquarium, on trouve notamment des ions chlorure $\text{Cl}^-(\text{aq})$ ainsi que des cations comme les ions sodium $\text{Na}^+(\text{aq})$.

La salinité de l'eau d'un aquarium est assimilée à la concentration en masse en ion chlorure $\text{Cl}^-(\text{aq})$. Celle de l'aquarium récifal doit être comprise entre 19,3 et 19,6 g·L⁻¹.

Pour contrôler la salinité de l'eau de l'aquarium étudié, on se propose de réaliser le titrage des ions chlorure. Pour cela, on prélève de l'eau de l'aquarium que l'on dilue d'un facteur 10, puis on titre 10,0 mL de cette solution à laquelle on a ajouté 200 mL d'eau distillée, par une solution de nitrate d'argent ($\text{Ag}^+(\text{aq})$; $\text{NO}_3^-(\text{aq})$) de concentration égale à $5,00 \times 10^{-2} \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$.

Le titrage est suivi par conductimétrie. L'équation de la réaction support du titrage est :



On obtient la courbe de suivi du titrage de la figure 1.

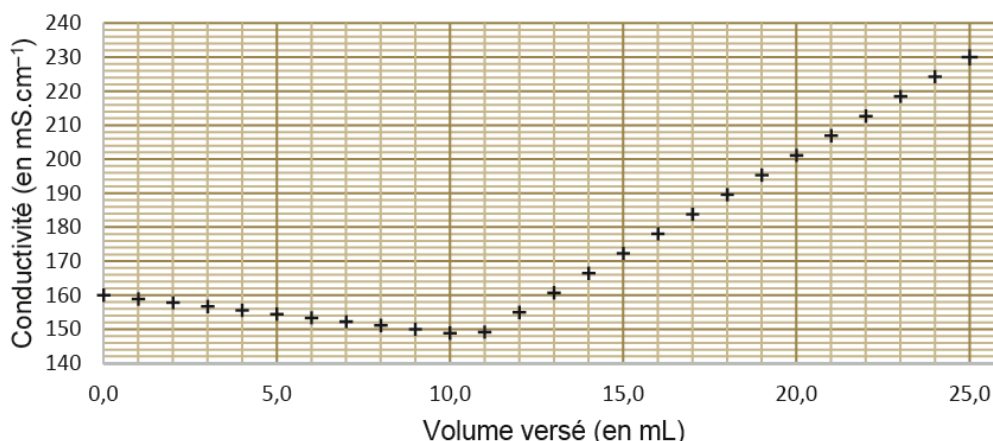


Figure 1. Conductivité de la solution en fonction du volume de solution de nitrate d'argent versé

2.1. Justifier qualitativement l'évolution de la pente de la courbe lors du titrage.

2.2. Indiquer si un traitement de l'eau est nécessaire à l'issue du contrôle de la salinité.

Le candidat est invité à prendre des initiatives et à présenter la démarche suivie même si elle n'a pas abouti. La démarche est évaluée et nécessite d'être correctement présentée.

3. Traitement des poissons contre les vers

L'aquarium récifal peut être infesté par différents types de vers qui parasitent les intestins, les branchies ou la peau des poissons. Pour assurer une élimination chimique de ces vers, les poissons doivent être momentanément placés dans un bassin de quarantaine dans lequel est ajouté un vermifuge.

Le praziquantel est une espèce chimique qui entre dans la composition d'un vermifuge utilisé en aquariophilie, vendu en animalerie en solution liquide, de concentration en masse de $10,0 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$.

En 2010, un procédé de synthèse du praziquantel impliquant trois étapes a été proposé, ce qui le rend plus écoresponsable et moins onéreux. L'étape 1 conduisant à l'obtention de la molécule **A** n'est pas présentée ici.

3.1. L'étape 2, représentée ci-dessous, permet de transformer les réactifs **A** ($\text{C}_9\text{H}_9\text{N}$), **B**, **C** et **D** ($\text{C}_4\text{H}_{11}\text{O}_2\text{N}$) en produit **E** ($\text{C}_{21}\text{H}_{32}\text{O}_4\text{N}_2$) et produit **F**.

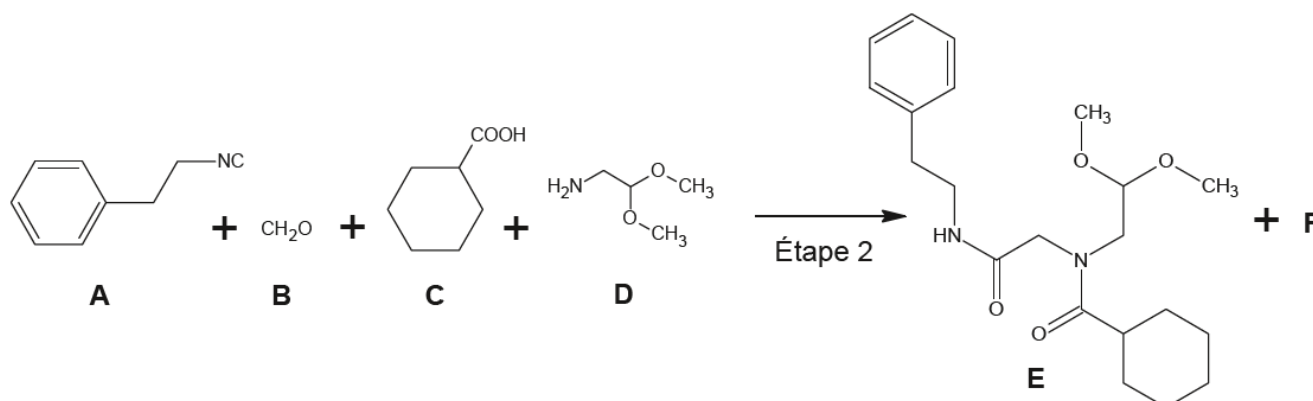
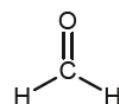


Figure 2. Équation de la réaction modélisant la transformation chimique de l'étape 2

La formule développée du réactif **B** est représentée ci-contre :



3.1.1. Justifier que la molécule **B** se nomme méthanal en nomenclature officielle.

3.1.2. Donner la formule semi-développée, puis brute du réactif **C**.

3.1.3. Déterminer le produit **F** formé à l'issue de l'étape 2 en s'appuyant sur les formules brutes des espèces chimiques mises en jeu.

La synthèse de 40,9 g de la molécule **E** nécessite 0,110 mol de chacun des réactifs **A**, **B**, **C** et **D**. La masse molaire moléculaire de **E** est $M(\text{E}) = 376,5 \text{ g} \cdot \text{mol}^{-1}$.

3.1.4. Déterminer le rendement de l'étape 2.

3.2. L'étape 3 permettant de synthétiser le praziquantel nécessite l'utilisation de l'acide méthylsulfonique, noté AMS. Cette étape comporte quatre opérations décrites ci-dessous.

- 30,0 g de **E** sont ajoutés à 104,0 mL d'AMS puis l'ensemble est chauffé pendant 6 heures à 70°C . La solution obtenue est versée dans de l'eau glacée ajustée à un pH égal à 8 avec une solution aqueuse d'hydroxyde de sodium.
- La solution est extraite quatre fois avec de l'éther diéthylique.
- La phase organique est lavée par 100 mL d'une solution aqueuse salée saturée. La phase organique est ensuite séchée. Après évaporation de l'éther diéthylique, on obtient un solide jaune.
- Ce résidu est recristallisé dans un mélange équimolaire d'acétate d'éthyle et d'hexane. On obtient un solide blanc.

D'après Dr. Haiping Cao Dr. Haixia Liu Prof. Alexander Dömling <https://doi.org/10.1002/chem.201002046>

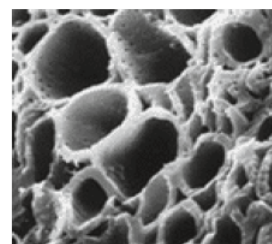
3.2.1. Associer à chacune des opérations a. et c. du protocole un ou plusieurs des mots suivants :

dissolution – séparation – purification – transformation chimique

3.2.2. Nommer une méthode d'identification possible pour le solide obtenu.

4. Prévention des infections

Un aquariophile traite de manière préventive son aquarium contre les infections. Pour cela, il utilise une solution aqueuse antiseptique de bleu de méthylène. Le bleu de méthylène ($C_{16}H_{18}ClN_3S$) est un colorant faiblement biodégradable, de couleur bleue foncée. L'excès de bleu de méthylène est éliminé par des « filtres » à charbon actif.



Vue au microscope électronique des pores d'un grain de charbon actif

Le charbon actif est une poudre noire dont les pores, observables au microscope électronique, permettent notamment de fixer et retenir des molécules organiques. C'est le phénomène d'adsorption.

La capacité d'adsorption du charbon actif peut être évaluée à l'aide d'un dosage par étalonnage en suivant le protocole expérimental suivant :

- tracer la courbe d'étalonnage de l'absorbance, à $\lambda = 650$ nm, pour des solutions étalon de bleu de méthylène ;
- mesurer l'absorbance d'un échantillon d'eau polluée en bleu de méthylène ;
- prélever un volume V de 50,0 mL d'eau polluée et y ajouter 100,0 mg de charbon actif ;
- agiter le mélange puis filtrer ;
- mesurer l'absorbance de la solution filtrée après traitement au charbon actif.

4.1. Justifier l'intérêt de l'étape de filtration.

Pour les questions suivantes, le candidat est invité à prendre des initiatives et à présenter la démarche suivie même si elle n'a pas abouti. La démarche est évaluée et nécessite d'être correctement présentée.

On applique le protocole précédent et on obtient les résultats suivants :

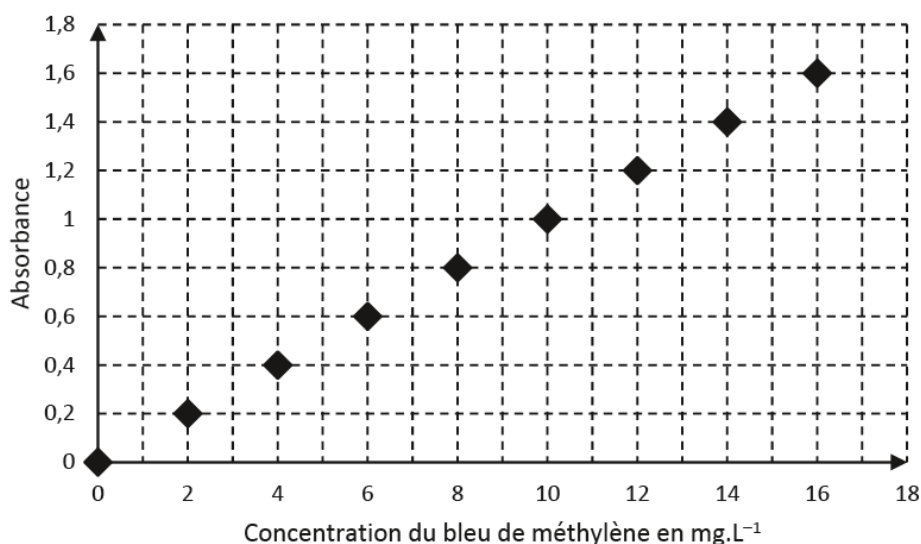


Figure 3. Absorbance en fonction de la concentration en bleu de méthylène, à $\lambda = 650$ nm

Les valeurs d'absorbance obtenues avant et après traitement de l'eau de l'aquarium pour éliminer l'excès de bleu de méthylène sont $A_{\text{polluée}} = 1,5$ et $A_{\text{traitée}} = 0,2$.

4.2. Montrer que la masse m_a de colorant adsorbée par gramme de charbon actif est voisine de 7 mg.

4.3. Sachant qu'un traitement préventif de l'aquarium, de volume $V = 8\,000$ L, nécessite 1 à 2 mg de bleu de méthylène par litre d'eau, calculer la masse de charbon actif nécessaire afin de réaliser le traitement pour cet aquarium récifal. Commenter.

Exercice 02 : Les supercondensateurs – (06 points)

Un supercondensateur permet de stocker et de restituer rapidement de l'énergie électrique. Dans certains transports en commun, un supercondensateur est utilisé pour emmagasiner un maximum d'énergie électrique en quelques secondes lors des phases de freinage.

Si des condensateurs classiques étaient utilisés à la place des supercondensateurs, il faudrait des armatures de très grandes surfaces et très rapprochées, séparées par un excellent diélectrique.

Cet exercice a pour objectifs :

- de comparer qualitativement un supercondensateur avec un condensateur usuel ;
- d'étudier le comportement d'un supercondensateur lors de sa charge afin de déterminer expérimentalement la valeur de sa capacité et de la comparer à celle fournie par le fabricant.

Données constructeur sur le supercondensateur étudié :

- dimensions : 35 mm × 60 mm
- capacité : 400 F
- tension maximale : 2,5 V
- énergie maximale : 0,35 Wh



1. Comparer la valeur de la capacité du supercondensateur étudié aux valeurs usuelles des capacités des condensateurs utilisées au lycée ou en électronique.

La valeur de la capacité C d'un condensateur plan peut être déterminée à l'aide de la relation :

$$C = \epsilon \frac{S}{d}$$

où :

S est la surface en regard des deux armatures,

d est l'écartement entre les deux armatures,

ϵ est une constante caractéristique du matériau isolant placé entre les deux armatures.

2. Justifier qualitativement les parties en italique et soulignées du texte de présentation des supercondensateurs.

Étude du modèle du circuit RC série

On souhaite déterminer la valeur de la capacité du supercondensateur en utilisant un cycle de charge dans un circuit RC. Pour cela, on étudie dans un premier temps le comportement d'un modèle de circuit RC série.

On considère le circuit électrique schématisé ci-dessous (**figure 1**) composé d'une source idéale de tension E , d'un interrupteur K , d'un conducteur ohmique de résistance R , du supercondensateur de capacité C et d'un ampèremètre de résistance interne négligeable (la tension aux bornes de l'ampèremètre est considérée comme nulle).

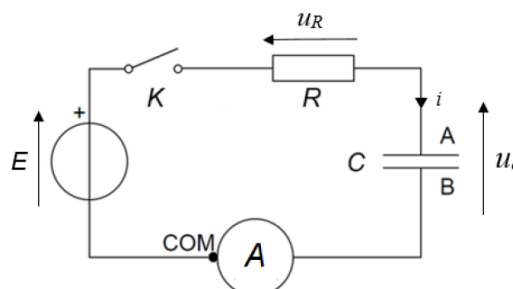


figure 1. Circuit électrique RC série

Le supercondensateur est initialement déchargé. À l'instant $t = 0$ s, on ferme l'interrupteur.

- Donner la relation entre l'intensité $i(t)$ du courant électrique et la dérivée de la charge $q(t)$ portée par l'armature A du supercondensateur, puis la relation entre l'intensité $i(t)$, la capacité C et la dérivée de la tension électrique $u_C(t)$ aux bornes du supercondensateur.
- Montrer que l'équation différentielle dont la tension électrique $u_C(t)$ aux bornes du supercondensateur est une solution est de la forme :

$$\frac{du_C}{dt}(t) + \frac{1}{\tau} u_C(t) = \frac{E}{\tau}$$

Exprimer la constante de temps τ en fonction de R et de C .

- Vérifier que les solutions de cette équation différentielle sont de la forme :

$$u_C(t) = A e^{-\frac{t}{\tau}} + E$$

Déterminer l'expression de A pour la situation étudiée.

Etude expérimentale et détermination de la valeur de la capacité

On réalise le montage précédent avec une source idéale de tension de valeur $E = 2,5$ V et un conducteur ohmique de résistance $R = 2,0$ Ω .

À l'aide d'une carte d'acquisition, on réalise le suivi temporel de la tension aux bornes du supercondensateur durant sa charge (**figure 2**

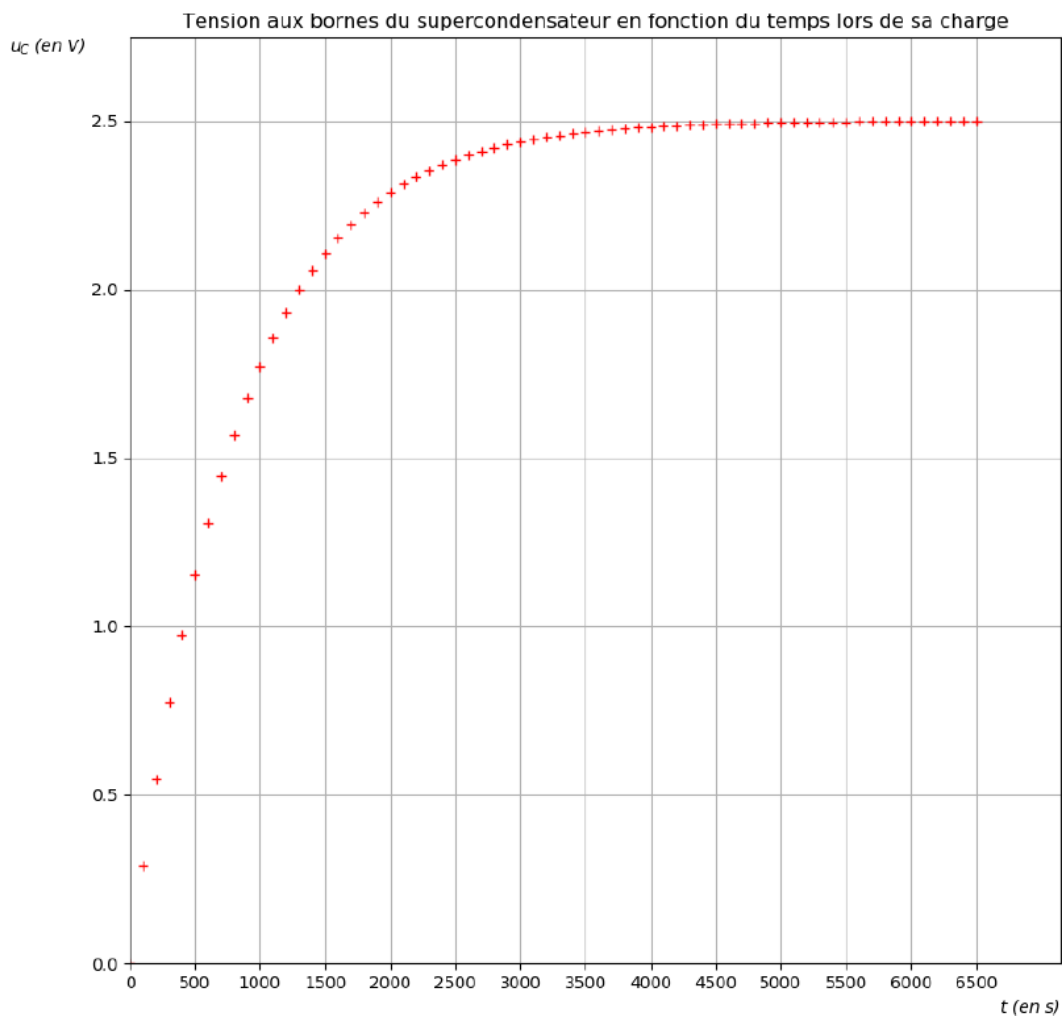


figure 2.

6. Déterminer la valeur C_1 de la capacité du supercondensateur en explicitant la démarche suivie.

À l'aide d'un microcontrôleur et d'un programme en python, on peut reproduire l'expérience un grand nombre de fois pour affiner la détermination du temps caractéristique du dipôle RC réalisé avec ce même supercondensateur. Ce programme permet d'obtenir le temps caractéristique du dipôle RC en déterminant la date pour laquelle le condensateur est chargé à 63%.

Après 10 exécutions successives du programme, on obtient, pour le temps caractéristique du dipôle RC, la série de valeurs suivantes exprimées en ms :

811614	818076	810301	810495	818526	812067	811327	813109	817838	819474
--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------

La moyenne $\bar{\tau}_2$ de la série de mesures est $\bar{\tau}_2 = 814,2827$ s.

La calculatrice donne 1,175 s pour le calcul de l'incertitude-type.

7. Écrire de manière appropriée le résultat de la mesure du temps caractéristique avec son incertitude-type.

On estime que l'incertitude-type de la résistance du conducteur ohmique est $u(R) = 0,1 \Omega$.

L'incertitude-type sur la valeur de la capacité C_2 du supercondensateur se déduit des mesures de la résistance et du temps caractéristique moyen par la relation :

$$u(C_2) = C_2 \sqrt{\left(\frac{u(R)}{R}\right)^2 + \left(\frac{u(\bar{\tau}_2)}{\bar{\tau}_2}\right)^2}$$

8. Déterminer la valeur de la capacité C_2 du supercondensateur ainsi que son incertitude-type.
9. Comparer la valeur de la capacité C_2 mesurée expérimentalement avec la valeur de référence C_{ref} donnée par le constructeur en utilisant le quotient $\frac{|C_2 - C_{ref}|}{u(C_2)}$. Conclure.

Exercice 03 : Quelle taille pour les mailles d'un tamis ? – (05 points)

Mots-clés : diffraction et interférences d'ondes lumineuses

Les artémies (voir photo ci-contre) sont des crustacés élevés pour nourrir les poissons des aquariums. Leur taille doit être adaptée à l'espèce de poisson à nourrir. On utilise des tamis calibrés pour les sélectionner.

On se propose dans cet exercice de déterminer la taille des mailles d'un tamis en utilisant une diode laser de longueur d'onde $\lambda = (650 \pm 10)$ nm.



Source :
<https://fr.m.wikipedia.org>

1. Vérification de la valeur de la longueur d'onde de la diode laser utilisée

Pour vérifier la valeur de la longueur d'onde de la diode laser annoncée par le constructeur, on réalise une expérience dont le schéma est donné ci-dessous (figure 1).

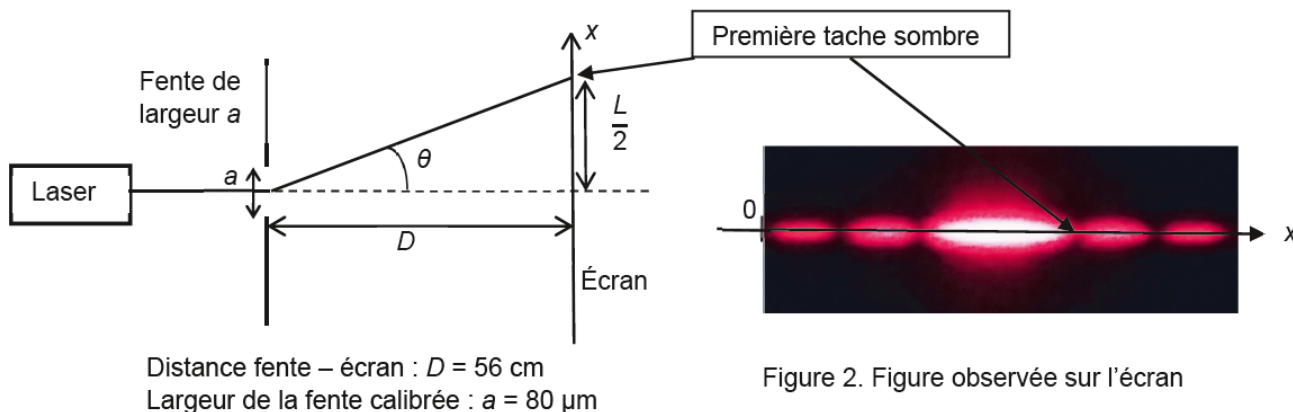


Figure 1. Schéma de l'expérience (échelle non respectée)

1.1. Nommer le phénomène physique responsable des taches lumineuses observées sur l'écran. Discuter qualitativement de l'influence de la largeur de la fente et de la longueur d'onde de l'onde incidente sur le phénomène observé.

1.2. On rappelle que l'angle θ est donné par la relation $\theta = \frac{\lambda}{a}$ et on considère que $\tan \theta \approx \theta$ pour les petits angles ($\theta \ll 1 \text{ rad}$). Déterminer l'expression de l'angle θ en fonction de la largeur L de la tache centrale et de D . En déduire l'expression de la longueur d'onde λ en fonction de L , a et D .

Pour faire une mesure précise, on remplace l'écran par une caméra qui permet d'obtenir l'intensité lumineuse relative* en fonction de la position x , repérée selon l'axe indiqué sur la photo de la figure 2. L'origine $x = 0 \text{ m}$ est prise sur le bord du capteur de la caméra. On obtient alors la figure 3.

* L'intensité lumineuse relative est le rapport de l'intensité lumineuse reçue par le capteur sur l'intensité maximale reçue.

1.3. Déterminer la valeur de la longueur d'onde de la diode laser utilisée en exploitant la courbe obtenue sur la figure 3. La comparer à la valeur indiquée par le constructeur.

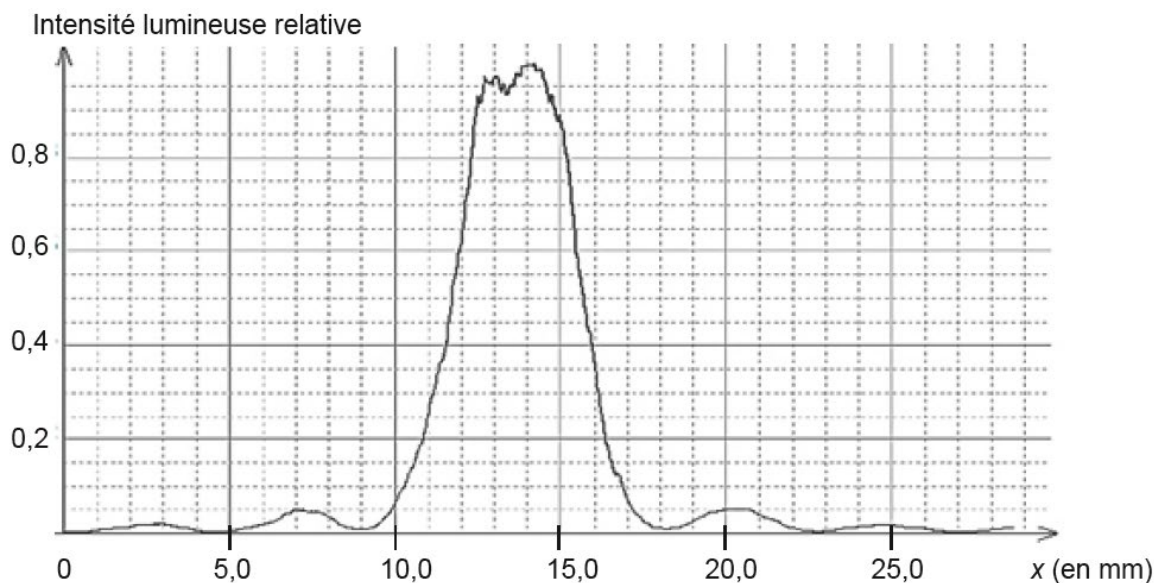


Figure 3. Intensité lumineuse relative en fonction de la position sur l'écran

2. Calibrage du tamis de récupération

Le but de cette partie est de vérifier que le tamis disponible, dont le maillage est représenté sur la figure 5, permet de récupérer toutes les artémies d'une taille supérieure à $150\text{ }\mu\text{m}$. On réalise une expérience d'interférences pour évaluer les dimensions du tamis en utilisant la diode laser précédente. La largeur du fil plastique constituant le tamis est égale à $230\text{ }\mu\text{m}$.

L'expérience d'interférences est décrite ci-dessous :

- le montage utilisé est donné sur la figure 4 ;
- on utilise la diode laser de longueur d'onde $\lambda = (650 \pm 10)\text{ nm}$. La distance entre le tamis et l'écran vaut $D = (7,75 \pm 0,03)\text{ m}$;
- on note b la distance entre les centres de deux trous consécutifs du maillage du tamis ;
- la figure d'interférences obtenue est donnée sur les figures 6 et 7.

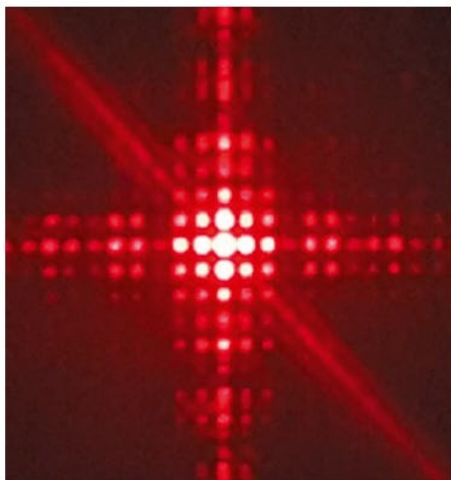
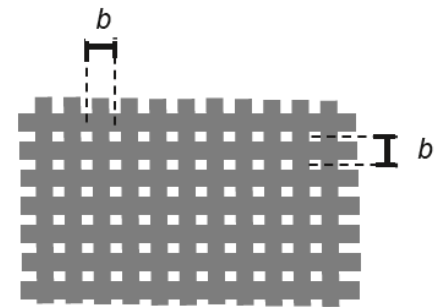
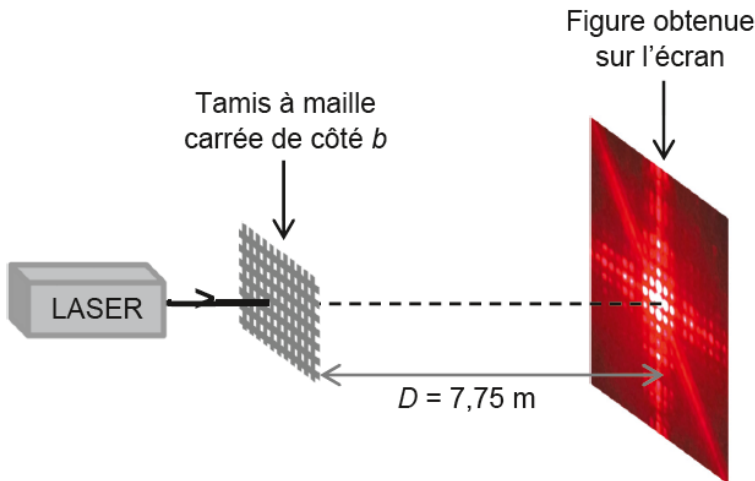


Figure 6. Figure d'interférences obtenue

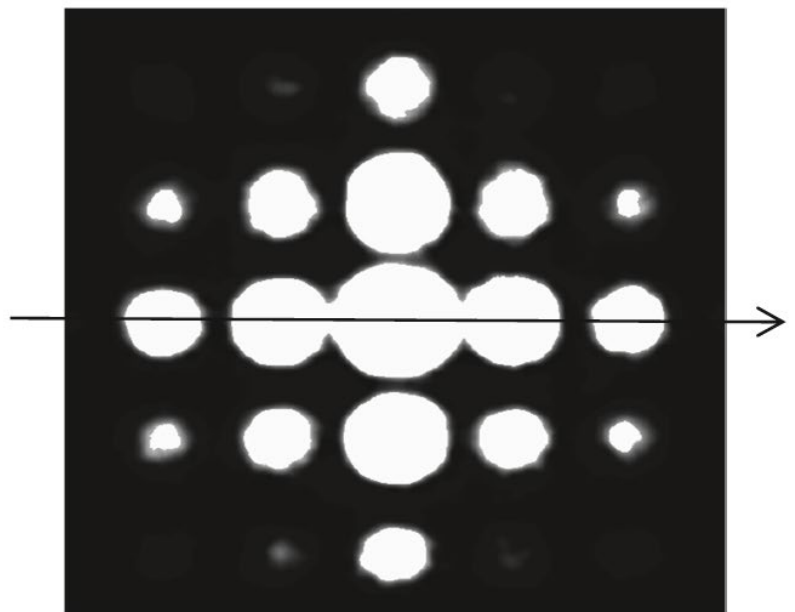


Figure 7. Tache centrale de la figure d'interférences à l'échelle 1/1

2.1. Expliquer brièvement, sans calcul, l'origine de la présence de zones sombres et de zones brillantes dans une figure d'interférences lumineuses.

Le centre de la figure d'interférences de la figure 6 est représenté sur la figure 7 ci-dessus à l'échelle 1/1. L'interfrange, noté i , est défini comme la distance entre les centres de deux taches lumineuses successives selon l'axe identifié sur la figure 7.

L'expression de l'interfrange est donnée par la relation : $i = \frac{\lambda \times D}{b}$.

L'incertitude-type $u(b)$ sur la grandeur b peut se calculer à partir de la relation :

$$\frac{u(b)}{b} = \sqrt{\left(\frac{u(D)}{D}\right)^2 + \left(\frac{u(i)}{i}\right)^2 + \left(\frac{u(\lambda)}{\lambda}\right)^2}$$

où $u(x)$ désigne l'incertitude-type associée à la grandeur x

2.2. Évaluer la valeur de l'interfrange i en explicitant la méthode suivie pour obtenir la meilleure précision.

Évaluer l'incertitude-type $u(i)$ sur la mesure de l'interfrange i .

2.3. Calculer b puis évaluer $u(b)$.

2.4. Indiquer si le tamis étudié permet de récupérer les artémies voulues. Justifier.