

## Instrumentation : modèle de spectrophotomètre

### THÉMATIQUE

- Instrumentation optoélectronique.

### CONCEPTS OU NOTIONS ABORDÉES

- Utilisation d'une carte à microcontrôleur.
- Mise en œuvre d'une application technologique simple (spectrophotomètre).

### OBJECTIFS DE FORMATION

- Réaliser un montage optique.
- Mettre en œuvre expérimentalement un circuit électronique.
- Utiliser la calibration d'un appareil de mesure.
- Étudier la réponse d'un capteur.

## Introduction

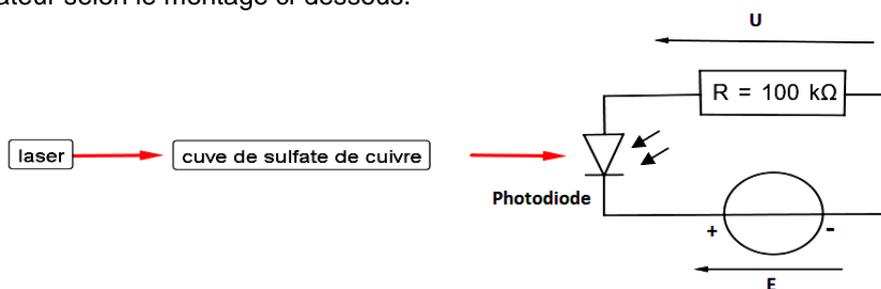
Consulter la page éducol associée au thème « [Programmer en physique-chimie](#) ».

## Présentation de l'activité

L'ensemble de ce document se compose de trois étapes.

### Étape 1 : montage expérimental

L'objectif est de concevoir un spectrophotomètre et travaillant à une longueur d'onde fixée. Pour cela on réalise un montage mêlant optique et électronique à l'aide d'un laser, d'une cuve (type cuve pour spectrophotomètre), d'une carte à microcontrôleur, d'une photodiode, d'un conducteur ohmique et d'un générateur selon le montage ci-dessous.



Il est possible de tester :

- le bon alignement du montage en mettant ou non sa main devant le faisceau lumineux, la tension, mesurée à l'aide d'un voltmètre, aux bornes du conducteur ohmique doit respectivement diminuer ou augmenter ;
- l'acquisition des données par l'intermédiaire de la carte en mettant ou non sa main devant le faisceau lumineux, l'entier doit respectivement diminuer ou augmenter.

### Étape 2 : étalonnage du spectrophotomètre

On étudie la réponse de la photodiode (la démarche est généralisable à tous types de capteurs) soumis à une sollicitation (ici un flux lumineux variable) via la carte afin d'étalonner le spectrophotomètre : les données acquises à l'aide d'un programme écrit en langage Arduino, sont alors modélisées alors grâce à un tableur.

### Étape 3 : mesures et automatisation

En utilisant le résultat de la modélisation obtenue, il s'agit d'adapter le dispositif à une mesure automatisée de la concentration (inconnue) d'une solution de même nature que celles ayant servi à effectuer la modélisation.

Il est possible de tester le spectrophotomètre calibré en effectuant une mesure de concentration avec une solution de concentration connue.

#### LOGICIELS UTILISÉS

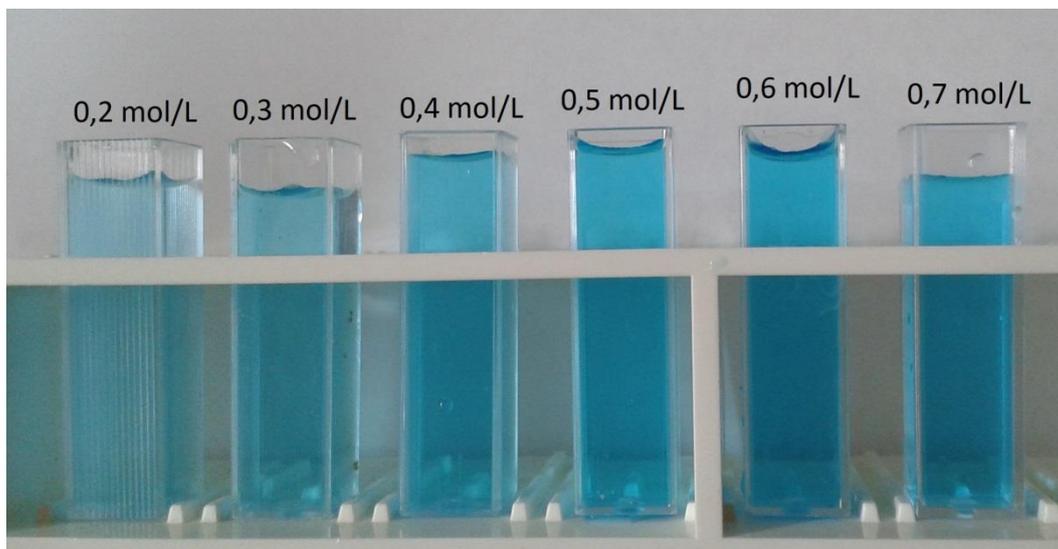
- Logiciel et interface de programmation Arduino
- Tableur Calc (LibreOffice), Excel<sup>®</sup> ou Regressi<sup>®</sup>

#### CAPACITÉS NUMÉRIQUES TRAVAILLÉES

- Déclarer des variables (langage Arduino) ;
- Activer les éléments utilisés de la carte (langage Arduino) ;
- Afficher le résultat d'une acquisition (langage Arduino) ;
- Savoir commander le calcul d'une grandeur à partir d'une grandeur acquise par la carte (langage Arduino) ;
- Saisir un tableau de grandeurs (tableur) ;
- Afficher une représentation graphique (tableur) ;
- Modéliser un nuage de points par une fonction mathématique (tableur).

### Exemple de contextualisation

Il est possible de contextualiser la situation d'apprentissage dans le cadre de la mise au point d'un spectrophotomètre pour des dosages par étalonnage en chimie. La situation est présentée avec une solution de sulfate de cuivre mais toute solution colorée pourrait convenir à condition que la longueur d'onde du laser choisi ait une longueur d'onde dans la bande d'absorption de la solution.

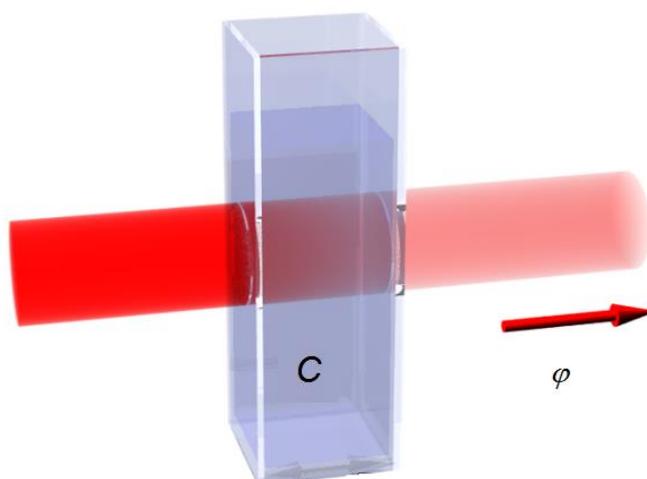


N.B. : Un fichier Spectrophotmètre\_ECE.doc, dans le dossier « [Modèle de spectrophotomètre.zip](#) », fournit un énoncé possible d'une évaluation des compétences expérimentales relatives au sujet abordé.

### De la situation physique au traitement numérique

Les paragraphes, ci-dessous, précisent les notions utilisées dans cette expérience et les notations utilisées pour les différentes grandeurs.

- Lorsque le laser est aligné avec la cuve, l'intensité lumineuse  $\varphi$  en sortie de la cuve est plus faible que l'intensité lumineuse incidente sur la cuve contenant une espèce absorbant la longueur d'onde du laser. L'intensité lumineuse  $\varphi$  en sortie de la cuve est liée à la concentration molaire  $C$  (ou massique  $C_m$ ) de l'espèce chimique, absorbant la lumière, contenue dans la solution selon la loi physique de Beer-Lambert si le cadre d'étude de cette loi est respecté ;



- La photodiode est un capteur qui transforme l'intensité lumineuse  $\varphi$  reçue en une intensité électrique, grandeur analogique, circulant dans la diode selon une relation de proportionnalité sur une certaine plage de mesures. Pour pouvoir acquérir le signal à l'aide de la carte à microcontrôleur, on souhaite mesurer une tension électrique. Pour cela on place un conducteur ohmique en série avec la photodiode comme l'indique le montage électrique. Dans ce cas la tension  $U$  aux bornes du conducteur ohmique est proportionnelle à l'intensité électrique  $I$  qui les parcourt.

- La carte permet de mesurer et d'acquérir la tension aux bornes du conducteur ohmique. Cette carte contient un convertisseur analogique-numérique qui fournit un signal numérique codé sur 10 bits proportionnel à la tension  $U$  appelé mot binaire. Le programme associera un entier  $N$ , entre 0 et 1023, à ce mot binaire.

Pour utiliser cette chaîne de transmission afin d'effectuer une mesure, il est nécessaire d'effectuer un traitement informatique comportant deux étapes majeures : une étape de calibration (étape 2) et une étape de mesure (étape 3).

Pour calibrer le spectrophotomètre on utilise des solutions étalons de concentrations connues en sulfate de cuivre. On obtient un graphique liant l'entier  $N$  généré par la carte d'acquisition et la concentration des solutions étalons. On modélise ce graphique par la fonction  $N = k_1 \cdot 10^{-k_2 \cdot C}$  où  $k_1$  et  $k_2$  sont des constantes. On dit que le spectrophotomètre est calibré ou étalonné.

Pour déterminer la concentration en sulfate de cuivre d'une solution inconnue, on s'appuie sur les résultats l'étalonnage.

## Ce que les élèves doivent retenir

Lors de la mise au point et de l'utilisation de ce dispositif, les élèves peuvent appréhender les différents éléments d'une chaîne de mesure :

- Depuis le signal lumineux ( $\varphi$ ), analogique ;
- En passant par le signal électrique ( $U$ ), analogique, donné par le capteur (photodiode) ;
- Jusqu'au signal « numérique » ( $N$ ) généré par la carte à microcontrôleur ;
- Puis à la grandeur physique à laquelle on souhaite avoir accès ( $C$ ).

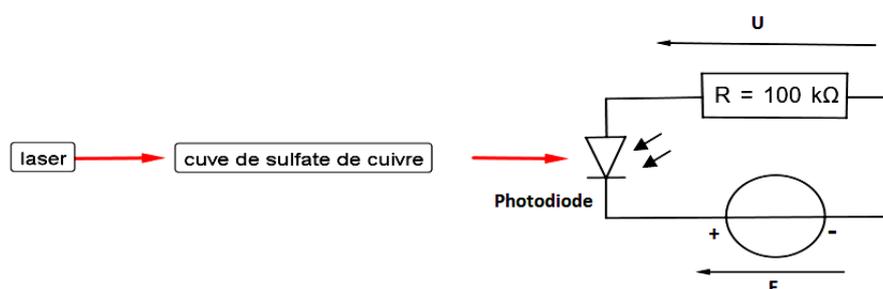
On peut enfin attirer l'attention des élèves sur le fait que le lien entre la grandeur physique à laquelle on souhaite avoir accès ( $C$ ) et la grandeur effectivement mesurée, la relation n'est pas nécessairement linéaire (et nécessite une calibration).

## Étape 1 : montage expérimental<sup>1</sup>

### Protocole expérimental (compétences Réaliser et Analyser)

#### Montage optique

- Éclairer la photodiode avec un laser rouge.
- Disposer une cuve contenant la solution aqueuse de sulfate de cuivre ( $\text{Cu}^{2+}_{(\text{aq})} + \text{SO}_4^{2-}_{(\text{aq})}$ ) de concentration molaire  $C$  entre la source laser et la photodiode.



<sup>1</sup> Les propositions suivantes ne sont pas prescriptives. Il s'agit de bases pour illustrer la situation d'apprentissage qu'il convient d'ajuster en fonction de sa place dans la progression et dans la séquence pédagogique, du niveau de maîtrise par les élèves de l'outil informatique choisi, etc.

## Montage électrique

- Réaliser le montage d'une photodiode montée en série avec un conducteur ohmique de résistance  $R = 100 \text{ k}\Omega$ . L'ensemble sera soumis à une tension continue  $E = 5 \text{ V}$  maximum, la photodiode sera polarisée en inverse.  
N.B : Les valeurs de  $R$  et  $E$  doivent être choisies pour éviter la saturation du détecteur.

## Connexion de la carte à microcontrôleur et programmation

- Connecter la carte pour mesurer la tension aux bornes du conducteur ohmique.
- Écrire un programme qui code par un entier  $N$  la tension mesurée par la carte.

## Validation expérimental de la programmation (compétence Valider)

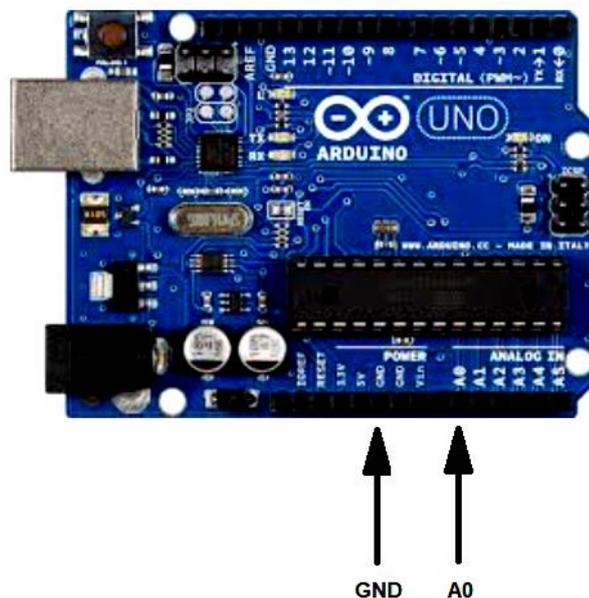
- Vérifier la valeur de l'entier  $N$  indiqué par le programme, cela permet de vérifier la stabilité du laser.
- Retirer la cuve, vérifier que l'entier  $N$  indiqué par le programme augmente.
- Mettre un obstacle opaque devant le faisceau lumineux, vérifier que l'entier  $N$  indiqué par le programme diminue.

## Exemples de solutions pour la programmation avec de la carte à microcontrôleur

Nous avons utilisé une carte à microcontrôleur Arduino™ Uno.

### Solutions partielles

La connexion sur la carte doit se faire entre une entrée analogique (par exemple la borne A0) et la masse GND. Pour connaître la position de ces différentes connexions sur la carte, vous référez à la photographie ci-dessous.



Pour initialiser le programme, il faut déclarer les variables correspondant à la tension mesurée d'une part et à l'entier généré par carte d'autre part. Il est également nécessaire de préparer la carte. On crée une boucle dans laquelle la tension analogique est lue, puis on associe entier  $N$  image de la tension mesurée. Pour terminer on affiche l'entier  $N$  avec une périodicité de 5 s par exemple.

## Solution totale

```
/* Déclaration des variables */
int tension=A0; /* entrée analogique de la carte Arduino */
int N=0;        /* sortie "numérique" de la carte Arduino */

/* Préparation de la carte */
void setup() {
  pinMode(tension, INPUT); /* La broche A0 sera une entrée (input) analogique */
  Serial.begin(9600);      /* Cette ligne permet la communication à 9600 bauds
                           entre la carte et le moniteur série */
}

/* Acquisition et affichage des résultats */
void loop() {
  N=analogRead(tension); /* N compris entre 0 (si A0 = 0 V) et 1023 (si A0 = 5 V) */
  Serial.println(N);     /* Affichage de la valeur de l'entier N */
  delay(5000);          /* Affichage pendant une durée de 5000 ms = 5 s avant la
                           prochaine acquisition */
}
```

## Étape 2 : étalonnage le spectrophotomètre (compétence Réaliser)

### Protocole expérimental pour effectuer les mesures

- Placer chacune des solutions étalons sulfate de cuivre ( $\text{Cu}^{2+}_{(\text{aq})} + \text{SO}_4^{2-}_{(\text{aq})}$ ) de concentration molaire  $C$  connues dans une cuve.
- Mesurer l'entier  $N$  géré par le programme pour chaque cuve après les avoir disposé entre la source laser et la photodiode.
- Tracer le graphique  $N = f(C)$  sur un tableur.

### Programmation pour étalonner le spectrophotomètre

Pour effectuer l'étalonnage, on peut procéder selon deux méthodes :

- en modélisant le graphique obtenu par la fonction  $N = k_1 \cdot 10^{-k_2 \cdot C}$  dans un intervalle de concentration  $C$  judicieusement choisi ;
- en cherchant la valeur du couple  $(k_1 ; k_2)$  qui minimise l'écart quadratique  $E$  défini par  $E = \sum_i (N_i - k_1 \cdot 10^{-k_2 \cdot C})^2$ .

Il peut être intéressant de comparer les deux méthodes.

### Expérimentation numérique et validation de la programmation (compétence Valider)

1. Vérifier que  $N$  décroît avec  $C$ .
2. Vérifier que la courbe caractéristique de la fonction  $N = f(C)$  épouse au mieux les points expérimentaux quand l'écart quadratique  $E$  défini par  $E = \sum_i (N_i - k_1 \cdot 10^{-k_2 \cdot C})^2$  est minimal.
3. Expliciter les limites du capteur.

## Exemple d'aides pour la programmation et de résultats

### Aides pour la programmation avec le tableur Excel<sup>®</sup>

Réaliser une programmation ayant pour but de rechercher les valeurs de  $k_1$  et  $k_2$  qui minimisent l'erreur quadratique  $E$  entre les mesures  $N$  et les valeurs calibrées  $C$ . On donne :

$$E = \sum_i (N_i - k_1 \cdot 10^{-k_2 \cdot C})^2$$

### Aides pour la programmation avec le tableur Regressi<sup>®</sup>

Modéliser par la fonction  $N = k_1 \cdot 10^{-k_2 \cdot C}$  la caractéristique  $N = f(C)$  dans l'intervalle de concentration  $C$  judicieusement choisi.

Vous trouverez des exemples de productions dans le dossier « [Modèle de spectrophotomètre.zip](#) ».

## Activité 3 : mesures et automatisation<sup>2</sup>

### Exemples de consignes pour les élèves pour l'utilisation du spectrophotomètre

#### 1. Programmation (compétence Réaliser)

Dans le programme en langage Arduino réalisé à l'étape 2, saisir quelques lignes supplémentaires permettant de déclarer la concentration molaire, puis de calculer  $C$  connaissant  $N$  :

$C = -\frac{1}{k_2} \cdot \log\left(\frac{N}{k_1}\right)$  où  $k_1$  et  $k_2$  ont été déterminés lors de l'étape 2, puis d'afficher une phrase du type « la concentration molaire en sulfate de cuivre est de ... mol/L ».

#### 2. Validation et expérimentation de la programmation (compétence Valider)

2.1. Vérifier avec une solution de concentration connue que le logiciel créé indique bien la bonne concentration.

2.2. Faire la mesure d'une concentration inconnue.

### Exemples d'aides et la solution totale pour la programmation

#### Aides pour la programmation en langage Arduino

Aide 1 : Définir une grandeur concentration en l'initialisant comme nulle.

Aide 2 : Dans la boucle principale, définir une grandeur intitulée concentration comme

$C = -\frac{1}{k_2} \cdot \log\left(\frac{N}{k_1}\right)$  avec  $k_1$  et  $k_2$  les constantes déterminées lors de l'étalonnage (étape 2).

Aide 3 : Dans la boucle principale, afficher le résultat.

#### Solution totale du programme en langage Arduino

Une écriture possible du programme est présentée ci-dessous.

```
int tension=A0;
int N=0;
float concentration=0;

void setup() {
  pinMode(tension, INPUT);
  Serial.begin(9600);
}

void loop() {
  N=analogRead(tension);
  concentration=1.645-0.5*log10(N);
  Serial.print("La concentration molaire en sulfate de cuivre est de ");
  Serial.print(concentration);
  Serial.println(" mol/L");
  delay(5000);
}
```

<sup>2</sup> Les propositions suivantes ne sont pas prescriptives. Il s'agit de bases pour illustrer la situation d'apprentissage qu'il convient d'ajuster en fonction de sa place dans la progression et dans la séquence pédagogique, du niveau de maîtrise par les élèves de l'outil informatique choisi, etc.