

Bleu de méthylène : adsorbe-moi si tu peux !

par **Olivier FRAISSE**

Lycée Joliot-Curie - 13400 Aubagne

olivier.fraisse@ac-aix-marseille.fr

et **Isabelle BEURROIES**

Laboratoire Matériaux, interfaces, réactivité, électrochimie (MADIREL)

Aix-Marseille Université - 13013 Marseille

isabelle.beurroies@univ-amu.fr

COMME DANS DE NOMBREUX LYCÉES, une société de recyclage de déchets vient chaque année récupérer les différents bidons de nos résidus expérimentaux. Notre établissement ayant le label « Établissement en démarche de développement durable », nous voulions, au niveau du laboratoire de chimie, contribuer de façon plus autonome aux traitements de ces résidus. Notre volonté était de réduire le volume de stockage des déchets et de diminuer le coût pour le lycée. Disposant dans notre local de stockage, d'un bidon de solution de bleu de méthylène, nous avons choisi de le traiter par adsorption sur charbon actif (charbon de haute pureté de surface spécifique très importante comportant de très nombreux pores microscopiques). La problématique consiste à déterminer la masse de charbon actif à introduire dans le bidon afin d'adsorber la totalité des molécules de bleu de méthylène.

1. ADSORPTION DE MOLÉCULES ORGANIQUES EN PHASE LIQUIDE

L'adsorption en phase liquide est un phénomène de surface par lequel des atomes, des ions ou des molécules (**adsorbats**) se concentrent sur une surface solide (**adsorbant**) depuis la phase liquide [1]. Le liquide est généralement constitué d'un soluté et de solvant et l'on suppose que c'est préférentiellement le soluté qui s'adsorbe sur la surface du solide, puisqu'il est choisi pour son affinité pour l'adsorbat. Lorsqu'un matériau est en présence d'une solution, deux phénomènes peuvent apparaître : l'adsorption ou l'absorption.

1.1. La différence entre absorption et adsorption

La différence fondamentale entre l'absorption et l'adsorption réside dans l'endroit où se fixe l'espèce chimique : uniquement à la surface du matériau pour l'adsorption, et dans tout son volume pour l'absorption. Les différences entre ces deux processus physico-chimiques sont schématisées dans la figure 1 (cf. page ci-après).

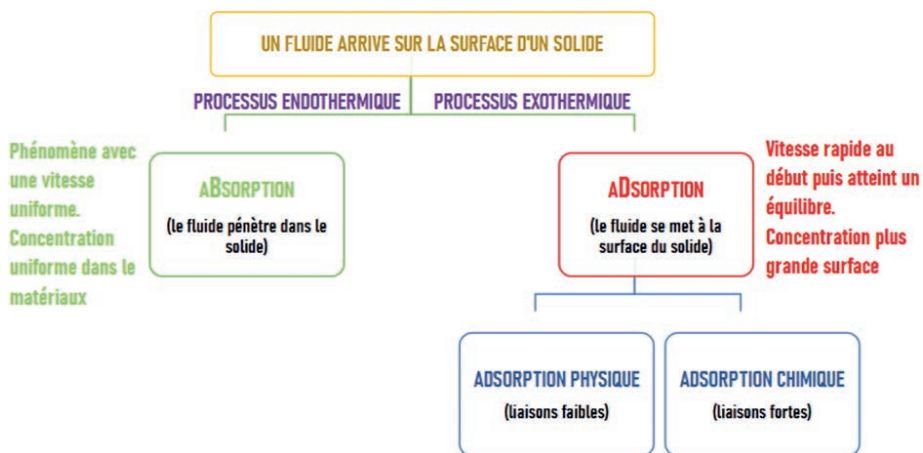


Figure 1 - Comparaison des processus physico-chimiques d'adsorption et d'absorption.

1.2. Les différents matériaux adsorbants

L'adsorption étant un phénomène de surface, il est nécessaire d'utiliser des adsorbants présentant une surface de contact avec les molécules à adsorber la plus grande possible.

1.2.1. Les matériaux divisés (poudres)

Pour augmenter la surface de contact entre le fluide et le solide, on peut diviser la matière. Plus les morceaux ou les grains sont petits, plus la surface est grande. On parle de poudre lorsque la taille des particules est inférieure à 1 mm. Lorsque cette dimension n'est plus que de 1 μm , on parle de poudre fine [2].

1.2.2. Les matériaux poreux

Un autre moyen pour augmenter la surface de contact entre le fluide et le solide est de creuser la matière. Les trous présents dans le solide sont appelés **des pores**. Ces pores peuvent se classer suivant leur type ou leur taille. Des grandeurs caractéristiques, telles que la surface spécifique et le volume poreux, viennent compléter la caractérisation des matériaux poreux.

Un pore est défini comme une cavité fermée ou ouverte plus profonde que large qui existe dans un grain de matière, à distinguer de la rugosité plus large que profonde [2].

1.2.2.1. Différents types de pores

Dans un grain poreux, il est possible de distinguer (cf. figure 2) :

- ◆ les irrégularités se trouvant à la surface du grain (a) caractéristiques de sa rugosité ;
- ◆ les pores ouverts qui débouchent à la surface du grain (b, c, d, e), ou fermés (f) ;
- ◆ les pores borgnes, c'est-à-dire ouverts à une seule extrémité (b, e) ;
- ◆ les pores en intercommunication (c, d).

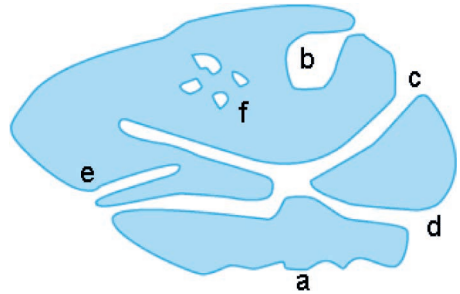


Figure 2 - Schéma d'un grain poreux [3].

1.2.2.2. Différentes tailles des pores

On distingue trois types de pores [2] :

- ◆ les **macropores** dont la largeur est supérieure à 50 nm ;
- ◆ les **mésopores**, dont la largeur est comprise entre 2 et 50 nm ;
- ◆ les **micropores** dont la largeur est inférieure à 2 nm.

Les plus grands pores peuvent être observés à différentes échelles et même être visibles à l'œil nu. Toutefois, le plus souvent, il est nécessaire d'utiliser la microscopie pour les observer, et en particulier la Microscopie électronique à balayage (MEB). La figure 3 représente une image de macropores obtenue à l'aide d'un ZEISS Gemini 500 couplé à un détecteur de type HE-SE2 Everhart-Thornley et avec une tension d'accélération de 1 kV sur un charbon actif type Norit.

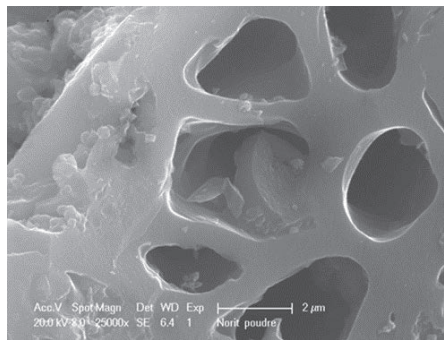


Figure 3 - Image MEB de Macropores (granules de charbons Norit) fournie par le laboratoire MADIREL.

Plus les pores sont petits et nombreux, plus la surface développée est importante.

1.2.2.3. Surface spécifique

On définit la **surface spécifique**, comme étant la **surface totale** (externe + interne) d'un gramme de solide, elle est exprimée en $\text{m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$:

$$S_{\text{totale}} = S_{\text{externe}} + S_{\text{interne}}.$$

La **surface externe** comprend toutes les irrégularités et la **surface interne** comprend tous les pores accessibles.

1.2.2.4. Volume poreux

Le volume poreux V_p , est le volume nécessaire pour saturer un gramme de solide, il s'exprime en $\text{cm}^3 \cdot \text{g}^{-1}$. La porosité représente la proportion de vide dans le matériau, c'est le rapport du volume poreux V_p sur le volume total V_T : $\frac{V_p}{V_T}$.

1.2.3. La nature chimique des adsorbants

On distingue principalement trois types d'adsorbants selon leur nature chimique :

- ◆ à base de carbone, tel que les charbons actifs et le graphite ;
- ◆ à base d'oxygène sous forme d'oxydes : les silices et les zéolithes ;
- ◆ à base de matière organique : les MOF (Metal Organic Frameworks) et les polymères.

1.3. Techniques d'adsorption

L'adsorption à partir d'une solution est habituellement effectuée, soit sous forme de colonne chromatographique, soit en batch. Dans le premier cas, on laisse la solution percoler à travers une colonne verticale contenant l'adsorbant. En mode batch, une masse d'adsorbant est mélangée en une seule fois avec un volume de solution et le système est maintenu sous agitation suffisamment longtemps. La séparation de la solution résultante est réalisée par filtrage, centrifugation ou décantation.

1.4. Comment quantifier l'adsorption ?

La quantité adsorbée est calculée à partir de la différence entre la quantité initiale d'adsorbat mis en présence de l'adsorbant et celle à l'équilibre restant en solution. Plus précisément, la quantité adsorbée Q en $\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$, est calculée à l'aide de la relation :

$$Q = \frac{(C_i - C_e) \times V}{m_s}$$

C_i : concentration initiale du soluté en $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$;

C_e : concentration du soluté à l'équilibre en $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$;

m_s : masse du solide (adsorbant) en g ;

V : volume de la solution en L.

Cette quantité d'adsorbable fixée par l'adsorbant en fonction de la concentration dans la solution est représentée par une courbe appelée « isotherme d'adsorption ». Cette courbe représente la quantité adsorbée ramenée à 1 g de poudre en fonction de la concentration d'adsorbat à l'équilibre. La capacité d'adsorption est maximale lorsque la concentration adsorbée reste constante à l'équilibre. La forme des isothermes d'adsorption traduit l'affinité entre l'adsorbat et l'adsorbant et peut être caractéristique du type de pores. Ainsi, il existe une classification établie par l'IUPAC (*International Union of Pure and Applied Chemistry*, en français : Union internationale de chimie pure et appliquée) qui permet d'identifier le type de pores présents dans le matériau poreux. Les échantillons microporeux tels que le charbon actif, sont caractérisés par une isotherme de type I correspondant à la saturation rapide de la microporosité (cf. figure 4) [4].

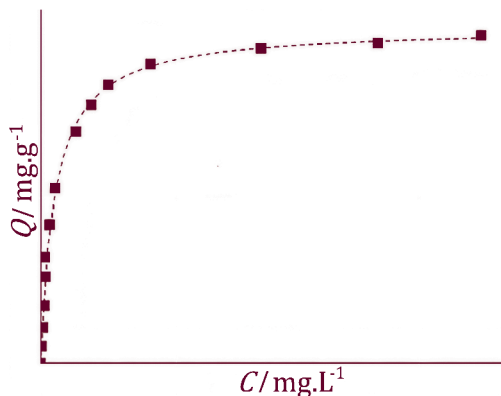


Figure 4 - Isotherme d'adsorption représentant la quantité adsorbée en fonction de la concentration d'équilibre.

2. LE BLEU DE MÉTHYLÈNE

Le bleu de méthylène (cf. figure 5) de formule brute $C_{16}H_{18}N_3ClS$, est un colorant cationique organique utilisé au lycée aussi bien en chimie qu'en SVT (Sciences de la vie et de la Terre). Étant très peu biodégradable, s'il se retrouve dans les eaux rejetées, les effets nuisibles à la faune et la flore sont importants [5].

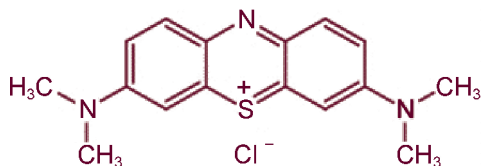


Figure 5 - Formule chimique du bleu de méthylène.

- ◆ Masse molaire moléculaire : $M_{\text{BM}} = 316,86 \text{ g} \cdot \text{mol}^{-1}$.
- ◆ La molécule de bleu de méthylène peut être considérée comme un volume prismatique de dimensions : $V_{\text{BM}} = 1,7 \text{ nm} \times 0,76 \text{ nm} \times 0,325 \text{ nm}$ [6].
Afin de quantifier la quantité de bleu de méthylène à traiter, la spectroscopie UV-Visible peut être utilisée.
- ◆ Spectre d'absorption (cf. figure 6) visible du bleu de méthylène à $C = 20 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ [7].

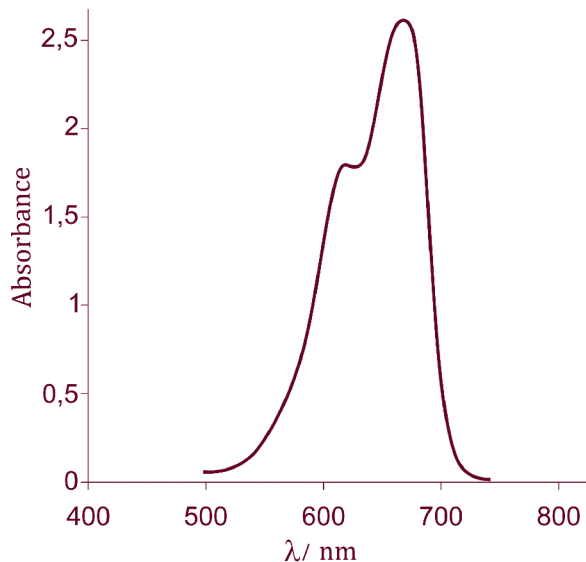


Figure 6 - Spectre d'absorption visible du bleu de méthylène, représentant l'absorbance en fonction de la longueur d'onde incidente.

3. LE TRAITEMENT D'UN BIDON DE STOCKAGE

Ce traitement concerne uniquement la physisorption du bleu de méthylène. Pour déterminer la masse de charbon actif nécessaire à l'élimination du bleu de méthylène présent dans notre bidon, plusieurs étapes sont à réaliser.

3.1. Détermination de la concentration en masse de bleu de méthylène dans un bidon de stockage, par dosage par étalonnage

Le bidon utilisé (cf. figure 7, page ci-contre) est un bidon de récupération de bleu de méthylène des laboratoires de chimie et de SVT de notre établissement.

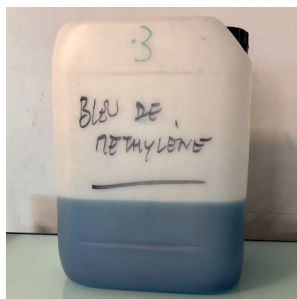


Figure 7 - Bidon de stockage.

La longueur d'onde retenue pour effectuer les mesures d'absorbance, de cinq solutions étalons de bleu de méthylène de concentrations en masse C_m , est de 670 nm (longueur d'onde au maximum d'absorption). Les mesures d'absorbance (cf. tableau 1) ont été réalisées avec un spectrophotomètre 4201/50 Zuzi.

$C_m / \text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$	6	9	11	15	18
A	1,119	1,409	1,809	2,314	2,667

Tableau 1 - Absorbance à $\lambda = 670 \text{ nm}$ pour différentes concentrations en masse de bleu de méthylène.

Après modélisation de la courbe $A_{670} = f(C_m)$ avec LATIS-Pro, nous obtenons la relation :

$$A_{670} = 0,155 C_m.$$

La mesure de l'absorbance de la solution ($A_{670} = 2,197$) contenue dans le bidon nous permet d'obtenir la concentration en masse en bleu de méthylène : $C_m = 14,2 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$. L'étape suivante consiste à déterminer la quantité maximale de bleu de méthylène que le charbon actif peut adsorber. Pour cela, il est nécessaire d'obtenir l'isotherme d'adsorption à partir de solutions de différentes concentrations de bleu de méthylène.

3.2. Adsorption par lot (batch adsorption)

La technique en batch consiste à ajouter une masse connue d'adsorbant (charbon actif) à une solution de concentration initiale (C_i) connue en adsorbat (bleu de méthylène). L'agitation du mélange se fait pendant une durée déterminée pour atteindre l'équilibre. Après filtration, afin de séparer l'adsorbant de la solution, on détermine par spectrophotométrie la concentration finale (C_e) de l'adsorbat. La quantité adsorbée est ensuite calculée à partir de la différence entre C_i et C_e .

3.2.1. Conditions expérimentales

Nous avons opté pour un adsorbant plutôt microporeux, facile à se procurer et à moindre coût. Le choix s'est porté sur le charbon actif (CAS n° 7440-44-0) de chez Jeulin. Pour réaliser les différentes étapes (cf. figure 8) du protocole de l'adsorption par lot, nous avons utilisé 47 mg de charbon actif (m_s) et un volume de 50,0 mL de solution (V). L'agitation a duré huit heures à 25 °C.

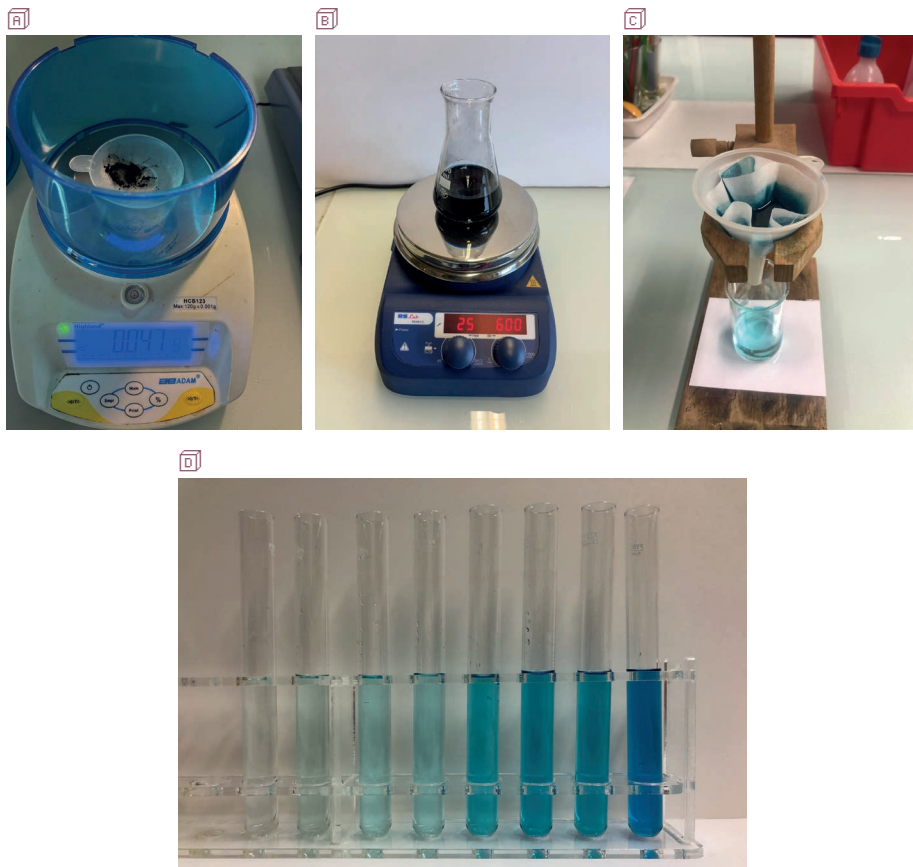


Figure 8 - Les différentes étapes de l'adsorption par lot : **A**) pesée du charbon actif - **B**) agitation du mélange charbon actif/solution de bleu de méthylène pendant huit heures - **C**) filtration du mélange - **D**) différents filtrats obtenus.

3.2.2. Résultats

Les différentes mesures d'absorbance et les valeurs calculées de C_c et de Q sont regroupées dans le tableau 2 (cf. page ci-contre).

$C_e / \text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$	0,252	0,760	1,57	1,78	5,55	8,04	8,06	17,4
$C_i / \text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$	198	223	251	260	293	323	332	343
A	0,039	0,118	0,243	0,276	0,860	1,246	1,250	2,690
$Q / \text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$	210	236	265	275	306	335	345	346

Tableau 2 - Résultats obtenus pour des concentrations initiales en bleu de méthylène allant de $198 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ à $343 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$.

Nous pouvons alors tracer l'isotherme d'adsorption (cf. figure 9) représentant l'évolution de la quantité adsorbée ramenée à 1 g de poudre en fonction de la concentration du soluté à l'équilibre.

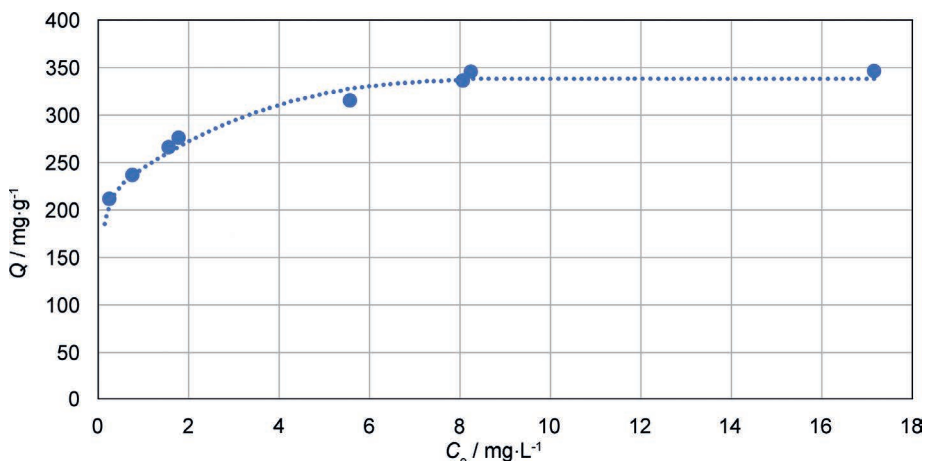


Figure 9 - Isotherme d'adsorption du bleu de méthylène obtenue à 25°C pour 47 mg de charbon actif.

On constate au plateau que la capacité maximale d'adsorption est de $345 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ de bleu de méthylène. Ainsi concernant notre bidon de $V_B = 3,8 \text{ L}$, une masse de 0,16 g de charbon actif serait suffisante pour adsorber la totalité du bleu de méthylène.

$$m_{\text{CA}} = \frac{C_m \times V_B \times 1,0}{Q} = \frac{14,2 \times 3,8 \times 1,0}{345} = 0,16 \text{ g.}$$

Cependant, après avoir introduit cette masse dans le bidon de récupération, la solution n'est pas devenue totalement incolore (cf. figure 10, page ci-après). Ainsi, on peut s'interroger sur les raisons qui peuvent justifier ce résultat.

3.3. Pourquoi le bleu de méthylène n'a-t-il pas été entièrement adsorbé ?

Nous avons demandé au Laboratoire MADIREL de déterminer le volume poreux

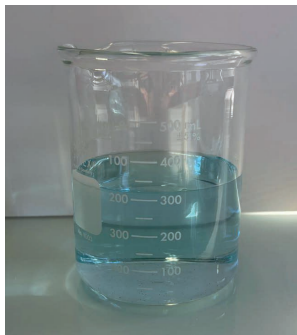


Figure 10 - Solution obtenue après traitement.

de notre charbon actif (CAS n° 7440-44-0) :

$$V_p = 0,433 \text{ cm}^3 \cdot \text{g}^{-1}.$$

La mesure a été faite par adsorption de diazote à 77 K sur l'appareil TriStar de Micromeritics après un traitement thermique sous vide à 200 °C pendant douze heures. Ce volume nous permet de déterminer celui disponible pour 0,16 g de charbon. Soit un volume :

$$V_p' = 6,9 \cdot 10^{-2} \text{ cm}^3.$$

Le volume total des molécules de BM est :

$$V_{\text{TBM}} = \frac{C_m \times V_B}{M_{\text{BM}}} \times N_A \times V_{\text{BM}}$$

$$V_{\text{TBM}} = \left(\frac{14,2 \cdot 10^{-3} \times 3,8}{319,86} \right) \times 6,02 \cdot 10^{23} \times 1,7 \cdot 10^{-9} \times 0,76 \cdot 10^{-9} \times 0,325 \cdot 10^{-9} = 4,3 \cdot 10^{-8} \text{ m}^3$$

$$V_{\text{TBM}} = 4,3 \cdot 10^{-2} \text{ cm}^3.$$

Comme $V_{\text{TBM}} < V_p'$, toutes les molécules de BM auraient dû être adsorbées.

Dans nos conditions expérimentales, l'adsorption dépend de deux facteurs principaux :

- ◆ **Température** : l'adsorption est un processus exothermique, son déroulement est favorisé thermodynamiquement par un abaissement de température (une température élevée réduit son efficacité).
- ◆ **Composés concurrents** : il est possible que le bidon de stockage fût mal rincé avant de contenir les différentes solutions de bleu de méthylène, ou que ces dernières aient été souillées lors des manipulations en classe. Ainsi, des composés autres que le bleu de méthylène présents dans le bidon ont pu être adsorbés. De plus, notre expérience a été réalisée avec du charbon actif non passé à l'étuve et conservé dans notre laboratoire dans des conditions peu optimales. Certains pores peuvent donc être occupés par des molécules d'eau, entre autres.

La mesure d'absorbance ($A_{670} = 0,129$) de la solution obtenue après traitement nous permet de déterminer la masse de BM non adsorbée :

$$m_{\text{BM restant}} = \frac{A_{670}}{0,155} \times V_B = \frac{0,129}{0,155} \times 3,8 = 3,1 \text{ mg.}$$

Il faudra donc ajouter 10 mg supplémentaires de CA pour les adsorber :

$$m_{\text{CA sup}} = \frac{m_{\text{CA}} \times m_{\text{BM restant}}}{(C_m \times V_B - m_{\text{BM restant}})} = \frac{160 \times 3,1}{(14,2 \cdot 10^{-3} \times 3,8 - 3,1)} = 10 \text{ mg.}$$

Après cet ajout de 10 mg, nous constatons (cf. figure 11) que notre solution est devenue incolore, le bleu de méthylène a donc été entièrement adsorbé.

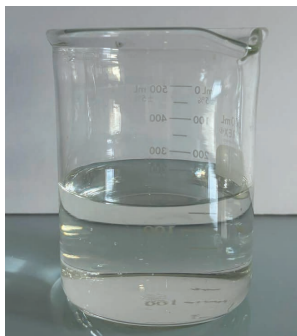


Figure 11 - Solution après ajout des 10 mg, puis filtration.

CONCLUSION

L'objectif fixé a donc été atteint. Gagner en capacité de stockage dans notre local, nous passons ainsi d'un volume de 3,8 L à une masse de 0,17 g à traiter et diminuer de la sorte le coût de traitement pour le lycée. Cette démarche s'inscrit aussi dans le cadre du label «Établissement en démarche de développement durable». Enfin, cette méthode peut faire l'objet d'un projet scientifique en classe de première, permettant notamment de sensibiliser les élèves au stockage et aux traitements des résidus des séances expérimentales. Il permet aussi de mobiliser les compétences retenues dans le cadre d'une démarche scientifique, ainsi que les notions et contenus tels que : absorbance, spectre d'absorption, loi Beer-Lambert [8].

REMERCIEMENTS

Merci à Magali Amberto, technicienne de recherche et de formation, au Lycée Joliot-Curie d'Aubagne, pour sa disponibilité et pour la précision des mesures.

BIBLIOGRAPHIE ET NETOGRAPHIE

- [1] STS Canada, « Adsorption en phase liquide ». Disponible à l'adresse : <https://www.stscanadainc.com/adsorption-en-phase-liquide.html>
page consultée le 15 mai 2026.
- [2] F. Rouquerol, J. Rouquerol, I. Beurroies, P. Llewellyn et R. Denoyel, « Texture des matériaux divisés: taille de pores des matériaux nanoporeux par adsorption d'azote », *Techniques de l'ingénieur*, 2020.
DOI : <https://doi.org/10.51257/a-v1-p1051>
- [3] F. Rouquerol, J. Rouquerol, I. Beurroies, P. Llewellyn et R. Denoyel, « Texture des matériaux divisés: aire spécifique des matériaux pulvérulents ou nanoporeux », *Techniques de l'ingénieur*, 2020.
DOI : <https://doi.org/10.51257/a-v4-p1050>
- [4] M. Thommes, K. Kaneko, A.V. Neimark, J.P. Olivier, F. Rodriguez-Reinoso, J. Rouquerol and K.S.W. Sing, "Physisorption of gases, with special reference to the evaluation of surface area and pore size distribution (IUPAC Technical Report)", *Pure Appl. Chem.*, vol. 87, n° 9-10, p. 1051-1069, July 2015.
- [5] A. Haouas, I. Bakir, M. Ksibi et E. Elaloui, « Étude de l'élimination de bleu de méthylène dans l'eau par le charbon actif commercial CECA40 », *J. Chim. Phys.*, vol. 96, n° 3, p. 479-486, March 1999.
- [6] P.T. Hang and G.W. Brindley, "Methylene blue absorption by clay minerals : determination of surface areas and cation exchange capacities (clay-organic studies XVIII)", *Clays Clay Miner.*, vol. 18, n° 4, p. 203-212, November 1970.
DOI : <https://doi.org/10.1346/CCMN.1970.0180404>
- [7] K. Asmaa Bennani, M. Badia, H. Mohsine, B. Mina et Y. Abdelghani, « Élimination du colorant basique "Bleu de méthylène" en solution aqueuse par l'argile de Safi », *Revue des sciences de l'eau*, vol. 23, n° 4, décembre 2010.
- [8] MENSUR, « Programme d'enseignement de spécialité de physique-chimie de la classe de première de la voie générale », *Bulletin Officiel de l'Éducation nationale*, spécial n° 1, 22 janvier 2019. Disponible à l'adresse : https://www.education.gouv.fr/pid285/bulletin_officiel.html?pid_bo=38502
page consultée le 15 mai 2026.

**Olivier FRAISSE**

Professeur agrégé de sciences physiques
Lycée Joliot Curie
Aubagne (Bouches-du-Rhône)

**Isabelle BEURROIES**

Professeure des universités
Laboratoire MADIREL
Aix-Marseille Université
Marseille (Bouches-du-Rhône)