

## HISTOIRE DES SCIENCES

### DES TRAVAUX DE PIERRE BOUGUER À LA LOI DE BEER-LAMBERT

Cette activité a pour objectif de découvrir la loi de Beer-Lambert par une approche historique, principalement fondée sur les travaux de Pierre Bouguer (1698-1758), dont les résultats ont été repris par Johann Heinrich Lambert (1728-1777) puis August Beer (1825-1863) pour aboutir à l'expression d'une loi fondamentale de la photométrie : la loi de Beer-Lambert.

Cette activité proposée en filière STL peut être précédée par le thème « Image » du programme de sciences physiques et chimiques de laboratoire, ou le thème « Image et couleurs » du programme de première. Ces deux thèmes permettent aux élèves de se familiariser avec le matériel d'optique nécessaire.

#### Objectif en termes d'histoire des sciences

L'activité proposée permet, du point de vue de l'histoire des sciences, d'étudier les expériences historiques et de les reproduire avec des moyens modernes. Cette activité permet également de questionner la démarche scientifique.

**Objectifs d'apprentissage en physique-chimie***Notions et contenus*

Dosage par étalonnage spectrophotométrique.

*Capacités exigibles*

Connaître et utiliser la loi de Beer-Lambert et ses limites.

Capacité numérique : tracer et exploiter une courbe d'étalonnage à l'aide d'un tableur.

**Programme de physique-chimie de première générale***Notions et contenus*

Absorbance, spectre d'absorption, couleur d'une espèce en solution, loi de Beer-Lambert.

*Capacités exigibles*

Déterminer la concentration d'un soluté à partir de données expérimentales relatives à l'absorbance de solutions de concentrations connues.

**Programme de sciences physiques et chimiques de laboratoire de première STL***Notions et contenus*

Dosages par étalonnage spectrophotométrique.

*Capacités exigibles*

Connaître et utiliser la loi de Beer-Lambert et ses limites.

Capacité expérimentale : concevoir et mettre en œuvre un protocole pour déterminer la concentration d'une solution à l'aide d'une gamme d'étalonnage.

Capacité numérique : tracer et exploiter une courbe d'étalonnage à l'aide d'un tableur.

**Compétences travaillées dans le cadre de la démarche scientifique**

*S'approprier* : représenter la situation par un schéma.

*Analyser/Raisonner* : choisir, élaborer, justifier un protocole.

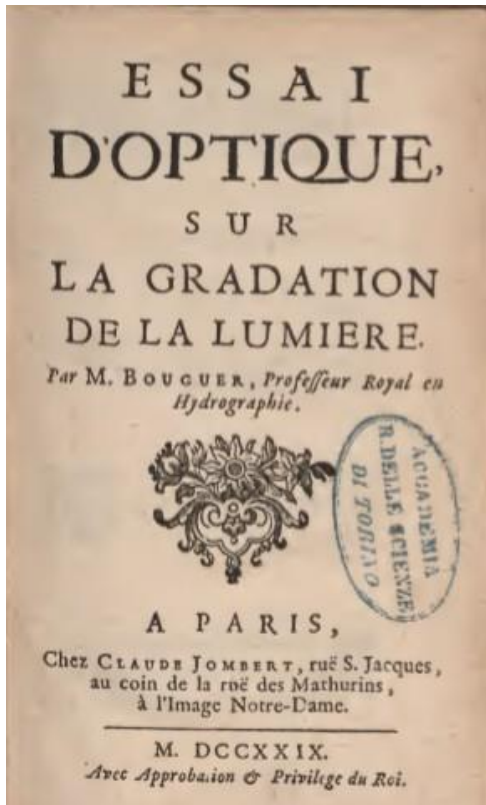
*Réaliser* : effectuer des procédures courantes (calculs, représentations, collectes de données, etc.) ; mettre en œuvre un protocole expérimental en respectant les règles de sécurité.

## Éléments pour construire l'activité des élèves

### Partie I : expérience de photométrie de Bouguer

Pierre Bouguer (1698-1758) est un savant français du XVIII<sup>e</sup> siècle. Mathématicien, astronome et physicien, il était professeur d'hydrographie au Croisic (en Loire-Atlantique) et formait les marins à la navigation astronomique. Il réalisa quelques-unes des premières expériences de « photométrie » pour étudier la luminosité d'objets célestes comme la Lune et le Soleil afin d'effectuer des mesures de distances.

**Document 1 : extrait de l'œuvre de Pierre Bouguer, *Essai d'optique sur la gradation de la lumière*, 1729**



Pour reconnoître la vérité ou la fausseté de ce sentiment, j'ai fait une fois passer perpendiculairement au travers de deux morceaux de verre une lumière qui étoit égale à celle de 32 chandelles, & elle se trouva ensuite deux fois plus foible; car elle ne se trouva plus égale qu'à la lumière de 16 chandelles. Or si une autre épaisseur de deux morceaux de verre eût produit un égal affoiblissement, il est évident que tous les rayons eussent été interrompus; & à plus forte raison, 8 ou dix morceaux de verre eussent formé une épaisseur tout-à-fait impénétrable à la lumière. Cependant ayant ajouté 2 morceaux aux deux premiers, il s'en fallut beaucoup qu'ils ne formassent un corps absolument opaque; la lumière se trouva encore très-vive; & lorsque je la fis passer au travers de dix morceaux, elle étoit encore sensiblement aussi forte que celle d'une chandelle.

(Section II, page 45)

**Document 2 : matériel à disposition**

- Lampe à filament, source de lumière blanche
  - Supports pour lentilles, diaphragme
  - Lames de verre pour microscope (50 lames, 76 mm × 26 mm, épaisseur 1,1 mm)
  - Luxmètre ou Smartphone équipé d'une application de récupération de signaux de capteurs d'appareils mobiles (par exemple, « [Phyphox](#) »).
1. À l'aide du matériel d'optique mis à disposition, schématiser une expérience permettant de reproduire l'expérience de Bouguer et de vérifier les résultats obtenus. Rédiger le protocole à mettre en œuvre.
  2. Réaliser l'expérience proposée. Tracer l'évolution de l'intensité lumineuse transmise en fonction du nombre de lames de verres traversées par le rayon lumineux. Que constate-t-on ? Peut-on modéliser la courbe obtenue par une fonction linéaire ?

**Document 3 : extrait de l'œuvre de Pierre Bouguer, *Essai d'optique sur la gradation de la lumière*, 1729**

« Il suit de là, que si nous supposons que le corps lumineux est infiniment loin, afin que les rayons soient sensiblement parallèles, et que la lumière ne diminue que par la seule interposition du corps transparent, sans que la divergence des rayons y ait aucune part; il suit, dis-je, de là que les forces

qu'à la lumière, après avoir traversé différentes épaisseurs, peuvent être représentées par les ordonnées d'une logarithme qui a pour axe l'épaisseur du corps. » (Section II, page 48)

3. Tracer le graphique suggéré dans cet extrait. Proposer une modélisation graphique de la courbe ainsi obtenue. Conclure.

## Partie II : apport de Lambert

Originaire de Mulhouse, Johann Heinrich Lambert est un mathématicien, un philosophe et un physicien du XVIII<sup>e</sup> siècle. Il a consacré une partie de sa vie à reproduire des expériences dans de nombreux domaines de la physique afin d'établir des expressions mathématiques permettant d'interpréter les différents phénomènes observés.

**Document 4 : *Photometria, sive de mensura et gradibus luminis, colorum et umbrae* (ouvrage en latin), traduit en français (1997) sous le titre *Photométrie, ou de la mesure de la gradation de la lumière, des couleurs et de l'ombre***

« Même si tantôt dans les chapitres précédents, tantôt et surtout dans le livre du célèbre Bouguer, dont j'ai déjà fort souvent fait l'éloge, on trouve bien des données utiles pour déterminer l'affaiblissement de la lumière dans les milieux transparents, il nous faut cependant reprendre la question, en quelque sorte, au tout début, puisqu'il faut non seulement la résoudre d'un point de vue général mais aussi l'appliquer à des cas particuliers.

Par exemple, dans le verre, l'eau et tous les autres liquides d'une densité uniforme et parfaitement mélangés on postule que la densité des particules est uniforme [...].

La quantité de lumière interceptée est d'autant plus grande que les particules interceptrices sont plus nombreuses dans un petit espace donné [...]. »

D'après Cinquième partie, Chapitre 1, page 287 et 288, paragraphes 865, 873 et 874

4. À quelle(s) grandeur(s) Johann Heinrich Lambert fait-il référence ici ?

## Éléments pour le professeur

Cette activité est prévue pour une séance d'environ 1h30. Elle peut être suivie d'une séance en classe au cours de laquelle la loi de Beer-Lambert sera finalement énoncée, après qu'on aura discuté des travaux d'August Beer (éventuellement grâce à une activité expérimentale ou documentaire complémentaire, proposée en fin de document).

Cette activité permet de montrer aux élèves l'évolution de la construction d'un modèle scientifique à l'aide d'expériences réalisées par différents scientifiques sur une période de plus de 120 ans (Bouguer en 1729, Lambert en 1760 et finalement Beer en 1852). L'histoire des sciences permet, dans ce cas, de questionner l'évolution de la démarche scientifique. Les élèves pourront également remarquer que cette loi, qui porte le nom de Beer-Lambert (et parfois appelée loi de Beer par les Anglo-saxons), a été énoncée par Beer à partir des travaux réalisés par Lambert et Bouguer. Il semblerait que Lambert, qui était très rigoureux dans ses travaux et qui rédigeait en latin, ait bénéficié d'une plus grande visibilité internationale, contrairement à Bouguer, qui rédigeait ses ouvrages en français. Le nom de Bouguer est ainsi tombé dans l'oubli.

Cette activité peut engendrer quelques problèmes de compréhension, en particulier le texte du document n°1 écrit en français du XVIII<sup>e</sup> siècle. L'enseignant peut, au choix, proposer aux élèves la

retranscription suivante ou s'assurer de la compréhension de ce texte avant d'aborder la reproduction de l'expérience réalisée par Bouguer.

Retranscription : « Pour reconnaître la vérité ou la fausseté de ce sentiment, j'ai fait une fois passer perpendiculairement au travers de deux morceaux de verre une lumière qui était égale à celle de 32 chandelles, et elle se trouva ensuite deux fois plus faible ; car elle ne se trouva plus égale qu'à la lumière de 16 chandelles. Or si une épaisseur de deux morceaux de verre eut produit un égal affaiblissement, il est évident que tous les rayons eussent été interrompus ; et à plus forte raison, 8 ou 10 morceaux de verre eussent formé une épaisseur tout à fait impénétrable à la lumière. Cependant ayant ajouté 2 morceaux aux deux premiers, il s'en fallut beaucoup qu'ils ne formassent un corps absolument opaque ; la lumière se trouva encore très vive ; et lorsque je la fis passer au travers de dix morceaux, elle était encore sensiblement aussi forte que celle d'une chandelle. »

En cas de problème de matériel (disponibilité des luxmètres ou lames de verre), l'expérience peut être réalisée par l'enseignant devant la classe.

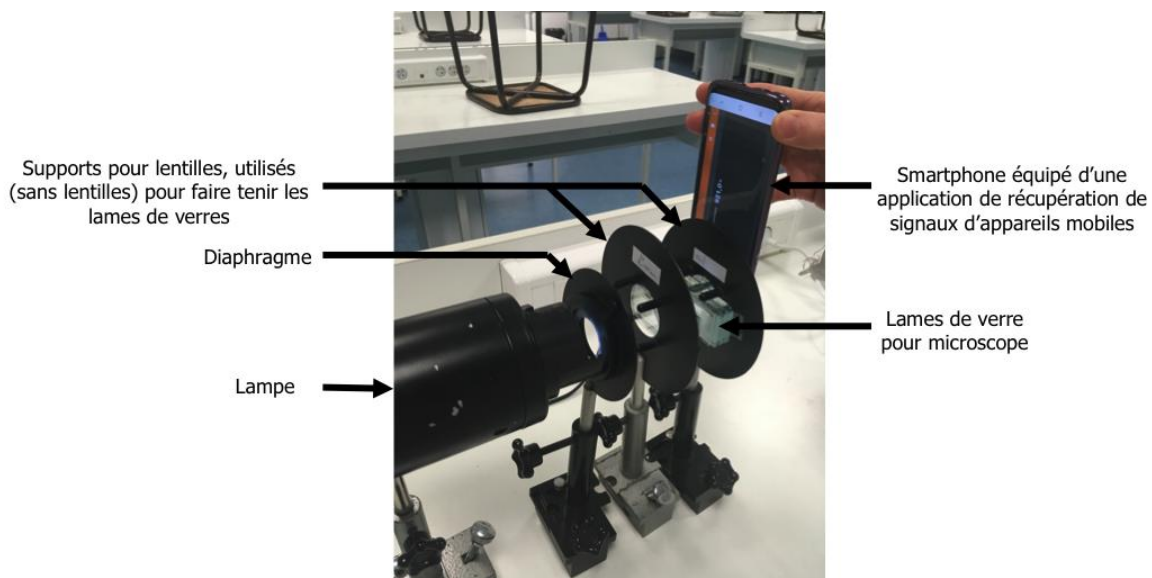
Enfin, cette activité propose l'utilisation d'une application de récupération de signaux de capteurs d'appareils mobiles (par exemple Phyphox sur Smartphone). Ce type d'application a fait l'objet du document [Les applications de récupération de signaux de capteurs d'appareils mobiles](#) publié par le GRIESP.

L'enseignant peut envisager la construction d'un tutoriel à destination des élèves à partir de captures d'écran.

## Éléments de réponses

1. À l'aide du matériel d'optique mis à disposition, schématiser une expérience permettant de reproduire l'expérience de Bouguer et de vérifier les résultats obtenus. Rédiger le protocole à mettre en œuvre.

L'expérience proposée est la suivante :



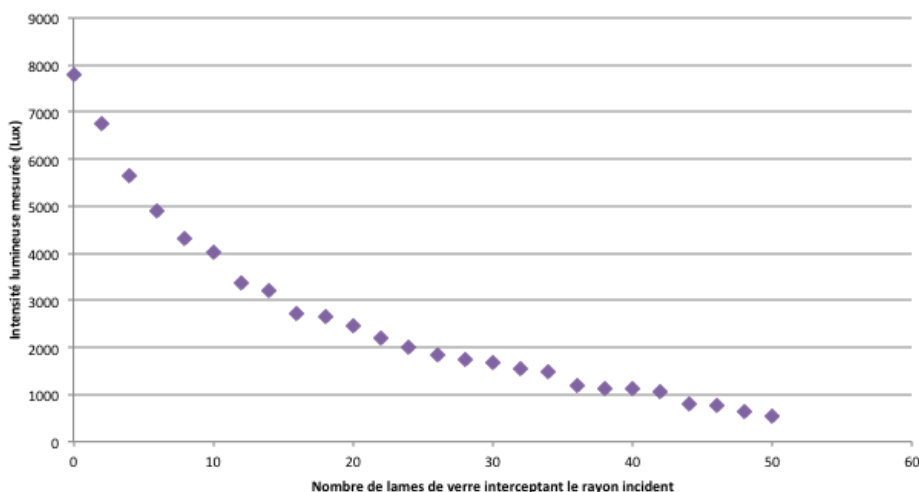
Grâce au smartphone, l'intensité lumineuse transmise après passage de la lumière à travers des lames de verres est mesurée. Pour réaliser les mesures, on a utilisé de 0 à 50 lames de verres en les ajoutant sur le chemin du rayon lumineux deux par deux.

2. Réaliser l'expérience proposée. Tracer l'évolution de l'intensité lumineuse transmise en fonction du nombre de lames de verres traversées par le rayon lumineux. Que constate-t-on ? Peut-on modéliser la courbe obtenue par une fonction linéaire ?

Épaisseur traversée par le faisceau lumineux (nombre de lames de verre)	Intensité lumineuse mesurée (lx)	Épaisseur traversée par le faisceau lumineux (nombre de lames de verre)	Intensité lumineuse mesurée (lx)
0	7800	26	1852
2	6740	28	1749
4	5630	30	1690
6	4902	32	1541
8	4300	34	1479
10	4004	36	1200
12	3384	38	1124
14	3219	40	1133
16	2721	42	1047
18	2641	44	805
20	2471	46	759
22	2211	48	630
24	1989	50	543

Comme le montre le graphique ci-dessous, l'intensité lumineuse transmise diminue lorsque le nombre de lames de verre interceptant le rayon lumineux augmente. Cette évolution ne peut pas être modélisée par une fonction affine.

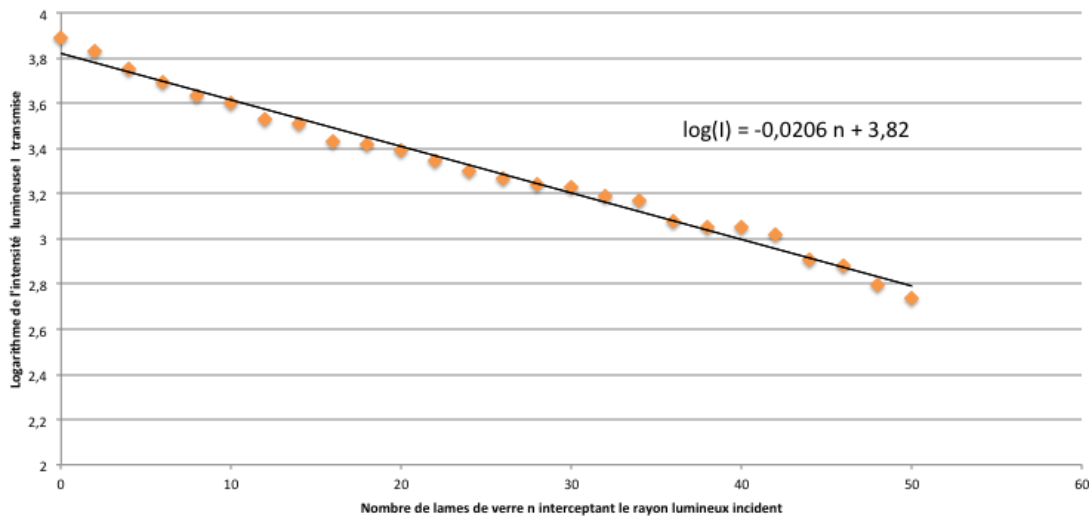
**Evolution de l'intensité lumineuse reçue par le Smartphone en fonction du nombre de lames de verre interceptant le rayon lumineux incident**



3. Tracer le graphique suggéré dans cet extrait. Proposer une modélisation graphique de la courbe ainsi obtenue. Conclure.

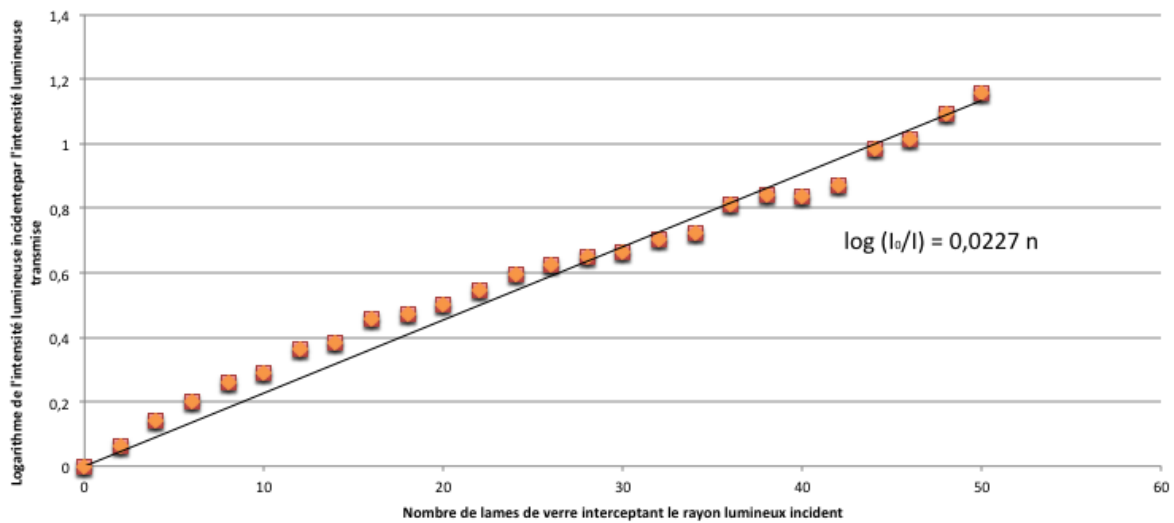
Bouguer propose, dans cet extrait, de représenter l'évolution du logarithme de l'intensité lumineuse (« les forces qu'à la lumière [...] peuvent être représentées par les ordonnées d'une logarithme ») en fonction de l'épaisseur de verre traversée par le rayon incident (« qui a pour axe l'épaisseur du corps »). Plusieurs graphiques peuvent donc être tracés.

**Evolution du logarithme de l'intensité lumineuse I transmise en fonction du nombre de lames de verre n interceptant le rayon lumineux**



Modélisation	Coefficient directeur a	Ordonnée à l'origine b
Valeur	-0,0206	3,82

**Evolution du logarithme de l'intensité lumineuse incidente par l'intensité lumineuse transmise en fonction du nombre de lames de verre interceptant le rayon lumineux**



Modélisation	Coefficient directeur a
Valeur	0,0227

Les mesures semblent pouvoir être représentées par un modèle linéaire, compatible avec la loi de Beer-Lambert.

4. À quelle(s) grandeur(s) Johann Heinrich Lambert fait-il référence ici ?

En reproduisant l'expérience de Bouguer, Lambert introduit la notion de concentration (nombre de particules dans un volume donné).

## Grille d'évaluation

Cette activité peut donner lieu à une évaluation des compétences travaillées dans le cadre de la démarche scientifique. Trois compétences ont été choisies : « s'approprier », « analyser/raisonner » et « réaliser ». Une grille d'évaluation est proposée ci-dessous :

Compétences	Capacités associées	Observables	Évaluation			
			A	B	C	D
S'approprier	Représenter la situation par un schéma.	Représenter un schéma rendant compte de l'expérience à réaliser et utilisant le matériel à disposition (Q1).				
Analyser / raisonner	Choisir, élaborer, justifier un protocole.	À l'aide du schéma, proposer un protocole permettant de reproduire l'expérience de Bouguer décrite dans le document 1 (Q1).				
Réaliser	Effectuer des procédures courantes (calculs, représentations, collectes de données, etc.).  Mettre en œuvre un protocole expérimental en respectant les règles de sécurité.	Mettre en œuvre le protocole expérimental proposé à la (Q1) et mesurer l'intensité lumineuse transmise en fonction de l'épaisseur de verre traversée par le rayon lumineux (Q2).  Représenter graphiquement les résultats obtenus à l'aide d'un tableur (Q2 et Q3).				



Compétences	S'approprier	Analyser / raisonner	Réaliser
Très insuffisant (D)	<p>Le rôle de chaque élément du montage mis à disposition n'est pas compris, même après l'apport de précisions par le professeur.</p> <p>Le schéma proposé est fantaisiste et ne permet pas de réaliser des mesures. Manque de soin.</p>	<p>Protocole irréalisable ou qui ne permet pas de réaliser des mesures d'intensité lumineuse.</p> <p>La rédaction du protocole est laborieuse et nécessite plusieurs aides (vocabulaire scientifique qui manque de précision).</p>	<p>N'arrive pas à collecter des résultats ou avec une aide importante de la part du professeur.</p> <p>Apport de nombreuses aides pour tracer les graphiques, les modéliser et les mettre en forme.</p>
Insuffisant (C)	<p>Le rôle de chaque élément du montage mis à disposition est compris, après l'apport de précisions par le professeur.</p> <p>Le schéma proposé est incomplet et le professeur doit apporter de nombreuses aides pour aboutir à un schéma complet. Manque de soin.</p>	<p>Proposition de protocole très lacunaire, mais qui permet de réaliser les mesures attendues (scientifiquement acceptable).</p> <p>Rédaction difficile avec un vocabulaire scientifique qui manque de précision.</p>	<p>Le protocole est mis en œuvre, et les mesures sont réalisées avec plusieurs aides.</p> <p>Apport de nombreuses aides pour tracer les graphiques, les modéliser et les mettre en forme.</p>
Satisfaisant (B)	<p>Le matériel mis à disposition est utilisé à bon escient.</p> <p>Le schéma rendant compte de l'expérience n'est pas tout à fait complet mais quelques aides ponctuelles permettent d'aboutir à un schéma clair et complet.</p>	<p>Proposition de protocole complet ou avec quelques oublis, avec quelques aides si nécessaire.</p> <p>Le vocabulaire scientifique peut manquer de rigueur, mais est corrigé après apport d'aide.</p>	<p>Le protocole est mis en œuvre, et les mesures sont réalisées avec une ou plusieurs aides.</p> <p>Tracé de deux graphiques répondant aux objectifs. Les graphiques sont modélisés et mis en forme avec d'éventuelles aides ponctuelles.</p>
Très satisfaisant (A)	<p>Le matériel mis à disposition est utilisé à bon escient.</p> <p>Le schéma rendant compte de l'expérience à réaliser est clair et soigné.</p>	<p>Proposition de protocole complet et correctement rédigé, avec un vocabulaire scientifique judicieusement choisi.</p>	<p>Le protocole est mis en œuvre, et les mesures sont réalisées avec soin.</p> <p>Tracé de deux graphiques répondant aux objectifs. Les graphiques sont modélisés et mis en forme avec d'éventuelles aides ponctuelles.</p>

## Compléments : l'expérience de Beer

Mathématicien, chimiste et physicien allemand, Beer (1825-1863) a énoncé, dans un ouvrage paru en 1852, une relation entre l'intensité lumineuse transmise lors du passage d'un faisceau monochromatique à travers une solution, l'épaisseur de solution traversée et la concentration en soluté. Cette loi est connue sous le nom de loi de Beer-Lambert.

### Document 5 : extrait de l'œuvre d'August Beer, *Bestimmung der Absorption des rothen Lichts in farbigen Flüssigkeiten*, 1852

« La plupart du temps, dans mes expériences, des dilutions de facteurs différents ont été appliquées et à partir des valeurs de  $\lambda$ , comme il s'est avéré pour celles-ci, le coefficient d'absorption pour 1 décimètre de la solution la plus concentrée a été calculé dans l'hypothèse que l'eau ajoutée lors de la dilution, comme elle n'a aucun effet chimique et que sa propre absorption peut être négligée, ne modifie pas la capacité d'absorption spécifique. L'observation montre cependant que l'affaiblissement de la lumière ne dépend en réalité que de l'épaisseur de la solution concentrée traversée. Par exemple, un tube de 1 décimètre de longueur a d'abord été rempli d'une solution de cuivre vitriol, qui contenait 9 volumes d'eau pour 1 volume de solution concentré à 13,5°, soit une dilution de 1/9. De plus, un tube de 2 décimètres de longueur a été rempli d'une solution de dilution 1/19. Le dernier tube contient autant de solution concentrée que le premier ; il montre aussi la même nuance en lumière blanche [...]. Les valeurs [...] pour le coefficient d'absorption de la solution concentrée sont presque identiques. »

(Traduction, pages 83 et 84)

### Document 6 : Matériel à disposition

- Solution de sulfate de cuivre de concentration  $C_1 = 0,1 \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$  et  $C_2 = 0,05 \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$
- Cuves cylindriques pour polarimètre (10 cm et 20 cm)
- Luxmètre ou Smartphone équipé de l'application « Phyphox »

5. Grâce au matériel mis à disposition, reproduire l'expérience réalisée par Beer.

La cuve de 10 cm est remplie avec la solution la plus concentrée ( $C_1$ ). Celle de 20 cm est remplie avec la solution la plus diluée ( $C_2$ ). Les cuves sont placées sur le détecteur du Smartphone. Dans les deux cas, l'intensité lumineuse transmise est pratiquement identique (22 et 23 lux sur les images ci-dessous).



NB : Les résultats obtenus lors de cette expérience sont néanmoins peu reproductibles.