
Spectrophotométrie sur un tableau de Charles Lapicque

Compte rendu d'étude en autonomie

Ecole Centrale Paris
Ondrej Rybysar - Simon Bergot (promotion 2008)
Etude encadrée par Patrick Callet
Réalisée en 2007



"Ruine sur le Palatin" 550x660 mm

Sommaire

Introduction.....	3
I. Charles Lopicque.....	3
II. La Colorimétrie	4
A. Vision en couleurs	4
B. Les mesures et les mélanges des couleurs.....	8
C. Diagrammes chromatiques	11
D. Gamut des couleurs.....	13
E. Le système RGB	14
F. Les espaces de couleurs	16
G. L'espace sRGB.....	17
H. Spectroscopie	19
III. Réalisation	19
A. Protocole expérimentale.....	19
B. Exploitation des résultats.....	20
1. Chargement des données.....	21
2. Calcul des coordonnées XYZ.....	22
3. Conversion en RGB	22
4. Création de l'image	24
Conclusion	25
Bibliographie.....	26

Introduction

Cette étude a été proposée par M. Patrick Callet, chercheur au laboratoire MAS à l'École Centrale Paris. Son but est de réaliser une étude spectrophotométrique des couleurs d'une lithographie de Charles Lapicque : « ruines sur le palatin ». L'École Centrale Paris possède en effet un exemplaire de cette série, dans le hall de son bâtiment administratif.

L'étude de ce tableau a plusieurs motivations. Tout d'abord, il s'agissait pour nous de découvrir la colorimétrie, par la pratique. Ensuite, c'est un hommage à un ancien centralien, qui, tout en vivant de ses œuvres, a continué à garder au cœur de ses préoccupations des questions scientifiques sur les couleurs et les perspectives.

Après une brève présentation de Charles Lapicque, et de la lithographie étudiée, nous présenterons les domaines que nous avons abordés en colorimétrie, et ce que nous avons réalisé.

I. Charles Lapicque

Charles Lapicque naît en 1898 dans le département du Rhône. Son père adoptif est professeur de physiologie générale à la Faculté des sciences de Paris. Il aborde la pratique du piano et du violon. Il commence le dessin au lycée. Il entre à l'École Centrale Paris, où il s'intéresse particulièrement à la géométrie projective. Parallèlement à son travail qui consiste à assurer l'électrification d'un département de Basse Normandie, il peint ses premiers paysages. Il travaille ensuite dans un bureau d'étude. Pendant cette période, il pousse encore ses études en géométrie. A partir de 1928, il se consacre uniquement à la peinture.

Il est mobilisé pendant les deux guerres mondiales ; dans l'artillerie de campagne pour la première, et dans un centre de recherche chargé d'études sur la vision nocturne et le camouflage pour la seconde. Il en tire à chaque fois plus de connaissances qu'il applique dans ses peintures. Il meurt à Orsay en 1988.

Il ne se réclame pas spontanément du mouvement cubiste. Cependant, à travers ses questionnements sur les projections et les perspectives multiples, il trouve une forme d'expression qui est propre à ce mouvement. Son travail sur la perception des couleurs l'amène à une nouvelle interprétation de celles-ci. Il en vient à utiliser le bleu pour les objets proches et solides, et le rouge pour les entités moins tangibles et plus lointaines.

Il construit de nombreuses règles sur les couleurs et sur les contrastes, qu'il s'efforce de suivre grâce à des mesures rigoureuses. Sa démarche est loin de ressembler à un mélange des couleurs instinctif : il cherche à les appliquer le plus précisément possible. « Pour avoir

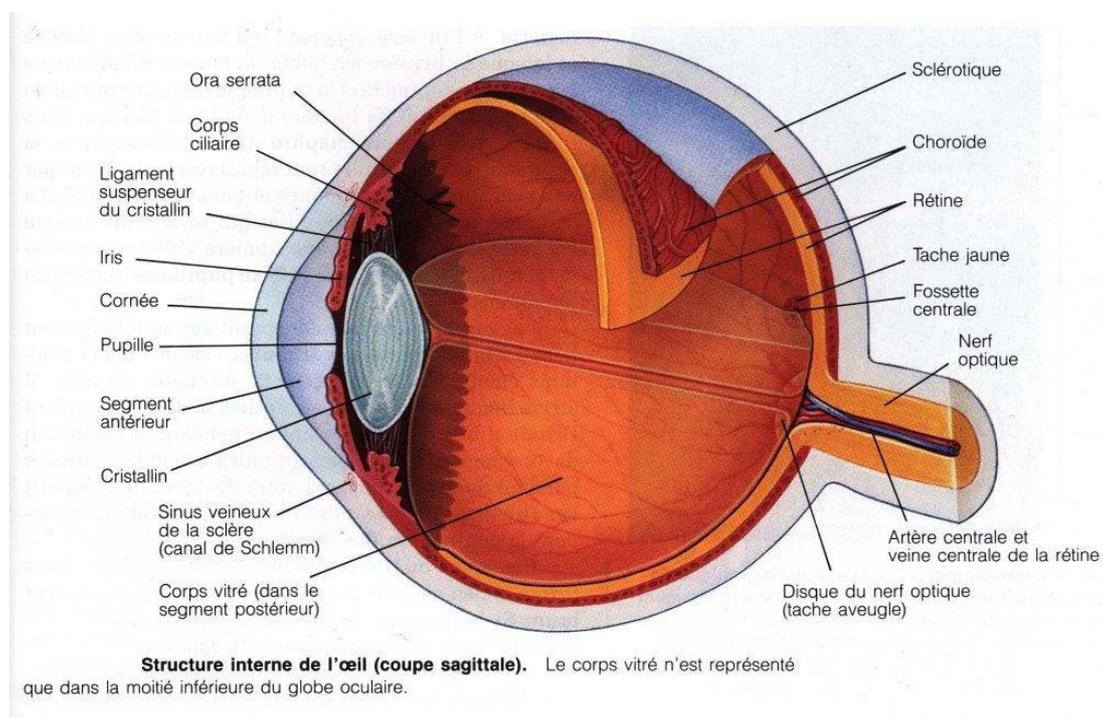
une belle gamme de valeurs, la valeur est aujourd'hui la luminance au sens du physicien, on parlait de brillance à l'époque de Lapicque, les luminances devront s'organiser suivant les puissances de 2, c'est-à-dire proportionnellement aux nombres 1, 2, 4, 8, 16, 32... Il trouve aussi que pour un mélange de deux couleurs en pigments, l'une très foncée, l'autre très claire, chaque fois que l'on multiplie par 4 la proportion du pigment clair, on multiplie la luminance par 2, que l'on travaille en poids ou en volume. ». (1)

« Ruine sur le palatin » est une lithographie sur pierre de 66 par 55 centimètres réalisée en 1957 pendant un voyage à Rome. Elle fait partie d'une série très représentative de Charles Lapicque, à la fois pour les formes et pour les couleurs. Elle est donc tout à fait indiquée pour notre étude. Nous allons donc chercher à voir comment cette recherche sur les couleurs peut se retrouver dans des mesures expérimentales.

II. La Colorimétrie

A. Vision en couleurs

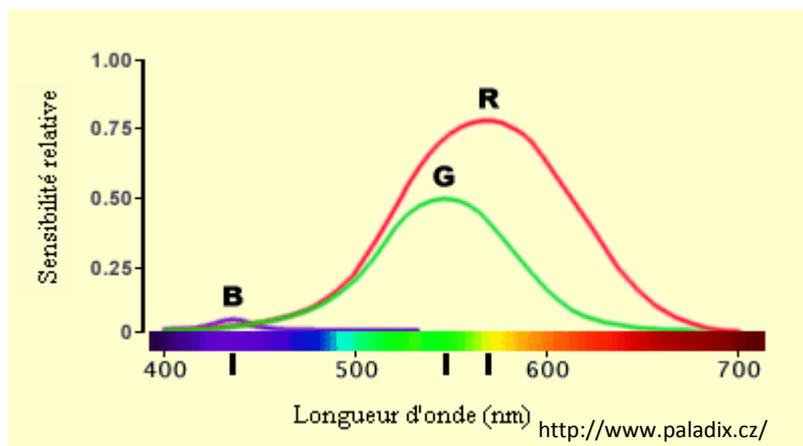
La vision humaine est un processus très complexe. Malgré le progrès de la science d'aujourd'hui, nous ne savons pas encore comment fonctionne exactement notre vue et cela non seulement en ce qui concerne l'analyse sémantique d'ordre supérieur (c'est-à-dire l'identification des objets et formes etc.), mais aussi la base de la vision, c'est-à-dire la formation des signaux visuels par notre œil.



La lumière entrant dans l'œil parcourt d'abord la cornée, puis l'humeur aqueuse, passe à travers le cristallin, entre dans le corps vitré et retombe sur la partie postérieure, qui est couverte par la rétine. La pupille, situé entre l'humeur aqueuse et le cristallin, règle la quantité de lumière entrante dans l'œil. La rétine comprend un système compliqué de cellules nerveuses interconnectées, dont la fonction n'est pas simplement d'attraper la lumière et de la transformer en impulsions nerveuses, qui sont directement transférées via le nerf optique pour être perçues dans le cerveau, mais aussi d'effectuer un prétraitement. Aucun modèle de fonctionnement de ce système, qui permettrait de décrire et d'expliquer tous les effets observés pendant les expériences, n'existe à ce jour. La lumière entre dans la rétine à travers la membrane externe et les fibres reliant les cellules du ganglion avec le nerf optique, puis traverse la couche des cellules du ganglion, et une autre couche de cellules et arrive finalement jusqu'aux cellules nerveuses photoréceptrices – les cônes et les bâtonnets. Ces cellules ont une forme prolongée et fonctionnent un peu comme les fibres optiques, qui livrent la lumière jusqu'aux segments externes, qui contiennent les pigments photosensibles. Une autre couche cellulaire contient les cellules, qui absorbent la lumière visible et qui ainsi empêchent la réflexion de la lumière.

Les composantes clés des bâtonnets et des cônes sont les pigments photosensibles. La molécule du pigment est désintégrée lors de l'impact de la lumière, ce qui donne la naissance à une impulsion électrique, qui est transportée et traitée par le réseau nerveux. Les pigments sont régénérés ultérieurement. La sensibilité des cellules dépend de la quantité de pigment non désintégré, qui est instantanément présent dans les cellules, qui est elle-même fonction de la quantité de lumière entrant dans l'œil. Ceci permet l'adaptation de l'œil aux différents niveaux d'éclairage, ainsi que l'adaptation automatique des couleurs de notre vue. L'un des effets issus du changement de la sensibilité est l'effet de persistance rétinienne.

Nous voyons en couleurs grâce à l'existence de trois types d'iodopsines – du pigment photosensible contenu dans les cônes. Ces pigments sont spectralement sélectifs, chacun étant sensible à un intervalle différent de longueurs d'onde. Le maximum de la sensibilité des cônes bleus est $\sim 440\text{nm}$, des cônes verts $\sim 540\text{nm}$ et des cônes rouges $\sim 570\text{nm}$. Les cônes rouges et verts se ressemblent beaucoup et certains mammifères n'ont qu'un seul type de cône jaune à leur place. Ils ne voient donc qu'en deux couleurs. L'œil humain contient à peu près 4% de cônes bleus, 32% de cônes verts et 64% de cônes rouges. Il existe plusieurs théories, qui essaient d'expliquer cette disproportion. Par exemple, on peut avancer que cela diminue l'influence de l'aberration chromatique du cristallin, où que cela compense le taux plus élevé des plus petites longueurs d'onde dans la lumière du jour. Le graphe exprimant la sensibilité relative des différents types de cônes de l'œil suit.



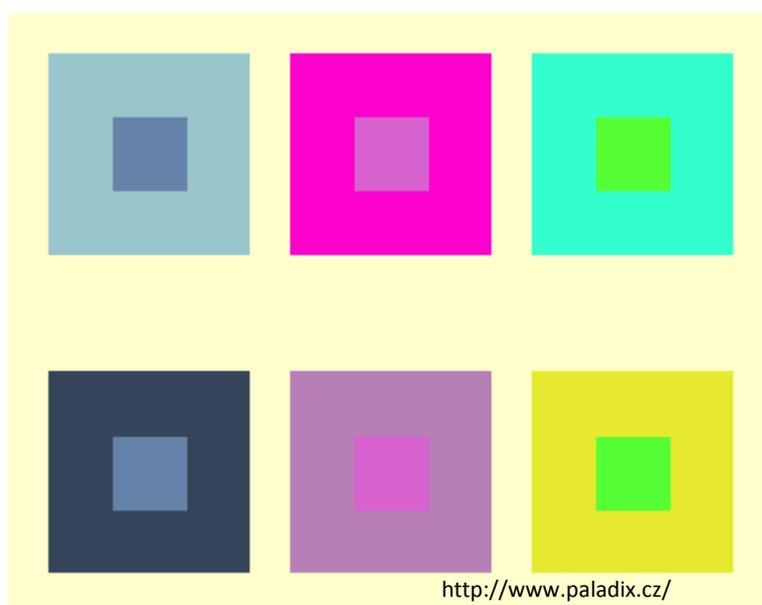
Les bâtonnets contiennent de la rhodopsine, dont le maximum de la sensibilité est autour 500nm. Sous l'incidence de la quantité élevée de la lumière, ce pigment est complètement désintégré et la vision est fournie uniquement par les cônes. Au contraire, le seuil de la sensibilité des bâtonnets est relativement élevé et s'il fait sombre, nous voyons uniquement grâce aux bâtonnets. C'est également la raison pour laquelle nous voyons de pire en pire les couleurs, quand le soleil se couche et le niveau de l'éclairage est en baisse. Quand il fait sombre, nous ne voyons des couleurs pas du tout. Notre œil contient à peu près vingt fois plus de bâtonnets que des cônes et les bâtonnets sont interconnectés en groupes plus grands. Cela augmente la sensibilité pour les faibles luminosités au détriment de la perception tridimensionnelle.

La gamme maximale de l'intervalle de la lumière, qui est visible pour l'homme est 360 – 830nm. La sensibilité de l'œil est très basse en dehors de l'intervalle 400 – 700nm. De part l'existence de trois types de cônes, chacun étant sensible à différentes longueurs d'onde, la vision humaine est en principe en trois couleurs. Chaque couleur perçue par l'œil peut être exprimée comme un mélange des trois couleurs primaires et indépendantes (le terme d'indépendance veut dire, qu'aucune de ces trois couleurs ne peut être exprimée comme un mélange de deux autres).

La vision en couleurs est différente pour différentes personnes, et elle évolue également avec l'âge. Ceci est causé d'une part par la mort des cellules réceptrices, d'autre part le cristallin qui devient au fur et à mesure moins transparent et jauni, ce qui a l'effet d'un filtre jaune à travers lequel parcourt la lumière entrant dans l'œil. A cause de la répartition non uniforme des cellules réceptrices sur la rétine, la couleur perçue par l'œil dépend également de la partie de la rétine, sur laquelle elle tombe. Le domaine le plus

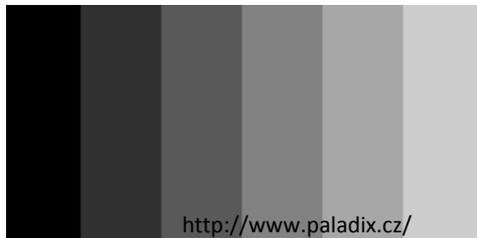
sensible de la rétine s'appelle fovéa et se trouve dans le prolongement de l'axe optique et de la rétine. La densité des cônes diminue progressivement, quand on s'éloigne sur le périmètre de l'œil de la fovéa vers le cristallin à l'exception d'une singularité, qui est l'endroit où le nerf optique sort de l'œil. Chez la plupart des hommes, il n'y a pas de bâtonnets dans la zone de fovéa. La plus grande concentration des bâtonnets est autour de la fovéa. A cause de cette asymétrie, nous percevons différemment les couleurs des aires larges, dont l'image sur la rétine ne tombe pas uniquement dans la zone fovéale, et des couleurs des petites aires.

Notre œil contient plus que 120 millions de récepteurs, alors que le nerf optique ne contient qu'à peu près 800 000 connexions. Ceci implique une combinaison et traitement importants des signaux perçus par l'œil avant le transfert par le nerf optique. Une théorie tend à montrer que le cerveau n'accepte pas directement des signaux issus des cônes bleus, verts et rouges, mais plutôt un signal représentant la luminosité et deux autres signaux représentant la couleur : un qui détermine la sensation est rouge ou verte et l'autre qui détermine la sensation est jaune ou bleue. Cette théorie est apparue déjà en 1878 et est due à Ewald Hering. L'argument de sa création est le suivant : nous sommes tous capables de voir de différentes nuances de la couleur bleue/verte, verte/jaune, jaune/rouge (orange) et rouge/bleue, lorsque rien comme une couleur jaune/bleue ou rouge/verte n'existe pas. Ces couleurs semblent d'être des contre pôles mutuels. Il existe plusieurs théories, qui essaient d'expliquer précisément la participation des photorécepteurs sur la naissance de ces signaux. Ainsi, il n'est pas clair, quelles sont précisément les causes d'autres effets, qui jouent un rôle important en reproduction des couleurs (par exemple le contraste simultané ou les bandes de Mach, voir l'image).



Ondrej Rybysar
Simon Bergot

Le contraste simultané. Les deux carrés, qui se trouvent sur le même niveau vertical, sont différents en clarté (à gauche), en saturation (au milieu) et en tonalité (à droite). Les deux petits carrés, qui se trouvent dedans, ont la même couleur, cependant le contraste avec le carré, qui les entoure provoque une apparence différente.

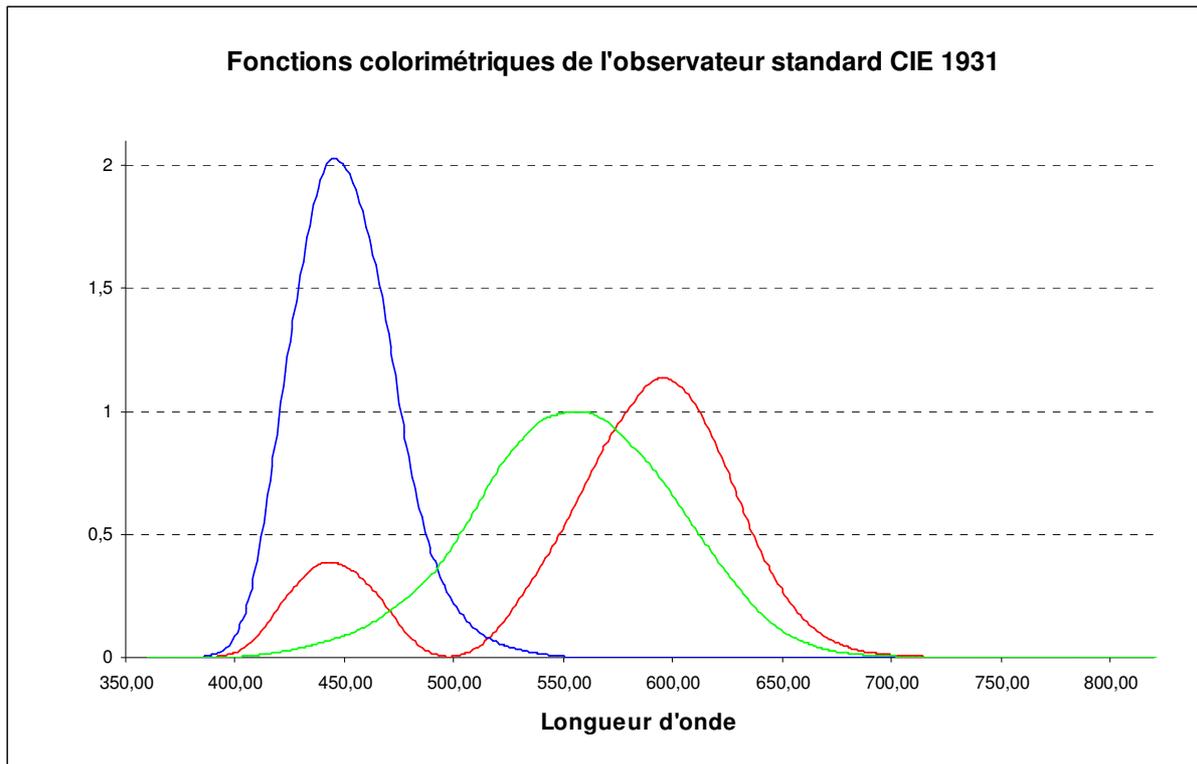


Bandes de Mach. Le contraste le long des transitions brusques est perçu par l'œil comme plus grand, qu'il est véritablement. C'est pourquoi le côté gauche de chaque bande a l'air d'être plus clair que le côté droit, bien que la bande entière ait exactement la même couleur dans toute son aire.

De ce que nous avons décrit au dessus nous pouvons déduire plusieurs conséquences pour la reproduction et la gestion des couleurs. La reproduction absolument précise des couleurs est impossible. Une couleur que nous percevons ne dépend pas uniquement de l'objet observé, mais aussi d'un tas d'autres facteurs – de la lumière éclairant l'objet, de ce qui l'entoure, d'état actuel de l'adaptation de notre vision etc.

B. Les mesures et les mélanges des couleurs

La standardisation des mesures colorimétriques est prise en charge par la Commission Internationale de l'Éclairage. La pierre angulaire de la colorimétrie est la définition de l'observateur standard colorimétrique sous un éclairage normalisé, qui a été mise en place par la CIE en 1931. L'observateur standard colorimétrique CIE 1931 consiste de trois fonctions de l'observateur standard (color matching function) $\bar{x}(\lambda), \bar{y}(\lambda), \bar{z}(\lambda)$. Les fonctions de l'observateur standard $\bar{x}(\lambda), \bar{y}(\lambda), \bar{z}(\lambda)$ servent à calculer une triade des chiffres appelés tristimulus, qui permet de comparer les couleurs issues des différentes sources.



Nos yeux réagissent à la lumière émise, réfléchié ou transmise par un objet observé. Cette lumière est caractérisé par une répartition spectrale d'énergie, qui peut être décrit par la fonction $f(\lambda)$, où λ est la longueur d'onde. Bien que la répartition spectrale d'énergie détermine quelle couleur nous voyons, elle ne constitue pas un moyen suffisant pour la caractérisation et les mesures de la couleur. La relation entre la fonction $f(\lambda)$ et la couleur, que nous voyons, est très compliquée. Entre outre, comme notre vision n'est que trichromatique, nous attribuons la même couleur à beaucoup de stimuli visuels ayant une répartition spectrale d'énergie très différente. Cet effet s'appelle métamérisme (plus précisément, pour pouvoir observer l'effet de métamérisme, on doit avoir deux objets, dont les fonctions de la répartition d'énergie sont différentes, et deux sources différents de la lumière ; il peut arriver, que sous l'incidence de la lumière d'une source nous apercevons les couleurs des deux objets comme les mêmes et sous l'incidence de la lumière issue de la deuxième source les couleurs nous semblent être différentes). L'objectif principal du tristimulus est la levée de cette ambiguïté. L'observateur colorimétrique standard a été construit de telle façon, qu'il ne permet aux deux objets d'avoir la même couleur que si et seulement si ces deux objets ont le même tristimulus. La définition du tristimulus XYZ est la suivante :

Ondrej Rybysar
Simon Bergot

$$X = \int_{360}^{830} k \cdot f(\lambda) \cdot \bar{x}(\lambda) d\lambda$$
$$Y = \int_{360}^{830} k \cdot f(\lambda) \cdot \bar{y}(\lambda) d\lambda$$
$$Z = \int_{360}^{830} k \cdot f(\lambda) \cdot \bar{z}(\lambda) d\lambda$$

Rq. : l'intervalle d'intégration peut différer légèrement, il correspond aux longueurs d'ondes visibles pour l'œil humain

Le k est la constante de calibration, dans la plupart des cas choisie de telle façon, que la valeur Y soit égale à 100% pour un réflecteur de blanche de référence (une surface mate, qui réfléchit tous les longueurs d'onde dans la même façon). En pratique, on peut obtenir des valeurs de Y plus grandes que 100%, ce qui est due aux couleurs saturées et brillantes ou aux couleurs fluorescentes. Il faut tenir compte du fait, que le tristimulus n'est qu'un modèle théorique, déduit des résultats d'expériences pratiques, qui a ses limites.

En regardant la définition de tristimulus, on voit immédiatement, qu'il s'agit d'un modèle linéaire, c'est-à-dire :

1/ le tristimulus XYZ d'un stimulus ayant la distribution spectrale $f(\lambda)+g(\lambda)$ est la somme de deux tristimulus calculés séparément pour les deux stimuli

2/ le tristimulus XYZ d'un stimulus amplifié par un facteur constant, $c \cdot f(\lambda)$ est le multiple de tristimulus XYZ de la stimule originelle et du facteur c

Le modèle est également transitif, c'est-à-dire : si les deux stimuli $f(\lambda)$ et $g(\lambda)$ sont métamérique et si les deux stimuli $g(\lambda)$ et $h(\lambda)$ le sont également, alors les deux stimuli $f(\lambda)$ et $h(\lambda)$ sont nécessairement aussi métamériques. Ce qui est écrit plus haut implique nécessairement, que la réalité est en fait plus compliquée et que ce modèle simple ne peut être appliqué qu'approximativement (déjà du fait, que la vue de chaque individu est un peu décalée par rapport à l'observateur standard), que pour un nombre limité de cas (par exemple uniquement pour les intensités appartenant à une intervalle, pour certains angles visuels, sous lesquels nous voyons les surfaces en couleur) et surtout que si les deux objets sont observés sous les conditions, qui sont exactement les mêmes (c'est-à-dire si l'état

d'accommodation de la vue est le même pour les deux cas, si l'entourage de deux objets est le même, etc.).

Ainsi, le tristimulus XYZ est un simple indicateur de la concordance des couleurs – si les deux objets ont le même ou presque le même tristimulus (les conditions étant les mêmes pour les deux objets), ils paraissent avoir la même ou presque la même couleur (bien sûr uniquement sous les conditions, pour lesquels le modèle est en vigueur). Le tristimulus XYZ ne fournit pas l'information de la couleur, que nous allons voir en regardant l'objet – cette couleur va varier en fonction des conditions d'observation, état d'adaptation de notre vue etc.

C. Diagrammes chromatiques

Parfois, il peut être convenable de ne pas considérer la clarté d'un stimulus visuel, et ne considérer que sa chromaticité. On peut faire cela en normalisant le tristimulus XYZ. Un exemple d'une simple normalisation est le suivant :

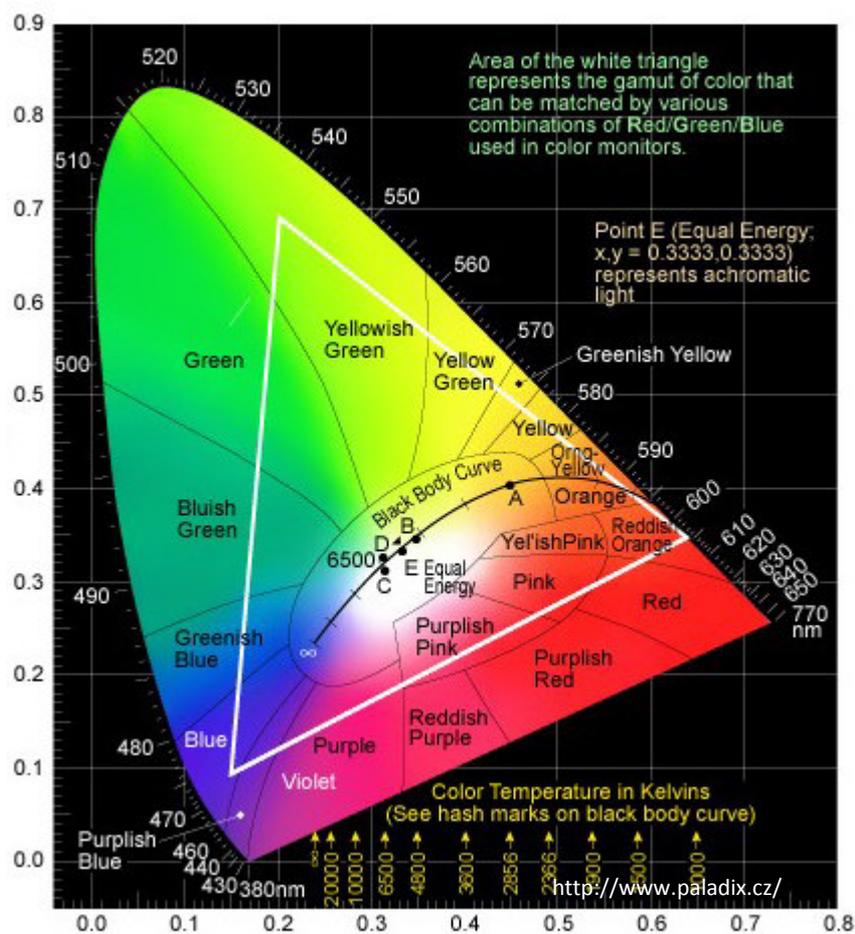
$$x = \frac{X}{X+Y+Z}, y = \frac{Y}{X+Y+Z}, z = \frac{Z}{X+Y+Z}$$

Il est évident que $x + y + z = 1$. Ceci nous permet d'enregistrer la chromaticité en deux dimensions – x en axe et y en abscisse ; le z se déduit très simplement de la relation $z = 1 - y - x$. Ces graphes en deux dimensions s'appellent les Diagrammes chromatiques. Le point ayant les coordonnées $[1/3, 1/3]$ correspond dans ce diagramme à la couleur blanche. C'est la chromaticité d'un stimulus achromatique, qui contient toutes les longueurs d'ondes en même quantité (pour un spectre dans le visible). Ce stimulus achromatique n'apparaît pas nécessairement comme parfaitement blanc, car la couleur observée dépend des conditions et d'état d'adaptation de notre vue. Dans la lumière du jour, qui nous semble être blanche, toutes les longueurs d'ondes ne sont pas contenues dans les mêmes proportions. De plus sa chromaticité change significativement en fonction du temps et des conditions météorologiques. Par exemple sous l'incidence de la lumière du jour (illuminant standard D_{65}) le stimulus achromatique ayant les coordonnées $[1/3, 1/3]$ va sembler d'être légèrement orange (si notre vue est adapté à cette lumière incidente).

On peut remarquer une caractéristique intéressante des diagrammes chromatiques. Le point, qui représente la chromaticité d'un stimulus, qui est issue d'une combinaison de

Ondrej Rybysar
Simon Bergot

deux stimuli, auxquels correspondent dans le diagramme chromatique les points A et B, est situé sur la droite liant les points A et B. De plus, s'il ne s'agit pas d'une combinaison théorique, mais d'une combinaison, qui peut exister réellement (ce qui interdit l'utilisation des quantités négatives de la lumière), alors ce point se trouve entre les points A et B. Du fait que toutes les stimuli qui existent réellement sont une combinaison des quantités non négatives de la lumière des différentes longueurs d'ondes, nous pouvons déduire que tous les points qui correspondent à la chromaticité des stimuli qui existent réellement (dont la couleur nous pouvons voir) se trouvent à l'intérieur du fer à cheval, qui est formé par les points correspondant aux chromaticités des couleurs spectrales pures.



Un exemple de diagramme chromatique

Reproduction des couleurs de mélange des trois couleurs primaires

D. Gamut des couleurs

En reproduisant les couleurs, on utilise d'habitude trois sources de couleurs primaires (parfois plus), dont le mélange devrait fournir la couleur demandée. Comme notre vision est trichromatique, trois couleurs sont un minimum. La répartition spectrale d'énergie du stimulus, que nous souhaitons reproduire, n'est pas répliquée complètement – on crée un stimulus métamérique.

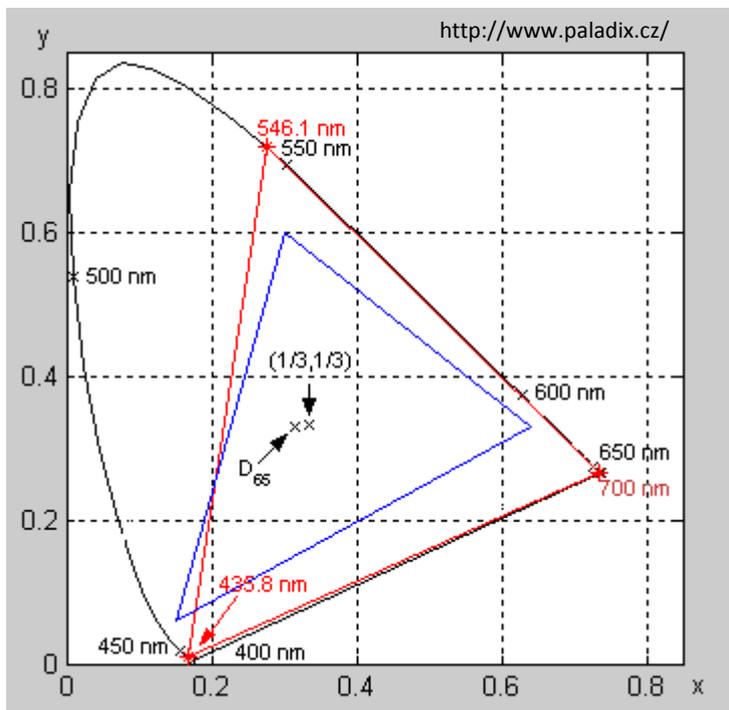
Les couleurs, que l'on peut obtenir en mélangeant les couleurs primaires, se trouvent à l'intérieur du triangle de Maxwell (ou n-angle pour n couleurs). Le diagramme, qui suit plus loin dans le texte, montre (en couleur rouge) le triangle de Maxwell pour le triplet des couleurs de base définies par le CIE – la rouge de longueur d'onde $\lambda = 700$ nm, vert $\lambda = 546,1$ nm et bleue $\lambda = 435,8$ nm.

Rq : Le triangle de Maxwell n'est qu'une approximation du gamut réel des couleurs primaires. En pratique on ne peut pas ajouter non seulement des quantités négatives de la lumière, mais ni les quantités illimitées des couleurs primaires. Alors pour un gamut réel, on ne peut pas ignorer l'intensité et se limiter à la chromaticité. Ainsi, le gamut est un objet tridimensionnel, dont la forme n'est pas plate, et ne peut pas être réduit en deux dimensions.

Etant donné que les sources des lumières primaires, utilisées pour mélanger, existent réellement, les points correspondant à ces couleurs dans le diagramme chromatique se trouvent toujours à l'intérieur du fer cheval contenant les couleurs visibles. C'est pourquoi le triangle entier de Maxwell se trouve toujours à l'intérieur du fer de cheval chromatique. Vue de l'autre côté, il y a toujours une partie du fer de cheval chromatique, qui se trouve en dehors du triangle de Maxwell. Alors quelque soit le choix des couleurs primaires, il y a toujours des couleurs, qui se trouvent en dehors du gamut des couleurs primaires choisies, c'est-à-dire que l'on ne peut pas créer ces couleurs en utilisant les couleurs primaires.

E. Le système RGB

En pratique, il peut être convenable que le triangle de Maxwell ait la plus grande aire possible. C'est pourquoi en mélanges additifs tricolores on utilise la couleur rouge, verte et bleue, autrement dit le système RGB (R – red, G – green, B – Blue). En fait, le système RGB n'est pas unique, il existe plusieurs systèmes RGB. Par exemple le standard CIE prend comme les couleurs primaires la rouge $\lambda=700$ nm, verte $\lambda=546,1$ nm et bleue $\lambda= 435,8$ nm, les valeurs chromatiques sont respectivement $x_r=0,73$, $y_r=0,27$, $x_g=0,27$, $y_g=0,72$ et $x_b=0,17$, $y_b=0,01$. Le phosphore typique rouge, vert et bleu d'un moniteur CRT a les valeurs chromatiques à peu près égales à $x_r=0,64$, $y_r=0,33$, $x_g=0,30$, $y_g=0,60$, $x_b=0,15$, $y_b=0,06$ (voyez l'image).



Soient $r(\lambda)$, $g(\lambda)$ et $b(\lambda)$ les fonctions de la répartition spectrale de l'énergie des trois sources des couleurs primaires. Pour pouvoir obtenir la couleur ayant la répartition spectrale $f(\lambda)$ à l'aide de ces trois couleurs primaires, il faut trouver un triplet des nombres R, G et B tel que la couleur ayant la répartition spectrale $R r(\lambda)+G g(\lambda)+B b(\lambda)$ et la couleur avec répartition $f(\lambda)$ soient métamériques. Si les valeurs du tristimulus XYZ sont connues, nous pouvons calculer les valeurs R, G et B en utilisant la relation suivante :

$$\begin{pmatrix} R \\ G \\ B \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} X_r & Y_r & Z_r \\ X_g & Y_g & Z_g \\ X_b & Y_b & Z_b \end{pmatrix}^{-1} \begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix}$$

Il s'agit évidemment d'une transformation linéaire des coordonnées en trois dimensions.

Une autre façon de trouver les valeurs R, G et B comprend l'utilisation des fonctions de l'observateur $\bar{r}(\lambda)$, $\bar{g}(\lambda)$, $\bar{b}(\lambda)$. On utilise la relation suivante :

$$R = \int_{360}^{830} k_r \cdot f(\lambda) \cdot \bar{r}(\lambda) d\lambda$$
$$G = \int_{360}^{830} k_g \cdot f(\lambda) \cdot \bar{g}(\lambda) d\lambda$$
$$B = \int_{360}^{830} k_b \cdot f(\lambda) \cdot \bar{b}(\lambda) d\lambda$$

où les constantes k_r , k_g et k_b sont choisies de la façon que les valeurs obtenues correspondent à la jauge choisie par rapport au réflecteur idéal blanc diffusif.

Pour un triplet quelconque des sources des couleurs primaires $r(\lambda)$, $g(\lambda)$, $b(\lambda)$ choisi, les fonctions de l'observateur sont une combinaison linéaire des fonctions de l'observateur colorimétrique standard. On a ainsi :

$$\begin{pmatrix} \bar{r}(\lambda) \\ \bar{g}(\lambda) \\ \bar{b}(\lambda) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} X_r & X_g & X_b \\ Y_r & Y_g & Y_b \\ Z_r & Z_g & Z_b \end{pmatrix}^{-1} \begin{pmatrix} \bar{x}(\lambda) \\ \bar{y}(\lambda) \\ \bar{z}(\lambda) \end{pmatrix}$$

F. Les espaces de couleurs

Un espace de couleurs est un ensemble des couleurs, qui est donné par un système de coordonnées permettant de se référer aux couleurs en utilisant des chiffres. Autrement dit, c'est un groupe des couleurs formant le gamut de l'espace des couleurs et un système du codage de ces couleurs. La même image est représentée dans deux espaces des couleurs différents par deux différents groupes de chiffres.

Les espaces des couleurs diffèrent surtout en ce qui concerne :

- 1/ les couleurs primaires – leurs chromaticités, luminosités et en cas échéant aussi leur nombre
- 2/ le point noir et blanc – leurs chromaticités et luminosités
- 3/ la caractéristique tonale – c'est-à-dire la répartition des tons entre le plus sombre et le plus clair

La caractéristique tonale est plus souvent exprimée à l'aide d'une courbe. Pour des moniteurs, scanners et appareils photos numériques c'est d'habitude la courbe gamma (en fait, c'est une simple puissance, gamma correspond à la valeur inverse de l'exposant).

Les espaces des couleurs peuvent être répartis en trois groupes – RGB, CMYK et les autres. Presque tous les appareils de type input utilisent RGB. Les espaces CMYK sont utilisés pour l'impression (les encres azurés (Cyan), pourpres (Magenta), jaunes (Yellow) et noirs (black)). La conversion entre RGB et CMYK est interne et elle est cachée pour un utilisateur commun.

Le système qui est actuellement le plus répandu est le système sRGB (standard RGB), qui modèle l'espace maternel des couleurs d'un commun moniteur CRT pour Windows.

G. L'espace sRGB

L'espace sRGB a été développé par Hewlett Packard en coopération avec Microsoft. Le type d'éclairage considéré est l'illuminant standard CIE D₅₀ (modèle de la lumière du jour de la température 5000K), la luminance dans la pièce est 64 lux. La vitre du moniteur a une réflectivité 20%, le moniteur lui-même l'intensité lumineuse 80 cd/m², le spéculaire 1% et la chromaticité du point blanc correspond à la valeur d'illuminant CIE D₆₅ (6500K, x=0.3127, y=0.3290). La chromaticité des phosphores du moniteur correspond au standard ITU-R BT.709/2 :

Couleur	x	y
Rouge	0,6400	0,3300
Verte	0,3000	0,6000
Bleue	0,1500	0,0600

Pour la transformation du RGB à CIE XYZ, il faut utiliser la démarche suivante :

1/ Normaliser les valeurs en RGB entre 0 et 1. Par exemple pour les données enregistrées en 8bits cela correspond à la division par 255.

2/ Après il faut appliquer la transformation non linéaire compensant la caractéristique tonale non linéaire du moniteur :

$$f(t) = t/12.92 \quad t \leq 0.04045$$

$$f(t) = ((t + 0.055)/1.055)^{2.4} \quad t > 0.04045$$

$$R = f(R'), G = f(G'), B = f(B'),$$

Rq. : L'exposant 2.4 peut être utilisé pour tracer la courbe gamma, dont on a déjà parlé

3/ Et finalement effectuer la transformation des coordonnées dans un nouvel système :

$$\begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0.4124 & 0.3576 & 0.1805 \\ 0.2126 & 0.7152 & 0.0722 \\ 0.0193 & 0.1192 & 0.9505 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} R \\ G \\ B \end{pmatrix} \text{ La transformation inverse peut être effectuée de la}$$

façon suivante :

$$\begin{pmatrix} R \\ G \\ B \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 3.2406 & -1.5372 & -0.4986 \\ -0.9689 & 1.8758 & 0.0415 \\ 0.0557 & -0.2040 & 1.0570 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix}$$

$$R' = f^{-1}(R), G' = f^{-1}(G), B' = f^{-1}(B)$$

$$R_{8bit} = 255R', G_{8bit} = 255G', B_{8bit} = 255B'$$

Les valeurs obtenues sont arrondies aux entières, les chiffres plus petits que 0 remplacés par 0 et les chiffres plus grands que 255 par 255.

A titre de curiosité, nous présentons aussi les caractéristiques des illuminants D_{50} , D_{65} et E (illuminant achromatique) :

	x	y
D_{65}	0.3457	0.3585
D_{50}	0.3127	0.3290
E	1/3	1/3

H. Spectroscopie

La spectroscopie de réflectance diffuse dans le domaine du visible est une technique paradoxalement rarement utilisée pour identifier les matériaux des couches picturales des œuvres d'art. Quand elle est malgré tout mise en œuvre, l'identification de pigments à partir de ce type de mesures repose toujours sur la comparaison avec une base de données spectrophotométriques de pigments de référence. Au sein du Centre de Recherche et de Restauration des Musées de France, la base de données est composée des spectres de réflectance de pigments purs, secs et en poudre. Une couche picturale est au contraire constituée de pigments parfois mélangés et dispersés dans un liant. Il est à présent possible, pour un mélange binaire, de déterminer les composants du mélange dans la majorité des cas par traitement numérique des mesures spectrophotométriques. Une fois la nature des composants déterminée, il est de plus systématiquement possible d'en retrouver les proportions relatives.

III. Réalisation

A. Protocole expérimentale

Le but de notre manipulation a été de mesurer la réflectance diffuse d'une lithographie de Charles Lapicque « Ruine sur le palatin ». Ce procédé consiste à éclairer avec une lampe halogène diffusant dans un faisceau de fibre optique des couches homogènes de peinture. En éclairant directement la surface, et avec un angle non nul par rapport au plan du tableau, on peut récupérer avec une autre fibre le spectre de réflectance diffuse des pigments. Ce spectre est une donnée expérimentale essentielle dans notre expérience, et doit être le plus juste possible.

Pour éviter de récupérer trop de parasites sur les mesures, il faut prendre un certain nombre de précautions.

Tout d'abord, il faut une distance assez faible entre la sortie de la fibre et la surface à analyser. Il faut réussir à garder cette distance constante pour l'ensemble des mesures.

Il est nécessaire de donner un angle à la fibre optique, pour ne pas mesurer la lumière sous incidence normale : on veut éliminer au maximum la composante réfléchie de la lumière. Bien entendu, il ne faut surtout pas que cet angle varie au cours de la manipulation.

Au maximum, il faut éviter les lumières extérieures, comme celle du soleil. Pour compenser cette lumière, on mesure le noir de référence

Ondrej Rybysar
Simon Bergot

L'intensité lumineuse récupérée est faible, et il faut échantillonner sur une période de temps assez longue pour avoir un résultat plus précis. Il faut donc éviter les vibrations, et ajuster ce temps pour être sûr de bien tenir le meilleur compromis entre la finesse des résultats d'une part, et l'absence de lumière parasite ou de saturation des capteurs d'autre part.

Pour nos mesures, nous n'avons pas pu retirer le verre protecteur du tableau, pour des raisons de coût (il aurait fallu détruire et refaire le cadre). Nous avons essayé de trouver un polarisateur pour atténuer le problème, mais nous n'avons pas réussi. Le verre s'est révélé être un avantage au moment de la réalisation pratique des mesures. En effet, les bars métalliques dont nous disposions pour fixer la fibre étaient à peine assez longs pour dépasser le cadre et la marge blanche du tableau.

Nous avons utilisé un support très léger et sec que nous pouvions déplacer sur la surface de verre sans laisser de traces. Nous avons fixé une gomme sous la fibre pour donner un angle constant.

Le tableau est composé d'un certain nombre de tâches, qui correspondent à différentes pierres lithographiques. Au lieu de balayer complètement le tableau, nous avons préféré numéroter un certain nombre de tache, en les choisissant de manière à analyser toutes les couleurs du tableau. Nous avons relevé trente points à analyser en préparant la manipulation. Par précaution au moment de l'expérience, nous sommes montés à cinquante points (nous avons travaillé à partir d'une image de qualité médiocre récupérée sur internet, et les couleurs n'étaient pas vraiment définies).

B. Exploitation des résultats

Nous avons décidé d'utiliser Matlab pour l'exploitation des résultats. En effet, même si nous connaissions un peu la librairie CImg pour le C++, nous avons préféré partir sur un environnement que nous maîtrisons, et dans lequel nous pouvions rapidement repérer nos erreurs.

Le programme se décompose en quatre étapes :

1. Chargement des données
2. Calcul des coordonnées XYZ
3. Conversion en RGB
4. Création de l'image

Pour faire tourner le programme, nous utilisons :

- Les cinquante relevés de réflectance diffuse
- Les fonctions standards d'évaluation du tristimulus
- Les taches enregistrées en noir et blanc dans différents fichiers

1. Chargement des données

Cette partie relève d'un problème de programmation, qui dépend de l'environnement choisi. Nous avons récupéré les fonctions d'observation standards sous forme de fichiers texte facilement exploitables. Les relevés de réflectance diffuses sont également enregistrés sous forme de texte, mais celui-ci est enrobé de paramètres et de caractères qu'il faut écarter pour pouvoir traiter ensuite les chiffres. Enfin, les fichiers images sont bien gérés par Matlab. Il faut toutefois faire attention à optimiser leur traitement, car leur taille rend très long le temps d'exécution de certaines opérations.

Pour récupérer ces fichiers images, nous avons pris une photo de la lithographie sans flash, en se positionnant de manière à éviter les reflets sans déformer le tableau. Nous avons ensuite filtré cette image avec *The Gimp* pour séparer les différentes couleurs. Il faut ensuite les convertir en noir et blanc. Pour cela, nous prenons la moyenne des valeurs des trois couleurs, et nous l'attribuons aux trois coordonnées RGB pour chaque pixel. Cette opération a été effectuée une fois pour toute, et est assez longue.

Il est à noter que le filtre utilisé sous *the Gimp* n'est pas parfait. Nous avons cherché comment prétraiter l'image pour accentuer les bords et améliorer la netteté des frontières. Néanmoins, nous perdons un peu de finesse dans la restitution de l'image : dans certaines taches, *Lapicque* a effectué des petits dégradés, qui correspondent à des quantités de graisse différentes sur la pierre. Effectuer la moyenne des couleurs sur chaque pixel est un moyen (certes un peu pauvre) de reproduire ces nuances. Le prétraitement a pour effet de lisser partiellement les surfaces : la finesse du résultat est moins bonne, mais on perd le problème de l'interpénétration des tâches.

2. Calcul des coordonnées XYZ

Nous effectuons ici le calcul décrit dans la partie théorique, soit l'intégrale :

$$X = \int_{360}^{830} k \cdot f(\lambda) \cdot \bar{x}(\lambda) d\lambda$$
$$Y = \int_{360}^{830} k \cdot f(\lambda) \cdot \bar{y}(\lambda) d\lambda$$
$$Z = \int_{360}^{830} k \cdot f(\lambda) \cdot \bar{z}(\lambda) d\lambda$$

En pratique, nous faisons une somme de Riemann sur les intervalles de longueurs d'ondes correspondant à la mesure. En effet, nous préférons interpoler les fonctions standards d'évaluation, qui sont très régulières : Matlab permet de faire cette interpolation automatiquement avec une méthode cubique, qui rend l'erreur négligeable. Cette opération s'effectue relativement rapidement.

3. Conversion en RGB

Cette opération constitue une étape qui nous a paru simple au premier abord : elle consiste à passer de l'espace des XYZ à celui du RGB : il faut passer de manière linéaire d'un système de trois coordonnées à un autre. Il s'agit donc simplement d'une multiplication par une matrice 3x3. Le problème est de calculer ces coefficients. Nous avons dans un premier temps utilisé une table standard de passage XYZ vers sRGB, considérée comme l'espace de référence.



Le résultat est très loin de la réalité. En particulier, on remarque que la coordonnée relative à la quantité de bleu est beaucoup trop faible. Nous avons décidé de corriger la matrice grâce à notre blanc de référence en utilisant la formule :

$$[M] = \begin{bmatrix} S_r X_r & S_r Y_r & S_r Z_r \\ S_g X_g & S_g Y_g & S_g Z_g \\ S_b X_b & S_b Y_b & S_b Z_b \end{bmatrix}$$

Avec :

$$\begin{bmatrix} S_r & S_g & S_b \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_W & Y_W & Z_W \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_r & Y_r & Z_r \\ X_g & Y_g & Z_g \\ X_b & Y_b & Z_b \end{bmatrix}^{-1}$$

On obtient le résultat suivant :



Ce résultat correspond à un défaut de Matlab, qui normalise les trois coordonnées de chaque pixel à certaines étapes du calcul. Les pixels dont les trois coordonnées dépassent 255 sont rendus en blanc. Nous corrigeons cette erreur dans l'étape suivante.

4. Création de l'image

Il faut ensuite assembler l'image. Pour cela, nous multiplions les coordonnées des couleurs de chaque point non blanc d'une tâche (pour éviter une colorisation dû a une normalisation intermédiaire non souhaitée effectuée par Matlab) par des coefficients proportionnels aux résultats que nous avons obtenus. Le coefficient de proportionnalité doit être choisi pour limiter l'apparition de tâches blanches, comme on l'a vu plus haut. Nous appliquons un Le négatif de la tâche est alors ajouté à une matrice initialisée à 0 sur toutes ses valeurs.

Il ne reste plus qu'à inverser la somme des images pour obtenir le résultat.



Malgré les corrections effectuées, nous sommes loin du résultat attendu. L'erreur se trouve vraisemblablement dans la matrice de passage. Notre difficulté vient du fait que nous ne savons pas vraiment vers quel espace RGB nous voulons aller : celui de l'écran, celui du format de fichier...

Une dernière idée nous est venue tardivement pour valider notre programmation : nous pouvons reconstituer la matrice de conversion XYZ vers RGB à partir du résultat a priori. Il faut pour cela écrire un minimum de neuf équations (trois points au minimum). Avec un nombre importants de points, on obtient un système surdéterminé, que l'on résout avec une méthode des moindres carrés. Nous n'avons pas encore de résultat pour cette méthode.

Conclusion

Nos résultats sont donc loin de notre objectif initial. Il faut corriger le programme d'affichage, ainsi que la matrice de conversion des coordonnées XYZ vers RGB. La suite logique de cette étude sera d'analyser les mesures spectrophotométriques pour doser les quantités de pigment présentes sur chacune des tâches. Pour cela, il faut d'abord trouver quel était la nature des pigments utilisés (en allant interroger l'atelier PONS à paris par exemple), puis de déterminer à l'aide de tables de références les quantités exactes présentes.

Pour limiter les erreurs, si on utilise matlab, il conviendra de ne plus travailler sur des images, mais de tout convertir en matrices de nombres flottant (grâce à la commande *double* par exemple). En effet, si les fonctions intégrées sont très polymorphes (elles s'adaptent bien au type de données que l'on manipule), il convient dans ce domaine de quitter le confort de fonctionnement proposé, et d'essayer d'être le plus précis possible dans la gestion des données. Malgré ces difficultés, matlab (ou sont équivalent scilab open source) nous semble un outil plus adapter que le C++ pour ce genre de projet, où l'on cherche plutôt quelque chose d'intuitif et de clair à une plateforme de développement plus efficace mais trop technique. Si on veut creuser du côté de la qualité du rendu, il est possible d'avoir un meilleur résultat en effectuant un prétraitement de l'image servant à récupérer les tâches. Cette étape est assez laborieuse, et pour quelqu'un connaissant un peu le logiciel *the gimp*, il serait possible d'accélérer le processus en écrivant un script python. La spectrophotométrie est un sujet passionnant, mais qui nous a surpris par sa difficulté. Nous espérons que ce rapport pourra aider à mieux comprendre les obstacles à prendre en compte pour le traitement de ce sujet.

Ondrej Rybysar
Simon Bergot

Bibliographie

(1) Charles L'apicque, L'espace et la vision des couleurs, Symposium international intitulé "l'ingénieur et l'art", Aix-en-Provence, 5, 6, 7 juin 1991.

Le numéro 527 de centraliens

wikipédia

<http://lapicque.combrisson.com/>

<http://www.brucelindbloom.com>

<http://www.paladix.cz/>