

Rapprocher physique et chimie autour de la construction d'instruments de mesure à partir d'un microcontrôleur

Jérôme RANDON

Institut des Sciences Analytiques
Université Claude Bernard Lyon 1

JIREC TOULOUSE 2022 Rapprocher physique et chimie autour de la construction d'instruments de mesure à partir d'un microcontrôleur

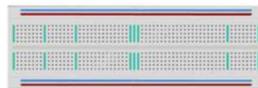
Quelques questions pour démarrer

<https://www.menti.com/>

JIREC TOULOUSE 2022 Rapprocher physique et chimie autour de la construction d'instruments de mesure à partir d'un microcontrôleur

Les outils de base

- Carte Arduino
- Platine d'expérimentation
- Composants simples : Résistances, Diodes Electroluminescentes...


JIREC TOULOUSE 2022 Rapprocher physique et chimie autour de la construction d'instruments de mesure à partir d'un microcontrôleur

Développer un pHmètre

$\Delta E(\text{pH electrode})$ entre -500 mV et +500 mV dépendant du pH de la solution dans laquelle l'électrode est immergée

Carte électronique pour convertir dans la plage 0-5V

Carte	Arduino	
V+	5V	
G	GND	
Po	A0	



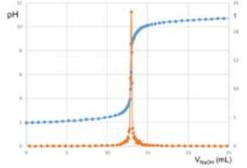


JIREC TOULOUSE 2022 Rapprocher physique et chimie autour de la construction d'instruments de mesure à partir d'un microcontrôleur

Les titrateurs automatiques



JIREC TOULOUSE 2022 Rapprocher physique et chimie autour de la construction d'instruments de mesure à partir d'un microcontrôleur



Quelques éléments de conclusion

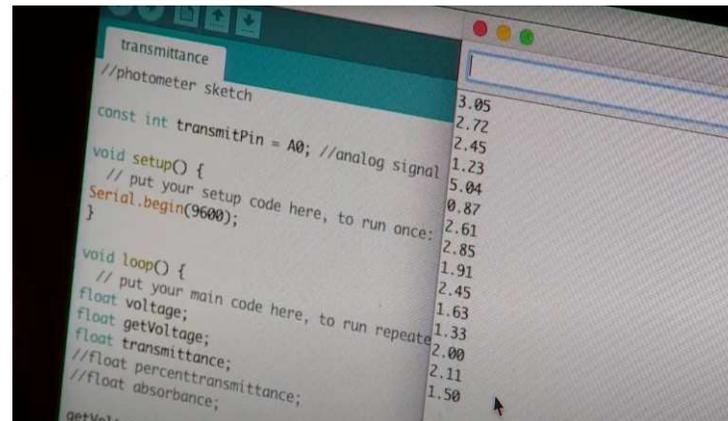
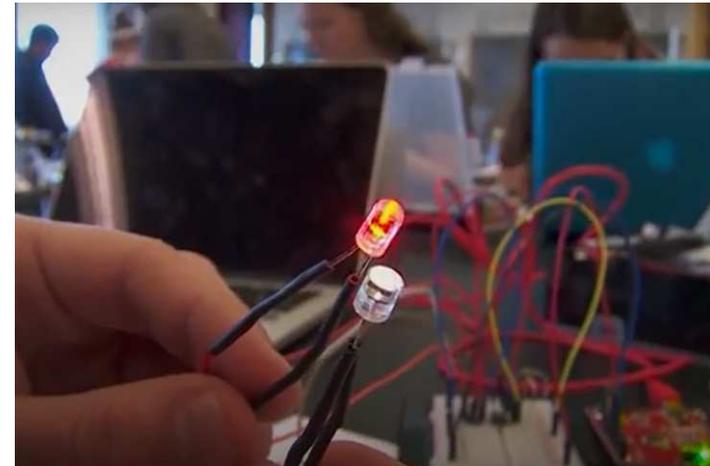


**Quelques questions
pour démarrer**

<https://www.menti.com/>

Une nouvelle opportunité via le numérique

Une pédagogie basée sur la création d'instruments



Une piste de formation... ...adaptable à différents niveaux

Construire l'instrument de mesure permet de mieux appréhender ses performances, et donc ses limites

Type de signal mesuré

Justesse et fidélité

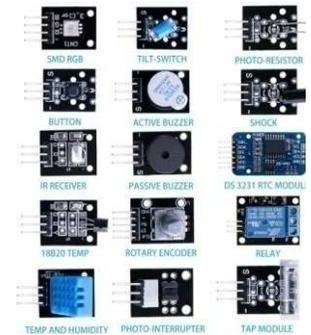
Optimisation de l'instrument



Avoir été impliqué dans l'élaboration d'un instrument permet de mieux appréhender le fonctionnement d'autres instruments

Possibilité de création d'instruments

- Electronique à bas coût
 - Basé sur des cartes Arduino opensource
- Grande variété de capteurs
- Grande variété d'actuateurs
- Connaissances basiques d'électricité
- Facile à programmer

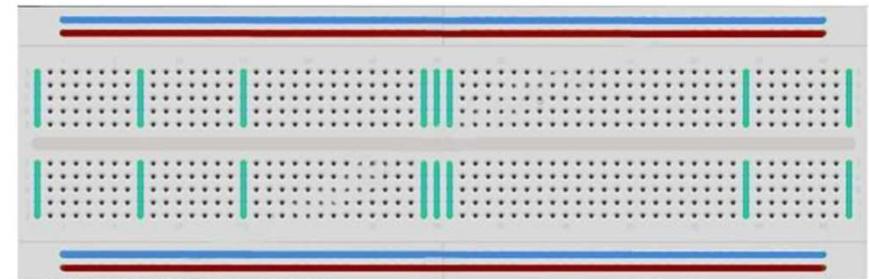


Les outils de base

- Carte Arduino



- Platine d'expérimentation



- Composants simples : Résistances, Diodes Electroluminescentes...

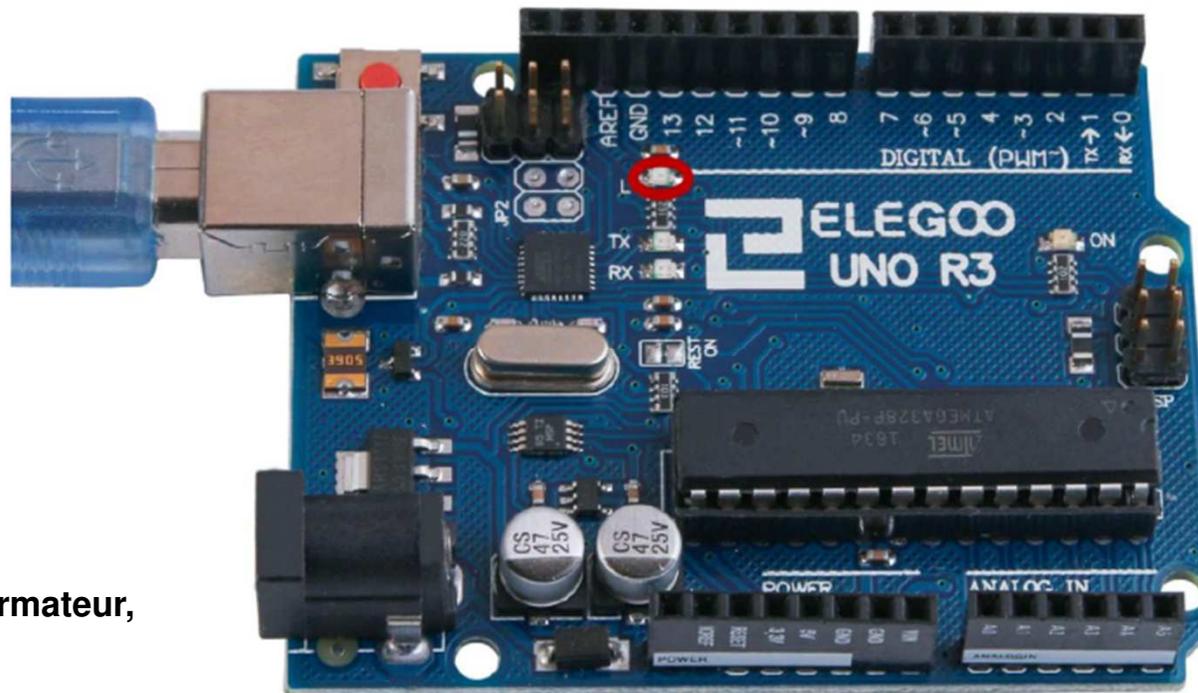


L'instrumentation de base

Carte Arduino

Port USB : communication et
alimentation 5V.

0 à 13 : Entrées / sorties
numériques et PWM



Connecteur jack :
alimentation transformateur,
pile ou une batterie

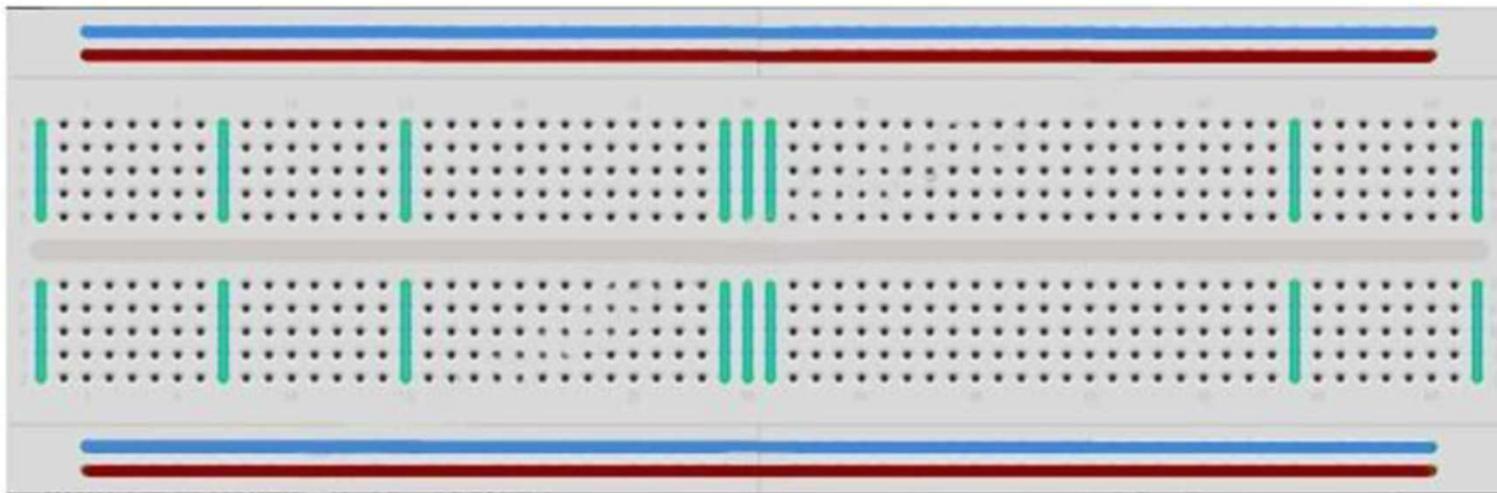
GND Terre ou masse (0V)
5V Alimentation +5V
3.3V Alimentation +3.3V

A0 à A5 : Entrées / sorties
analogiques

L'instrumentation de base

Platine d'expérimentation

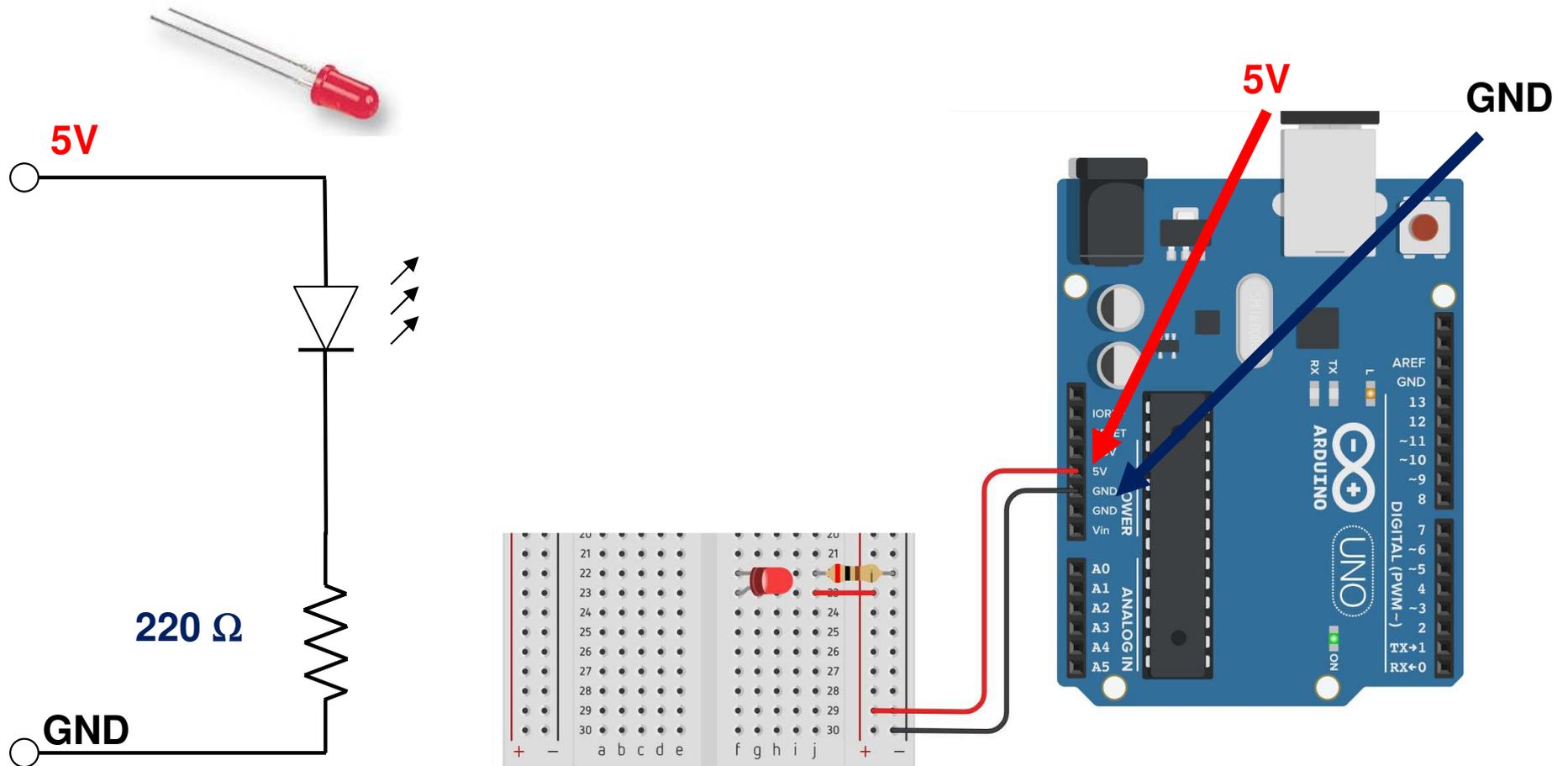
Tous les connecteurs dans une colonne de 5 sont reliés entre eux
Tous les connecteurs sur les lignes rouge et bleu sont reliés entre eux



Un générateur de tension

1 LED, 1 résistance de 220 Ω , 2 câbles

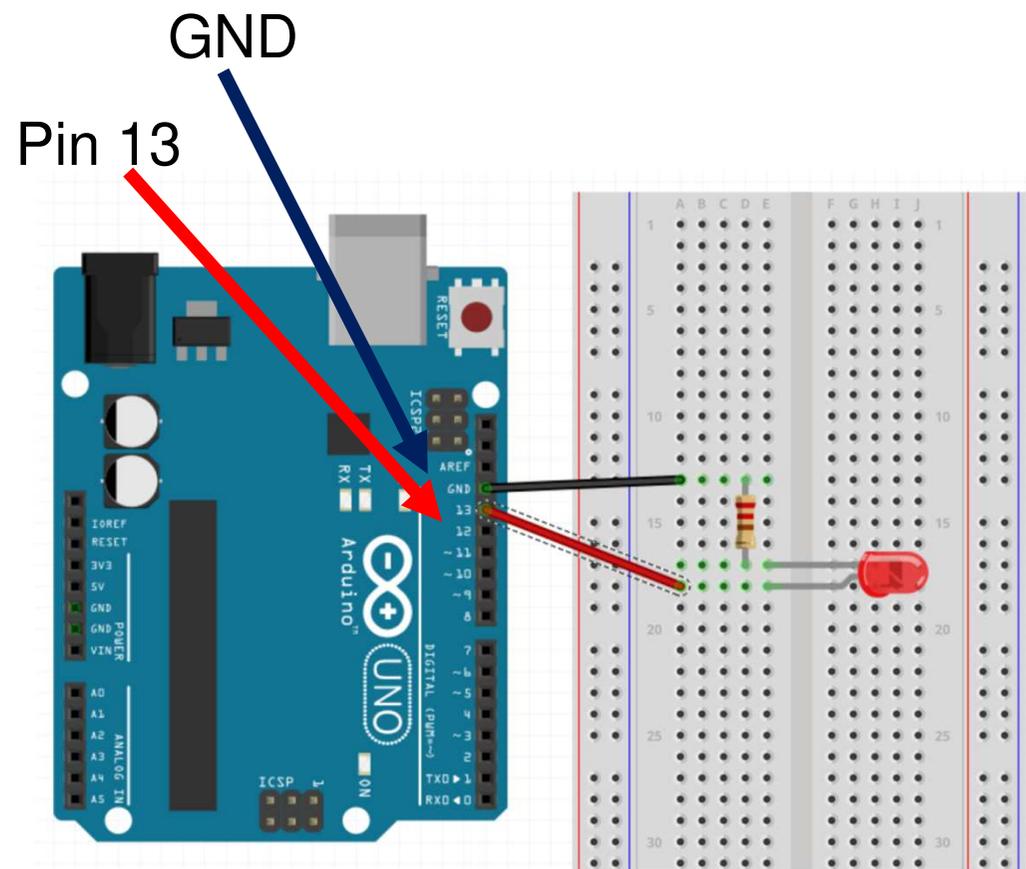
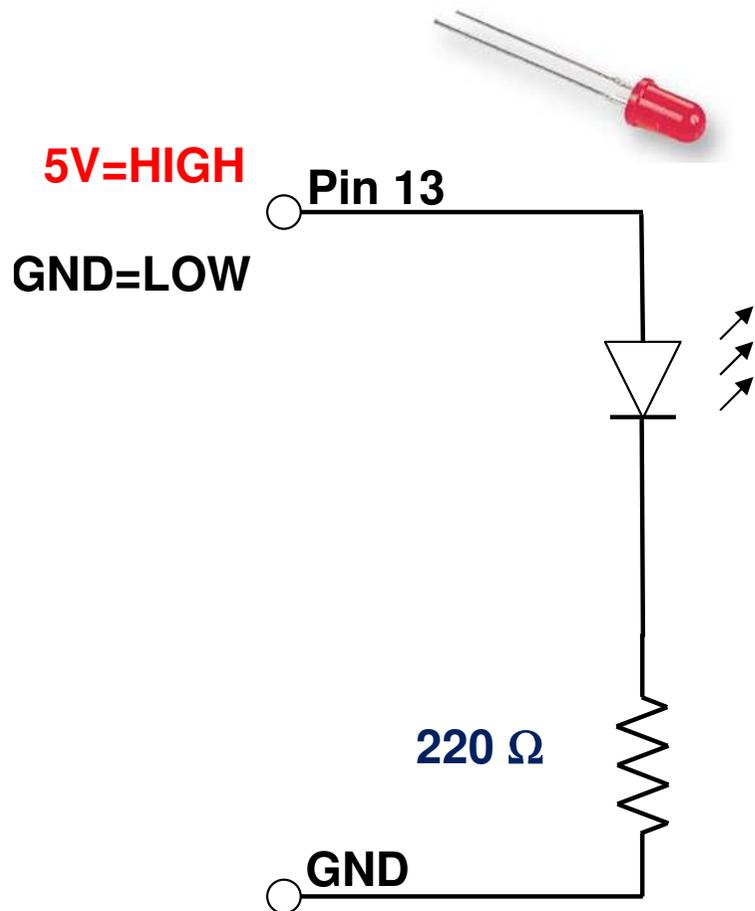
Branchement Carte Arduino sur un port USB => alimentation électrique



Agir : allumer une diode

1 LED, 1 résistance de 220 Ω , 2 câbles

Branchement Carte Arduino sur un port USB => alimentation électrique

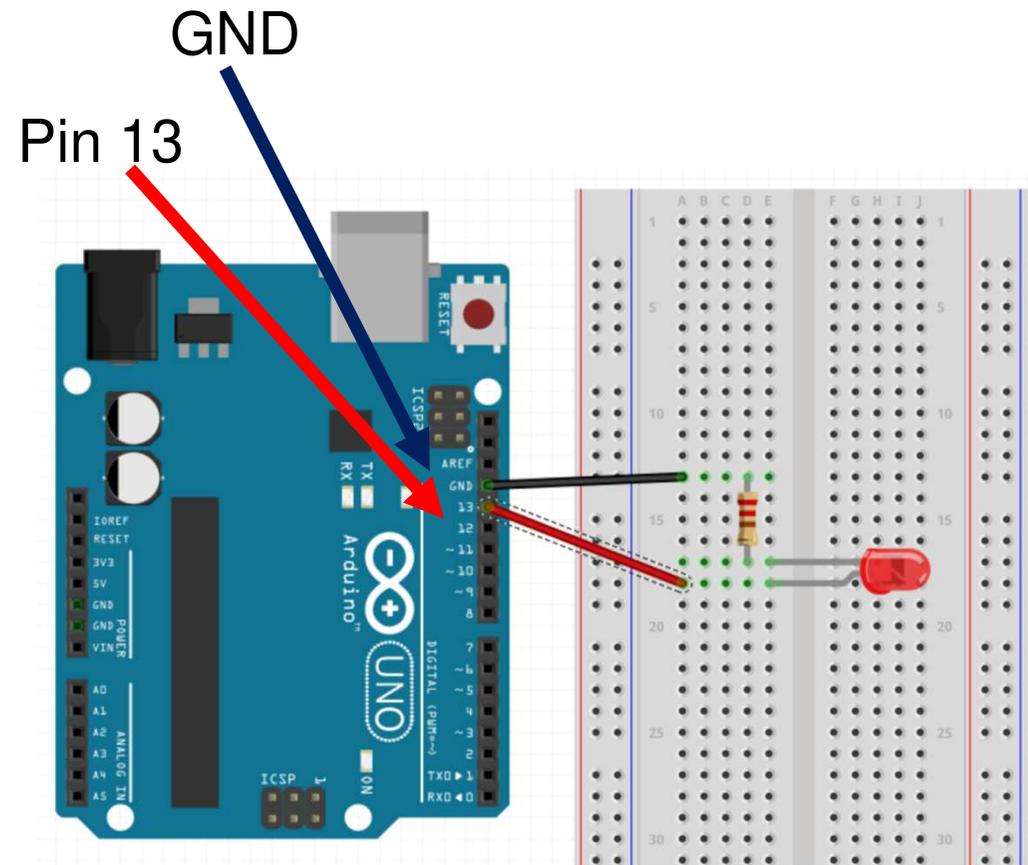


Agir : allumer une diode

Le programme

```
void setup(){
  pinMode(13,OUTPUT);
  digitalWrite(13, HIGH);
}
```

```
void loop(){
}
```

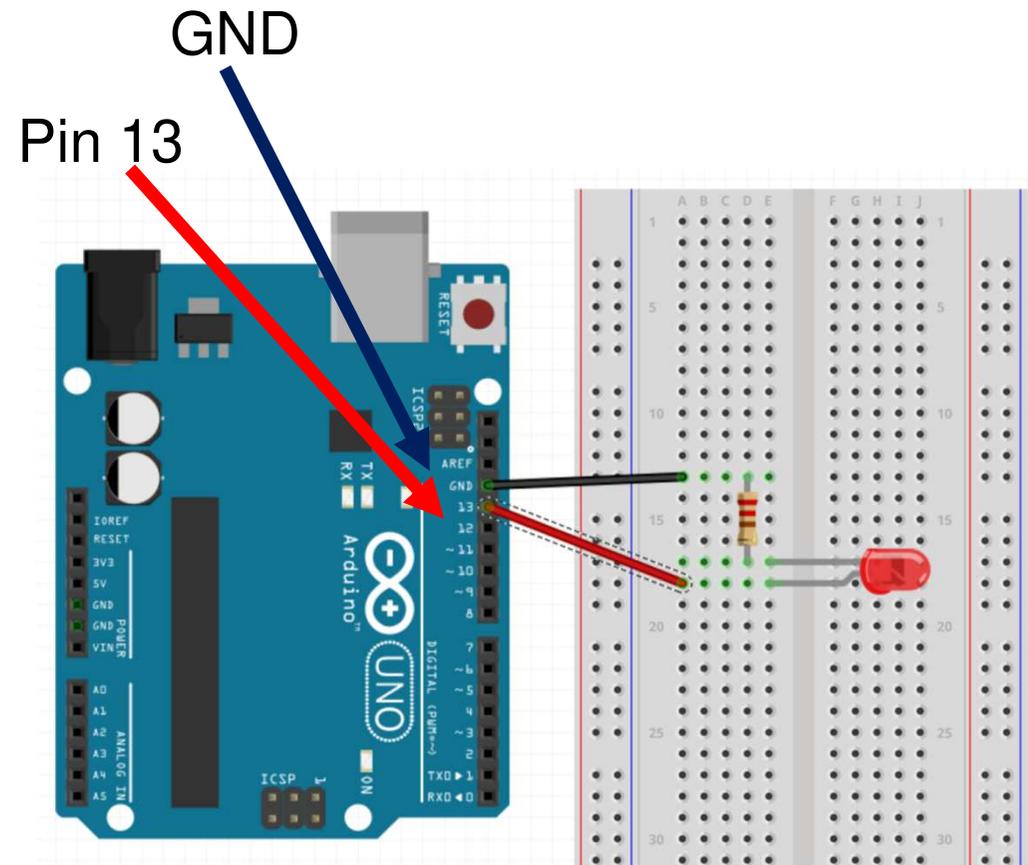


Agir : allumer une diode, la faire clignoter

Le programme

```
void setup(){
  pinMode(13,OUTPUT);
}
```

```
void loop(){
  digitalWrite(13, HIGH);
  delay(1000);
  digitalWrite(13, LOW);
  delay(1000);
}
```



Mesurer : Entrée analogique

analogRead (pin number); // retourne une valeur numérique sous la forme d'un entier (0-1023), proportionnelle au voltage sur le pin spécifié (A0 à A5)

Exemple de code

SensorValueA=analogRead(A0);



A0 à A5 : Entrées Analogiques

Convertisseur Analogique/Numérique 10 bits (0 à 1023)

Mesurer : une tension

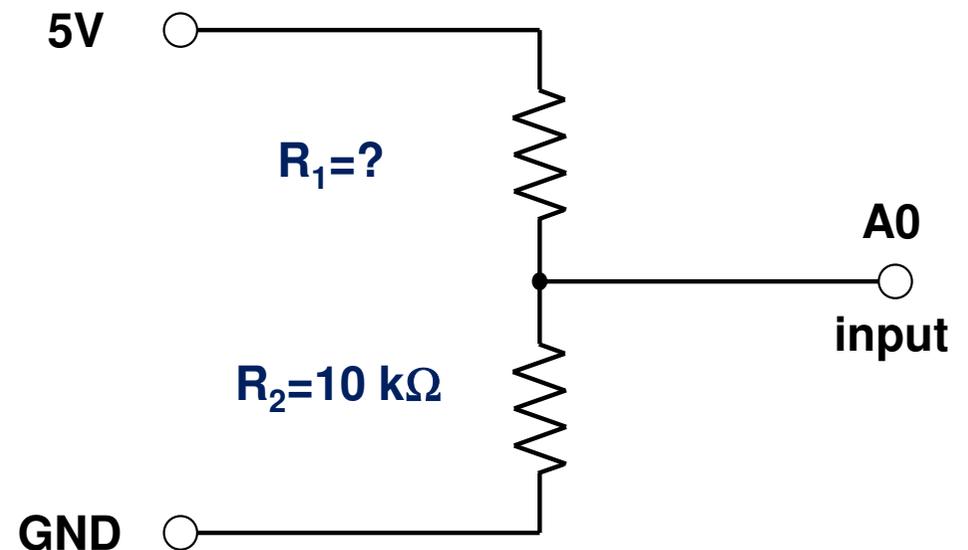
```
float TensionLue;

void setup() {
  pinMode(A0, INPUT);
  Serial.begin(9600);
}

void loop() {
  TensionLue = analogRead(A0)* 5.0 / 1023;
  Serial.println(TensionLue);

  delay(200);
}
```

Le circuit



$$R_1 = R_2 \left(\frac{5}{V_{A0}} - 1 \right)$$

Mesurer : créer un thermomètre

Le capteur : thermistance

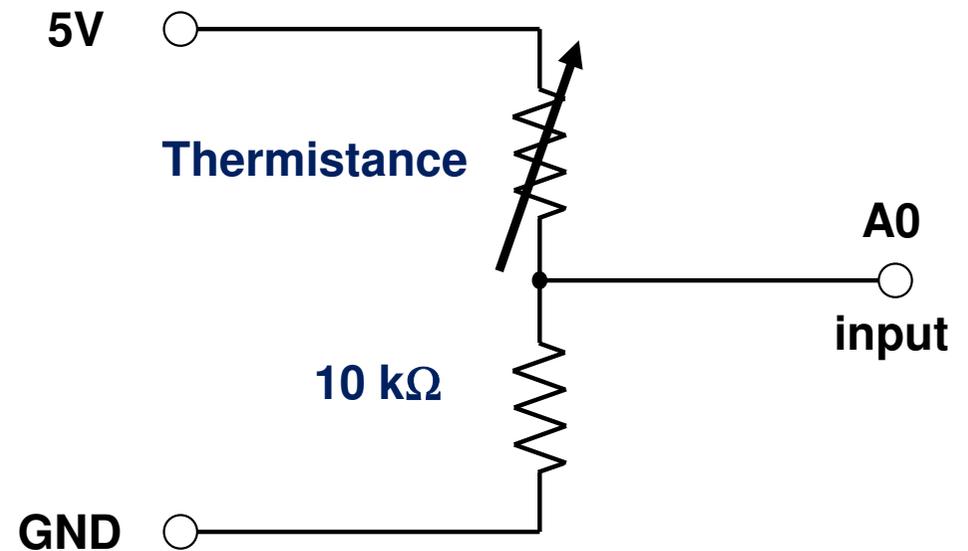


Données fiche technique

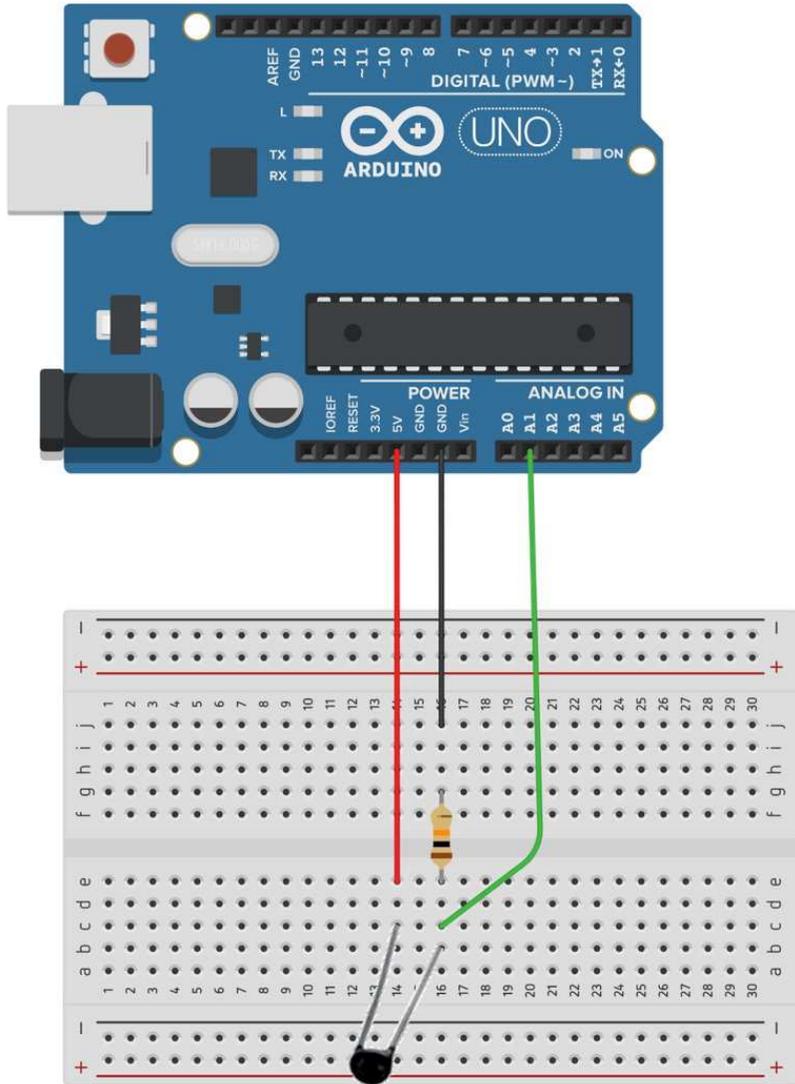
$$R_{(T)} = R_{(25)} \cdot e^{\left(B \cdot \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{298,15} \right) \right)}$$

$$R_{(25)} = 10\,000 \, \Omega \quad \mathbf{B} = 3950$$

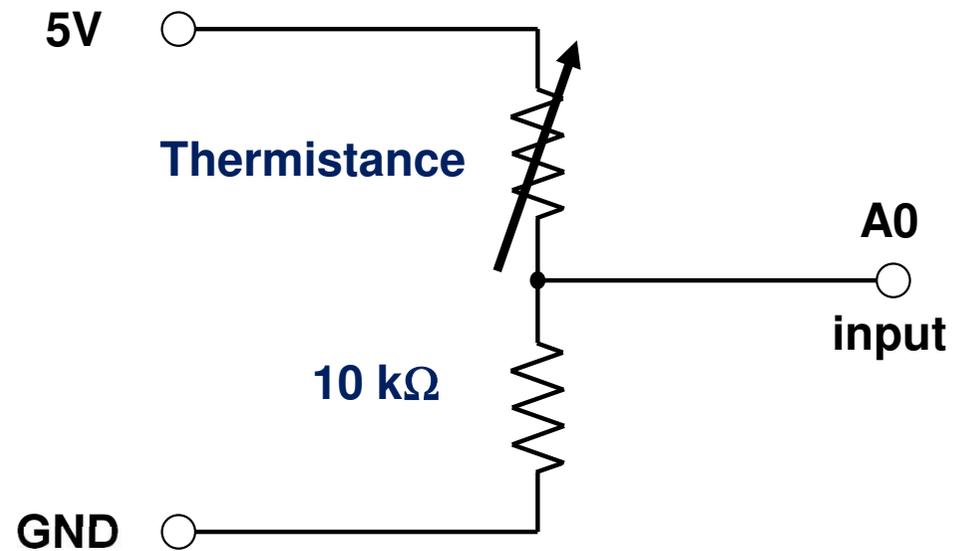
Le circuit



Mesurer : créer un thermomètre



Le circuit

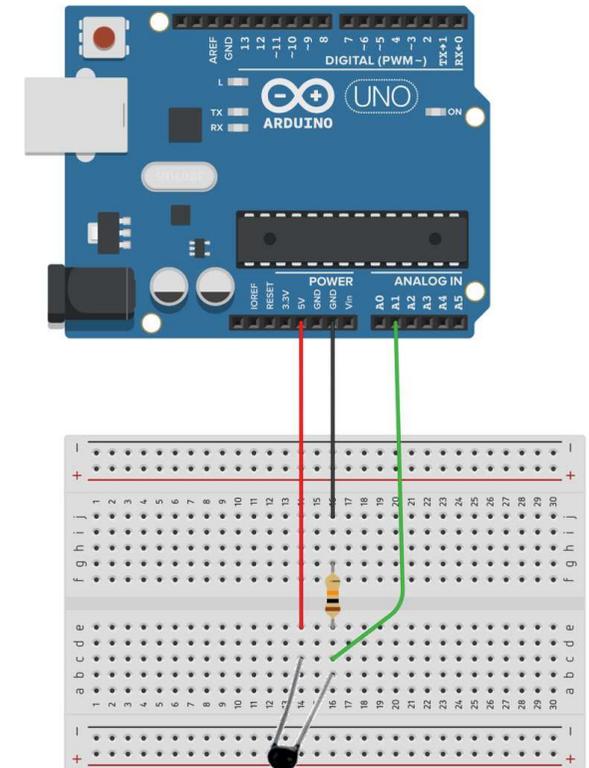


Mesurer : créer un thermomètre

```
float TensionLue;
float ResistanceCapteur;
float Temperature;
float R2 = 10000;
float RT25=10000; // résistance de la thermistance à 25°C
```

```
void setup() {
  pinMode(A1, INPUT);
  Serial.begin(9600);
}
```

```
void loop() {
  TensionLue = analogRead(A1)* 5.0 / 1023;
  ResistanceCapteur = R2 * (5 / TensionLue - 1);
  Temperature = 1 / ((log(ResistanceCapteur / RT25)) / 3950 + 1 / 298.15) - 273.15;
  Serial.println(Temperature);
  delay(200);
}
```



Développer un pHmètre



$\Delta E(\text{pH electrode})$ entre -500 mV et +500 mV dépendant du pH de la solution dans laquelle l'électrode est immergée

Carte électronique pour convertir dans la plage 0-5V



Carte

Arduino

V+



5V

G



GND

Po



A0



Développer un pHmètre



Carte

V+

G

Po



Arduino

5V

GND

A0

```
void setup() {  
  pinMode(A0, INPUT);  
  Serial.begin(9600);  
}  
  
void loop() {  
  Serial.println(analogRead(A0));  
  delay(200);  
}
```

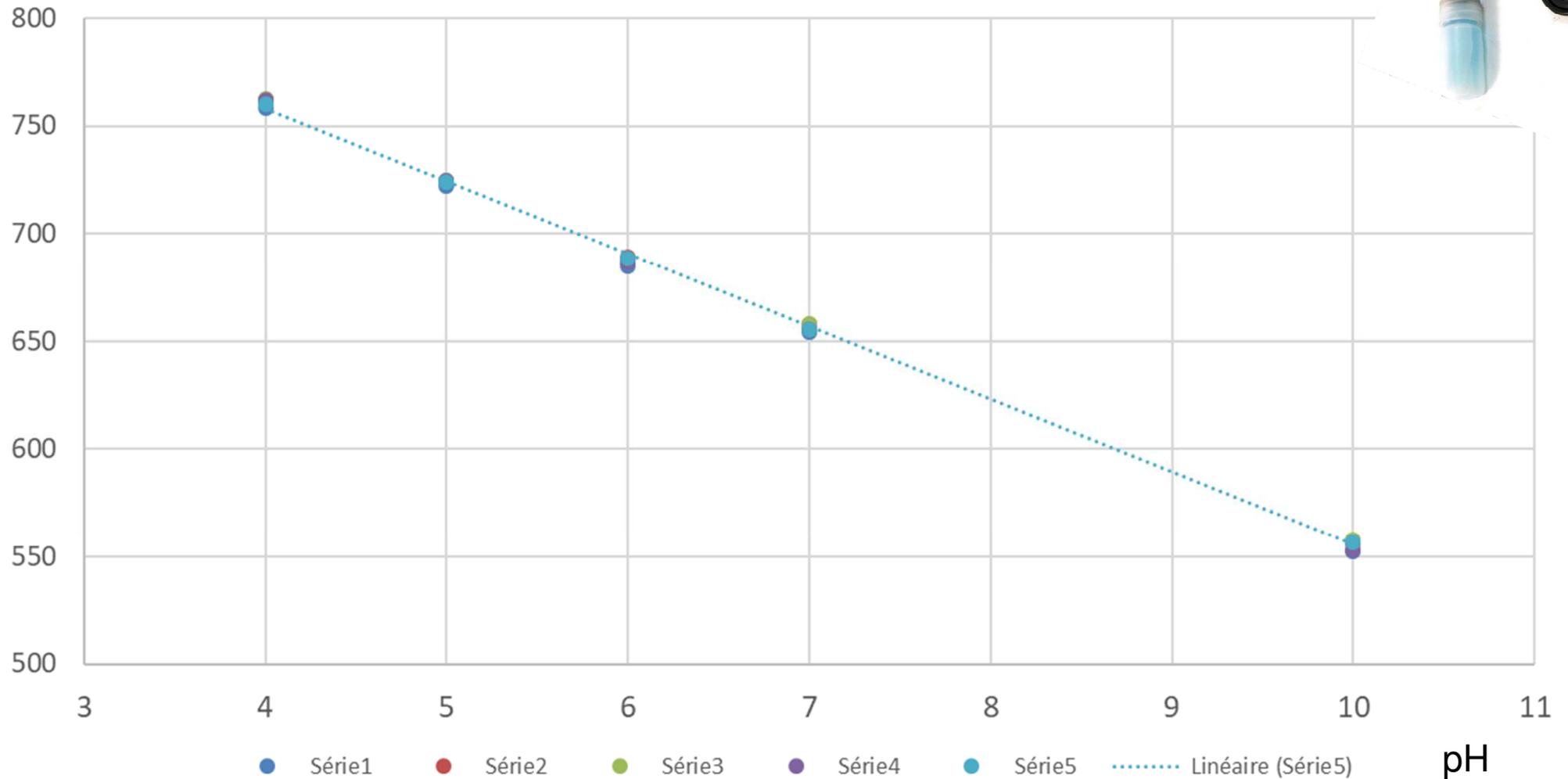


Calibration/étalonnage du pHmètre ?

Développer un pHmètre

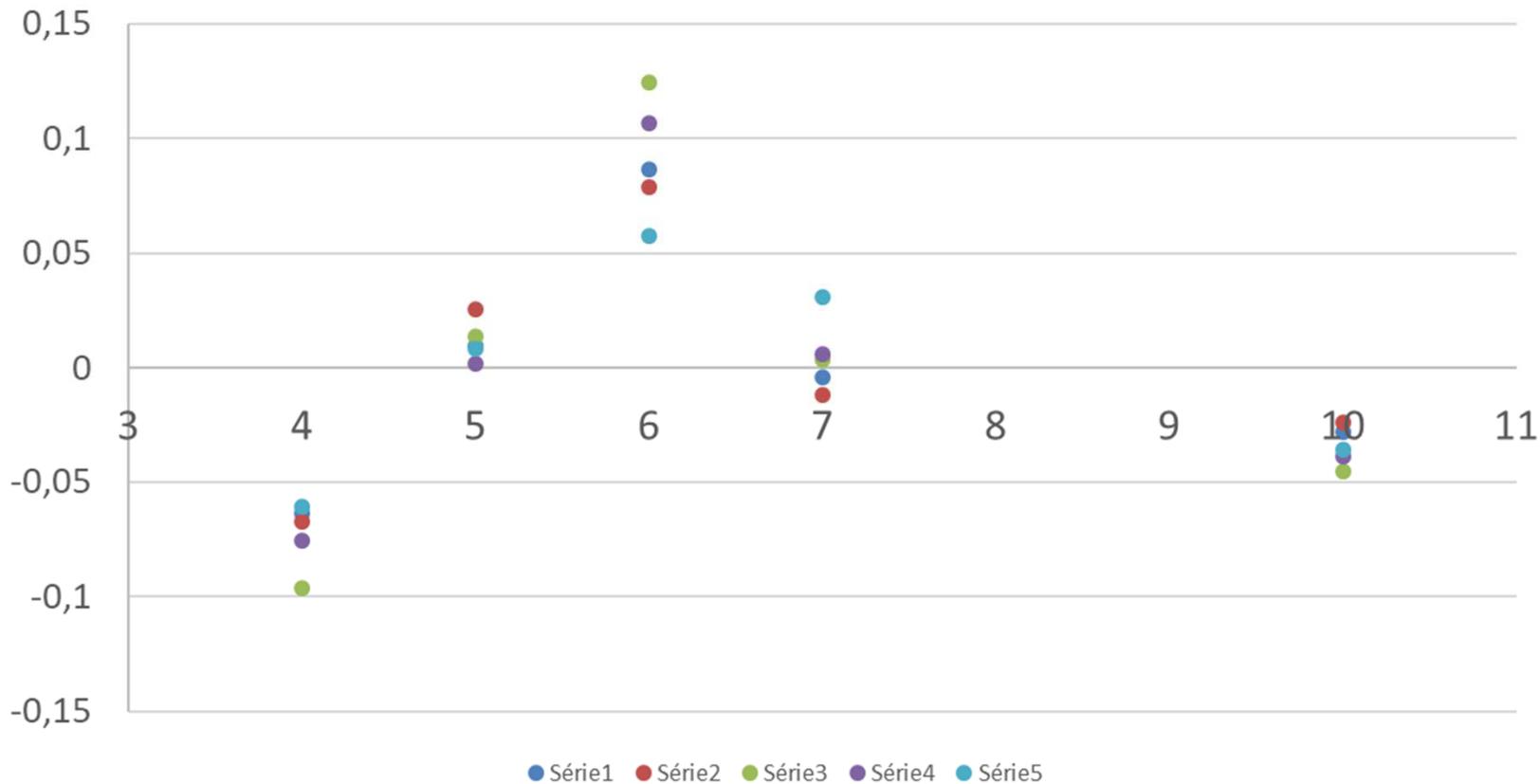


Signal A0



Mesure de pH

Biais absolu sur le pH recalculé

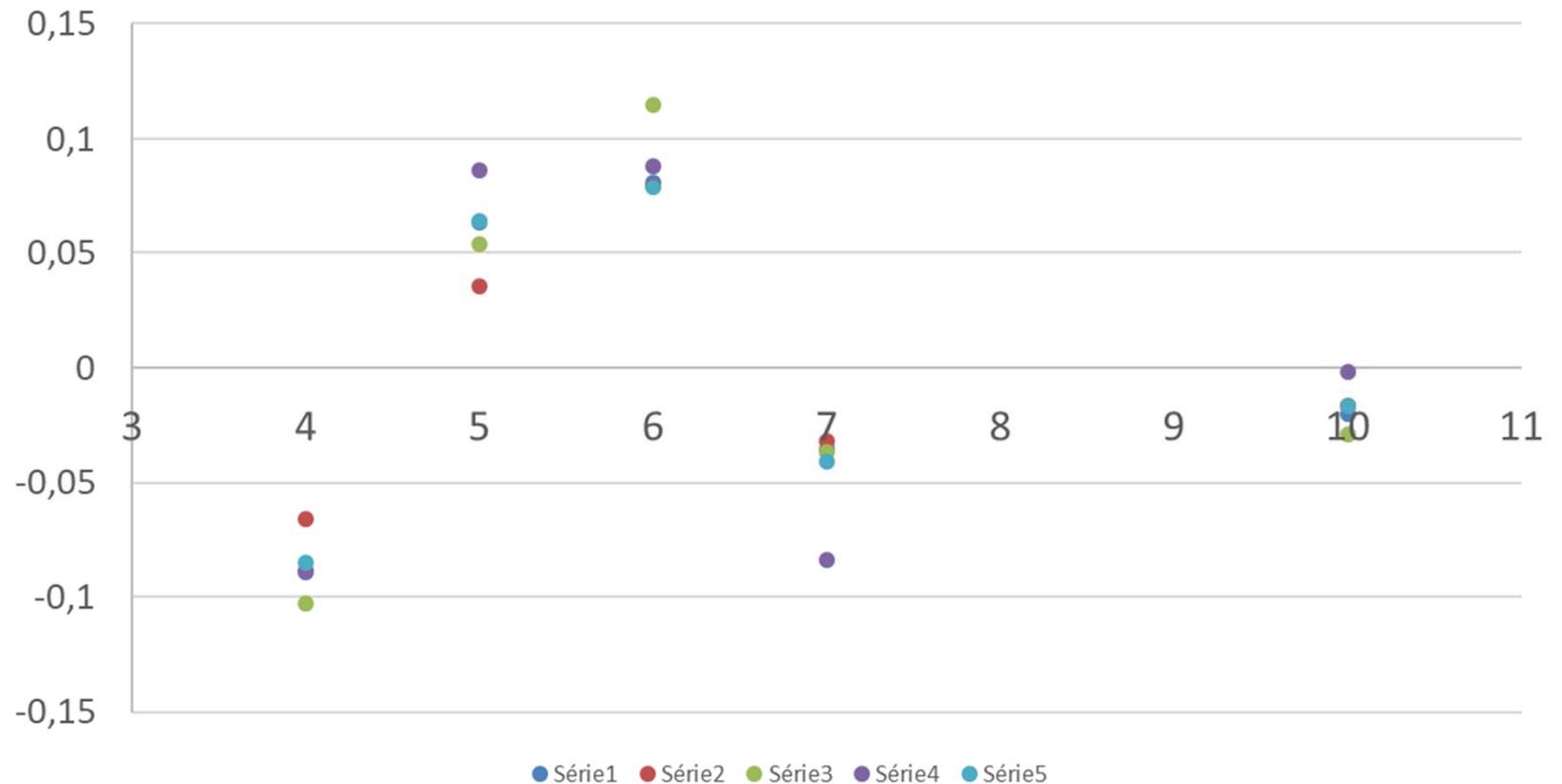


Mesure de pH



pH-mètre commercial

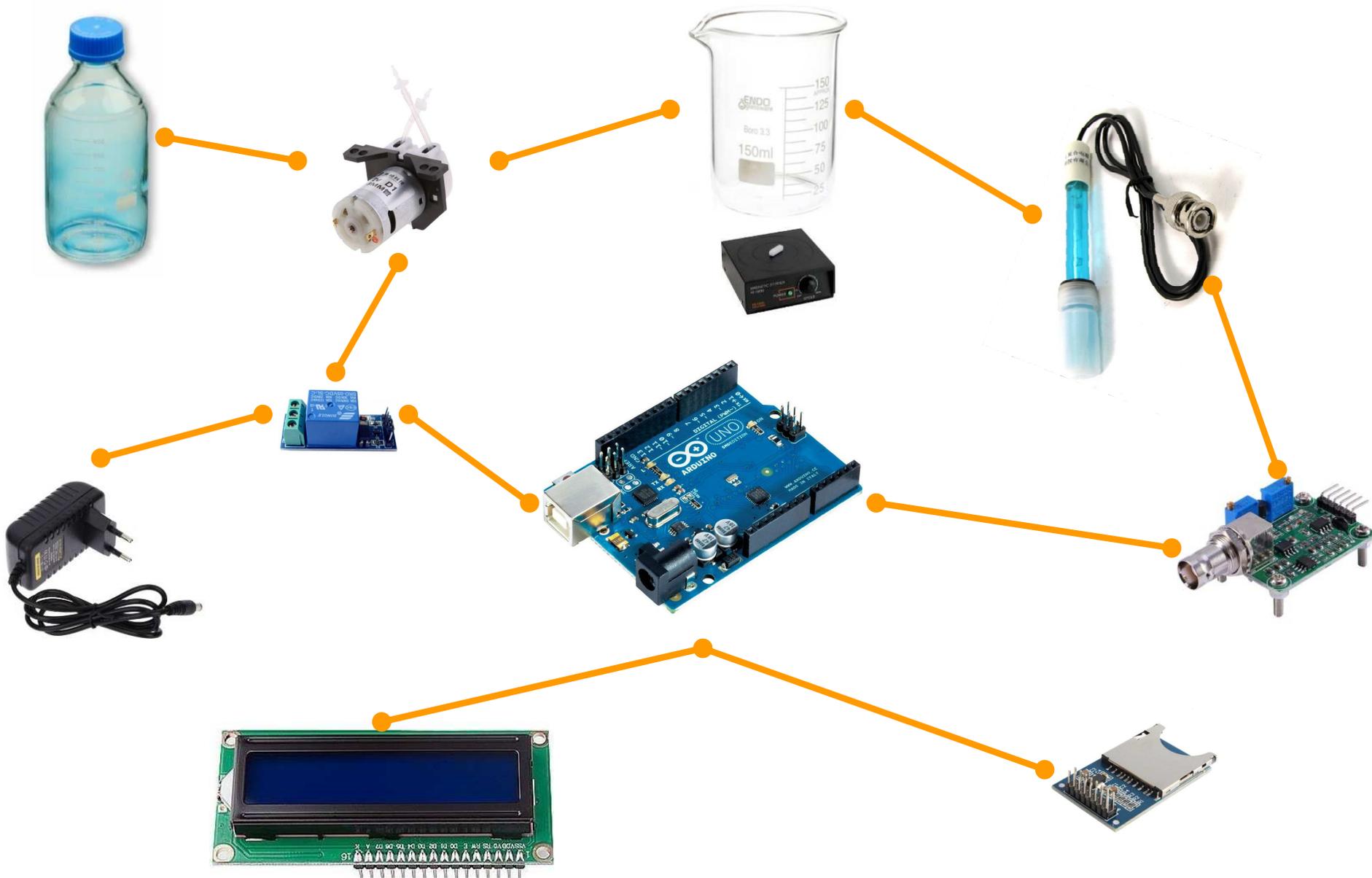
Biais absolu sur le pH recalculé



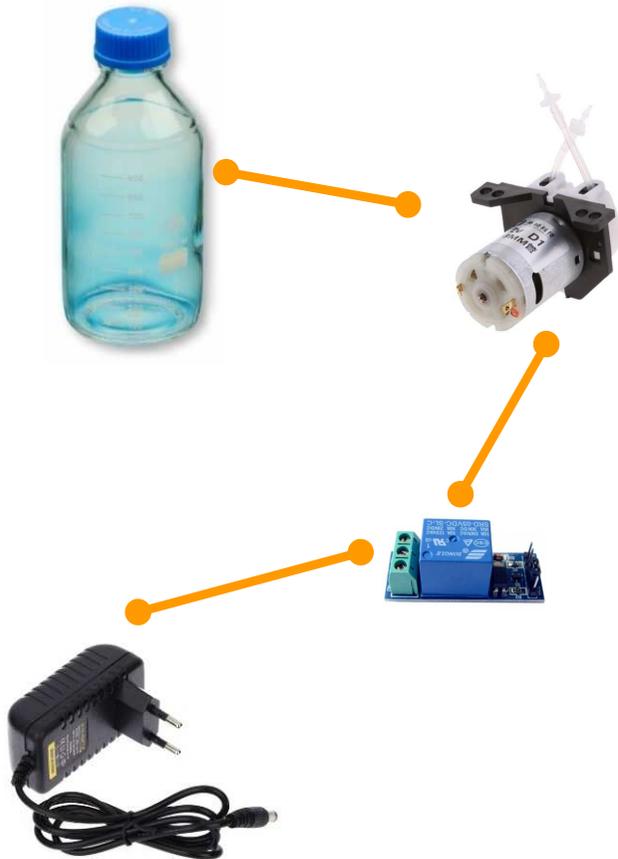
Les titrateurs automatiques



Un titrateur automatique low cost



Délivrer un volume contrôlé de réactif

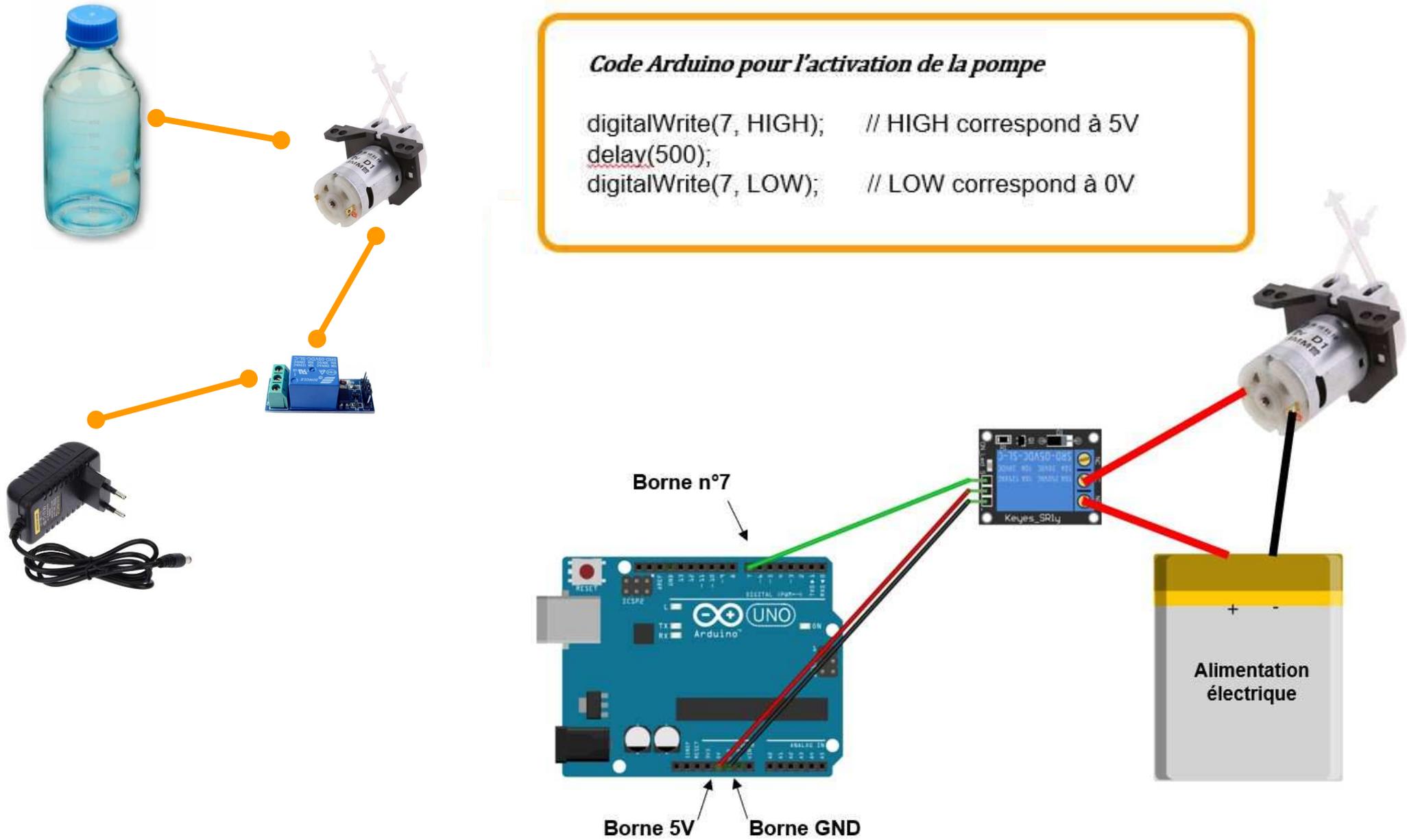


Actuation de la pompe sous tension constante (5V)

Alimentation électrique de la pompe

Utilisation d'un relai
courant fort/courant faible

Délivrer un volume contrôlé de réactif



Délivrer un volume contrôlé de réactif



Actuation de la pompe sous tension constante (5V)

Alimentation électrique de la pompe

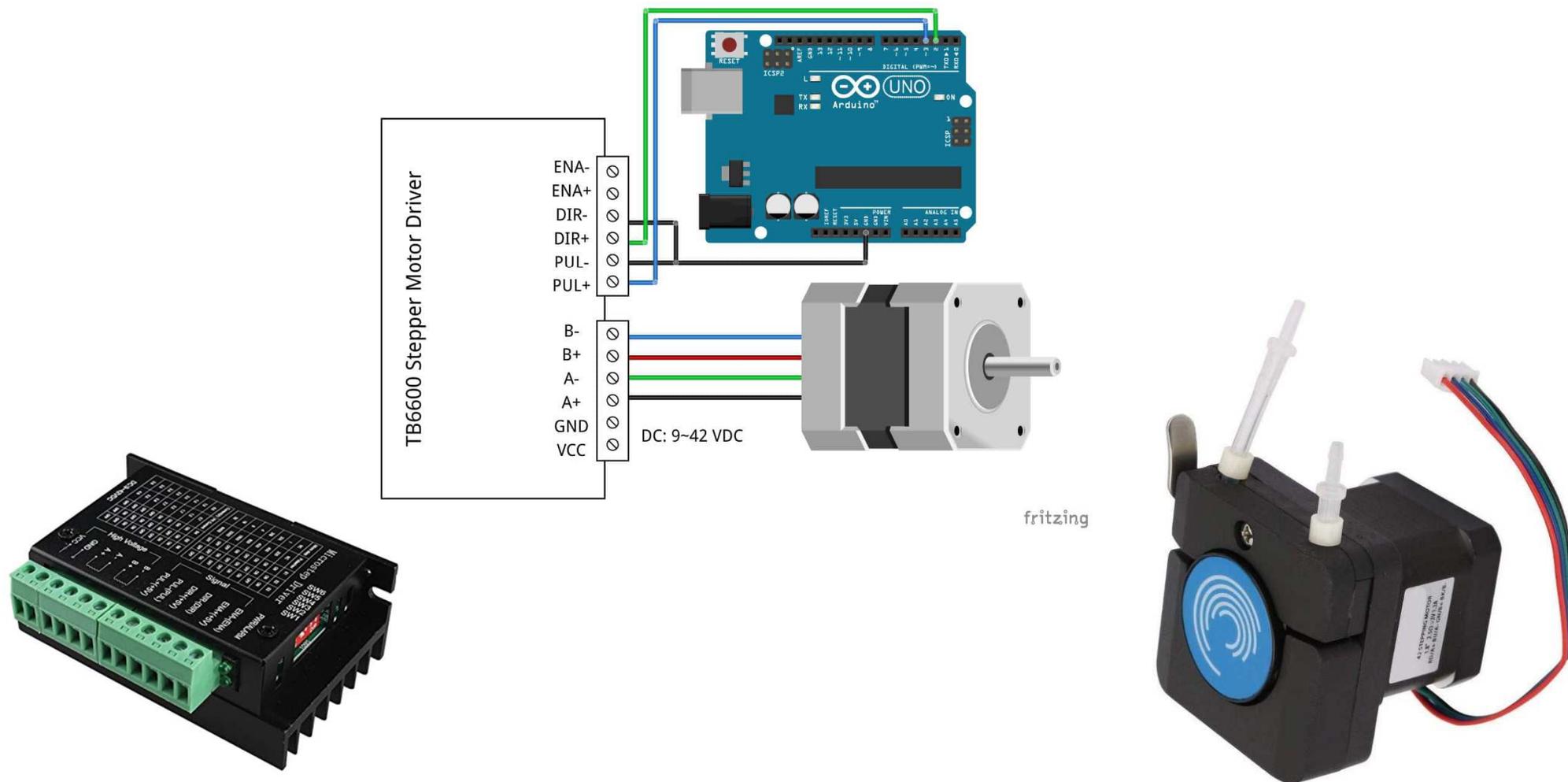
Utilisation d'un relai

Calibration du volume versé en fonction du temps d'activation

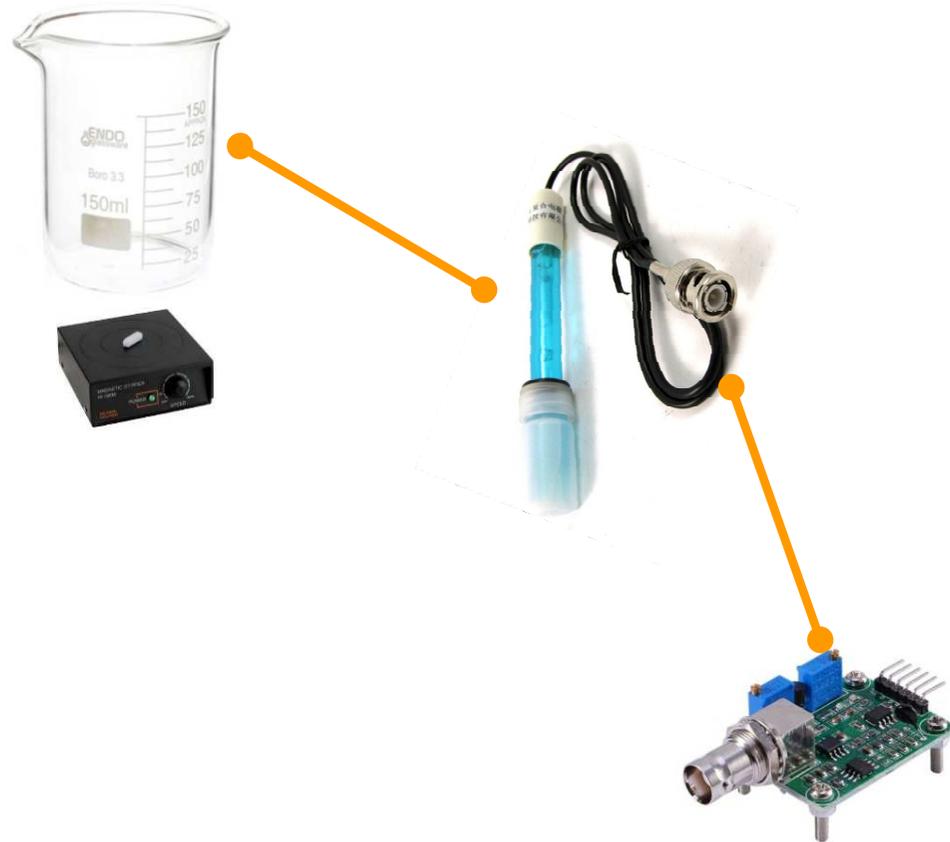
Répétabilité du volume versé

Délivrer un volume contrôlé de réactif

Moteur pas à pas



Récupérer une information



Homogénéité du réacteur

Adaptation du signal mesuré

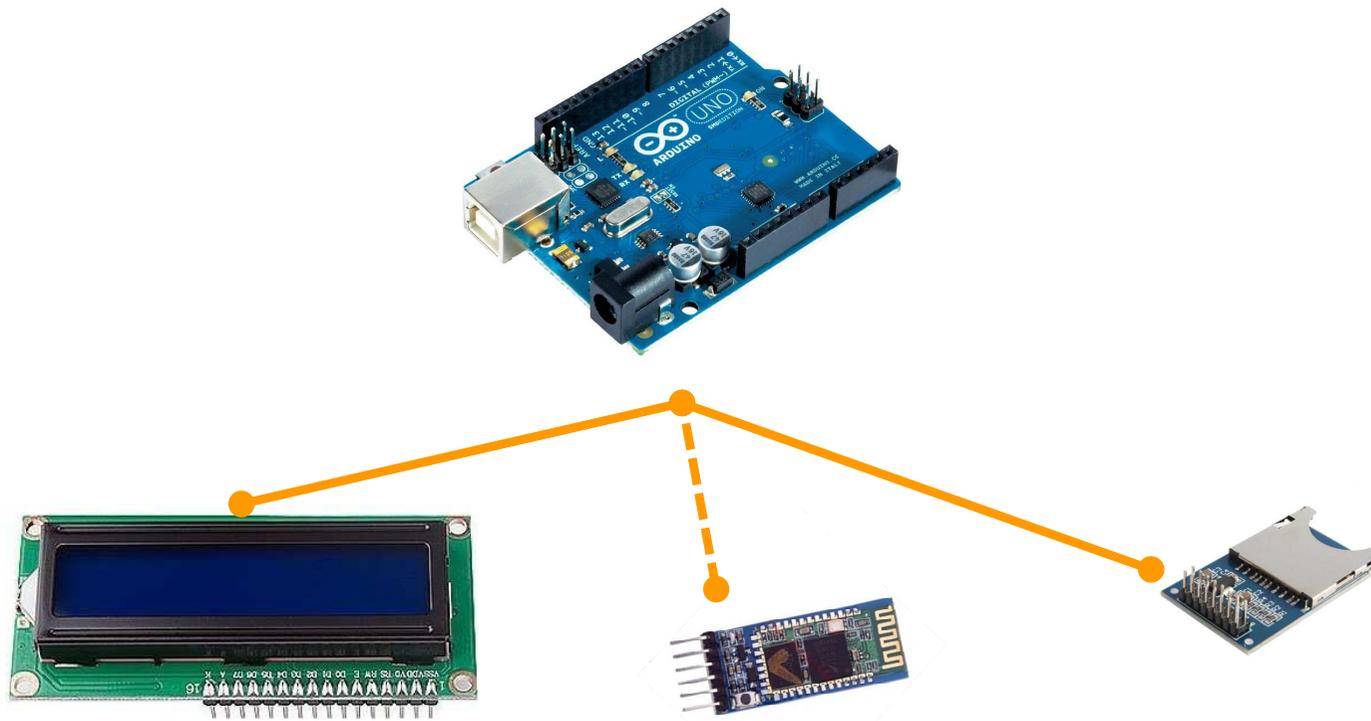
Etalonnage du pH-mètre

Temps de réponse de l'électrode

Proposer une interface de sortie

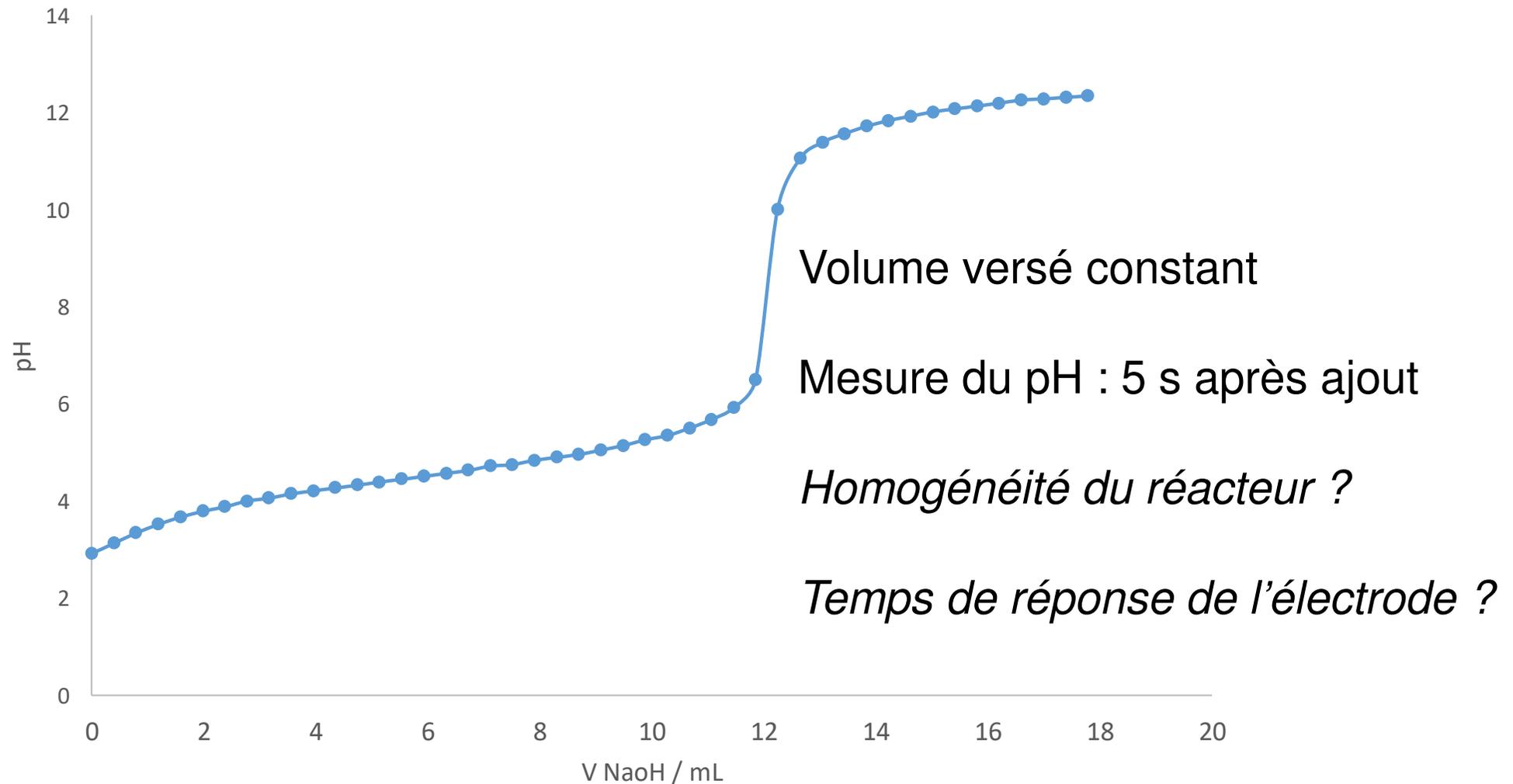
- Afficheur LCD
- Carte SD
- Bluetooth

**Délais dans la transmission
de l'information**



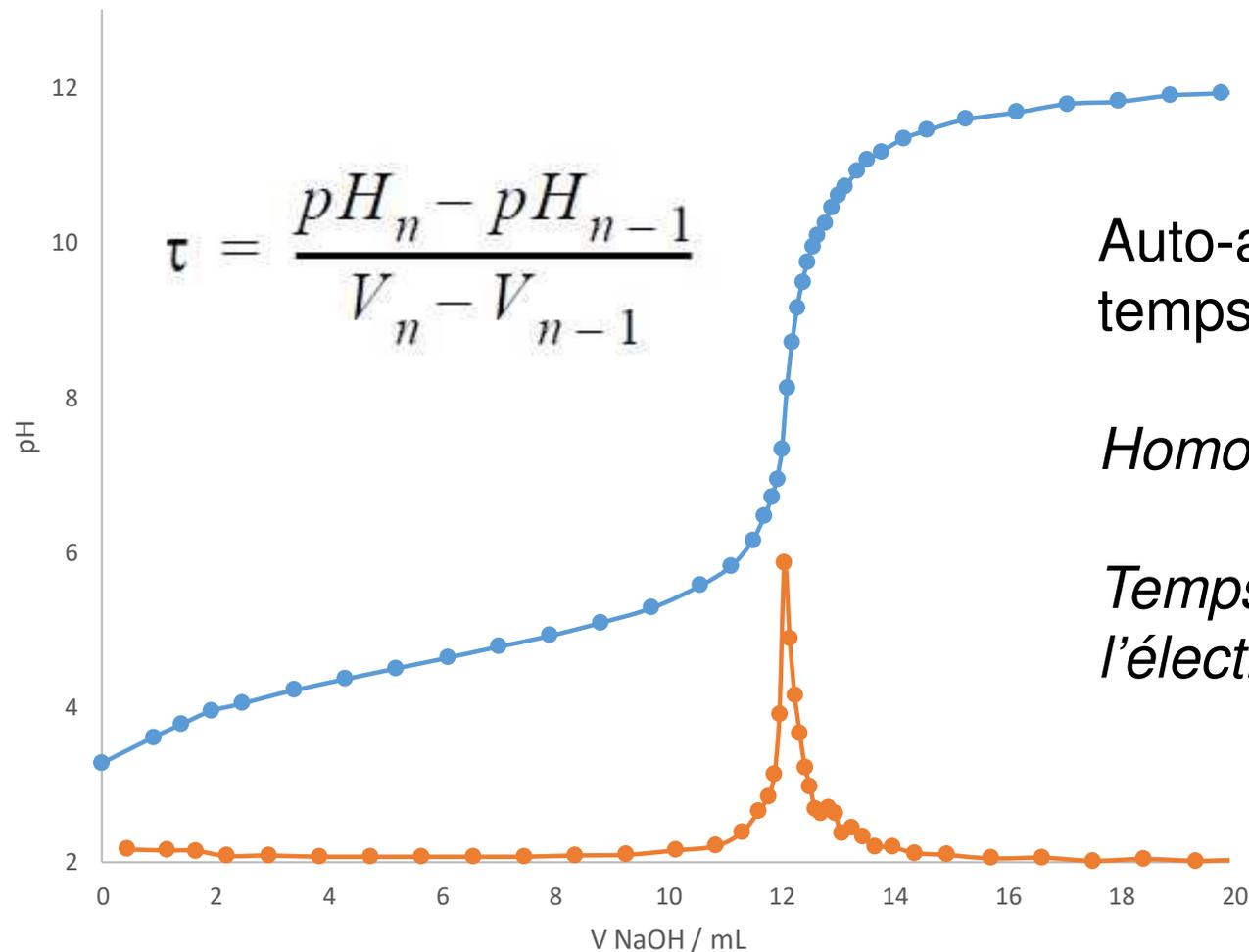
Un exemple de titrage

Dosage d'une solution d'acide éthanoïque par une solution de soude



Un exemple de titrage autoadaptatif

Dosage d'une solution d'acide éthanoïque par une solution de soude



$$\tau = \frac{pH_n - pH_{n-1}}{V_n - V_{n-1}}$$

Auto-adaptation volume et temps d'équilibre

Homogénéité du réacteur

Temps de réponse de l'électrode

Evaluation de la répétabilité

Dosage d'une solution d'acide éthanoïque par une solution de soude

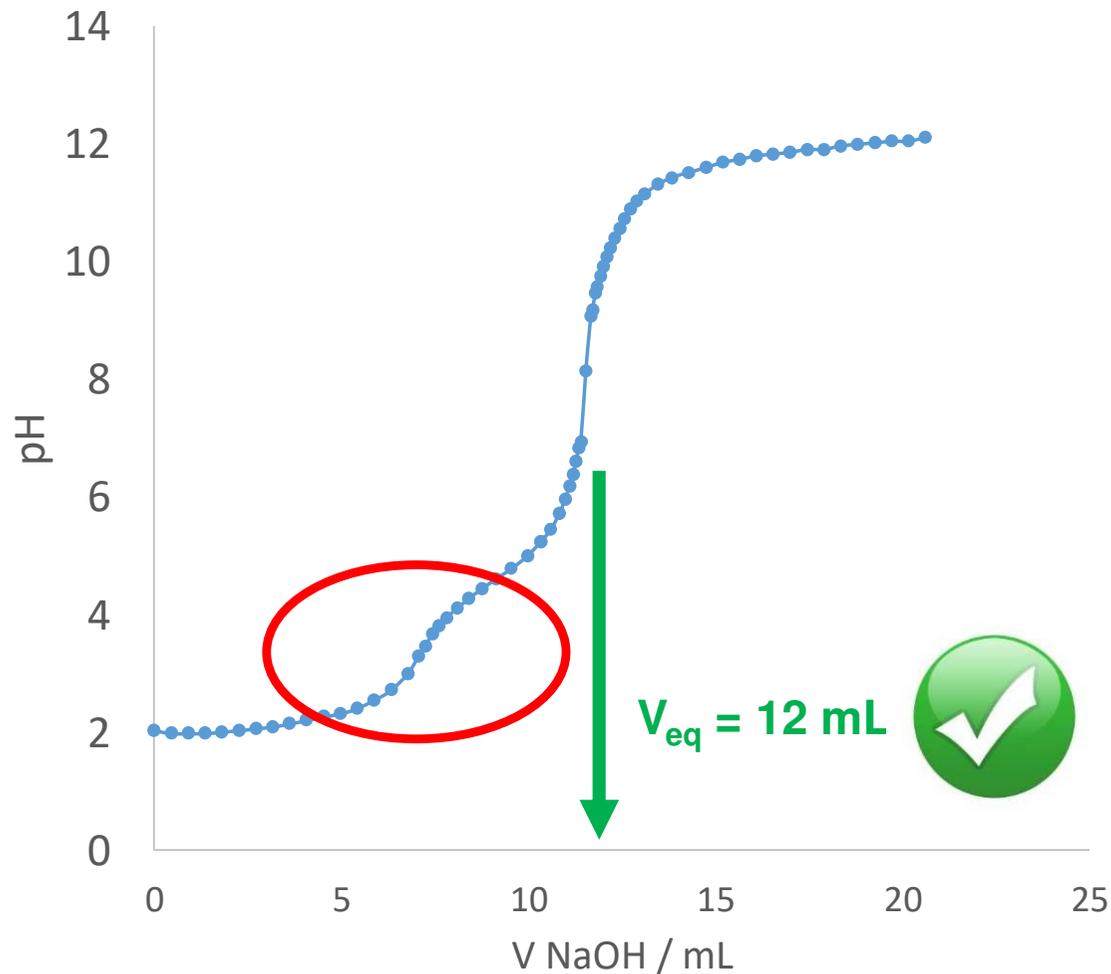
$$C_{\text{NaOH}} = 0,1025 \text{ mol.L}^{-1}$$

m CH ₃ CO ₂ H / g	Ve _q NaOH / mL	C CH ₃ CO ₂ H / mol.L ⁻¹
15,8	19,31	0,125271
9,21	11,17	0,124313
9,73	12,05	0,126940
12,22	15,1	0,126657
15,8	19,31	0,125271

moyenne	0,1257
ecart type	0,0011
RSD	0,87%

Et les interférents potentiels ?

Vérifier le volume équivalent...



Et regarder l'intégralité de la
courbe de titrage et les
informations qu'elle contient

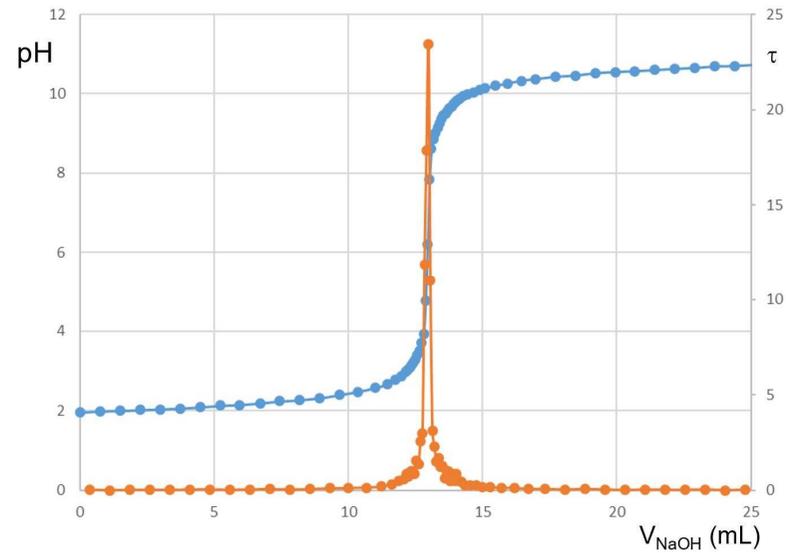


Et pour la justesse ?

Se comparer à une valeur de référence

Pas à celle indiquée sur l'étiquette d'un produit commercial courant !





Quelques éléments de conclusion



Quelques éléments de conclusion

Matériel à très bas coût

Signal mesuré, conversion analogique/numérique, bruit,
traitement du signal, transmission des données

Etalonnage, validation de méthode, robustesse

Automatisation, régulation, analyse en ligne

Etudiant acteur dans sa formation

Groupes projets pluridisciplinaires



Quelques difficultés

Gestion du matériel

Formation des formateurs

Travail de groupe

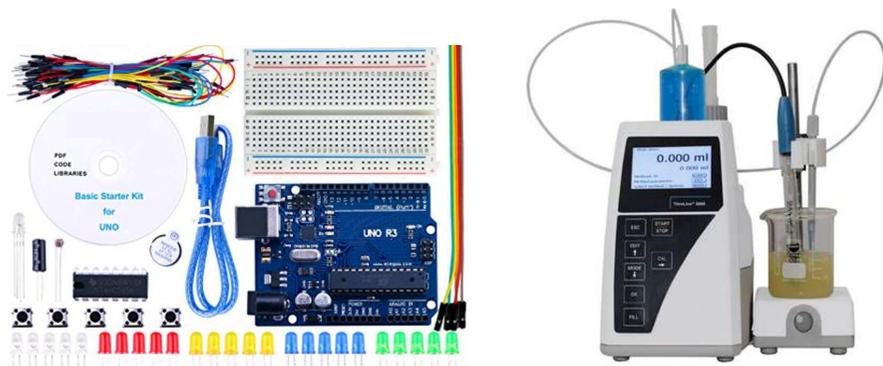


Pour tout retrouver

<http://arduino-enseignement-chimie.univ-lyon1.fr/>



@RandonJerome



https://www.lactualitechimique.org/article_auteur/Randon

l'actualité chimique

LE JOURNAL DE LA SOCIÉTÉ CHIMIQUE DE FRANCE

Enquête à la maison : calorimétrie et contrôle qualité – p45 – N°463

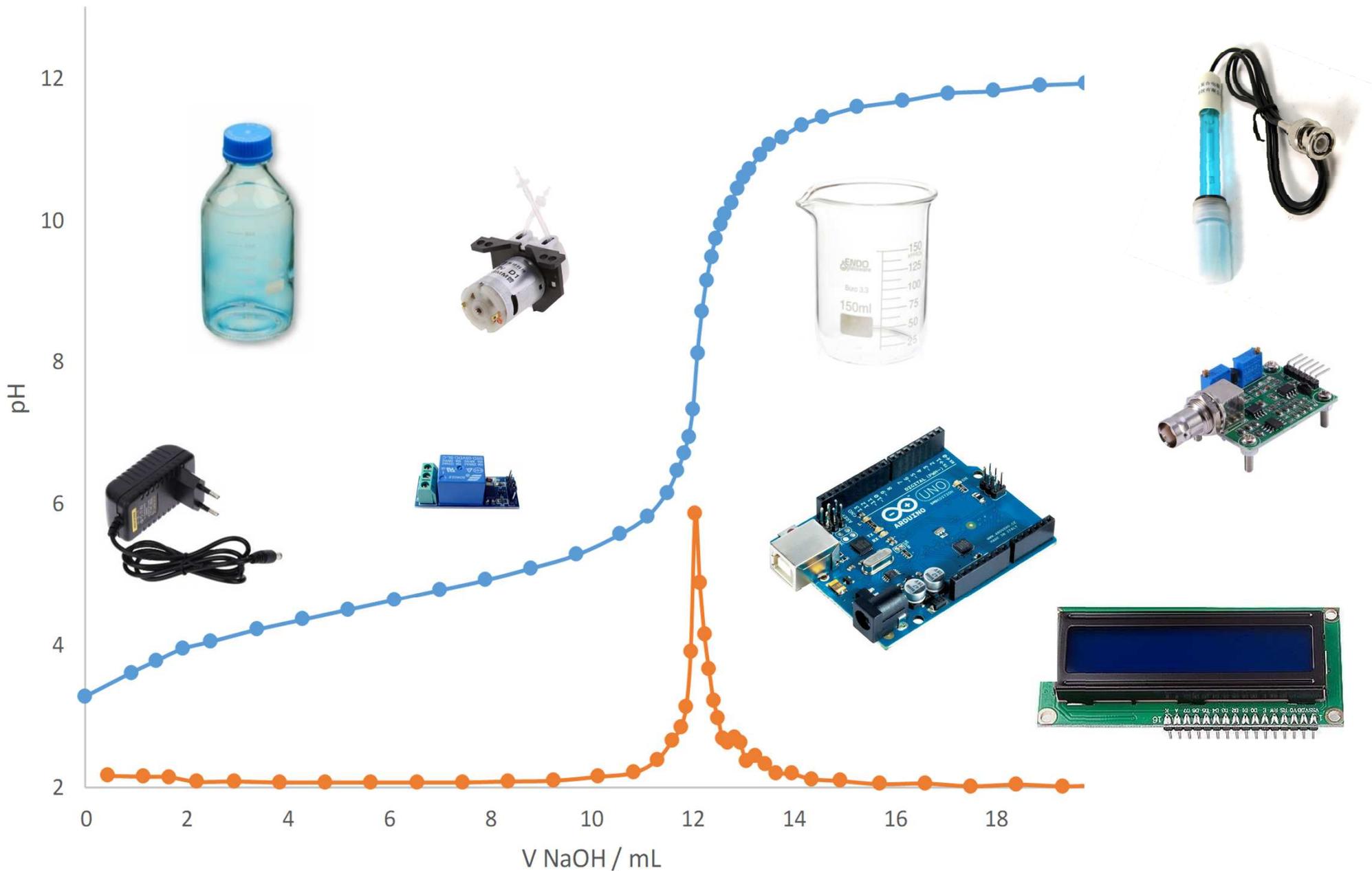
Comment l'information jaillit de la lumière: retour sur les notions cachées liées à une « mesure d'absorbance » – p52 – N°455

Des activités à la maison pour développer les compétences scientifiques ? – p7 – N°453

Construire un colorimètre et évaluer l'incertitude des méthodes de dosage par étalonnage – p29 – N°452

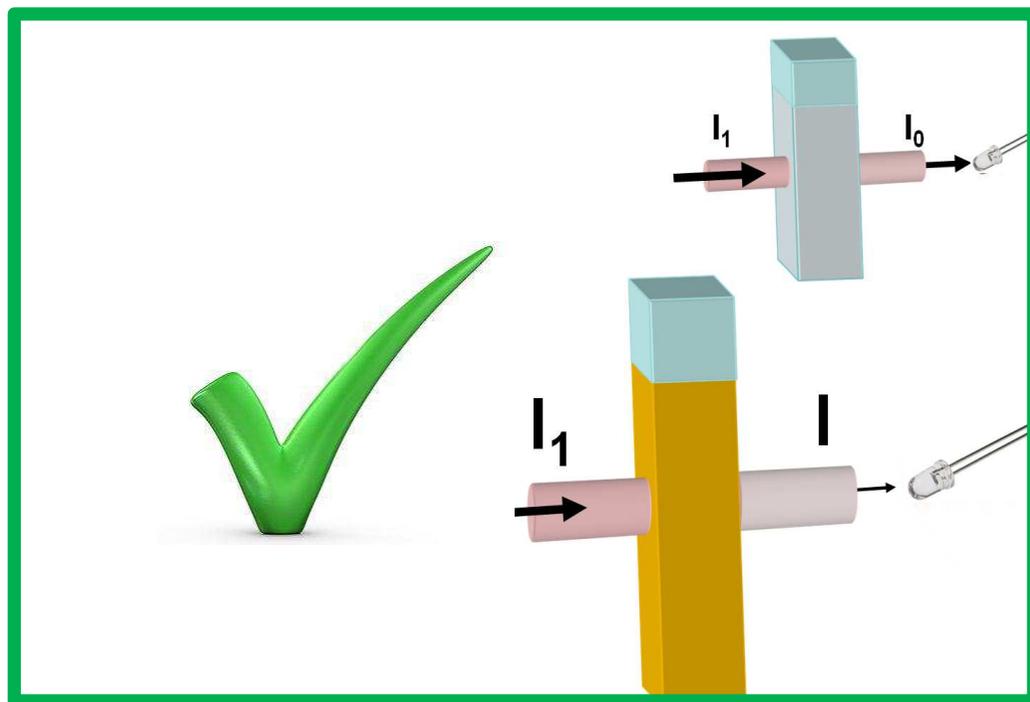
Repenser l'enseignement des sciences analytiques par la construction et l'évaluation d'instruments: un titrateur automatique pour les dosages acido-basiques – p41 – N°451

Rapprocher physique et chimie autour de la construction d'instruments de mesure à partir d'un microcontrôleur

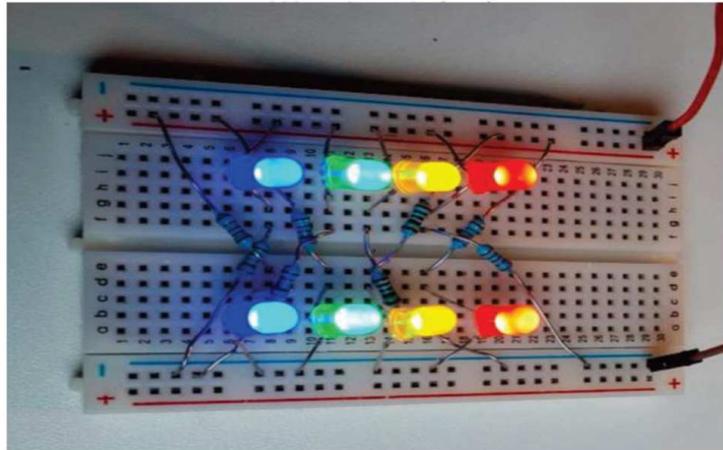




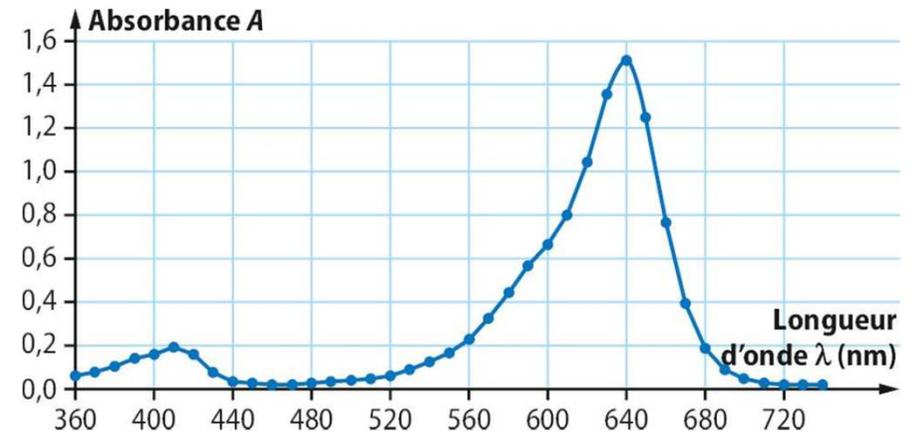
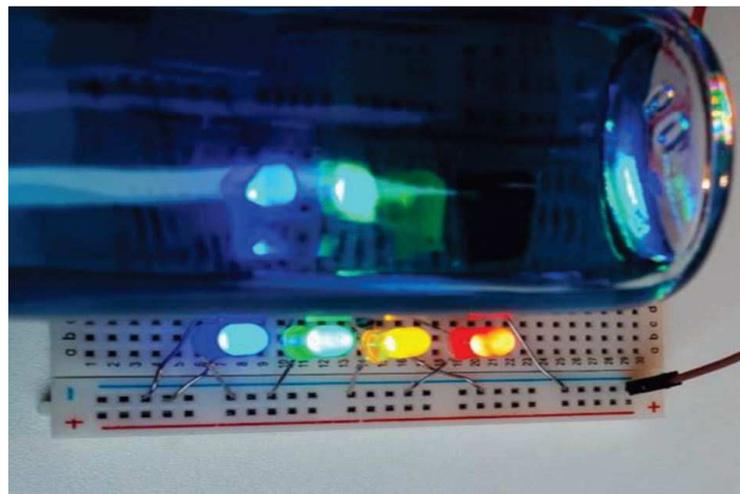
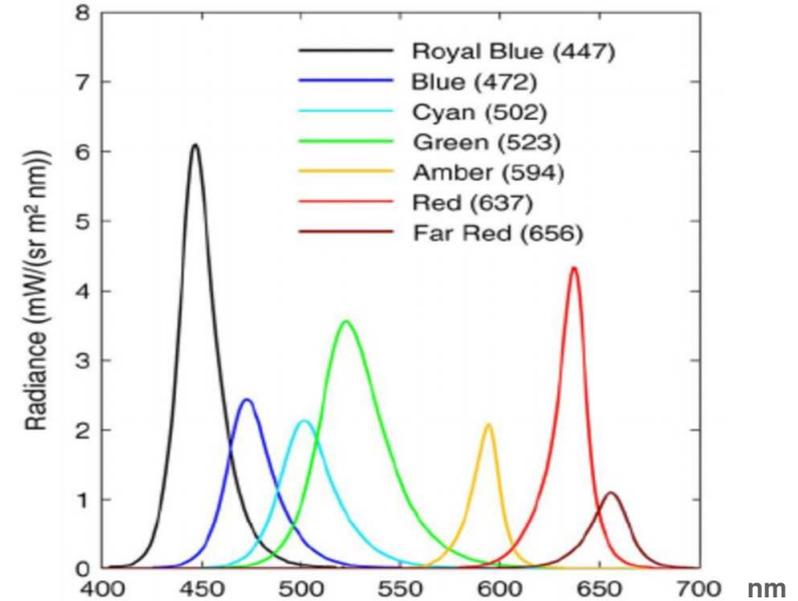
Un colorimètre



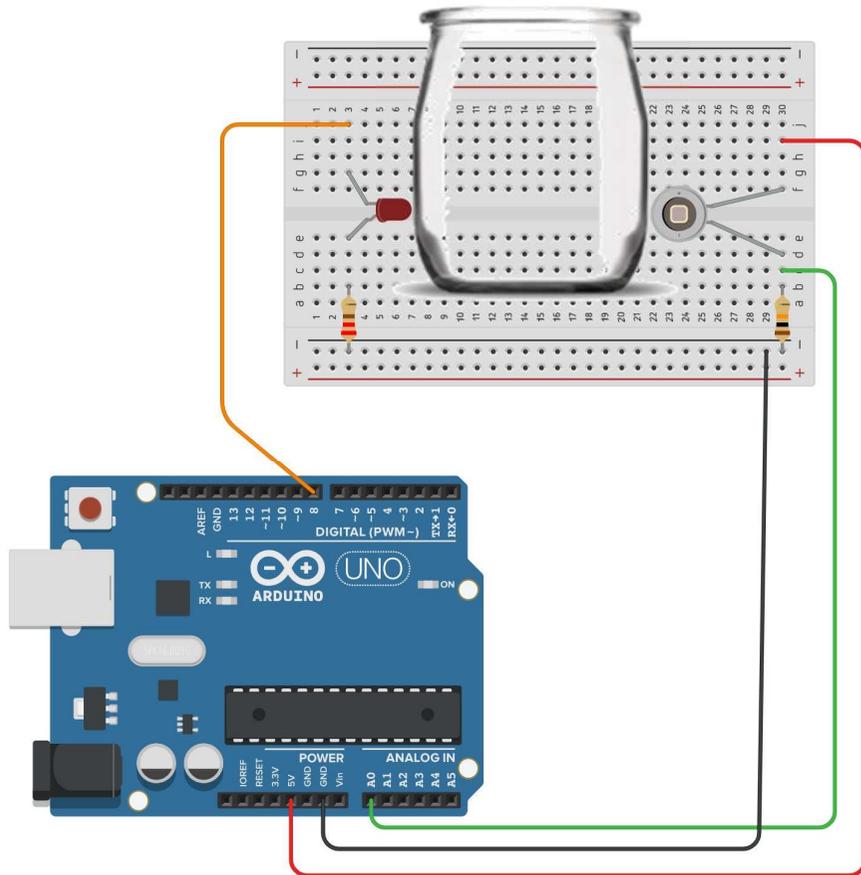
Absorption par une solution colorée



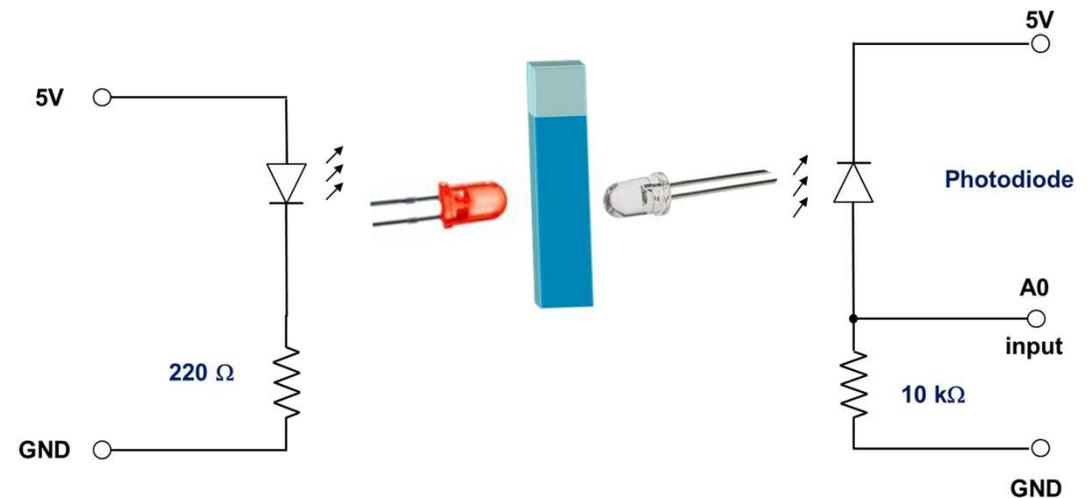
Spectre d'émission des LED



Développer un colorimètre



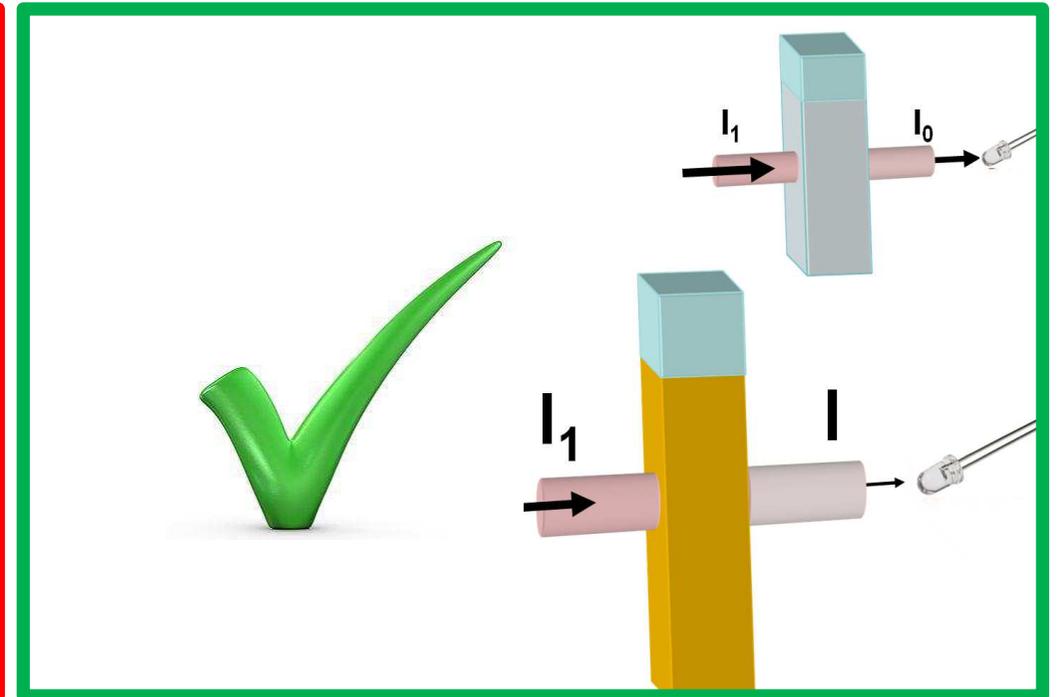
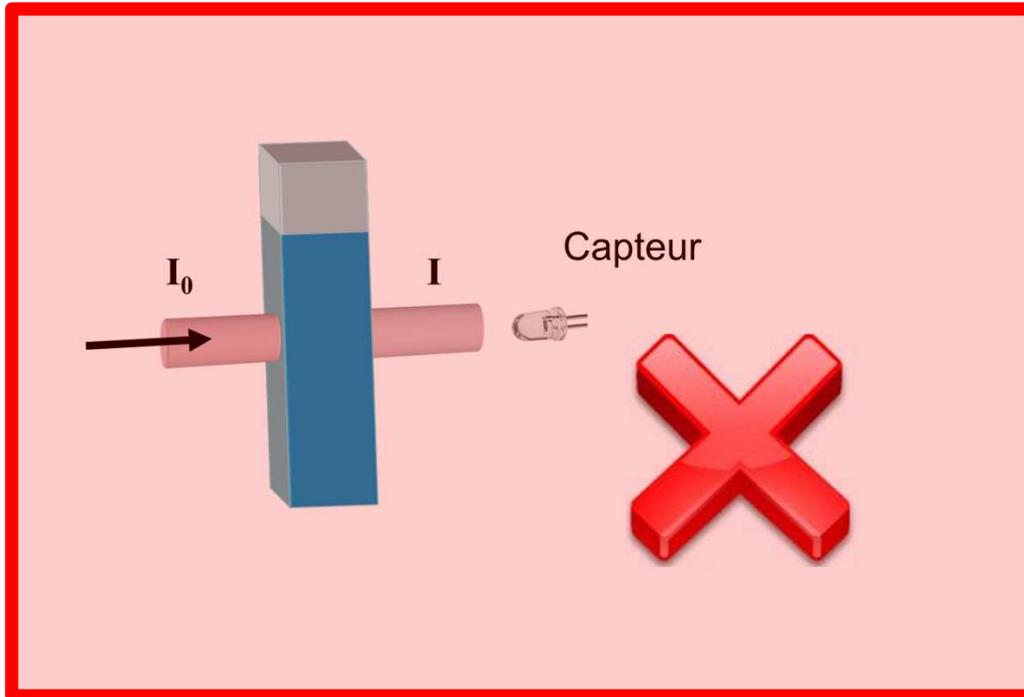
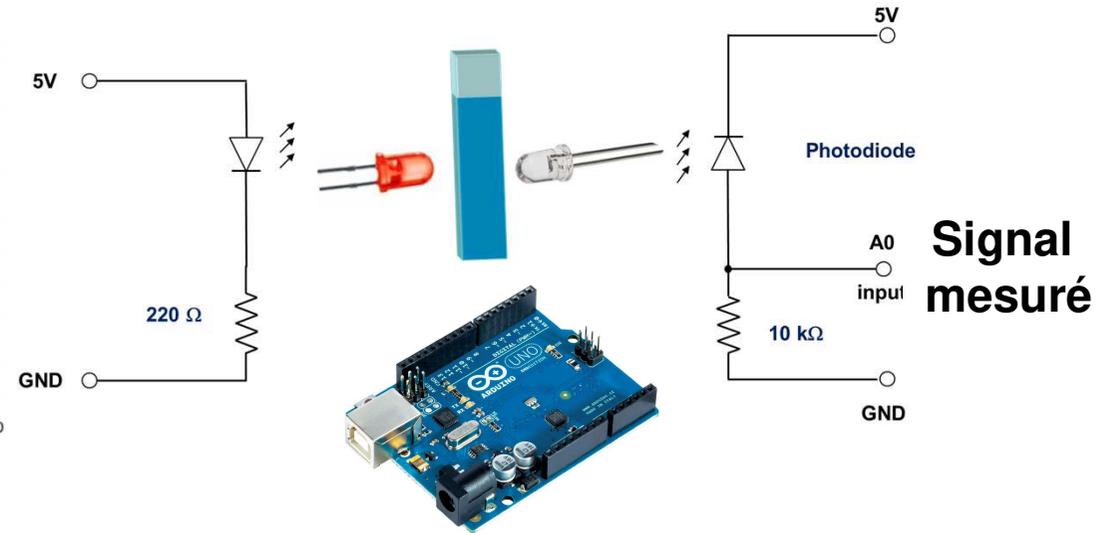
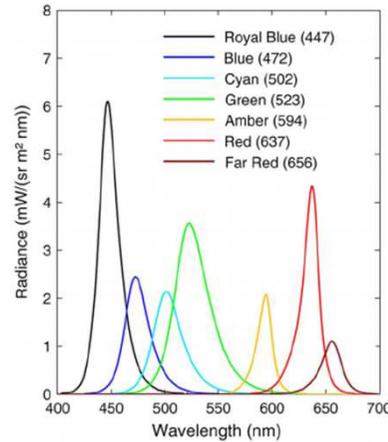
$$A = -\log \frac{I}{I_0}$$



Signal mesuré sur broche A0, proportionnel à l'intensité lumineuse

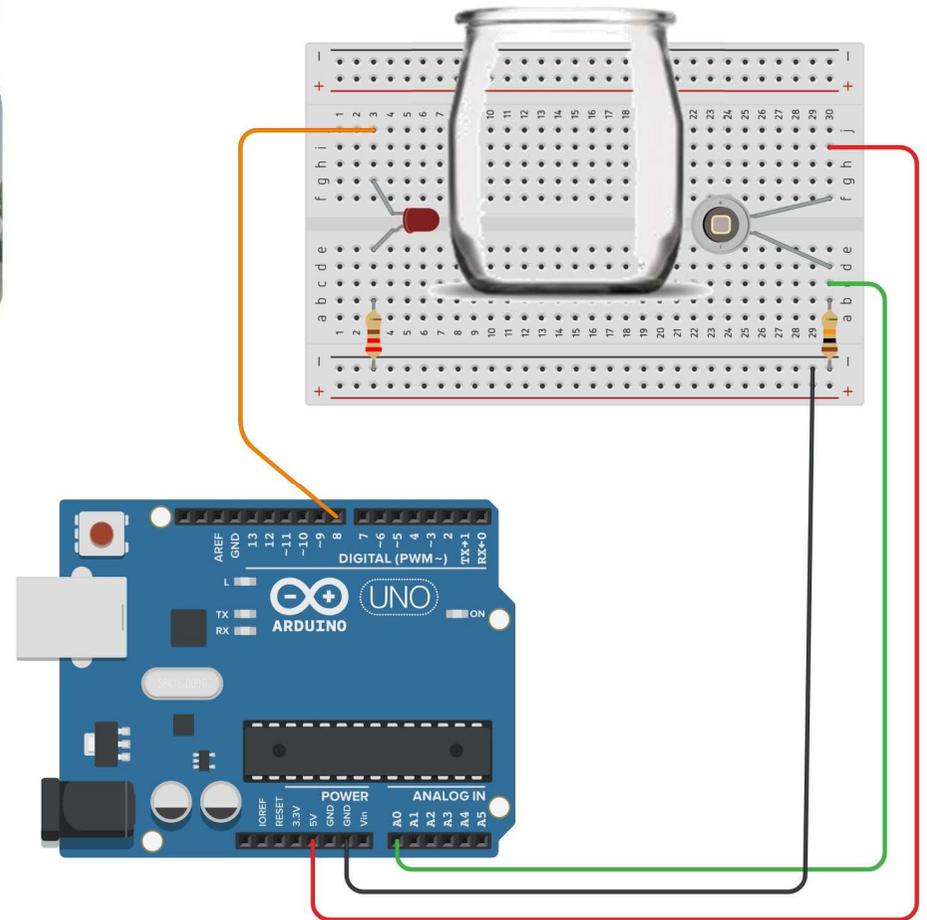
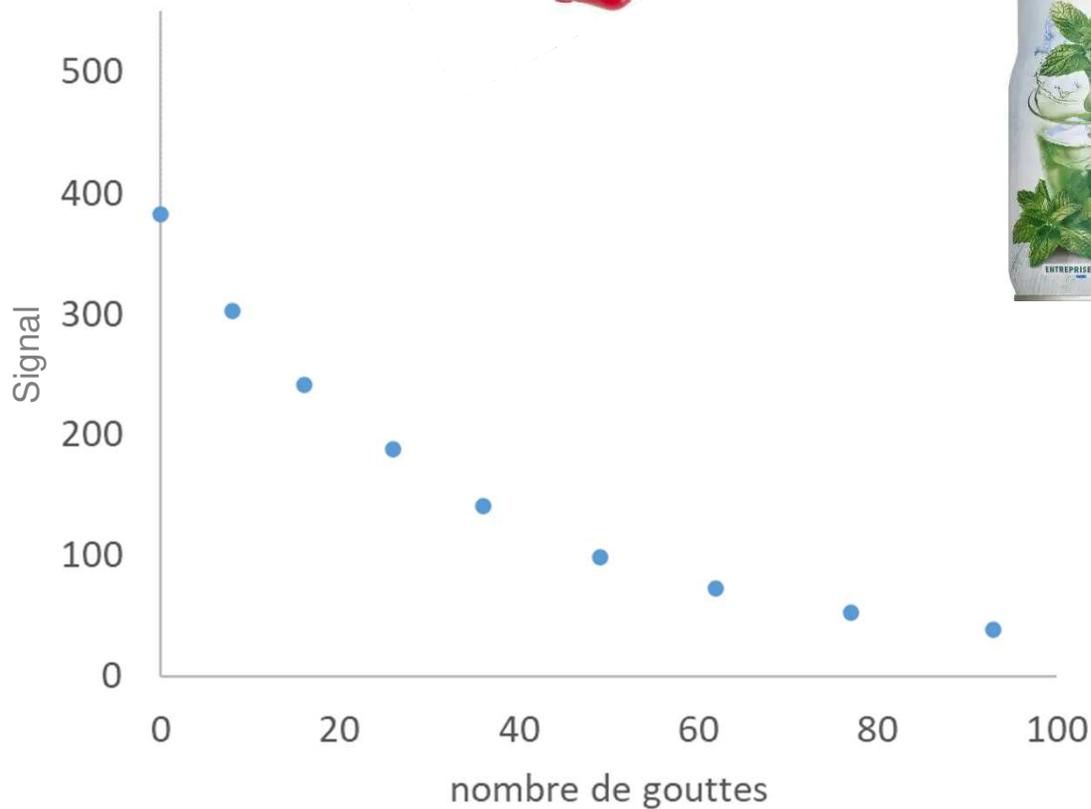
Développer un colorimètre

$$A = \log \frac{I_0}{I}$$



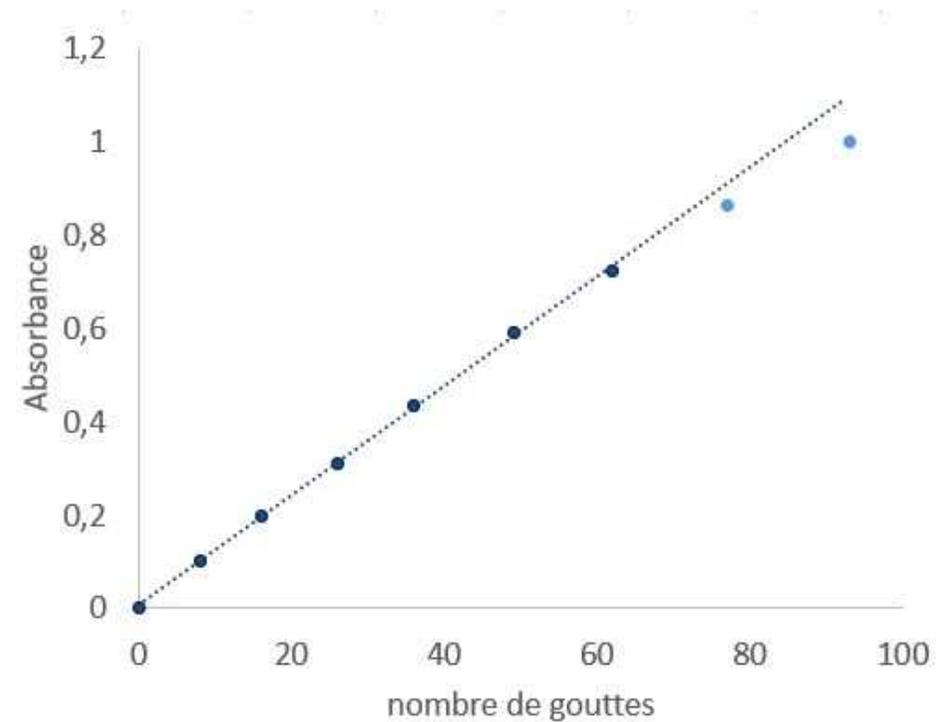
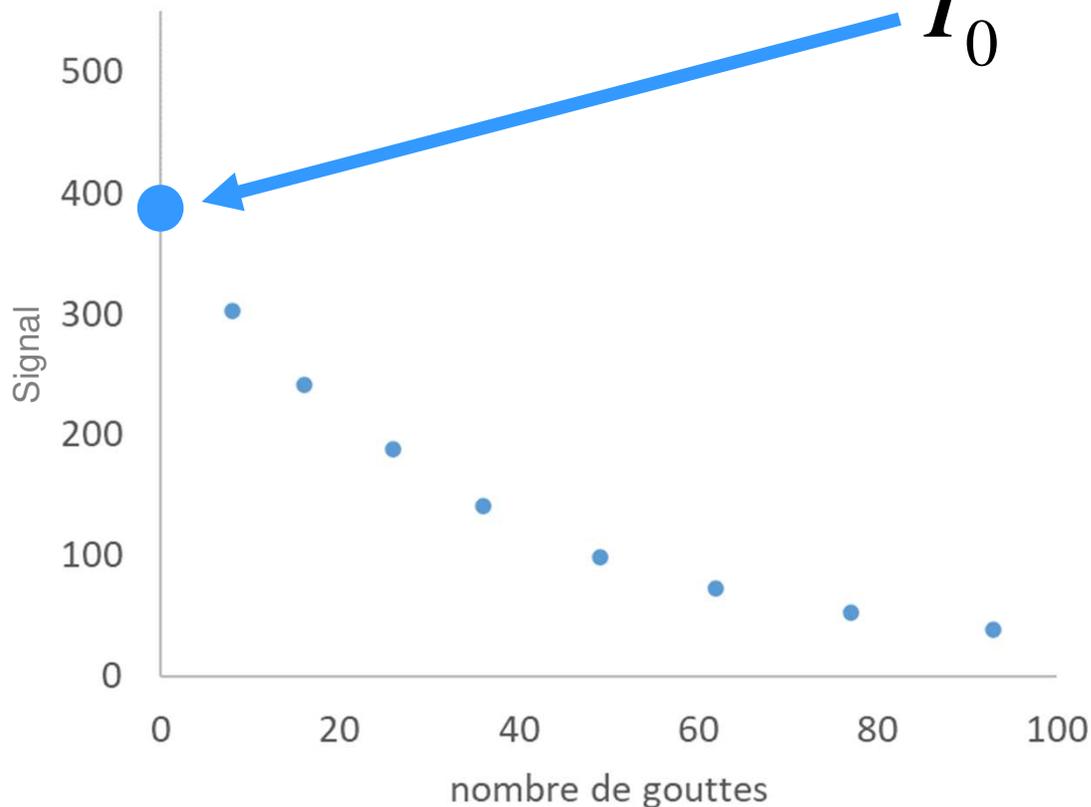
De l'intensité à l'absorbance

Pot de yahourt avec 100 mL d'eau
Sirop de menthe, compte goutte
LED rouge



De l'intensité à l'absorbance

$$A = -\log \frac{I}{I_0}$$



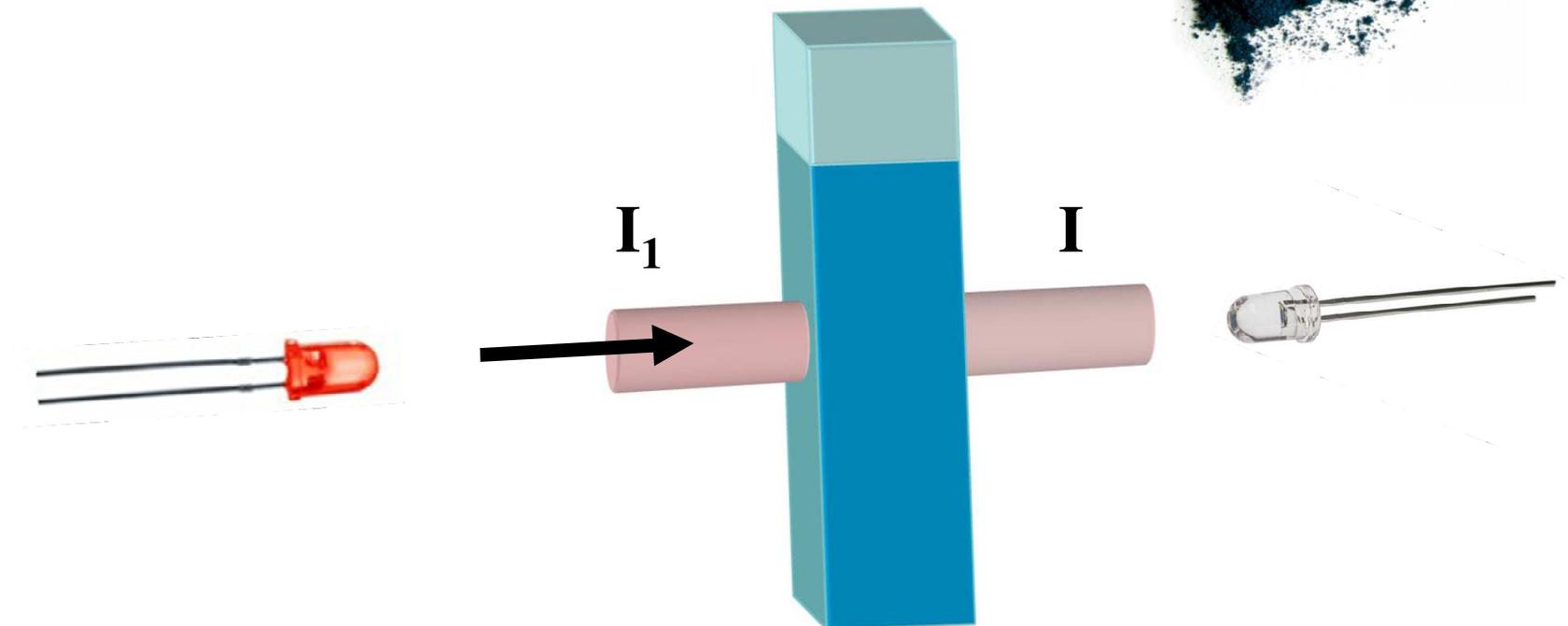
Validation d'un colorimètre, photodiode

	2	4	6	8	10
S1	99	298	485	685	852
S2	108	288	491	691	868
S3	104	292	490	695	860
S4	103	299	487	681	857
S5	112	292	485	685	860

Concentration (mg.L⁻¹)

Absorbance mAU

5 répétitions sur 5 niveaux de concentration



Validation d'un colorimètre, photodiode

	2	4	6	8	10
S1	99	238	485	685	852
S2	108	288	491	691	868
S3	104	292	490	695	860
S4	103	299	487	681	857
S5	112	292	485	685	860

Pour chaque ligne
Pente, ordonnée origine

Grandeurs retrouvées

S1	1,9344955	4,036978	6,012678	8,1257264	9,890122
S2	2,0353614	3,907436	6,018721	8,098804	9,939678
S3	1,9874674	3,950914	6,018799	8,1597911	9,883029
S4	1,9534392	4,027513	6,016931	8,0698413	9,932275
S5	2,0317628	3,937533	5,980942	8,0984648	9,951297

Concentrations retrouvées
(proches de 2, 4, 6, 8, 10)

Tableau des biais absolus

S1	-0,065504	0,036978	0,012678	0,1257264	-0,10988
S2	0,0353614	-0,09256	0,018721	0,098804	-0,06032
S3	-0,012533	-0,04909	0,018799	0,1597911	-0,11697
S4	-0,046561	0,027513	0,016931	0,0698413	-0,06772
S5	0,0317628	-0,06247	-0,01906	0,0984648	-0,0487
Moyenne biais	-0,011495	-0,02793	0,009614	0,1105255	-0,08072
Ecart-type biais	0,0453169	0,057238	0,01622	0,0338977	0,030718

Biais absolus
Conc. retrouvée – Conc. attendue

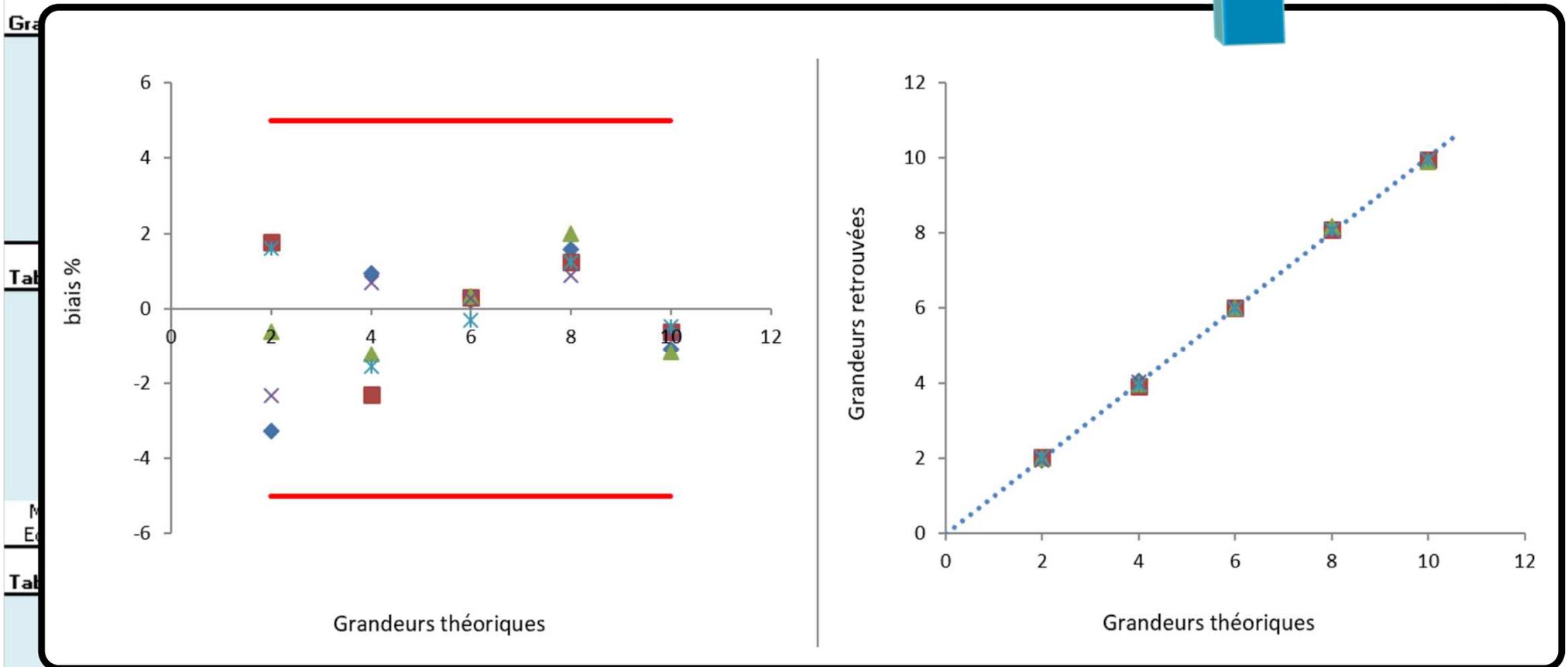
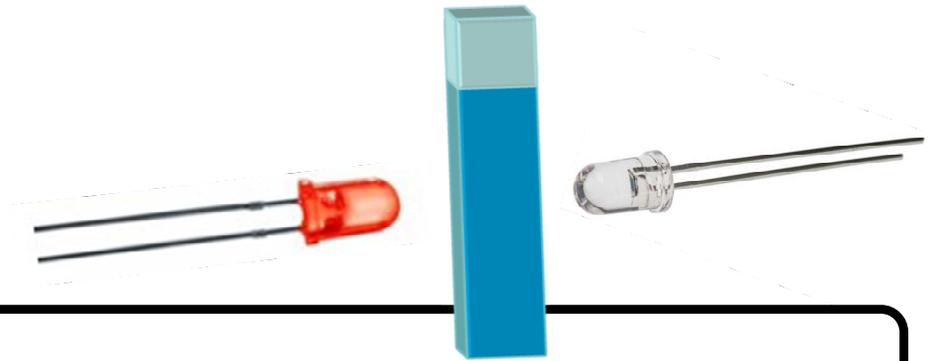
Tableau des biais relatifs (%)

S1	-3,275225	0,924459	0,211305	1,5715795	-1,09878
S2	1,7680707	-2,31409	0,312012	1,2350494	-0,60322
S3	-0,626632	-1,22715	0,313316	1,997389	-1,16971
S4	-2,328042	0,687831	0,282187	0,8730159	-0,67725
S5	1,5881419	-1,56167	-0,31763	1,23081	-0,48703

Biais relatifs

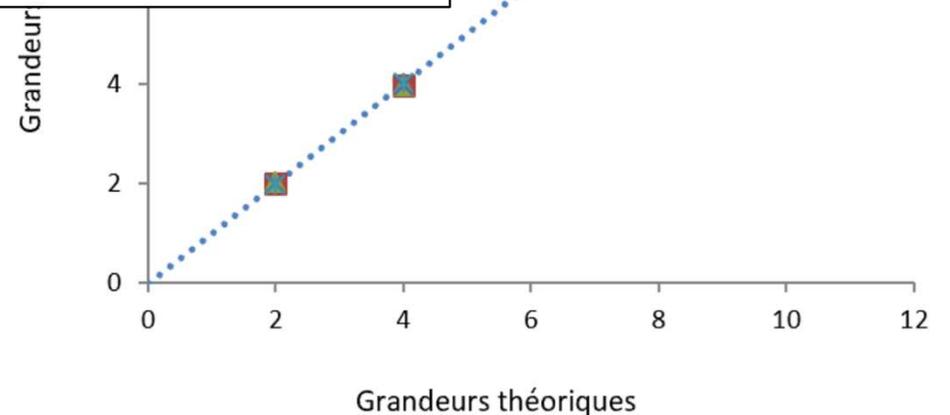
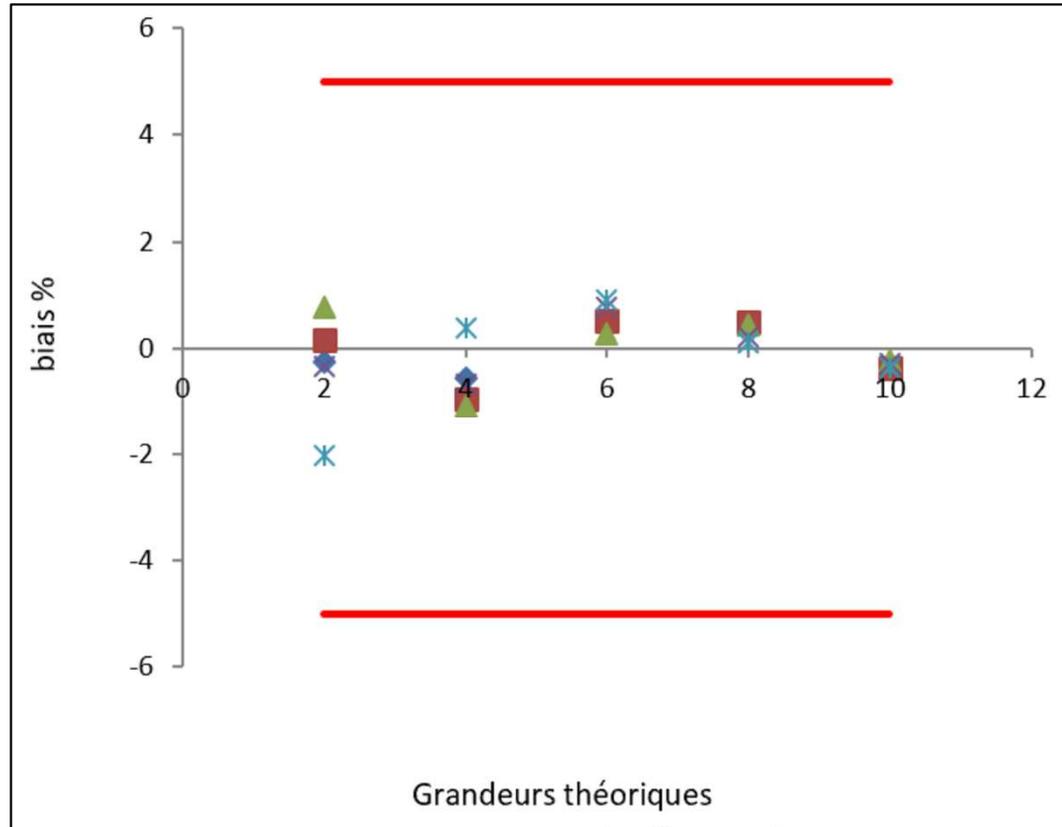
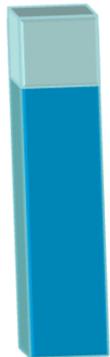
Validation d'un colorimètre, photodiode

	2	4	6	8	10
S1	99	298	485	685	852
S2	108	288	491	691	868
S3	104	292	490	695	860
S4	103	299	487	681	857
S5	112	292	485	685	860



S4	-2,328042	0,687831	0,282187	0,8730159	-0,67725
S5	1,5881419	-1,56167	-0,31763	1,23081	-0,48703

Spectrophotomètre commercial



Mesurer, agir : tout pour faire un éthylotest !

