



Tester la loi de Beer-Lambert à la maison par traitement numérique de photographies

L'objectif de cette activité est de tester la loi de Beer-Lambert à la maison. Pour cela, les élèves, qui peuvent travailler en équipe, utilisent des solutions colorées (colorants alimentaires, cartouches d'encre de stylo, peinture à l'eau). Ils proposent et mettent en œuvre un protocole pour réaliser une gamme d'étalonnage. Ils prennent ensuite des photographies des solutions préparées. Puis un traitement numérique des images est réalisé avec le langage de programmation Python. Pour terminer, une discussion est menée sur les sources d'incertitudes de mesure et sur la robustesse du traitement d'images.

Prérequis

Les notions de solvant, soluté, solution aqueuse ont été étudiées précédemment.

Les élèves doivent maîtriser la notion de facteur de dilution.

Les élèves doivent savoir choisir une verrerie adaptée pour préparer une solution par dilution.

En classe de seconde, l'enseignement commun « Sciences Numériques et Technologie », présente le traitement numérique d'une image en agissant sur les trois composantes de ses pixels. Les élèves doivent savoir extraire les composantes RVB d'un pixel.

Références au programme

Ondes et signaux

2. La lumière : images et couleurs, modèles ondulatoire et particulaire

Notions et contenus

- Couleur blanche, couleurs complémentaires
- Couleur des objets. Synthèse additive, synthèse soustractive.
- Absorption, diffusion, transmission.
- Vision des couleurs et trichromie.

Capacités exigibles - Activités expérimentales support de formation

- Choisir le modèle de la synthèse additive ou celui de la synthèse soustractive selon la situation à interpréter.
- Interpréter la couleur perçue d'un objet à partir de celle de la lumière incidente ainsi que des phénomènes d'absorption, de diffusion et de transmission.

- Prévoir le résultat de la superposition de lumières colorées et l'effet d'un ou plusieurs filtres colorés sur une lumière incidente.
- Illustrer les notions de synthèse additive, de synthèse soustractive et de couleur des objets.

Constitution et transformations de la matière

1. Suivi de l'évolution d'un système, siège d'une transformation

A) Détermination de la composition du système initial à l'aide de grandeurs physiques

Notions et contenus

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

Capacités exigibles - Activités expérimentales support de formation

- Expliquer ou prévoir la couleur d'une espèce en solution à partir de son spectre UV-visible.
- Déterminer la concentration d'un soluté à partir de données expérimentales relatives à l'absorbance de solutions de concentrations connues.
- Proposer et mettre en œuvre un protocole pour réaliser une gamme d'étalonnage et déterminer la concentration d'une espèce colorée en solution par des mesures d'absorbance.
- Tester les limites d'utilisation du protocole.

Compétences travaillées dans le cadre de la démarche scientifique

S'approprier - *Capacités associées*

Tester la loi de Beer-Lambert en choisissant comme variable l'inverse du facteur de dilution (au lieu de la concentration).

Faire le lien entre spectrophotométrie et synthèse soustractive.

Analyser/Raisonner - *Capacités associées*

Planifier les étapes de la démarche.

Choisir un protocole pour réaliser une gamme d'étalonnage à la maison.

Choisir les paramètres à tester individuellement.

Réaliser - *Capacités associées*

Mettre en œuvre, à la maison, un protocole pour réaliser une gamme d'étalonnage.

Mettre en œuvre, à la maison, un protocole pour tester un paramètre.

Traiter numériquement des images à la maison.

Valider - *Capacités associées*

Tester la robustesse du traitement d'image.

Confronter le modèle aux résultats expérimentaux.

Proposer d'éventuelles améliorations de la démarche.

Communiquer - *Capacités associées*

Produire des graphiques pertinents.

Présenter la procédure de validation du modèle, convaincre ses pairs.

Mutualiser les résultats de l'équipe pour valider le modèle.

Capacités expérimentales

- Préparer une solution par dilution en choisissant le matériel adapté.
- Réaliser des mesures d'absorbance en s'aidant d'une notice.
- Mettre en œuvre un dispositif pour illustrer la synthèse soustractive.

Compétences numériques¹

Domaine 3 : création de contenus

Compétence 3.2 Développer des documents multimédias

Niveau 3 et 4

- Produire une image [...] avec différents outils numériques.
- Utiliser des procédures simples pour modifier un document multimédia.
- Traiter des images [...].

Mesure et incertitudes

Notions et contenus

- Variabilité de la mesure d'une grandeur physique.
- Incertitude-type.
- Écriture du résultat. Valeur de référence.

Capacités exigibles

- Exploiter une série de mesures indépendantes d'une grandeur physique : histogramme, moyenne et écart-type.
- Discuter de l'influence de l'instrument de mesure et du protocole.
- Évaluer qualitativement la dispersion d'une série de mesures indépendantes.

Capacité numérique :

- Représenter l'histogramme associé à une série de mesures à l'aide d'un tableur.
- Définir qualitativement une incertitude-type.
- Procéder à l'évaluation d'une incertitude-type par une approche statistique (évaluation de type A).
- Procéder à l'évaluation d'une incertitude-type par une autre approche que statistique (évaluation de type B).
- Écrire, avec un nombre adapté de chiffres significatifs, le résultat d'une mesure.
- Comparer qualitativement un résultat à une valeur de référence.

Modalité de travail

L'activité se décompose en 3 étapes. Une première étape de **cadrage du projet** s'effectue en classe entière (enseignement présentiel). La deuxième étape, qui peut être effectuée en équipe, correspond à la **mise en œuvre expérimentale à la maison** (autonomie de l'élève ou des équipes et enseignement distanciel asynchrone). Enfin, lors de la troisième étape, le **projet est présenté dans sa globalité**, en classe entière (enseignement présentiel).

Séquence de travail proposée



1^{re} étape en présentiel

Présentation du projet, clarification de l'objectif.

Étude des contraintes du travail expérimental à la maison.

¹ CRCN : Cadre de référence des compétences numériques : <https://eduscol.education.fr/721/cadre-de-referance-des-competences-numeriques>

PIX a pour objectif « d'amener chacun d'entre nous à cultiver ses compétences numériques et à valoriser ses acquis, et ce tout au long de sa vie. » : <https://pix.fr/>

Discussion pour l'élaboration d'un protocole commun pour la réalisation de la gamme d'étalonnage : anticipation des difficultés liées au choix du matériel, à la préparation de la solution mère, à la gestuelle de mesure.

Choix des paramètres de l'expérience liés à la réalisation de la gamme d'étalonnage.

Discussion pour l'élaboration d'un protocole commun de traitement d'images.

Choix des paramètres de l'expérience liés au traitement d'images.

Répartition des missions individuelles.



2^e étape en distanciel

Mise en œuvre à la maison, en autonomie, des expériences.

Suivi individualisé, en distanciel.

Mutualisation asynchrone des résultats : comptes rendus individuels des expériences réalisées envoyés à la classe (libre choix du support de communication).



3^e étape en présentiel

Présentation de la totalité du projet. Bilan.

Séances



1^{re} étape

1^{re} problématique : quel colorant choisir ?

On utilisera au choix des colorants alimentaires, des cartouches d'encre de stylo ou de la peinture à l'eau. On s'intéresse aux trois couleurs rouge R, vert V et bleu B qui composent un pixel. On peut aussi travailler avec les trois couleurs complémentaires jaune, magenta et cyan.

On fera attention à vérifier la stabilité du colorant dans l'eau (il peut y avoir des dégradations cinétiques).

2^e problématique : quelle abscisse pour le graphique final (test de la loi de Beer-Lambert) ?

Il s'agit d'amener les élèves à comprendre que l'on ne pourra pas déterminer précisément la concentration de la solution mère (on ne dispose pas de colorant solide pur de masse molaire connue).

Il est donc préférable de prendre comme abscisse l'inverse du facteur de dilution.

L'abscisse $1/f$ est choisie pour que l'axe des abscisses affiche des concentrations croissantes, ce qui facilite la comparaison des résultats à la loi de Beer-Lambert.

3^e problématique : quelle concentration doit avoir la solution mère ?

On ne peut pas proposer de valeur numérique.

Les élèves peuvent montrer des photos de solutions mères (trop diluée, adaptée, trop concentrée).

4^e problématique : comment diluer à la maison ?

On travaille sur les ordres de grandeur, on choisit des facteurs de dilution f de sorte que les concentrations des solutions filles n'atteignent pas les limites de validité de la loi de Beer-Lambert.

En notant C_0 la concentration de la solution mère et C_i les concentrations des solutions filles, on a $f_i = \frac{C_0}{C_i}$.

Les élèves devront choisir le matériel : balance de cuisine ou verre mesureur.

5^e problématique : comment photographier les solutions ?

Éclairage ambiant, fond blanc.

Photographier par-dessus ou sur le côté ? Notion de lumière incidente.

Penser à faire un blanc.

6^e problématique : comment rogner les photos ?

Présentation du logiciel Gimp ; donner un mode opératoire.

Quelle partie de la photo choisir ? Faut-il tirer au sort des pixels ?

Faut-il avoir les mêmes dimensions d'image pour chaque solution de la gamme d'étalonnage ?

7^e problématique : comment récupérer les paramètres RVB de chaque image avec le langage de programmation Python ?

Montrer, expliquer le code python.

8^e problématique : quel graphique tracer, comment exploiter les données ?

Tracer, puis tenter d'interpréter, les graphiques des valeurs relevées pour rouge R, vert V et bleu B en fonction de l'inverse de la variable f (facteur de dilution) : $R(1/f)$, $V(1/f)$ et $B(1/f)$. L'éclairement total étant $T = R + V + B$, pour s'affranchir des différences d'éclairement entre chaque photo, il est préférable de tracer : $\frac{R}{T}(1/f)$, $\frac{V}{T}(1/f)$ et $\frac{B}{T}(1/f)$ où $T = R + V + B$

Pour mesurer l'absorption par rapport à la lumière incidente, il faut « faire le blanc », et tracer : $\frac{R}{T} - \frac{R_b}{T_b}(1/f)$, $\frac{V}{T} - \frac{V_b}{T_b}(1/f)$ et $\frac{B}{T} - \frac{B_b}{T_b}(1/f)$

où $T = R + V + B$ et $T_b = R_b + V_b + B_b$ pour le blanc.

Si on veut tracer une absorbance en fonction de $1/f$, on détermine :

$$A = -\log\left(\frac{X_T}{X_b/T_b}\right) \text{ ou } A = -\log\left(\frac{X_T + X'_T}{X_b/T_b + X'_b/T_b}\right) \text{ (où } X, X' = R, V, \text{ ou } B)$$

Par exemple, pour une solution de couleur rouge, complémentaire du cyan (vert+bleu), il faut tracer :

$$A = -\log\left(\frac{V_T + B_T}{V_b/T_b + B_b/T_b}\right)$$

Choix des facteurs de dilution

Toute la classe peut prendre les mêmes facteurs de dilution f_i ($f_i = \frac{C_0}{C_i}$)

i	1	2	3	4	5	6	7	8
C_i (mL)	C_0	$3C_0/4$	$C_0/2$	$C_0/3$	$C_0/4$	$C_0/5$	$C_0/10$	$C_0/20$

Répartition des missions individuelles

On divise la classe en plusieurs équipes selon les couleurs à disposition.

Un élève de chaque équipe se voit attribuer la « mission principale » : *montrer que l'absorbance définie ci-dessus est une fonction linéaire de l'inverse du facteur de dilution.*

Pour cela, il doit diluer la solution mère avec plusieurs facteurs de dilution, prendre des photos de chaque solution fille obtenue, déterminer les valeurs R, V, B, déterminer l'absorbance A et tracer le graphique $A=f(1/f)$.

Un élève de chaque équipe peut choisir une ou plusieurs solution(s) trop concentrée(s) pour étudier les limites de la loi de Beer-Lambert.

Un élève de chaque équipe peut étudier la variabilité des paramètres R, V et B sur une image sélectionnée, en traçant trois histogrammes (R, V et B) puis en déterminant les paramètres R, V et B moyens ainsi que les incertitudes-type pour chacun u_R , u_V et u_B .

Un élève de chaque équipe peut découper l'image en 25 rectangles. Sur chaque portion d'image (c'est-à-dire chaque rectangle), il peut déterminer les paramètres moyens R, V, B ainsi que leurs incertitudes-type et ainsi en déduire le choix de la portion de l'image à sélectionner (quelle partie de l'image faut-il sélectionner ? Quelle est la variabilité RVB liée au choix des N pixels ?).

Un élève de chaque équipe peut travailler sur le dimensionnement de la sélection de la photographie (variabilité RVB liée au nombre de pixels sélectionnés), l'objectif étant de montrer qu'augmenter le nombre de pixels sélectionnés limite l'incertitude-type de l'absorbance liée au traitement de l'image.



2^e étape

Les élèves interagissent à distance avec le professeur pour discuter de leur protocole.

Les codes python sont corrigés par échanges de mails.

Les comptes rendus sont corrigés par échanges de mails.

Les versions finales des comptes rendus sont envoyées à la classe entière.



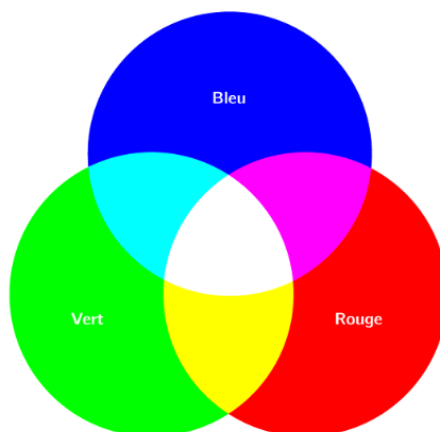
3^e étape

Un débriefing en classe permet de conclure sur les apprentissages acquis lors de cette activité concernant la technique d'analyse par spectrophotométrie : absorption, notion de blanc, couleurs complémentaires, loi de Beer-Lambert et limites de validité, variabilité lors d'un traitement d'image, notion de robustesse d'une méthode d'analyse.

Éléments de correction

Rappels sur les couleurs complémentaires

Synthèse additive des couleurs



En synthèse additive, la couleur complémentaire du rouge est le cyan (addition du vert et du bleu).

Rogner une image

Voir Annexe 1 – Rogner une image avec Gimp.

Traitement d'images en python : extraire les valeurs moyennes de RVB sur une image

```
from PIL import Image

Im=Image.open('C1.png')
Im=Im.convert("RGB", colors=256
)

Nx=Im.size[0]
Ny=Im.size[1]
NbPix=Nx*Ny

LR,LV,LB=[], [], []

for i in range (Nx) :
    for j in range (Ny) :

(R,V,B)=Im.getpixel((i,j))
    LR.append(R)
    LV.append(V)
    LB.append(B)

print(sum(LR)/len(LR))
print(sum(LV)/len(LV))
print(sum(LB)/len(LB))
```

Remarque : la ligne 3 du code doit préciser le chemin complet du fichier image (par exemple si ce fichier est rangé dans le dossier travail du disque C l'instruction est : `Im=Image.open('C:/travail/C1.png')`).

Suivant la configuration de l'IDE Python utilisé, il suffit parfois que ce fichier image soit situé dans le même dossier que celui du script.

Compte-rendu des missions principales

Equipe rouge

Protocole

Matériel pouvant être utilisé :

- Verre mesureur (50 mL à 500 mL)
- 1 grand pot à confiture
- 9 verres (pour éviter la vaisselle, mais un seul suffit)
- Eau
- Cartouche d'encre de stylo plume
- Préparation d'environ 1 L d'une solution mère d'encre rouge (cartouche de stylo plume).



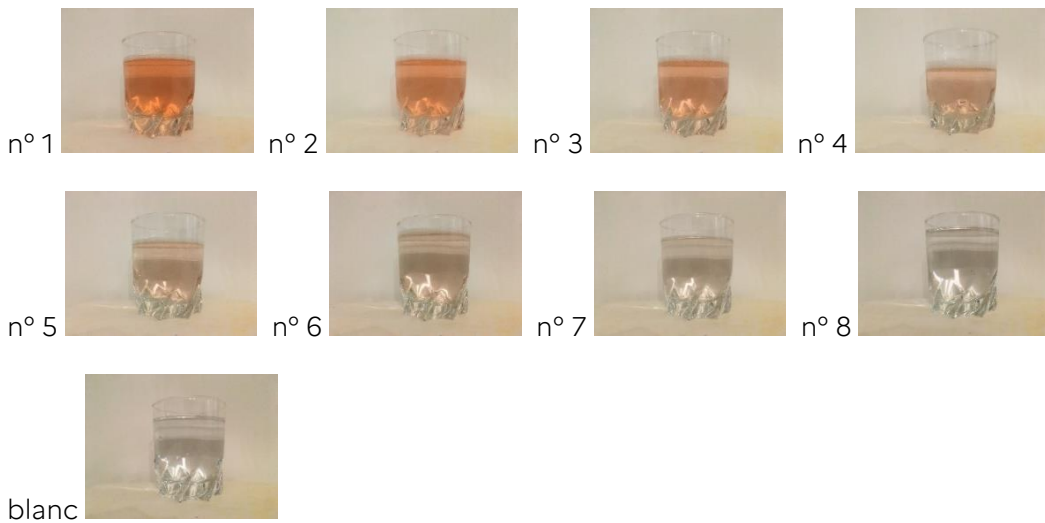
Solutions diluées dans des verres numérotés de $i = 1$ à $i = 8$:

i	1	2	3	4	5	6	7	8
$V_{\text{mère prélevé}}$ (mL)	200	150	100	50	50	50	50	50
$V_{\text{eau ajouté}}$ (mL)	0	50	100	100	150	200	450	950
$V_{\text{flûte final}}$ (mL)	200	200	200	150	200	250	500	1000
$f_i = \frac{V_{\text{flûte}}}{V_{\text{mère}}}$	1	4/3	2	3	4	5	10	20

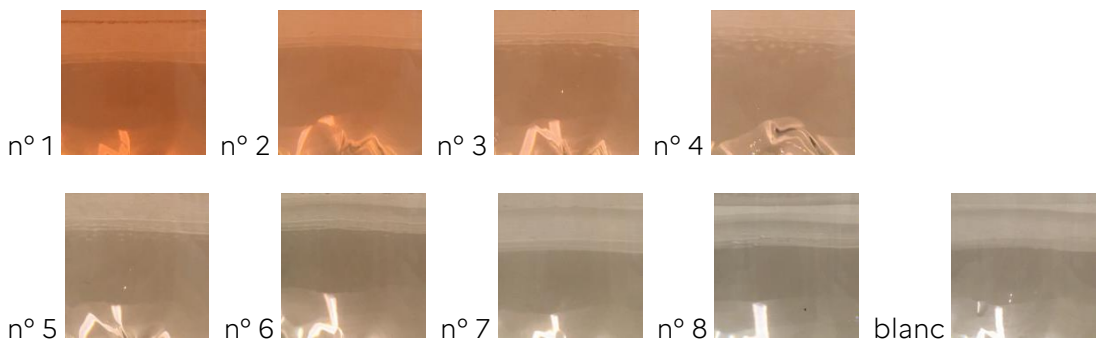
Le 9^e verre est rempli avec de l'eau.



Photos de chaque verre :



Images rognées pour préparer leur traitement numérique (utilisation de Gimp).



Résultats

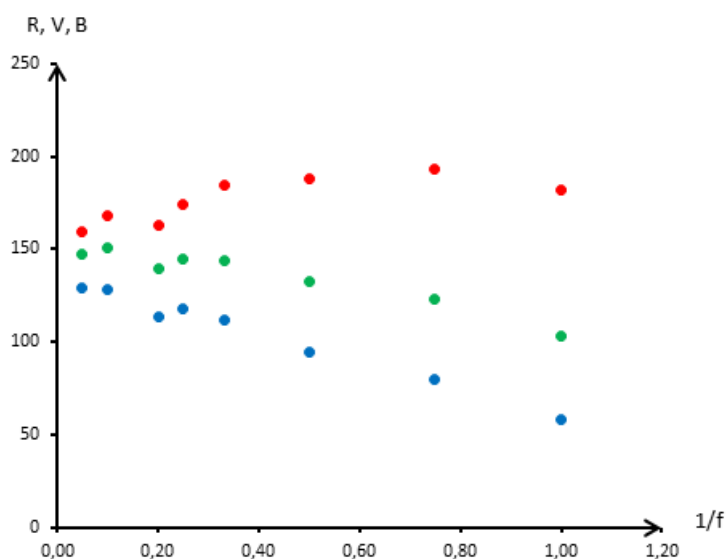
Traitement des images rognées avec Python. On trouve les composantes R, V, B moyennes de chaque image (Les composantes R, V, B sont des nombres compris entre 0 et 255). On calcule $T = R + V + B$. On fait de même pour le blanc (image n° 9).

i	1	2	3	4	5	6	7	8
R_i	188,22	193,06	187,64	184,50	173,94	163,05	168,13	159,71
V_i	102,78	123,20	132,28	143,51	144,88	139,43	150,43	147,36
B_i	57,90	79,82	94,67	112,20	117,45	113,94	128,21	128,90
$T_i = R_i + V_i + B_i$	342,90	396,08	414,59	440,21	436,27	416,42	446,77	435,97

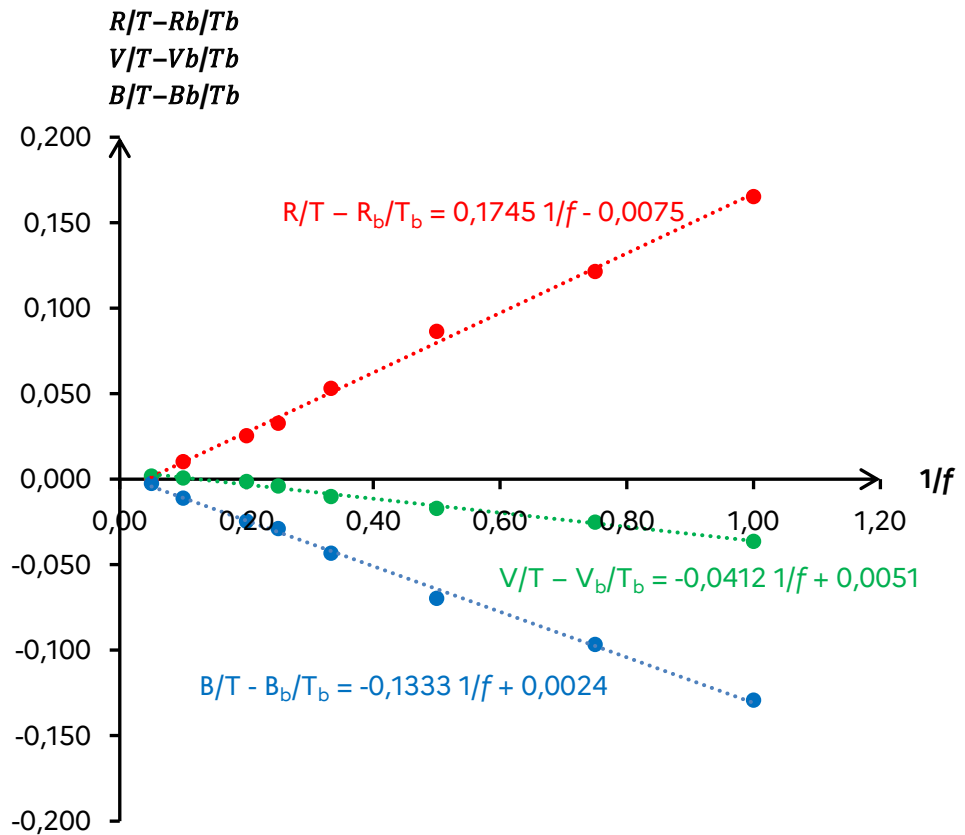
i	blanc
R_b	167,50
V_b	153,79
B_b	136,40
$T_b = R_b + V_b + B_b$	457,69

Discussion

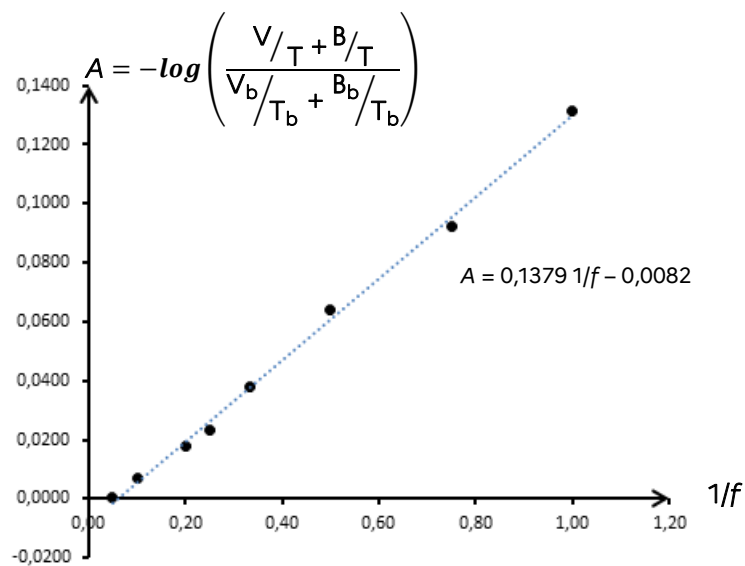
Représentation de chaque composante R, V, B en fonction de l'inverse du facteur de dilution f : $R(1/f)$, $V(1/f)$ et $B(1/f)$



Prise en compte des variations d'éclairement et correction par le « blanc »



Le vert et le bleu sont sous l'axe des abscisses, donc sont absorbés. Le rouge est au-dessus. C'est la couleur de la solution. La couleur complémentaire du rouge est le cyan (addition du vert et du bleu).



Les points semblent alignés. On peut conclure que les données expérimentales peuvent raisonnablement être modélisées par une droite (fonction affine) et donc par la loi de Beer-Lambert.

Autres équipes

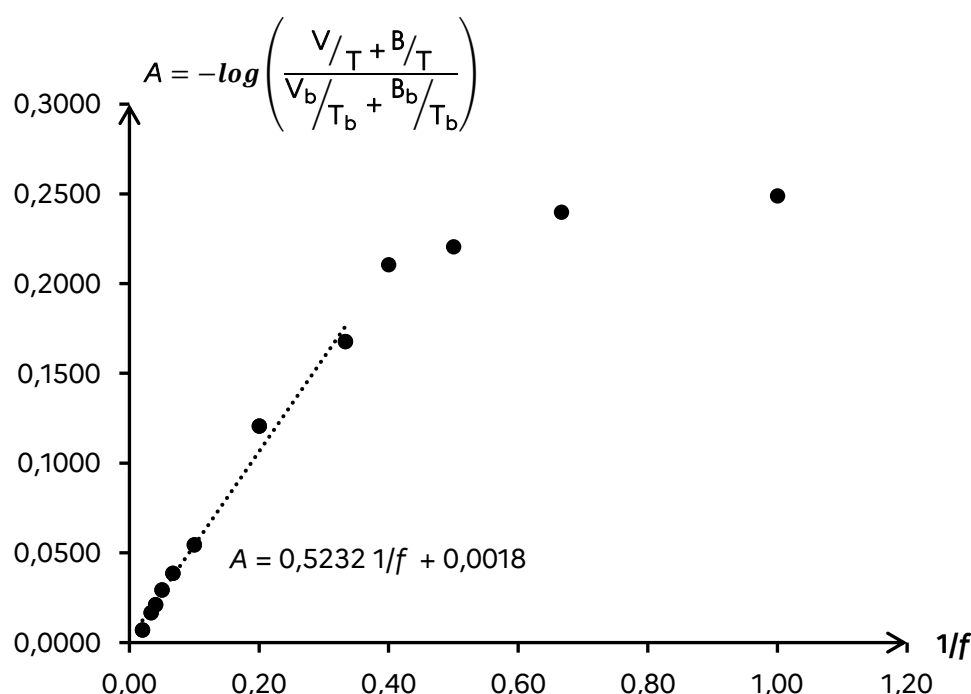
Le même travail que celui de l'équipe rouge a été réalisé pour les autres équipes, en utilisant :

- pour l'équipe magenta, une encre de stylo plume ;
- pour l'équipe cyan, un tube de peinture.

Les résultats sont donnés en Annexe 2 - Compte-rendu des missions principales.

Limites de l'utilisation de la modélisation avec la loi de Beer-Lambert aux concentrations élevées

Le travail a été mené par un membre de l'équipe rouge en utilisant une solution d'encre rouge trop concentrée (résultats donnés en Résultats). On obtient la courbe représentant l'absorbance $A = f(1/f)$ suivante :



Le modèle de la loi de Beer-Lambert n'est pas valable pour des concentrations élevées : les espèces chimiques sont trop proches les unes des autres, ce qui peut modifier leurs propriétés d'absorption. Il peut se former des agrégats.

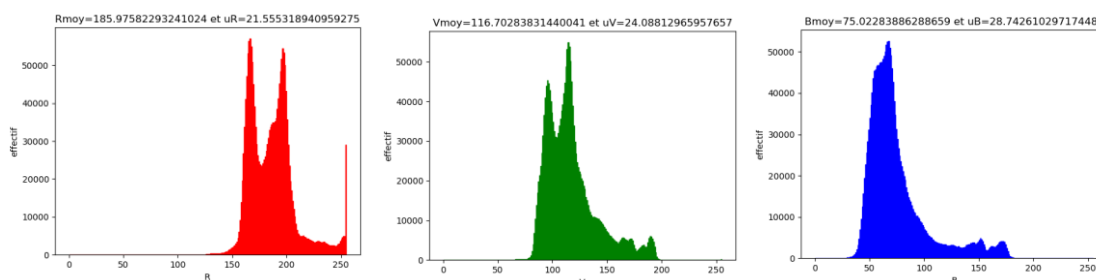
Variabilité des paramètres R , V et B sur l'image sélectionnée – histogrammes

On travaille ici sur une seule image.



n° 1

Le programme en Annexe 4 – Étude de la variabilité des paramètres R, V, B sur une image permet d'étudier la variabilité des paramètres R, V, B pour cette image. On obtient les histogrammes suivants :



On peut déterminer les paramètres R, V et B moyens ainsi que les incertitudes-type pour chacun u_R , u_V et u_B : $R=185,98$ ($u_R=21,56$) ; $V=116,70$ ($u_V=24,09$) ; $B=75,02$ ($u_B=28,74$).

La question de la robustesse du traitement d'image pour la détermination de l'absorbance se pose. Quelle est l'influence de la sélection d'image ? Faut-il sélectionner un maximum de pixels ? Faut-il éviter les zones de reflet du verre ? Quelle partie de l'image faut-il sélectionner ?

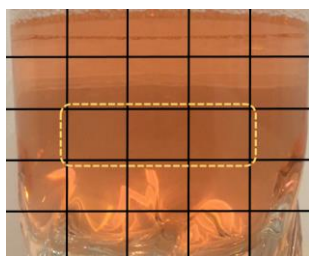


On se propose de découper l'image en 25 rectangles. Sur chaque portion d'image (c'est-à-dire chaque rectangle), on détermine les paramètres moyens R, V, B ainsi que leurs incertitudes-type (programme en Annexe 6 – Influence de la position de sélection d'image). On affiche les résultats sous forme de tableau.

Incertitudes-type (chaque valeur d'incertitude-type correspond à une portion d'image (un rectangle)) :

Paramètre R					Paramètre V					Paramètre B				
[[9.21	8.26	7.63	7.77	7.72]	[[23.9	10.67	9.78	11.87	20.33]	[[32.79	14.98	13.71	17.87	28.18]
[[13.2	14.01	14.24	13.26	12.52]	[[24.82	9.92	10.3	9.96	20.25]	[[31.89	8.02	7.95	8.35	24.93]
[[11.54	2.93	3.74	4.08	12.19]	[[28.87	2.65	3.41	5.3	25.45]	[[36.03	3.46	3.94	6.38	31.15]
[[21.33	25.26	28.89	21.06	20.14]	[[26.29	16.75	19.03	13.57	35.99]	[[32.98	10.04	11.23	8.96	42.98]
[[15.85	30.5	25.43	31.08	20.75]]	[[18.24	16.69	17.63	16.96	27.02]]	[[24.29	16.3	16.64	12.	30.67]]

On voit que les valeurs les plus faibles d'incertitude-type se situent au centre de la photo, au centre du verre. Il faut donc sélectionner le centre de la photo pour minimiser l'incertitude-type.



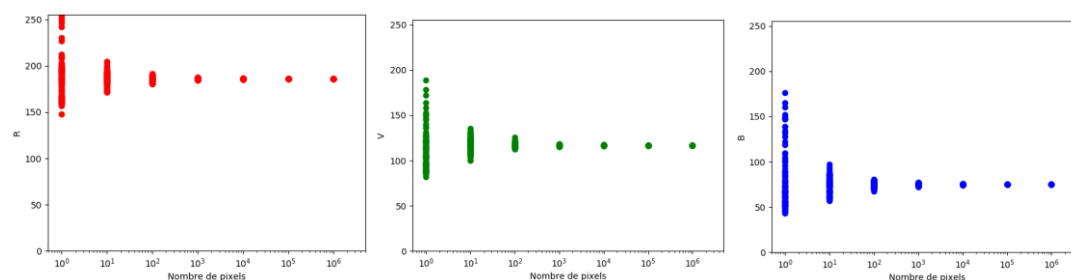
Influence du dimensionnement de l'image sélectionnée

Combien de pixels faut-il sélectionner ?



n° 1

L'image étudiée ici se compose de 1 969 056 pixels. On se propose de tirer aléatoirement, 100 fois, un nombre de pixels (noté N_{pix}) de cette image. On calcule, pour chaque tirage, les paramètres moyens R , V , B . On trace ensuite un graphique qui montre la variabilité de ces paramètres moyens en fonction du nombre de pixels tirés (programme en Annexe 5 - Étude du dimensionnement de la sélection d'image) :



On en conclut qu'il ne faut pas effectuer une trop petite sélection d'image. À partir de 10 000 pixels sélectionnés (à peu près $1/100^{\text{e}}$ de l'image), les paramètres R , V , B correspondent raisonnablement aux paramètres moyens de l'image.

Référence bibliographique

Joel F. Destino* and Katie Cunningham, *At-Home Colorimetric and Absorbance-Based Analyses: An Opportunity for Inquiry-Based, Laboratory-Style Learning*, J. Chem. Educ. 2020, 97, 2960–2966

Annexe 1 – Rogner une image avec Gimp

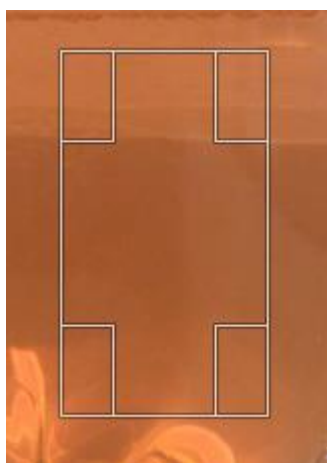
Ouvrir l'image Nom.jpg.

Sélectionner la partie de l'image à étudier.

Outil sélectionner :



Ajuster la taille du rectangle avec les « poignées » (haut, bas, gauche, droite et les 4 coins).



Vous pouvez utiliser Image/Rogner selon la sélection ou Copier (Ctrl+C) et coller dans une nouvelle image (Ctrl+Maj+V).

Exporter en format png (Ctrl+Maj+E) en Nom.png ; l'image jpg originale est conservée.

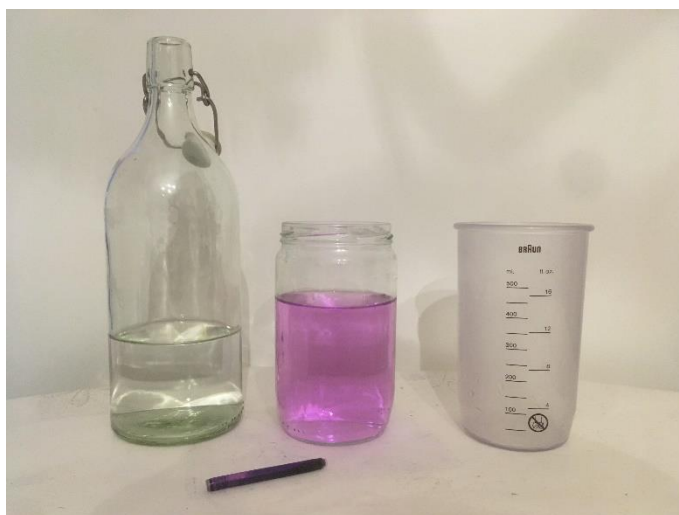
Annexe 2 - Compte-rendu des missions principales

Équipe « magenta »

Protocole

- Verre mesureur (50 mL à 500 mL)
- 1 grand pot à confiture
- 9 verres (pour éviter la vaisselle, mais un seul suffit)
- Eau
- Cartouche d'encre de stylo plume

Préparation d'environ 1 L d'une solution mère d'encre violette (cartouche de stylo plume).



Solutions diluées dans des verres numérotés de $i = 1$ à $i = 8$:

i	1	2	3	4	5	6	7	8
$V_{\text{mère}}$ (mL)	200	150	100	50	50	50	50	50
V_{eau} (mL)	0	50	100	100	150	200	450	950

Le 9^e verre est rempli avec de l'eau.



n°1

n°2

n°3

n°4

n°5

n°6

n°7

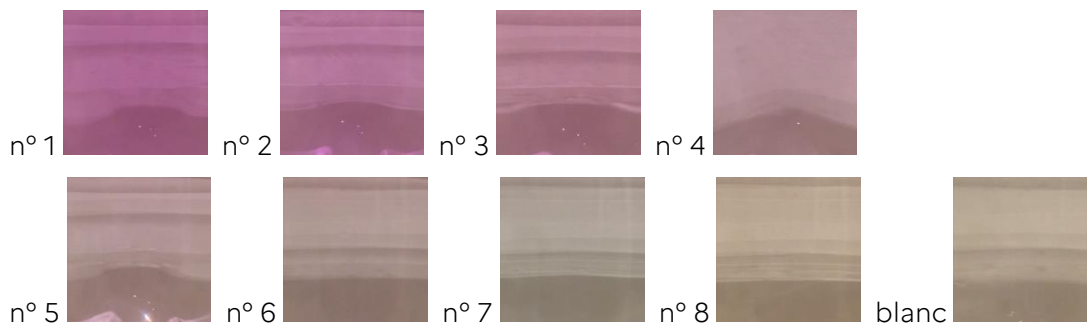
n°8

n°9

Photos de chaque verre.



Images rognées pour préparer leur traitement numérique (utilisation de Gimp).



Résultats

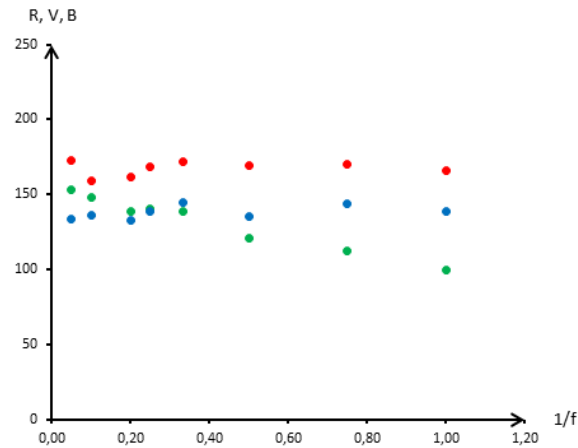
Traitement des images rognées avec Python. On trouve les composantes R, V, B moyennes de chaque image. On calcule $T = R + V + B$. On fait de même pour le blanc (image n° 9).

i	1	2	3	4	5	6	7	8
R_i	165,96	170,40	169,06	171,93	168,35	161,64	159,41	172,74
V_i	99,49	112,23	120,81	138,67	140,77	138,60	148,48	153,42
B_i	138,36	143,46	135,67	144,55	138,98	132,54	136,49	133,23
$T_i = R_i + V_i + B_i$	403,81	426,09	425,54	455,15	448,10	432,78	444,38	459,39

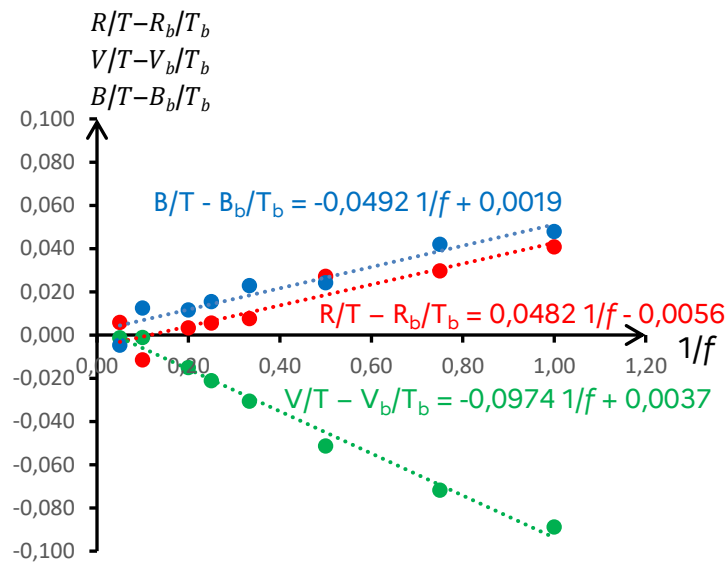
i	blanc
R_b	171,69
V_b	155,49
B_b	136,67
$T_b = R_b + V_b + B_b$	463,85

Discussion

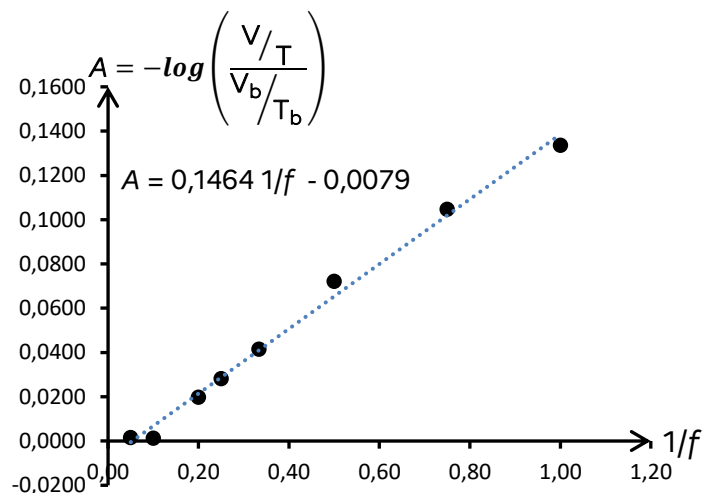
Représentation de chaque composante R, V, B en fonction de l'inverse du facteur de dilution f : $R(1/f)$, $V(1/f)$ et $B(1/f)$



Prise en compte des variations d'éclairement et correction par le « blanc »



La couleur complémentaire du magenta (addition du rouge et du bleu) est le vert.



Équipe « cyan »

Protocole

- Verre mesureur (50 mL à 500 mL)
- 1 grand pot à confiture
- 9 verres (pour éviter la vaisselle, mais un seul suffit)
- Eau
- Tube de peinture

Préparation d'environ 1 L d'une solution mère d'encre cyan (tube de peinture).



Solutions diluées dans des verres numérotés de $i = 1$ à $i = 8$:

i	1	2	3	4	5	6	7	8
$V_{\text{mère}}$ (mL)	200	150	100	50	50	50	50	50
V_{eau} (mL)	0	50	100	100	150	200	450	950

Le 9^e verre est rempli avec de l'eau.



n°1

n°2

n°3

n°4

n°5

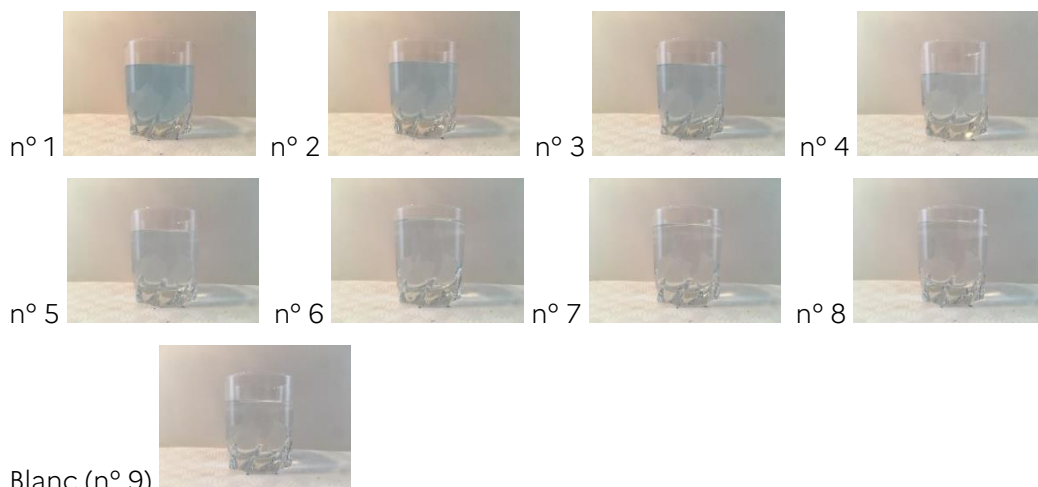
n°6

n°7

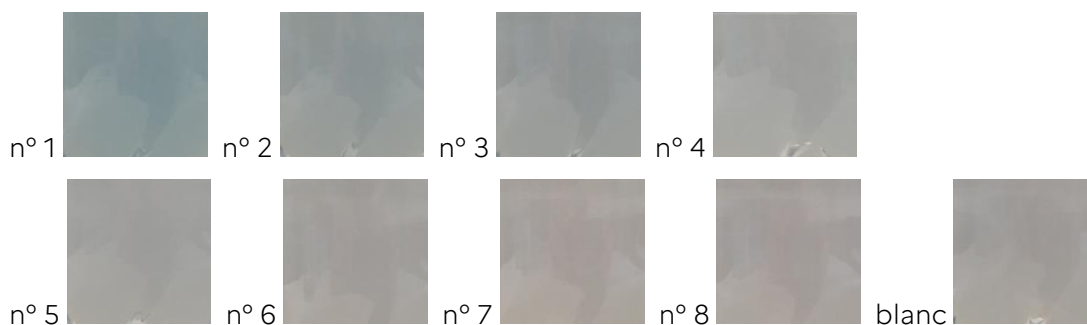
n°8

n°9

Photos de chaque verre.



Images rognées pour préparer leur traitement numérique (utilisation de Gimp).



Résultats

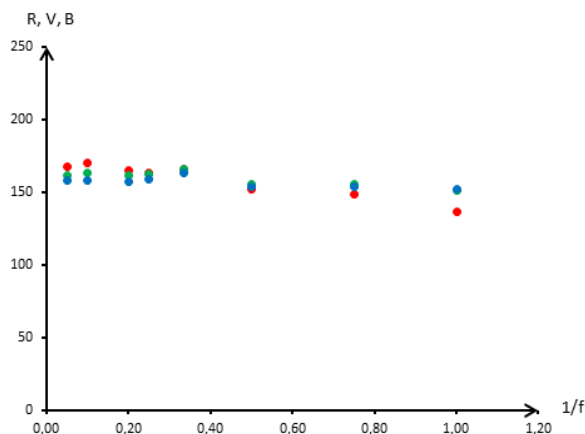
Traitement des images rognées avec Python. On trouve les composantes R, V, B moyennes de chaque image. On calcule $T_i = R_i + V_i + B_i$. On fait de même pour le blanc (image n° 9).

i	1	2	3	4	5	6	7	8
R_i	135,93	148,45	151,43	165,51	163,16	164,61	169,80	167,13
V_i	150,68	154,87	155,19	165,91	162,51	161,04	163,07	161,11
B_i	152,24	153,35	153,83	162,69	159,15	157,02	157,89	157,49
$T_i = R_i + V_i + B_i$	438,85	456,67	460,45	494,11	484,82	482,67	490,76	485,73

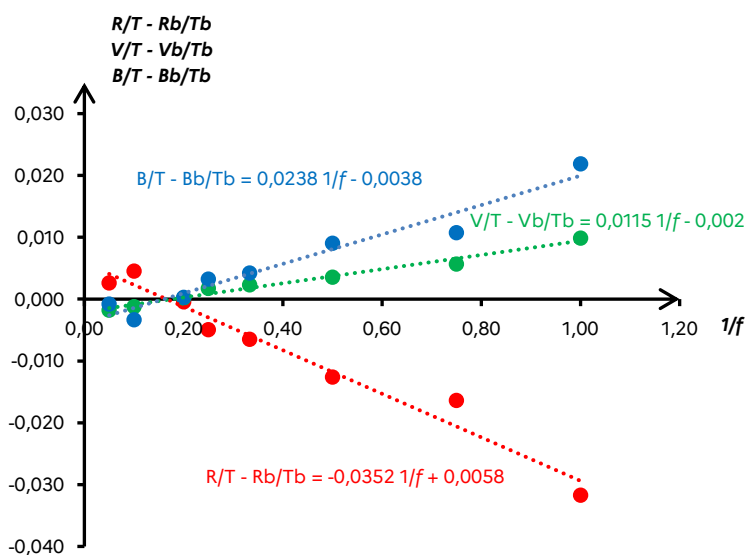
i	blanc
R_b	164,04
V_b	160,20
B_b	156,15
$T_b = R_b + V_b + B_b$	480,39

Discussion

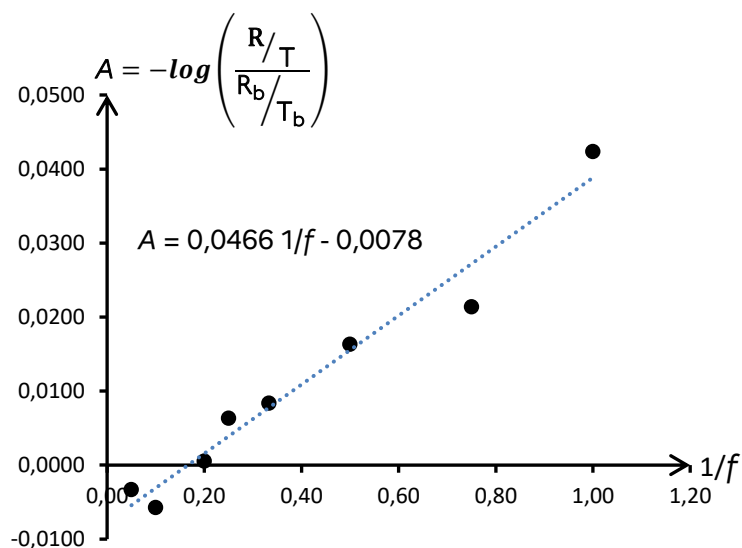
Représentation de chaque composante R, V, B en fonction de l'inverse du facteur de dilution f : $R(1/f)$, $V(1/f)$ et $B(1/f)$



Prise en compte des variations d'éclairement et correction par le « blanc »



La couleur complémentaire du cyan (addition du vert et du bleu) est le rouge.



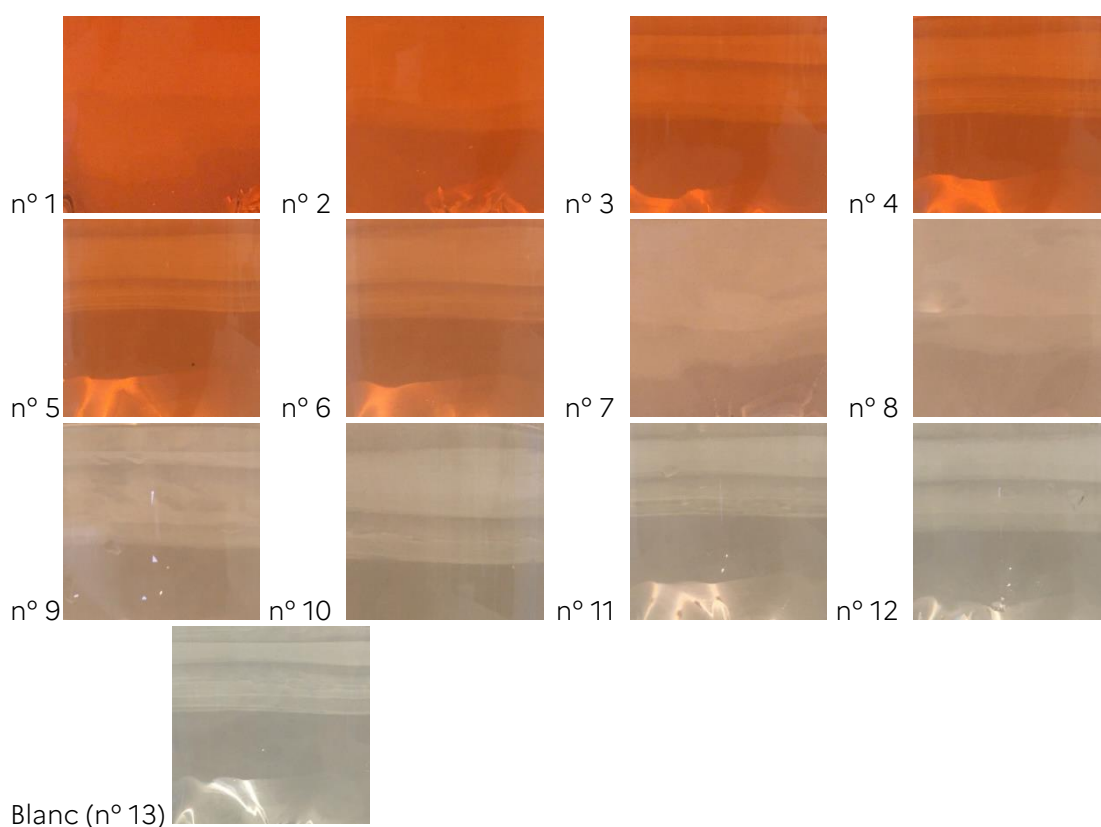
Annexe 3 - Limites de l'utilisation de la modélisation avec la loi de Beer-Lambert aux concentrations élevées

Protocole

Préparation d'environ 1 L d'une solution mère d'encre rouge trop concentrée (cartouche de stylo plume).



i	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
C_i (mL)	C_0	$2C_0/3$	$C_0/2$	$2C_0/5$	$C_0/3$	$C_0/5$	$C_0/10$	$C_0/15$	$C_0/20$	$C_0/25$	$C_0/30$	$C_0/50$



Résultats

Traitement des images rognées avec Python. On trouve les composantes R , V , B moyennes de chaque image. On calcule $T_i = R_i + V_i + B_i$. On fait de même pour le blanc (image n° 13).

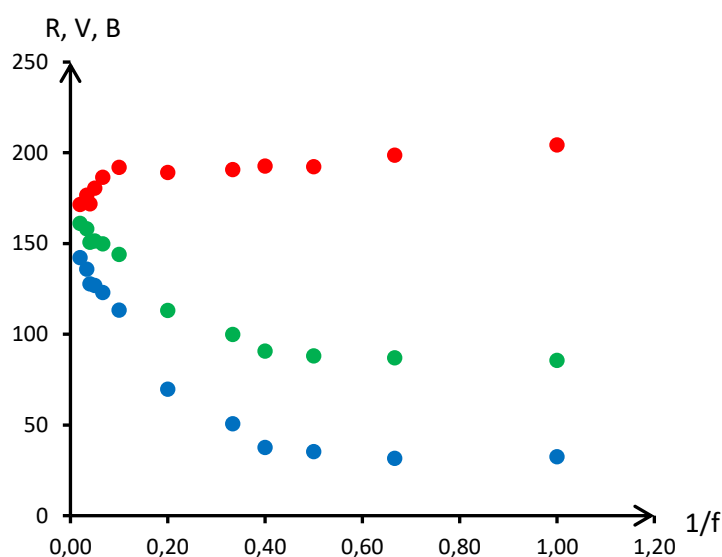
i	1	2	3	4	5	6
R_i	204,25	198,60	192,36	192,64	190,63	189,14
V_i	85,50	86,98	87,97	90,72	99,88	113,15
B_i	32,41	31,51	35,32	37,57	50,59	69,72
$T_i = R_i + V_i + B_i$	322,16	317,09	315,65	320,93	341,11	372,01

i	7	8	9	10	11	12
R_i	192,02	186,53	180,43	171,78	176,62	171,51
V_i	144,03	149,73	151,34	150,61	157,98	161,00
B_i	113,27	123,04	126,85	127,65	135,88	142,22
$T_i = R_i + V_i + B_i$	449,33	459,30	458,62	450,04	470,48	474,72

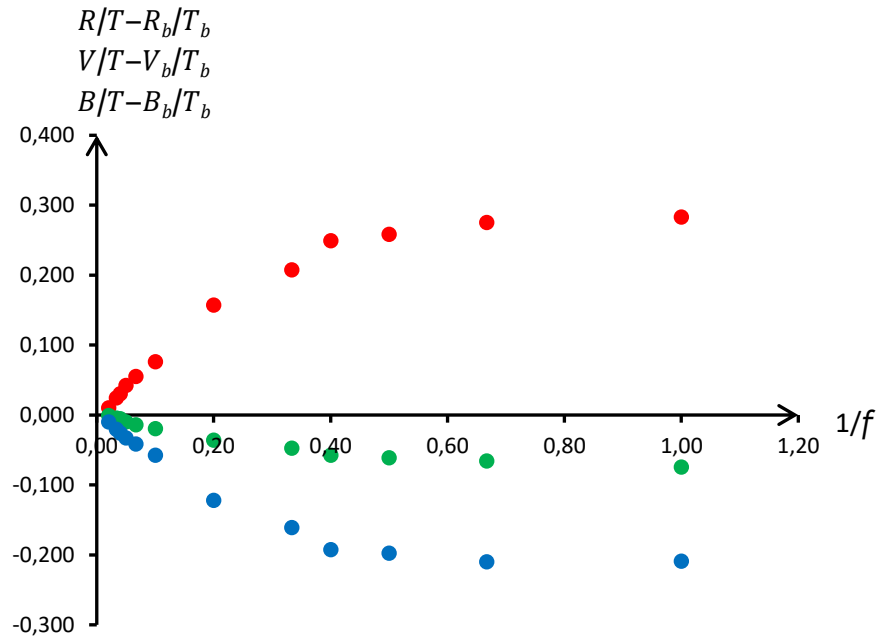
i	blanc
R_b	175,28
V_b	169,76
B_b	154,48
$T_b = R_b + V_b + B_b$	499,52

Discussion

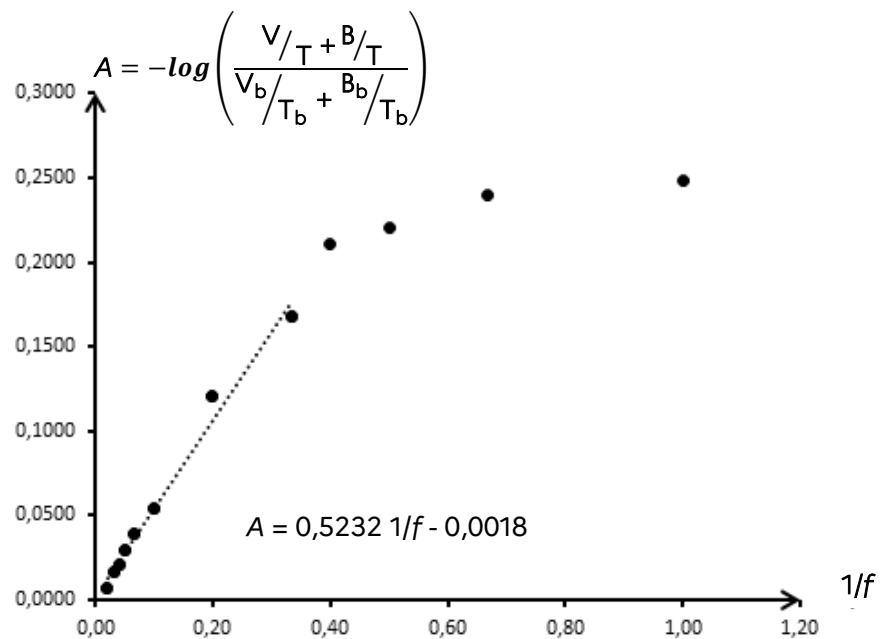
Représentation de chaque composante R , V , B en fonction de l'inverse du facteur de dilution f : $R(1/f)$, $V(1/f)$ et $B(1/f)$.



Prise en compte des variations d'éclairement et correction par le « blanc »



La couleur complémentaire du rouge est le cyan (addition du vert et du bleu).



Pour les concentrations élevées, correspondant aux valeurs élevées de 1/f, les points s'écartent de la droite de régression.

Annexe 4 – Étude de la variabilité des paramètres R , V , B sur une image

```

from PIL import Image
import numpy as np
from matplotlib import pyplot

Im=Image.open('SelectionImage.png')
Im=Im.convert("RGB",colors=256)

Nx=Im.size[0]
Ny=Im.size[1]

LR,LV,LB=[],[],[]

for i in range (Nx) :
    for j in range (Ny) :
        (R,V,B)=Im.getpixel((i,j))
        LR.append(R)
        LV.append(V)
        LB.append(B)

Rmoy=np.average(LR)
Vmoy=np.average(LV)
Bmoy=np.average(LB)

uR=np.std(LR, ddof=1)
uV=np.std(LV, ddof=1)
uB=np.std(LB, ddof=1)

pyplot.figure(1)
pyplot.hist(LR, range = (0, 255), bins = 255, color = 'red',
edgecolor = 'red')
pyplot.xlabel('R')
pyplot.ylabel('effectif')
pyplot.title('Rmoy='+str(Rmoy)+' et uR='+str(uR))
pyplot.savefig('R.eps')

pyplot.figure(2)
pyplot.hist(LV, range = (0, 255), bins = 255, color =
'green', edgecolor = 'green')
pyplot.xlabel('V')
pyplot.ylabel('effectif')
pyplot.title('Vmoy='+str(Vmoy)+' et uV='+str(uV))
pyplot.savefig('V.eps')

pyplot.figure(3)
pyplot.hist(LB, range = (0, 255), bins = 255, color =
'blue', edgecolor = 'blue')
pyplot.xlabel('B')
pyplot.ylabel('effectif')
pyplot.title('Bmoy='+str(Bmoy)+' et uB='+str(uB))
pyplot.savefig('B.eps')

pyplot.show()

```

Remarque : « Image.png » dans le script correspond à l'image à examiner.

Annexe 5 - Étude du dimensionnement de la sélection d'image

```

from PIL import Image
import numpy as np
from matplotlib import pyplot
import random

Im=Image.open('Verre.png')
Im=Im.convert("RGB",colors=256)

Nx=Im.size[0]
Ny=Im.size[1]

print('Nombre de pixels de l image :'+str(Nx*Ny))

LR,LV,LB=[],[],[]

for i in range (Nx) :
    for j in range (Ny) :
        (R,V,B)=Im.getpixel((i,j))
        LR.append(R)
        LV.append(V)
        LB.append(B)

N=7 #nombre de pixels tirés au hasard 10^N
Ntirages=100 #nombre de tirages
LRmoy,LVmoy,LBmoy=[],[],[]
X=[]

for i in range(N) :
    Npix=10**i
    for j in range(Ntirages) :
        TirageR=random.sample(LR, Npix)
        TirageV=random.sample(LV, Npix)
        TirageB=random.sample(LB, Npix)
        LRmoy.append(np.average(TirageR))
        LVmoy.append(np.average(TirageV))
        LBmoy.append(np.average(TirageB))
        X.append(Npix)

pyplot.figure(1)
pyplot.scatter(X,LRmoy, label='Rouge',c='red',marker='o')
pyplot.xlabel('Nombre de pixels')
pyplot.ylabel('R')
pyplot.semilogx()
pyplot.axis([0.5,0.5*10**N,0,255])
pyplot.savefig('Rpix.eps')

pyplot.figure(2)
pyplot.scatter(X,LVmoy, label='Vert',c='green',marker='o')
pyplot.xlabel('Nombre de pixels')
pyplot.ylabel('V')
pyplot.semilogx()
pyplot.axis([0.5,0.5*10**N,0,255])
pyplot.savefig('Vpix.eps')

pyplot.figure(3)
pyplot.scatter(X,LBmoy, label='Bleu',c='blue',marker='o')
pyplot.xlabel('Nombre de pixels')
pyplot.ylabel('B')
pyplot.semilogx()
pyplot.axis([0.5,0.5*10**N,0,255])
pyplot.savefig('Bpix.eps')

pyplot.show()

```

Remarques

Pour que le script fonctionne, il convient d'utiliser l'image « Verre.png » originale, jointe à la production, ou alors de modifier le code pour qu'il s'adapte à la définition de l'image utilisée (La valeur de l'entier N (7 dans la version initiale) doit être éventuellement réduite suivant l'image testée).

Il peut être nécessaire que l'adresse complète du fichier image soit indiquée.

Annexe 6 – Influence de la position de sélection d'image

```

from PIL import Image
import numpy as np

Im=Image.open('Verre.png')
Im=Im.convert("RGB",colors=256)

Nx=Im.size[0]
Ny=Im.size[1]

Cut=5
CoteX=int(Nx/Cut)
CoteY=int(Ny/Cut)

LRmoy,LVmoy,LBmoy=[],[],[]
uR,uV,uB=[],[],[]

for i in range(Cut):
    for j in range(Cut):
        LR,LV,LB=[],[],[]
        for k in range(CoteX):
            for l in range(CoteY):
                (R,V,B)=Im.getpixel((j*CoteX+k,i*CoteY+l))
                LR.append(R)
                LV.append(V)
                LB.append(B)
        # LRmoy.append(round(np.average(LR),2))
        # LVmoy.append(round(np.average(LV),2))
        # LBmoy.append(round(np.average(LB),2))
        uR.append(round(np.std(LR, ddof=1),2))
        uV.append(round(np.std(LV, ddof=1),2))
        uB.append(round(np.std(LB, ddof=1),2))

#print(np.array(LRmoy).reshape(Cut,Cut))
#print(np.array(LVmoy).reshape(Cut,Cut))
#print(np.array(LBmoy).reshape(Cut,Cut))

print(np.array(uR).reshape(Cut,Cut))
print(np.array(uV).reshape(Cut,Cut))
print(np.array(uB).reshape(Cut,Cut))

```