La couleur, théorie et gestion, pour les ... photographes

Opuscule garanti à très faible teneur en calculs

Charles Vassallo
Objectif Image Trégor
3 juillet 2011

La couleur pour les... nuls ? J'espère que mes lecteurs valent mieux que ça et qu'ils accepteront de faire un petit effort pour suivre ce document, car, quoi qu'on puisse dire, le sujet n'est pas si simple et il présente de nombreuses facettes. En échange, afin de rendre l'accès le plus accueillant possible au plus grand nombre, j'ai fait de mon mieux pour bannir les mathématiques de l'exposé.

Il ne faut toutefois pas trop se voiler la face : certes, il n'y aura (quasiment) ni formules ni équations, mais dès qu'on décrit des phénomènes naturels avec un minimum de logique et qu'on utilise des chiffres, ces chiffres qu'on organise en tableaux ou en courbes dans la vie de tous les jours, on fait des maths sans le savoir.

Ce document vise à mieux faire comprendre ce qu'on fait quand on manipule les différents objets et concepts liés au respect des couleurs tout au long de la chaîne graphique. Et à relativiser les choses.

Bonne lecture !

La couleur, théorie et gestion pour... les photographes

1 - Introduction : la gestion des couleurs, ça marche ! 3

2 - La lumière est une superposition de rayonnements élémentaires monochromatiques

La décomposition de la lumière 5
Spectres de quelques sources de lumières 6
La réflectivité des objets 6
Le blanc et les gris 7
La sensation de couleur et le grand mystère de la couleur des objets 7
La couleur des objets n'est finalement pas si stable que ça. Le métamérisme 8
La balance des blancs. 9
Qu'est-ce que la température de couleur ? 10

3 – Caractérisation des couleurs et synthèse trichrome

Introduction 11
Principe de la synthèse trichrome (synthèse additive) 12
Tout le monde voit de la même façon ? 13
Il y a toujours des couleurs qu'on ne peut pas reconstruire 13
Le modèle CIE-1931 14
L'espace tridimensionnel des couleurs et le triangle de Maxwell 14
Deux propriétés importantes du triangle de Maxwell 16
Les couleurs de l'arc-en-ciel 17
Les primaires virtuelles du modèle CIE-1931 et les composantes XYZ 18
La composante Y et la valeur tonale des couleurs (luminance) 20
Obtention générale des XYZ 21
Les couleurs du corps noir 21
Quelques espaces colorimétriques pratiques 22
Le cercle chromatique 24

4 — La couleur des objets: du système empirique de Munsell au LAB

Le système de Munsell pour la couleur des objets 24
Passage des XYZ aux couleurs des objets 26
Une échelle de valeurs avec uniformité perceptuelle 27
Naissance du modèle LAB 28
La discrétisation du modèle LAB et l'ensemble des couleurs possibles 28
Les delta E et la précision du travail en LAB 29
La variation des couleurs avec l'éclairage et l'adaptation chromatique 29
La représentation en LAB des espaces colorimétriques 30
Le gamma des espaces colorimétriques 31

5 — La chaîne graphique et la gestion de la couleur

Organisation générale de la chaîne graphique 33
Comparaison entre les sorties papier et l'affichage à l'écran 34
La température de couleur pour l'écran 35
Les profils des périphériques de sortie 35
Les profils des périphériques d'entrée 39
Utilisation des profils de périphériques 40
Attribution d'un profil colorimétrique 41
Conversion et modes de rendu 41
L'affichage d'épreuve (le soft-proof virtuel) 43
Appareil photo numérique et calibration DNG. 44

6 — Détails pratiques sur l'étalonnage des écrans

La procédure 47
Quelle sonde choisir ? 48
Comment vérifier la qualité de l'étalonnage ? 49
Comment choisir son écran ? 50
Ecrans de portables 50
Systèmes à 2 écrans 51
Sur la durée de vie des sondes 51

7 — Détails pratiques sur l'étalonnage des imprimantes

Obtention des profils d'imprimante 52
Principe de la calibration et de l'utilisation du profil ICC 53
Comment imprimer les images de calibration 54
Les différents kits de calibration 55
Comment choisir ses papiers 56
Où mettre les profils ICC ? 56
Travail avec un imprimeur extérieur 56
Comment tester ses profils 57
Et, euh... ça marche vraiment à tous les coups ? 58

Annexes

A – Espaces colorimétriques standard 59
B – Sur les rendus perceptif et saturation 60
C – Moniteurs à grand gamut sur le web 62
D – Les modèles TSL 62

1 - La gestion des couleurs, ça marche !

Toute la photographie numérique repose sur la théorie des couleurs et sa mise en œuvre pratique qu'on appelle *la gestion de la couleur*. Il n'y a pas de doute, ça marche, il suffit de regarder tout autour de nous la profusion d'images en couleurs de toutes sortes et généralement fort satisfaisantes. Bien entendu, il y a des personnes plus exigeantes ou plus tatillonnes que les autres qui ne partagent pas l'enthousiasme général, pour diverses raisons :

(i) Comme de nombreux exemples d'illusion optique montrent que l'œil est incapable d'apprécier exactement les couleurs, comment peut-on croire en une telle théorie ?

(ii) On faisait des travaux en couleurs bien avant que cette théorie ne se répande : on n'en a donc pas besoin.

(iii) Ils ont essayé d'imprimer leurs images et ils sont déçus des résultats.

(iv) Trop compliqué !

(v) Ils accordent que ça marche dans certains cas mais pas dans d'autres (qui justement les intéresseraient davantage) : cette théorie ne serait pas fiable et il serait donc inutile de s'y intéresser

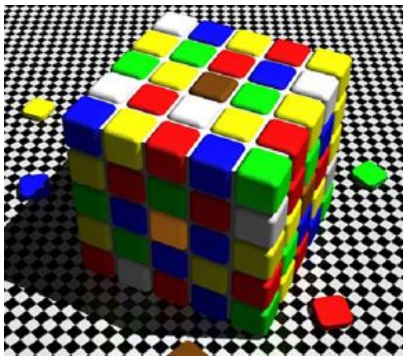
Nous allons revenir plus loin sur le point (i). Le point (ii) est bien exact, mais la préparation d'une image en couleurs était alors tout un art que seuls de rares praticiens possédaient ; par ailleurs, si on compare les ouvrages en couleurs des années 1950-60 à ceux d'aujourd'hui, on devrait convenir que la qualité générale s'est considérablement élevée. Le point (iii) devrait être une incitation à se pencher sur les principes de la gestion de la couleur, et ceux qui renâclent à cause des points (iv) ou (v) ont tort.

Il faut faire l'effort de comprendre, et ce n'est pas si compliqué que ça quand on tombe sur un bon pédagogue... et vous êtes justement ici en de bonnes mains ! En règle (très) générale, ça marche bien et la théorie donne les méthodes à suivre pour obtenir de bons résultats. Pour autant, il ne faut pas nier qu'il y a de temps en temps des problèmes. Il y a effectivement des couleurs qu'on ne peut pas reproduire, c'est comme ça et il en a toujours été ainsi. Simplement, la théorie explique pourquoi cela arrive et, plus important, elle permet de prévoir ces situations problématiques. On ne pourra toujours pas reproduire ces couleurs impossibles à reproduire, mais on pourra alors préparer des stratégies de contournement.

Quant au point (iv), j'espère que le présent document vous convaincra que ce n'est pas si ésotérique que ça.

–Parenthèse : les illusions de contraste de simultanéité.

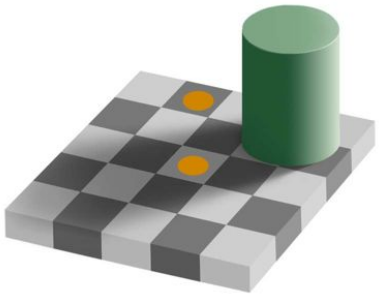
Avant d'entrer dans le vif du sujet, montrons trois images célèbres illustrant le point (i) ci-dessus.



Qui croirait que les carrés au centre des faces sont constitués de la même couleur orangée ?

Qui croirait que les lignes horizontales sont formées de cinq carrés identiques (et uniformes)?

(image attribuée à Bartleson et Breneman)



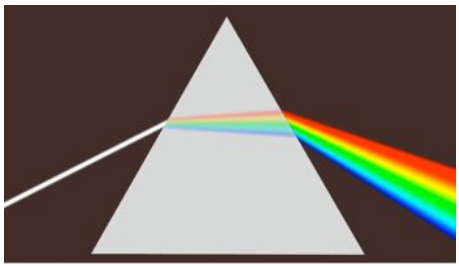
Ici, comme dans la première image, on a d'abord du mal à croire que les deux ronds soient constitués du même orange. Mais plus fort encore, qui croirait que les pavés sous ces ronds sont formés du même gris, ni plus clair, ni plus foncé ?

(variante de l'échiquier d'Adelson)

Toutes ces illusions reposent sur le principe du contraste de simultanéité, à savoir que la perception d'une couleur dépend de son environnement ; en quelque sorte, l'œil n'accèderait pas à une sensation de couleur absolue. Mais cela ne condamne absolument pas le concept même de couleur et le principe de la gestion de la couleur. Dans les appareils numériques, toute scène est décomposée en points élémentaires qui sont analysés un par un, indépendamment des autres, et cela permet de définir une couleur pour chacun d'entre eux sans aucune ambiguïté. Si on sait ensuite reproduire ces différents points avec leur couleur, l'image ainsi reconstituée sera lue par l'oeil de la même façon que la scène originale ; et si cette scène donnait lieu à des illusions d'optique, il en sera de même pour son image.

2 - La lumière est une superposition de rayonnements élémentaires monochromatiques

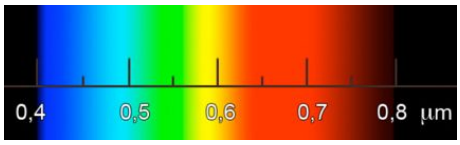
2.1 La décomposition de la lumière



L'expérience de base est due à Isaac Newton (1665). Un faisceau de lumière « blanche » qui entre dans un prisme se décompose à la sortie en couleurs allant du rouge au bleu-violet — les couleurs de l'arc-en-ciel.

Vers la même époque, Christiaan Huyghens pressentait que la lumière était un phénomène vibratoire, mais il a fallu attendre les années 1800 pour en être certain, avec Augustin Fresnel et Thomas Young. Chacune des couleurs à la sortie correspond à une *onde élémentaire*, quelque chose qui vibre tout en avançant, un peu comme les ondes à la surface d'un étang. Ce qui vibre est longtemps resté mystérieux (un champ électromagnétique) mais peu nous importe dans cette introduction ; nous retiendrons seulement que cette onde avance d'un certain chemin pendant sa période de vibration, la *longueur d'onde*, et ce sont ces longueurs d'onde dont on se servira pour caractériser ces ondes élémentaires. On aurait pu tout aussi bien utiliser l'angle de déviation dans l'expérience du prisme, mais il y a davantage de physique fondamentale à manipuler des longueurs d'onde.

Deux points vont nous intéresser.



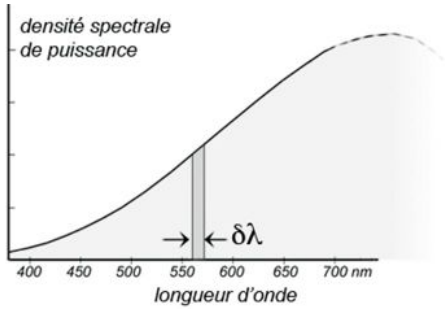
- D'abord, l'oeil associe une couleur à chacune de ces ondes élémentaires, selon la correspondance indiquée schématiquement à droite, depuis le bleu-violet (le *blue* anglais) jusqu'au rouge. Cet intervalle se prolonge par des rayonnements que l'oeil ne perçoit pas, ultra-violet sur la gauche et infra-rouge sur la droite.

  A noter que ces rayonnements n'ont pas vraiment de couleurs par eux-mêmes ; ce sont les couleurs qui apparaissent si ces rayonnements frappent un objet blanc.

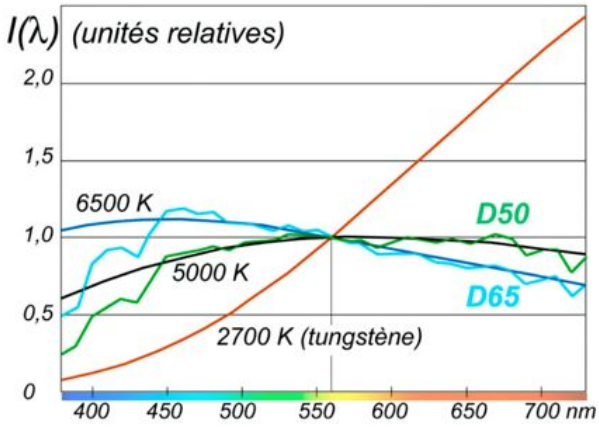
  Par ailleurs, les frontières vers 0,4 et 0,8 μm sont floues ; l'œil ne perd pas brutalement sa sensibilité. La transition est assez rapide du côté de l'ultra-violet, mais très progressive du côté de l'infra-rouge.

- On ne peut pas physiquement créer un rayonnement strictement *monochromatique*, qui ne contiendrait qu'une seule onde élémentaire sur une longueur d'onde unique. Tout rayonnement réel est une superposition d'une infinité de ces ondes et la puissance qu'il véhicule (des watts) est distribuée sur les longueurs d'onde selon une certaine loi de répartition dont nous allons donner plusieurs exemples ; on parle de *spectre* ou de loi de répartition *spectrale*.

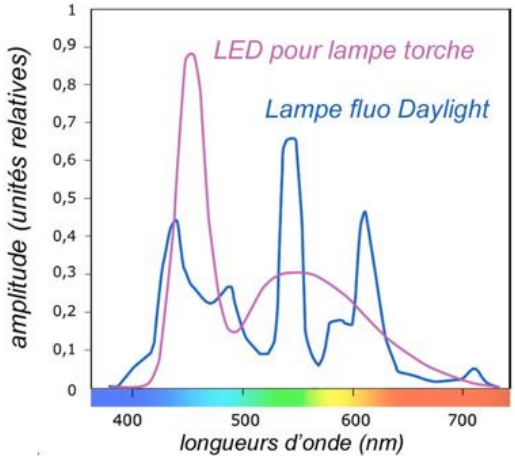
  La figure ci-contre montre un tel spectre. La puissance véhiculée dans l'intervalle $\delta\lambda$ est proportionnelle à l'aire en gris foncé, mais pour passer à une valeur bien concrète en watts, il faudrait d'abord connaître la totalité du spectre (qui s'étend généralement au-delà des longueurs d'onde visibles), afin d'accéder à toute la surface en gris pâle qui porterait la totalité de la puissance rayonnée. Si on connaît cette puissance, une règle de trois donnera alors les watts portés par le petit intervalle $\delta\lambda$.



2.2 Spectres de quelques sources de lumières



A titre d'illustration, nous allons donner les spectres de quelques sources de lumières. Cette première figure montre des spectres de très grande largeur, recouvrant la totalité du spectre visible. Les courbes irrégulières D50 et D65 sont des spectres normalisés de lumière solaire (le D50 correspondant plutôt à une moyenne générale et le D65 à une lumière plus froide venant du nord), et les courbes lisses sont trois spectres « de corps noir » à trois températures différentes — nous reviendrons plus tard sur ce corps noir et sa température. La courbe à 2700 K est pratiquement celle d'une lampe tungstène — on devine qu'elle se prolonge fort loin dans l'infrarouge et que c'est là qu'on trouve la majeure partie de sa puissance émise ; autrement dit, qu'elle chauffe bien plus qu'elle n'éclaire.

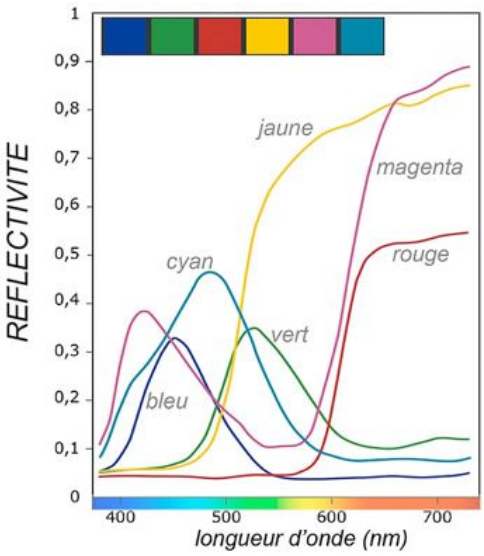


Cette deuxième figure montre des sources avec des *spectres de raie*, autrement dit des spectres présentant des pointes sur une ou plusieurs parties restreintes du spectre visible. La lampe Daylight représentée est estampillée « lumière naturelle à 6500 K », mais son spectre irrégulier peut gêner une bonne perception des couleurs (au contraire des sources précédentes à spectre large). Quant à cette LED de lampe torche, elle n'a pas d'autre prétention que d'éclairer dans l'obscurité et la lumière fournie est manifestement bleutée.

On peut aussi rencontrer des rayonnements *quasi-monochromatiques*, avec des spectres extrêmement resserrés autour d'une longueur d'onde, comme la lumière des lasers, ou, dans une moindre mesure mais plus familièrement, la lumière jaune des lampes à vapeur de sodium utilisées dans certains éclairages urbains. Tout ce qui est baigné dans ces rayonnements prend la couleur de cette lumière.

2.3 La réflectivité des objets

Les diverses ondes élémentaires qui arrivent sur un objet éclairé ne subissent pas toutes le même sort. Seule une partie est rediffusée, dans une proportion $R(\lambda)$ qui varie avec la longueur d'onde. Cette fonction $R(\lambda)$ s'appelle la *réflectivité* de l'objet et on parle de *spectre de réflectivité* pour cette dépendance en longueur d'onde ou sa représentation graphique. La figure suivante donne plusieurs exemples.

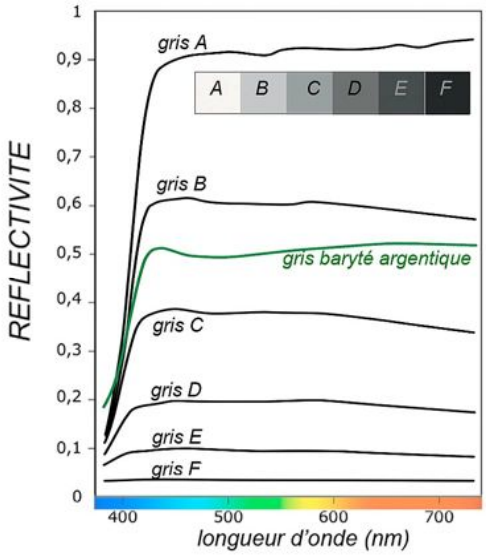


Spectres de réflectivité pour les couleurs primaires (rouge, vert, bleu) et secondaires (jaune, magenta, cyan) prises sur une ligne d'une charte ColorChecker ; cette charte est un outil couramment utilisé dans les milieux de la colorimétrie.

Comme on s'y serait attendu, la plage verte réfléchit surtout dans le vert (comprendre pour les longueurs d'onde proches du vert). De même, le rouge réfléchit surtout dans le rouge et le bleu dans le bleu. Par contre, le jaune réfléchit sur un spectre très large, recouvrant le vert et le rouge, alors qu'on aurait pu s'attendre à un spectre bien plus étroit centré sur les longueurs d'ondes jaunes. Il en est de même pour le cyan, qui s'étend largement dans le bleu et dans le vert et non pas sur une plage plus restreinte entre le vert et le bleu — tout ceci s'éclaircira quand nous aurons abordé les principes de la synthèse additive.

On note également l'apparition d'une nouvelle couleur, le magenta, qui n'existait pas dans la lumière décomposée par un prisme. Pour le moment, nous retiendrons simplement que sa réflectivité s'étend sur les bleus et sur les rouges, avec un creux sur les verts.

2.4 Le blanc et les gris



Un blanc ou un gris *idéal* correspondrait à une réflectivité parfaitement plate sur la totalité du spectre visible.

Pour les blancs ou les gris *réels*, la réflectivité n'est qu'à peu près plate, et cela sur la plus grande partie de ce spectre. La figure ci-contre montre ce qu'il en est pour les six plages de gris d'une charte Color Checker (en noir) et aussi pour un gris lu sur un tirage argentique baryté (en vert) ; pour toutes ces courbes, on voit que la réflectivité s'effondre dans l'extrême bleu.

Bien entendu, un *blanc idéal* aurait une réflectivité de 100% à toutes les longueurs d'onde et un *noir idéal* une réflectivité partout nulle.

2.5 La sensation de couleur et le grand mystère de la couleur des objets

La sensation de couleur naît dans l'œil, lorsque les rayonnements émis par les différents objets d'une scène se recombinent sur les cellules de la rétine. De quoi dépend cette sensation ?

Le rayonnement qui provient d'un objet est caractérisé par sa puissance et sa distribution spectrale. Celle-ci est le produit du spectre $I(\lambda)$ de *l'illuminant* (c'est-à-dire la lumière qui baigne l'objet) et de la réflectivité $R(\lambda)$ de l'objet. Un premier fait d'expérience est que la couleur de l'objet ne change apparemment pas quand on fait varier la puissance de l'illuminant ; autrement dit, la sensation de couleur ne dépend que de la *forme* du spectre du rayonnement qui entre dans l'œil, et pas de son amplitude

> Cette affirmation demande à être précisée et nuancée.
> – D'abord, quand on parle de « modifier la puissance d'un illuminant », on veut dire qu'on multiplie $I(\lambda)$ par un facteur constant sans changer la forme du spectre ; cela n'est pas si évident que cela à réaliser. Par exemple, si la scène est éclairée par des spots tungstène, on ne pourra modifier cette puissance qu'en reculant ou en avançant ces spots, ou encore en interceptant une partie de la lumière émise avec un diaphragme, et non pas en jouant sur la tension d'alimentation de ces spots — on sait que la lumière émise devient plus rouge ou plus bleue si on baisse ou si on augmente cette tension.
> – Ensuite, cette stabilité de la couleur perçue n'est valable que dans un certain domaine de luminosité. Si celle-ci devient aveuglante, on ne perçoit plus grand chose d'autre que la sensation d'une lumière beaucoup trop forte. Si celle-ci est trop faible, on rentre dans le domaine de la vision nocturne, où on perçoit des variations d'éclairement sans bien percevoir les couleurs. Sans aller jusque là, la sensation de couleur varie tout de même un peu avec la puissance de l'éclairage. Par exemple, l'aspect éclatant des jaunes sous une forte lumière s'éteint peu à peu quand la lumière baisse.

L'observation dicte un autre grand principe : les objets ont une couleur qui leur est propre, et cela sous une très grande variété d'éclairages. Un objet blanc restera perçu comme blanc qu'on l'observe sous le soleil de midi, sous lumière tungstène ou sous un éclairage fluorescent, alors qu'il renverra dans l'oeil les rayonnements extrêmement différents que nous avons vus au paragraphe 2.2. Il en sera de même pour un objet colorié ; la couleur qu'on lui attribue sera largement indépendante de la lumière qui le baigne. En quelque sorte, dans le spectre $I(\lambda)\,R(\lambda)$ qui lui provient d'un objet (c'est à dire le spectre de l'illuminant filtré par la réflectivité de l'objet), l'œil et le cerveau seraient capables d'enlever la contribution de l'illuminant pour ne retenir que ce qui est spécifique de l'objet, sa réflectivité.

Cette stabilité de la couleur des objets est une grande bénédiction pour les peintres et les photographes, car elle assure qu'une peinture ou qu'une photo en couleurs n'exigera pas une lumière très particulière pour être contemplée. Elle sera perçue à peu près de la même façon sous une très grande variété d'éclairages.

2.6 La couleur des objets n'est finalement pas si stable que ça. Le métamérisme.

En réalité, ce principe n'est pas tout à fait rigoureux, et c'est pourquoi nous avons entouré son énoncé de quelques précautions oratoires. On sait bien que tout devient rougeâtre dans une scène éclairée à la bougie et que les bleus y apparaissent noirs. A l'extrême, avec un éclairage quasi-monochromatique, tout prend la couleur de l'éclairage ; par exemple, tout devient jaune dans une rue de nuit éclairée au sodium. Cette stabilité de la couleur des objets exige que le spectre de l'illuminant soit présent à peu près partout dans le spectre visible et qu'il y varie le plus régulièrement possible.

Une autre observation vient limiter la portée de ce principe : l'existence du *métamérisme*. Au sens premier, deux matériaux *métamères* sont deux matériaux différents — avec des réflectivités différentes — qui sont perçus avec la même couleur sous un éclairage donné et avec deux couleurs différentes sous un autre éclairage. Cet effet est généralement assez faible, mais sa seule existence montre que la couleur d'un matériau ne dépend pas uniquement de la réflectivité, mais aussi (plus faiblement) de son illuminant. Dans son sens moderne, le métamérisme désigne précisément cette petite variation de la couleur quand on change l'éclairage. Il est généralement imperceptible si on n'a pas juste à côté une référence de cette couleur, sauf si on s'intéresse à des tons très proches d'un gris, car l'oeil est très sensible aux petites dominantes qui affectent ces tons.

> Il est bien connu que les éclairages fluorescents faussent souvent la perception des couleurs. C'est dû à leur spectre très irrégulier avec des raies parfois plus prononcées que celles du §2.2. On chiffre cet effet par un *indice de rendu des couleurs* (IRC, ou CRI en anglais) obtenu à partir d'une comparaison entre des couleurs tests perçues sous cet éclairage et ce qu'elles donneraient sous un éclairage de référence de type soleil ou corps noir — la comparaison étant confiée à l'impartialité d'un spectrophotomètre. Cet indice va de 0 à 100. On dit souvent qu'une source de lumière est utilisable pour travailler sur des images en couleur si son indice est supérieur à 90 mais mon conseil serait d'exiger bien davantage ; il existe maintenant des tubes fluorescents destinés à des éclairages de contrôle avec un IRC de 98%. A titre de comparaison, l'éclairage urbain au sodium a un indice de 15. Cet indice n'est cependant qu'une simple indication, qu'on peut critiquer ; par exemple, toutes les ampoules à incandescence sont créditées d'un indice de 100 alors que les ampoules ordinaires ou sous-voltées ne permettent manifestement pas d'apprécier correctement les bleus.
> http://fr.wikipedia.org/wiki/Indice_de_rendu_de_couleur
> http://en.wikipedia.org/wiki/Color_rendering_index

2.7 La balance des blancs.

Nous avons mentionné que cette stabilité de la couleur des objets impliquait que l'œil était plus ou moins capable de séparer la réflectivité des objets de la lumière d'ambiance. On essaie évidemment d'en faire autant dans un appareil photographique, mais l'appareil est beaucoup moins habile que l'œil pour deviner et caractériser la lumière d'ambiance et c'est pourquoi il dispose d'un réglage « balance des blancs » (abrégé en *WB* pour *White Balance*) par lequel le photographe peut le remettre dans le droit chemin.

Ce réglage donne généralement le choix entre différentes options décrivant de grands types d'éclairage : ensoleillé, nuageux, ombre, éclairage artificiel, le tout variant selon les appareils (et les hasards de la francisation). Les appareils plus savants donneront aussi des indications chiffrées à côté de ces appellations, genre 2700 K, 5000 K , etc… où le « K » signifie « degré Kelvin » et où le nombre est la *température de couleur* (nous allons voir plus loin de quoi il s'agit). On se doute bien que ce nombre très limité d'options ne permet pas une caractérisation très fine de cette lumière ; le soleil de midi n'est pas celui du soir, et on se doute bien qu'il devrait y avoir plusieurs intermédiaires entre « soleil » et « nuageux » . Une imprécision sur la lumière ambiante se traduit par une capture des couleurs imprécise, allant jusqu'à l'apparition de grosses dominantes bleues ou rouges en cas d'erreur grave. Pour travailler finement, on a parfois une position « blanc mesuré » où l'appareil part d'une première photo d'une feuille blanche pour caractériser la lumière ambiante et qu'il utilisera ensuite pour les photos suivantes tant qu'on le laissera sur ce réglage « blanc mesuré ».

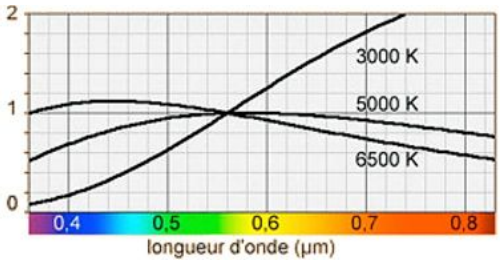
Dans la position « automatique » (*WB auto*), l'appareil fait de son mieux pour deviner quelle est la lumière ambiante. Pour cela, il ne dispose évidemment que des rayonnements provenant des différents points de la scène photographiée et il ne peut qu'en tirer une sorte de moyenne. En cas d'image avec des fortes couleurs non équilibrées, il se plantera inévitablement alors que l'œil a évidemment l'avantage de pouvoir sortir du champ de l'objectif pour faire sa propre moyenne.

> A noter aussi qu'il y a manifestement plusieurs façons de s'y prendre qui ne sont pas toujours aussi heureuses les unes que les autres. Quand on a enregistré une image en RAW, il suffit de demander à *Camera Raw* de faire sa propre balance des blancs automatique et de comparer à ce que l'appareil avait suggéré (réglage « tel quel ») ; il y généralement des différences sensibles. Egalement, certains boîtiers sont réputés pour la véracité de leurs couleurs, ... et d'autres sont plus discrets sur ce point.

2.8 Qu'est-ce que la température de couleur ?

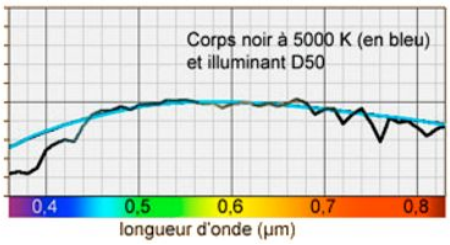
D'après les lignes précédentes, on a compris qu'il s'agit d'un nombre qui sert à caractériser de nombreux éclairages naturels. Nous allons essayer d'expliquer de quoi il s'agit.

Tous les corps qui supportent d'être élevés à une température élevée (métaux, briques ou céramiques réfractaires) se mettent à émettre de la lumière, d'abord du rouge, puis du jaune… puis finissent par se volatiliser. En parlant du fer, on dit communément qu'on peut le chauffer « à blanc », mais c'est une illusion ; en fait ça se passe généralement dans un local clos pas trop éclairé où il devient si aveuglant que l'œil ne peut plus discerner de couleur ; en fait, si on pouvait faire l'opération sous un soleil généreux, on verrait que la lumière émise reste plutôt jaune.



Les physiciens se sont emparés du phénomène et ils en ont extirpé la « théorie du corps noir ». Ce corps noir est une abstraction théorique où on néglige toute réflexion par le matériau (autrement dit, la couleur naturelle du matériau) et où on ne tient compte que des radiations émises par le matériau. Le point important est que le spectre de ce rayonnement ne dépend que de la température du matériau. La figure ci-contre montre cette répartition pour trois températures différentes ; au fur et à mesure que la température monte, la puissance baisse dans le rouge et monte dans le bleu.

Reste ensuite à voir comment cette belle théorie colle à la réalité. Pas si mal ! Dans la gamme 2000-3500 K, on trouve souvent un excellent accord, notamment avec les matériaux réfractaires comme le tungstène de nos ampoules d'éclairage. On trouve aussi que la lumière émise par la surface du Soleil colle très bien à celle d'un corps noir à 5800 K.



Attention toutefois à ne pas confondre cette lumière solaire directe avec la lumière ambiante dans nos scènes de tous les jours. Ces scènes sont éclairées par le Soleil, mais aussi par le ciel, le tout étant filtré par l'atmosphère qui absorbe plus ou moins selon les longueurs d'onde. La figure ci-contre montre « l'illuminant D-50 », une certaine moyenne de ce que

le soleil nous apporte, en comparaison du rayonnement du corps noir à 5000 K. Il y a des différences, mais qui n'auront pas beaucoup d'influence sur notre perception : on dit que cette lumière a une température de couleur de 5000 K.

On sait que cette lumière ambiante peut changer considérablement. En fin ou en début de journée, les rayons du soleil ont bien plus d'atmosphère à traverser, ce qui arrête les bleus au profit des rouges ; le résultat ressemble toujours au rayonnement d'un corps noir, mais à une température plus basse — 4000 K ou moins. A l'opposé, les nuages peuvent s'opposer à la lumière directe du soleil et favoriser l'éclairage par le ciel (ou bien on peut travailler par grand beau temps mais à l'ombre d'un mur) : à nouveau, on reste près d'un rayonnement de corps noir, mais à une température plus haute — 7000 K ou plus. Bref, dans tous ces cas, on parle toujours de lumière naturelle et on la caractérise par une température de couleur, entendant par là que cette lumière est très voisine de celle qu'émettrait un corps noir à cette température.

La température de couleur ne suffit pas toujours pour caractériser la qualité d'une lumière ambiante. Nous reviendrons sur ce sujet au §3.11.

3 – Caractérisation des couleurs et synthèse trichrome

3.1 Introduction

D'après ce que nous venons de dire, la couleur d'un matériau découle essentiellement de sa réflectivité $R(\lambda)$, mais la relation n'a pas l'air très simple, ne serait-ce que parce qu'on peut avoir la même couleur pour deux $R(\lambda)$ différents, et que lalumière ambiante intervient tout de même un peu. Il est donc indispensable de pouvoir caractériser les couleurs de manière plus simple. Historiquement, deux écoles de pensée se sont attelées à la tâche :

- les physiciens, à la suite de Newton et de Young, ont abouti au système RVB, où chaque couleur serait représentée tout simplement par trois composantes chromatiques rouge, verte et bleue.

  Ce n'est pas aussi simple que cela dans la réalité : il faut ajouter *à l'intérieur d'un certain espace colorimétrique* (nous expliquerons plus loin de quoi il s'agit). De nombreux problèmes de reproduction d'images en couleurs viennent de ce qu'on a longtemps ignoré cette précision.
- Les peintres et les philosophes comme Goethe ont préféré partir des propriétés physiologiques des couleurs. On peut considérer que la classification empirique de Munsell, basée sur les notions de valeur, de saturation et de teinte constitue le point d'aboutissement de cette approche.

Les pratiques de la gestion de la couleur permettent d'unifier ces deux approches. Nous allons surtout nous attarder sur le système RVB ; nous verrons plus tard comment on le relie au système de Munsell.

3.2 Principe de la synthèse trichrome (synthèse additive)

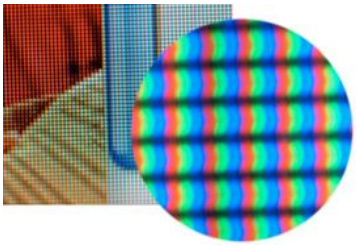
On sait qu'on peut reconstituer une très grande variété de couleurs en faisant converger trois faisceaux respectivement rouge, vert et bleu (*couleurs primaires*), avec des intensités variables.

Cette expérience est schématisée ci-contre. Dans la réalité, il faudrait prendre beaucoup de précautions pour modifier l'intensité des faisceaux sans altérer leurs couleurs (il faudrait se débrouiller avec des diaphragmes à l'intérieur des projecteurs).

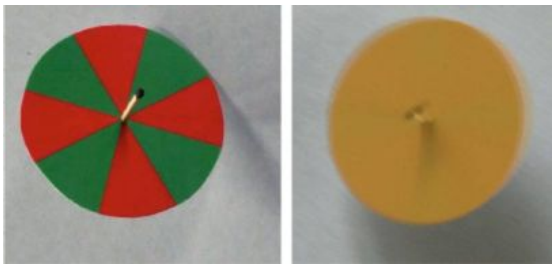
La figure illustre les grandes règles de la synthèse additive :

- rouge + vert = jaune
- vert + bleu = cyan
- bleu + rouge = magenta
- rouge + vert + bleu = blanc

En abaissant les intensités dans des proportions %R, %V et %B, on peut obtenir une très grande variété de couleurs dans la zone où les trois faisceaux se superposent. On obtient des gris si les trois proportions sont égales.



Cette synthèse est mise en œuvre tous les jours dans nos téléviseurs et dans nos écrans d'ordinateur. On voit ci-contre une double macrophotographie d'un écran, à deux échelles différentes. Le médaillon montre l'agencement des cellules individuelles RVB qui reconstituent un blanc ; chacune fait 0,08 mm de largeur dans l'écran qui nous a servi et on les regarde de trop loin pour qu'on puisse les distinguer les unes des autres. Le mélange des trois couleurs se fait donc directement dans l'œil.



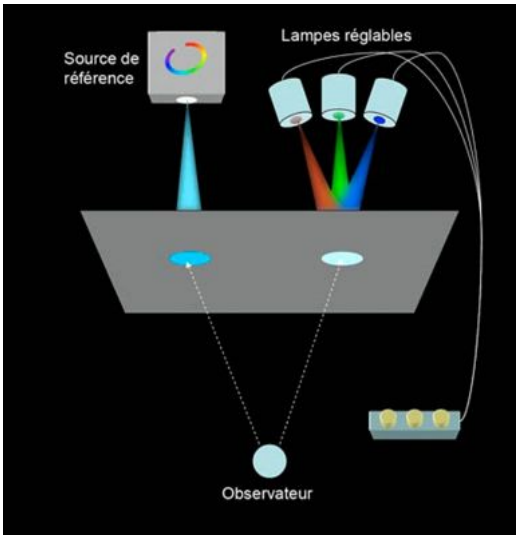
Le mélange optique peut aussi se faire à travers une succession temporelle très rapide. On peut le démontrer de manière très ludique avec une toupie avec des secteurs alternativement vert et rouge qui se fondent en jaune quand la toupie tourne. Plus sérieusement, ce principe est utilisé dans certains viseurs électroniques à haute définition d'appareils numériques ; on y affiche en cycle très rapide les rouges, puis les verts, puis les bleus et l'oeil voit la scène en couleurs.

Ainsi, à première vue, toute couleur pourrait être caractérisée par la donnée des trois proportions %R, %V et %B qui permettent de la reconstruire et ce sont ces proportions qu'on appellera *composantes chromatiques*. Mais bien évidemment, ces trois composantes n'ont de sens que dans le dispositif expérimental utilisé : si on change les filtres rouge, vert et bleu devant les projecteurs, la couleur obtenue avec les mêmes composantes ne serait plus la même ; bref, on a simplement reporté la complexité de la caractérisation générale des couleurs par la caractérisation de ce dispositif particulier. Nous allons néanmoins continuer à explorer cette voie.

Nota : ces composantes chromatiques RVB sont parfois appelées *tristimulus*, bien que ce terme soit le plus souvent accolé aux composantes XYZ qui nous verrons plus loin.

3.3 A peu près tout le monde voit de la même façon

Avant toute chose, cette caractérisation en est-elle vraiment une ? Comme la sensation de couleur naît dans les mystères de l'œil et du cerveau, sommes-nous tous câblés de la même façon ? Face à une couleur donnée qu'on nous demande d'analyser comme une combinaison de trois couleurs primaires, allons-nous tous trouver les mêmes composantes ? On ne se pose même plus la question de nos jours, tant le succès des techniques de reproduction en couleur semble aller de soi — ou alors, ceux qui ne voient pas comme tout le monde sont plus ou moins affectés de daltonisme.



d'après « Oleg »
gueyraud.pagesperso-orange.fr/gcouleurs

Les chercheurs du début du XIXème siècle ont enquêté sur cette question à l'aide du dispositif schématisé ci-contre : on demande à l'observateur de régler les trois projecteurs de droite de manière à retrouver la couleur projetée à gauche, les deux taches lumineuses étant vues dans un environnement sombre, sans rien à proximité qui puisse fausser la perception des couleurs. On a conclu au bon accord de la vision des uns et des autres.

Les choses ne sont toutefois pas aussi simples. Il y a eu deux campagnes historiques de ce genre de mesures, en 1931 et en 1964, avec la seule différence que les taches ont d'abord été observées sous un angle de 2° puis de 10°. On a confirmé qu'on voyait à peu près tous de la même façon, mais, bizarrement, que les composantes à 2° et à 10° n'étaient pas les mêmes. La gestion de la couleur est basée sur les résultats à 2°, plus proche de l'analyse des couleurs point par point.

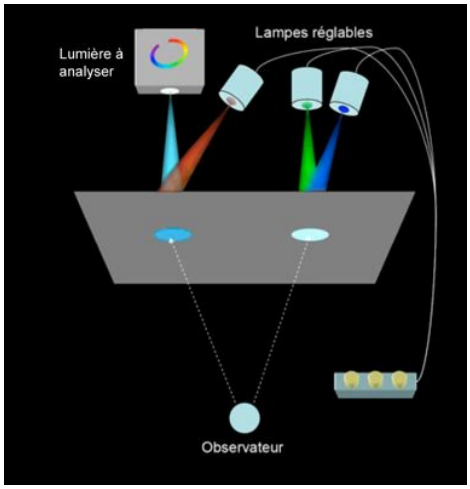
3.4 Il y a toujours des couleurs qu'on ne peut pas reconstruire, mais on se débrouille !

La figure à droite montre deux choses :

- le triangle est une visualisation de toutes les couleurs qu'on peut recréer à partir des couleurs primaires affichées aux sommets du triangle. Nous reviendrons plus loin sur ce *triangle de Maxwell* afin d'aller au-delà de son caractère très intuitif et d'expliquer plus précisément ce qu'on y voit.
- Les ronds montrent des couleurs qui ne sont manifestement pas dans ce triangle ; elles sont trop vives pour y entrer. Quelles composantes chromatiques pourrait-on bien leur accorder ?

Pour répondre à cette dernière interrogation, on a un peu compliqué le dispositif expérimental précédent, en permettant de mélanger la couleur analysée et celle d'une ou deux des couleurs

primaires (voir ci-contre) ; en quelque sorte, si la couleur analysée était trop vive, on la « cassait » en lui superposant un peu de la couleur complémentaire. Lorsqu'il était nécessaire de recourir à cette option, on comptait négativement les proportions des couleurs primaires ainsi détournées.



Le résultat fondamental est qu'on peut ainsi caractériser toutes les couleurs possibles et imaginables

Ce résultat répond pleinement à notre souci de caractériser les couleurs de la manière la plus simple possible : on y arrive avec seulement ces trois composantes chromatiques ; comme on savait que la couleur comportait les trois propriétés indépendantes de luminosité, de saturation et de teinte, on ne pouvait pas espérer s'en sortir avec moins de trois paramètres. En plus, si les trois composantes sont toutes trois entre 0 et 100%, cette caractérisation donne le moyen de synthétiser les couleurs correspondantes.

3.5 Le modèle CIE-1931

Bien évidemment, ces composantes chromatiques n'ont d'intérêt que si on est capable de reproduire le dispositif expérimental des figures précédentes afin de reproduire les couleurs analysées. Il aurait donc fallu à chaque fois en fournir une description exhaustive ; au nom de la clarté et de la simplicité des échanges, il était évident qu'on ne pouvait pas permettre à chacun d'y aller avec son propre appareillage. Il fallait imposer un standard.

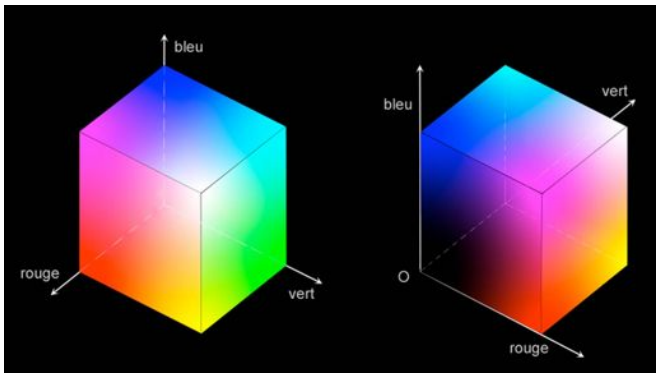
La CIE (Commission Internationale de l'Eclairage), la société savante en charge de ces questions, a tranché en 1931 :

- les trois couleurs primaires devraient être quasi monochromatiques à 700 nm (rouge), 546,1 nm (vert) et 435,8 nm (bleu).
- Elle a également normalisé les puissances qui devaient être émises sur chacune des primaires. C'est indispensable si on veut aboutir à des composantes uniques pour une couleur donnée — sans cette règle, si on s'amusait à doubler la puissance émise sur le rouge sans toucher aux deux autres projecteurs, il faudrait alors diviser par deux la composante chromatique rouge. La règle choisie n'a rien d'évident et nous en dirons un mot un peu plus loin ; au préalable, il faut préciser un peu les choses sur le triangle de Maxwell.

3.6 L'espace tridimensionnel des couleurs et le triangle de Maxwell

A priori, pour visualiser l'ensemble des couleurs et leurs trois paramètres, il faut une représentation tridimensionnelle. L'idée la plus simple est de prendre trois axes rouge , vert bleu dans l'espace. Chaque composante allant de 0 à 100%, on va occuper un cube si les axes sont orthogonaux — ou un prisme à faces parallèles si on a choisi des axes obliques —, et on

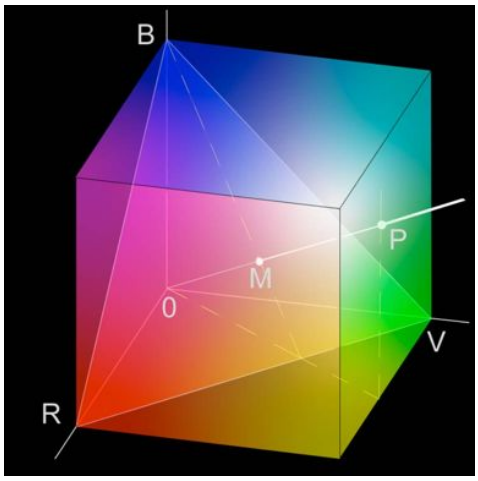
va naturellement colorier chaque point de ce volume par la couleur dont les composantes sont les coordonnées de ce point. Le cube prend des couleurs et la figure suivante montre le résultat sous deux orientations différentes :



La figure de droite est obtenue avec une rotation de 90° autour d'un axe vertical.

Chacun sommet correspond à des primaires à 0 ou à 100%, c'est-à-dire aux couleurs primaires (rouge, vert, bleu), secondaires (jaune, magenta et cyan) et aussi au blanc et au noir. Les trois faces les plus lumineuses sont celles vues ci-dessus à gauche, celles qui partent du sommet blanc. Les trois autres contiennent le sommet noir et ont donc des couleurs plus sombres. Bien entendu, le cube est opaque et on ne voit pas les couleurs internes ; pour accéder à celles-ci, il faudrait procéder à des coupes — c'est une difficulté inhérente à toute représentation tridimensionnelle.

Peut-on simplifier les choses ? Si on pouvait évacuer la notion de luminosité pour ne retenir que les informations de couleur pure (teinte et saturation), on devrait aboutir à une représentation à deux dimensions bien plus commode à manipuler. Or justement, dans ce cube, pour tous les points sur une demi-droite issue de l'origine telle que OP dans la figure ci-contre, on passe bien du noir (en O) au ton le plus lumineux (en P, à la sortie du cube), mais les composantes chromatiques restent proportionnelles entre elles, comme si on augmentait d'un même facteur la puissance sur les trois primaires ; par conséquent cette information de « couleur pure » doit être la même. Peut-être n'en était-on pas trop sûr, peut-être a-t-on simplement voulu préciser le concept, on a inventé le nouveau terme de *chromaticité* pour décrire cette propriété partagée par tous les points de cette demi-droite.



Pour donner une représentation visuelle simple de cette nouvelle propriété, on peut considérer que tous les points de la droite OP précédente sont bien représentés par son intersection M avec le triangle RVB (construit à partir des couleurs primaires à intensité maximale), en ce sens que ce point M permet de reconstruire cette droite et donc tous les points qui partagent cette chromaticité. *Le triangle RVB permet ainsi de représenter toutes les chromaticités* : c'est le triangle de Maxwell. Ne reste plus qu'à associer une couleur au point M pour visualiser cette chromaticité, parmi toutes celles du segment OP. On aurait pu choisir celle du point M dans le cube, mais il est plus joli de prendre la couleur la plus lumineuse possible, celle du point P. En d'autres termes, *le triangle de Maxwell est une projection conique à partir du point 0 des trois faces du cube qui partent du sommet blanc*.

Bien entendu, on peut faire un peu de « vraies » math par dessous (on en a fait déjà un peu, mais sans le dire). Les nostalgiques des maths modernes auront reconnu dans le triangle de Maxwell *l'ensemble quotient* de l'ensemble des couleurs du cube *modulo* la relation d'équivalence de même chromaticité, cette chromaticité étant définie par le triplet des trois quantités réduites

r = %R / (%R + %V + %B)
v = %V / (%R + %V + %B)
b = %B / (%R + %V + %B)

telles que $r+v+b = 1$, mais bien avant l'irruption des maths modernes, on savait que ce triplet correspond précisément aux coordonnées barycentriques du point M par rapport au sommets du triangle, telles que

r **MR** + v **MV** + b **MB** = 0,

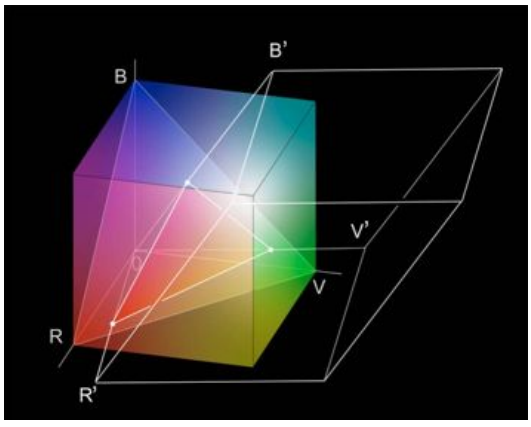
ou encore que r = aire (MVB) / aire (RVB), v = aire (RMV) / aire (RVB) et b = aire (RVM) / aire (RVB), les aires des triangles étant comptées positivement ou négativement selon qu'on tourne dans le sens positif ou négatif en passant d'un sommet à l'autre. Ou encore, dans le repère constitué par les vecteurs **BR** et **BV** et l'origine au point B, le point M a des coordonnées r et v.

Remarque

Cette chromaticité correspond davantage à un intermédiaire mathématique qu'à la notion recherchée de couleur pure. On verra que celle-ci est plutôt représentée par les composantes a et b du système LAB. Or, on peut expérimenter dans le sélecteur de couleur de Photoshop, en cochant le bouton « L » du groupe TSL et en déplaçant le curseur central pour modifier la luminosité sans changer la chromaticité. On constate que cela peut modifier fortement ces composantes a et b — on peut rapprocher cette remarque des réserves que nous avions faites sur la stabilité de la sensation de couleur quand on faisait varier la puissance de l'illuminant au §2.5

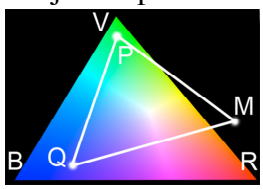
3.7 Deux propriétés importantes du triangle de Maxwell

Tout d'abord, ce triangle n'a sa forme traditionnelle de triangle équilatéral que si on a fait le choix standard de trois axes orthogonaux pour le rouge, le vert et le bleu dans la représentation tridimensionnelle des couleurs. On peut très bien choisir des axes obliques ; le « cube » des couleurs devient alors un prisme à faces parallèles et le triangle de Maxwell peut prendre n'importe quelle forme.



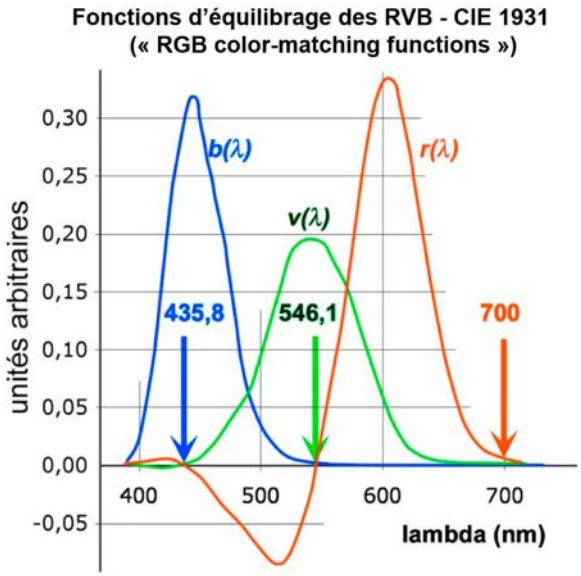
Une autre propriété. Nous avons vu que toutes les couleurs reproductibles dans une expérience de synthèse trichrome pouvaient se représenter par les points d'un cube, par exemple celui de la figure ci-contre. On peut ensuite positionner n'importe quelle couleur dans la figure (qu'on puisse la recréer ou non à l'aide des primaires initiales), puisqu'on peut toujours lui accorder des composantes chromatiques. Si on prend trois de ces couleurs, R', V' et B' comme nouvelles couleurs primaires pour refaire de la synthèse trichrome, toutes les couleurs qu'on va pouvoir ainsi reproduire seront à l'intérieur du prisme construit à partir des arêtes OR', OV' et OB' et leurs chromaticités seront dans le triangle découpé par ce prisme dans l'ancien triangle de Maxwell.

En termes plus simples, sans nous embarrasser des constructions tridimensionnelles et en restant dans le triangle de Maxwell initial, si les chromaticités du deuxième jeu de primaires correspondent à trois points M, P et Q (qui ne sont pas forcément à l'intérieur du triangle initial), toutes les couleurs qu'on pourra former avec ce nouveau jeu de primaires correspondront à l'intérieur du triangle MPQ.



Remarque : il y a une entourloupe mathématique assez subtile dans les raisonnements précédents. Il faut admettre que l'espace tridimensionnel des couleurs constitue bien un *espace vectoriel*, ce qui ne va pas de soi (loi, ou plutôt hypothèse, de Grassmann)

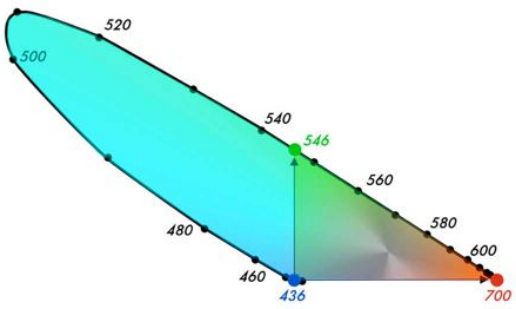
3.8 Les couleurs de l'arc-en-ciel (spectrum locus)



La CIE en 1931 ne s'était pas seulement préoccupée de définir une référence pour les primaires à utiliser : ses chercheurs avaient surtout travaillé à caractériser la couleur des ondes monochromatiques — en termes plus poétiques, les couleurs de l'arc-en-ciel. Ces travaux ont été conclus par une tabulation officielle des composantes chromatiques $\underline{r}(\lambda)$, $\underline{v}(\lambda)$ et $\underline{b}(\lambda)$ de ces ondes par rapport à ces primaires « 1931 », et par la représentation graphique ci-contre.

Il faut bien comprendre que de nombreuses équipes ont participé à ces mesures et que cette tabulation officielle est une sorte de moyenne de ces mesures. Bien noter que ces courbes impliquent les puissances relatives bien précises spécifiées par le modèle de 1931 sur les trois primaires : si on doublait la puissance sur le rouge sans toucher aux primaires verte et bleue, il faudrait diviser de moitié la composante $\underline{r}(\lambda)$ sur le rouge.

Le point le plus marquant est la partie négative de la courbe $\underline{r}(\lambda)$ entre les primaires verte et bleue. Les autres courbes ont aussi des parties négatives, mais qui ne se voient pas beaucoup à l'échelle de la figure. En fait, il y a toujours l'une des composantes qui est négative : *les couleurs de l'arc-en-ciel sont toutes en dehors des couleurs reproductibles avec les trois primaires utilisées*.



Cela se voit clairement dans la figure ci-contre, où on est parti d'un triangle de Maxwell en forme de triangle rectangle (pour de simples raisons de commodité de tracé). La courbe sur laquelle se placent ces couleurs de l'arc-en-ciel, appelée *spectrum locus*, est tout entière en dehors du triangle. Les graduations indiquent les longueurs d'onde en nanomètres. Comme les trois primaires sont des ondes monochromatiques, cette courbe

passe par les sommets du triangle de Maxwell, mais on voit surtout qu'elle en déborde très largement sur la gauche. Il y a aussi un débordement sur la droite entre les primaires rouge et bleue, mais trop faible pour être perçu à l'échelle de la figure.

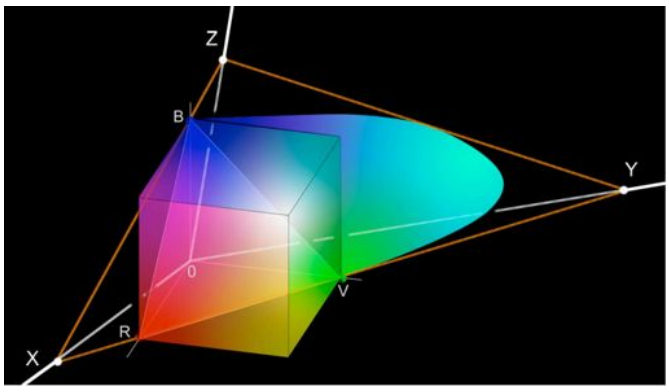
Cette figure appelle plusieurs commentaires :

- La forme de cette courbe et la façon dont elle sort du triangle de Maxwell sont imposées par les tables officielles de la CIE.
- *Comme toutes les couleurs visibles sont des combinaisons de ces ondes élémentaires, leurs chromaticités se placent toutes à l'intérieur de la zone colorée.*
- Il ne faut pas se laisser abuser par le large débordement de la figure et croire que « beaucoup » de couleurs ne seront pas synthétisables à partir de ces primaires RVB-1931. En effet, le nombre de couleurs (discernables) pour un petit élément de cette figure varie énormément d'un endroit à un autre.
- On peut se demander pourquoi on n'a pas choisi la primaire verte autour de 510 nm, car le triangle ainsi formé aurait été bien plus grand dans la figure, et on aurait raté bien moins de couleurs. Ce n'est pas sûr. On aurait aussi perdu des jaunes et des verts, et puis, à cause de la remarque précédente, il n'est pas certain qu'on aurait globalement gagné.
- Le *spectrum locus* ne s'arrête pas pile sur les primaires rouge et bleue à 700 et 436 nm. Les mesures habituelles au spectromètre vont un peu au-delà, de 380 nm jusqu'à 730 nm, mais on ne les a pas reportées dans la figure.

3.9 Les primaires virtuelles du modèle CIE-1931 et les composantes XYZ

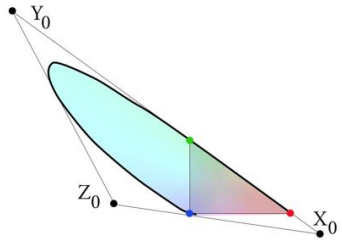
L'épopée du modèle CIE-1931 ne s'arrête pas là. Les chercheurs de l'époque étaient très embêtés face à l'impossibilité de faire rentrer toutes les couleurs visibles dans le triangle de Maxwell, quelles que soient les longueurs d'onde choisies pour les couleurs primaires. Il y a toujours des couleurs avec une ou deux composantes chromatiques négatives.

Puis germa une idée bizarre : pourquoi s'obstiner à caractériser les couleurs en termes d'une possible reconstitution directe de ces couleurs ? Si on abandonne l'idée que changer les primaires demande de reconstruire tout un appareillage pour refaire une nouvelle synthèse trichrome, on peut concevoir ce changement de primaires d'une manière abstraite, comme un simple changement d'axes dans l'espace tridimensionnel des couleurs. La figure suivante schématise le raisonnement. On y voit le « cube » des primaires RVB et son triangle de Maxwell, avec son spectrum locus et son gros débordement du côté des cyans. Dans ce plan du triangle de Maxwell, on construit un nouveau triangle (en rouge) qui englobe tout le spectrum locus ; il y a bien sûr de multiples façons de s'y prendre, mais la CIE a évidemment fixé un choix précis. Les trois sommets étant tous à l'extérieur du spectrum locus, il n'y a pas de couleur réelle qui leur corresponde (on parlera donc de *couleurs virtuelles*) mais ils définissent bel et bien trois axes OX, OY et OZ à partir desquels

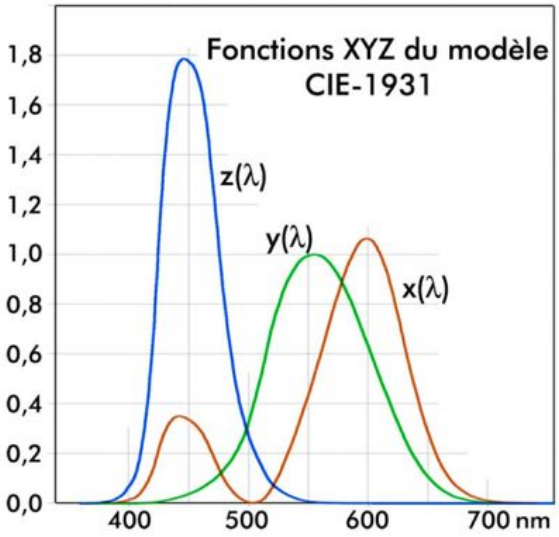


on peut repérer n'importe quel point de cet espace — et notamment ceux qui correspondent aux couleurs visibles.

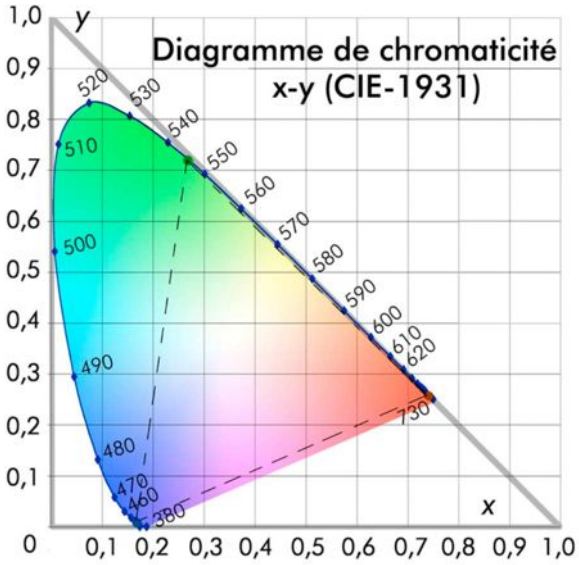
La figure ci-contre, tracée à l'échelle, montre les chromaticités autour du triangle de Maxwell que nous déjà rencontré pour les primaires RBV du modèle CIE-1931. Les « chromaticités » des nouvelles primaires sont évidemment virtuelles. On explique plus loin comment le point Y_0 a été choisi ; nous ne savons pas exactement comment ont été choisis les deux autres ; ça ne se voit pas à l'échelle de la figure, mais la droite Y_0Z_0 n'est pas tangente au spectrum locus mais passe très légèrement à l'extérieur.



Bref, passer des anciennes composantes chromatiques RVB aux nouvelles XYZ n'est qu'une question de changement d'axes, une question élémentaire pour les mathématiciens. Les nouvelles composantes sont tout simplement des combinaisons linéaires des anciennes avec les coefficients indiqués par la CIE. La figure suivante montre ce que deviennent les composantes des ondes monochromatiques sur les nouveaux axes ; il n'y a évidemment plus de partie négative.



On peut ensuite redéfinir une chromaticité par rapport à ces nouveaux axes (avec x = X/(X+Y+Z), etc), puis reconstruire un triangle de Maxwell et retracer le spectrum locus. On obtient la figure suivante, qu'on reverra à maintes reprises lorsqu'on fera des comparaisons entre tel ou tel espace colorimétrique.



Le triangle de Maxwell est tracé en gris, sous la forme d'un triangle rectangle isocèle. Le spectrum locus est complètement à l'intérieur (on a fait ce qu'il fallait pour ça, n'est-ce pas ?) ; on l'a gradué en longueurs d'onde de 380 nm à 730 nm. Le triangle en pointillé correspond aux primaires RVB du modèle CIE-1931.

Cette nouvelle représentation rend moins dramatique le débordement du spectrum locus dans le cyan, mais, comme nous l'avons dit, interpréter ce débordement en nombres de couleurs est très hasardeux et tout autant dans cette nouvelle figure qu'auparavant.

3.10 La composante Y et la valeur tonale des couleurs (luminance).

La *luminance* d'un éclairement correspond à la sensation d'intensité visuelle perçue par l'œil ; c'est un mot savant qu'on a introduit pour échapper à l'ambiguïté du mot *luminosité* qu'on utilise dans trop de contextes différents. Les peintres parlent aussi de *valeur tonale* ou de *gris naturel,* c'est à dire de la densité du gris qu'ils utiliseraient pour faire un dessin en noir et blanc.

Ce qui suit va sans doute être difficile à suivre si vous n'avez vraiment aucune culture mathématique ; dans ce cas, admettez au moins ce résultat, que *les primaires virtuelles du modèle CIE-1931 ont été choisies de manière à ce que la composante Y d'un rayonnement soit précisément cette luminance*.

Tout comme pour l'étude des composantes RVB, on a cherché à quantifier cette notion et on a comparé les luminances de rayonnements de même puissance mais avec des distributions spectrales variées ; à nouveau on a été amené à constater qu'il y avait une relation linéaire entre ce spectre et la luminance — en d'autres termes, que la luminance globale était la somme des luminances des ondes élémentaires qui constituaient ce rayonnement. Le problème fondamental était donc d'étudier la luminance des ondes monochromatiques.

Le problème expérimental était nettement plus difficile que l'étude de la synthèse trichrome — peu ou prou, il s'agit de comparer des sensations avec les lumières fort différentes — et on a proposé de nombreuses méthodes. La figure ci-contre rapporte les résultats de six méthodes différentes ; il y a évidemment une certaine dispersion mais aussi un accord global autour d'une courbe en cloche (attention à l'échelle logarithmique de la figure) avec son maximum à $\lambda = 0.555$ μm. Or, ce genre de courbe rappelle fortement la courbe $\underline{v}(\lambda)$ vue plus haut (§ 3.8, composante chromatique verte des ondes monochromatiques dans le modèle RVB-1931), à ceci près que celle-ci n'a pas son maximum au bon endroit et qu'elle est un peu négative par moment. Qu'à cela ne tienne ! Le maximum se déplace en ajoutant une pincée de $\underline{r}(\lambda)$ et les zones négatives se comblent en ajoutant un zeste de $\underline{b}(\lambda)$. La CIE, dans son modèle 1931, a décidé

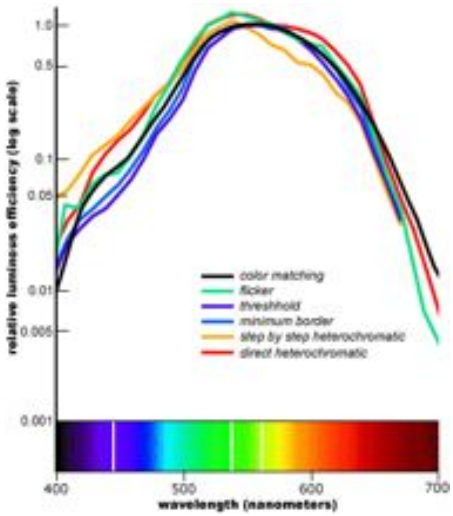


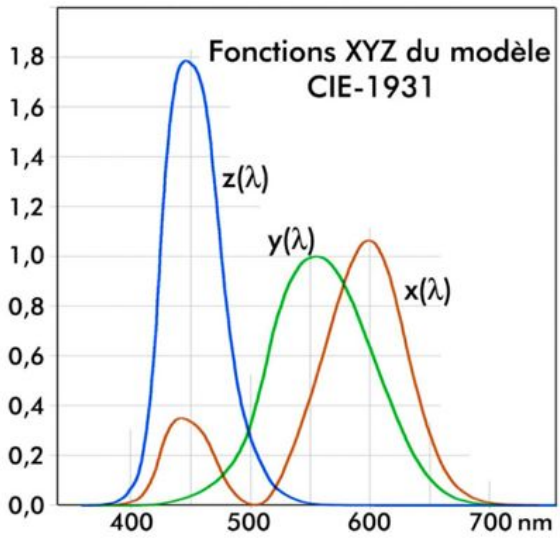
Figure attribuée à Wyszecki & Stiles, Color Science, 1982, d'après le site www.handprint.com/HP/WCL/color1.html (chercher « passel of photopic » dans la page

- que ce serait cette nouvelle fonction qu'on prendrait comme luminance des ondes monochromatiques,
- et que cette combinaison linéaire serait reprise dans le choix des nouveaux axes XYZ, de telle sorte que la composante Y d'un rayonnement serait précisément sa luminance.

Remarque. Il semble finalement que la courbe de luminance $\underline{v}(\lambda)$ imposée par la CIE soit un peu pessimiste autour de l'extrémité bleue du spectre visible, mais tant pis ! La théorie des couleurs contient beaucoup d'empirisme et d'approximations, mais elle est confortée par son succès pratique même. On verra plus loin l'intérêt de disposer de la luminance parmi les composantes chromatiques

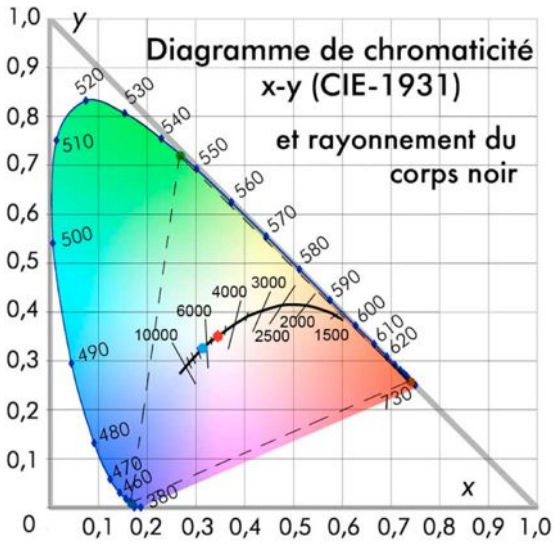
3.11 Obtention des tristimulus XYZ pour un rayonnement quelconque

Un rayonnement quelconque est une superposition d'ondes élémentaires monochromatiques. Chacune de ces ondes va apporter ses propres composantes x(λ), y(λ) et z(λ) (rappelées ci-contre) à la construction des composantes XYZ globales. En d'autres termes, si on disposait de filtres rouge, vert, bleu avec des courbes de transmission correspondant aux courbes de la figure, les puissances détectées après la traversée de ces filtres donnerait directement ces XYZ (à un coefficient multiplicatif près).



3.12 Les couleurs du corps noir.

Nous avons expliqué ce qu'est le corps noir au §2.8. Par simple curiosité, on peut analyser la couleur qu'il émet en fonction de sa température et la placer dans le diagramme précédent des chromaticités. Nous obtenons la courbe ci-après, graduée en degrés Kelvin ; les points rouge et bleu correspondent respectivement à 5000 K et 6500 K, deux températures que nous reverrons à maintes reprises dans les applications pratiques de la théorie.



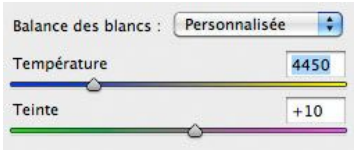
On peut remarquer que cette courbe passe pratiquement par le «blanc» du modèle CIE-1931. Par définition, le «blanc» d'un système de synthèse trichrome s'obtient avec les trois primaires à 100% ; le fait que ces primaires soient ici virtuelles ne change rien. En conséquence, on a X=Y=Z pour ce «blanc» et donc une chromaticité x=y=1/3. Dans le graphique, ce point est pratiquement sur la courbe du corps noir à 5500 K.

C'est une coïncidence, car on ne s'est absolument pas préoccupé de corps noir quand on a construit le modèle CIE-1931. En réalité, cette notion de «blanc» est très relative et c'est pourquoi nous avons mis des guillemets.

Nous avons déjà dit que ce rayonnement de corps noir est une référence naturelle pour la description des sources de lumière. La lumière du jour en est très proche, avec des températures variant de 4000 à 7000 K selon les moments et la météo du jour (§2.8). Mais il y a d'autres sources lumineuses, qui émettent des lumières sensiblement différentes, et il était

normal de chercher à les rapporter à ce rayonnement de corps noir. Cela a conduit à la notion de *température de couleur corrélée* (CCT), la température pour laquelle la lumière émise par un corps noir serait la plus proche possible de la lumière étudiée. Dit ainsi, cela paraît simple ; dans les faits, le sens à donner à l'expression « la plus proche possible » est plutôt ésotérique ; disons simplement que les lumières de même CCT se placent sur les traits inclinés portés dans la figure.

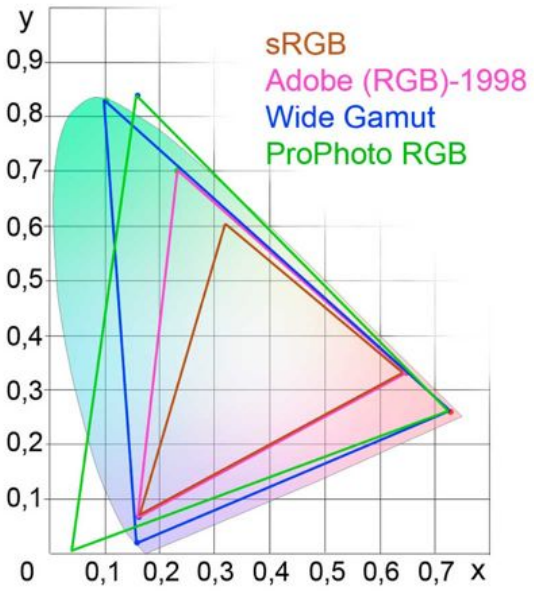
On côtoie ces mystères de la CCT chaque fois qu'on fait le réglage de la balance des blancs dans *Camera Raw* (ou équivalent) : on cherche alors à retrouver la chromaticité de l'éclairage de la scène. On a un réglage principal pour la température de couleur qui provoque un déplacement global des couleurs selon un axe jaune-bleu (visible sur la courbe précédente quand on se déplace de 7000 à 3000 K) et un réglage secondaire magenta-vert qui correspond à une sortie de la courbe du corps noir.



> Rappelons qu'avoir une chromaticité de corps noir ne signifie rien sur la qualité d'une source d'éclairage. Ce qui compte pour le confort visuel (et celui du photographe) est une bonne restitution des couleurs et cela implique un minimum de régularité de l'ensemble du spectre de la lumière émise (cf §2.6)

3.13 Quelques espaces colorimétriques pratiques.

Les composantes RVB sont abondamment utilisées pour le codage des couleurs dans les images numériques, mais pas avec les primaires du modèle CIE-1931. On utilise plutôt d'autres systèmes conventionnels appelés *espaces colorimétriques* ou *profils colorimétriques* (ou encore *profils ICC*) dont les noms sont bien connus, comme *sRGB*, Adobe RGB-1998, etc. Ces profils sont définis dans les standards internationaux de l'ICC (International Color Consortium), l'organisme qui a pris la suite de la CIE ; quatre de ces profils sont cités dans la figure ci-dessous. Ce sont des systèmes de synthèse trichromes comme les autres ; pour les décrire, il faut spécifier les couleurs et les puissances relatives de leurs trois primaires.



- On peut définir les trois primaires par leurs composantes XYZ : à un coefficient multiplicatif près, cela spécifie complètement la couleur et la puissance relative sur chacune d'entre elles. Pour tous ces profils standard, ces puissances sont choisies de telle manière que le « blanc » (ce qu'on obtient en mettant les trois primaires à 100%) soit une couleur de corps noir, soit à 5000K, soit à 6500 K.
- Ces composantes XYZ permettent de déterminer les chromaticités des primaires et donc de tracer les triangles dans la figure ci-contre. A noter que la donnée des chromaticités seules ne permet pas de remonter aux XYZ ; on a besoin d'ajouter la chromaticité du point blanc.

- La définition de ces profils standard ne se limite pas à la description des primaires utilisées. Elle contient aussi des *règles de gamma,* sur lesquelles nous reviendrons plus tard, qui décrivent comment on encode les valeurs numériques des composantes chromatiques à partir des proportions %R, %V et %B.

Soulignons que n'importe lequel de ces espaces permet de représenter n'importe quelle couleur, mais au prix éventuel de composantes RVB « non physiques », c'est-à-dire négatives ou supérieures à 100%. Dans l'utilisation pratique, ces composantes non physiques sont écrêtées à 0 ou à 100% et les couleurs correspondantes ne sont pas correctement représentées. On dit que ces couleurs sont *hors gamut*, le gamut étant l'ensemble des couleurs reproductibles dans cet espace (on a éprouvé la nécessité de créer un mot spécifique parce que le mot « espace » était déjà pris)

On peut se demander pourquoi on n'en est pas resté aux primaires de 1931 et pourquoi on a introduit des espaces comme le *sRGB* avec des *gamuts* nettement plus petits. C'est de l'histoire très récente et je n'en connais pas tous les éléments. Parmi les facteurs qui ont joué, citons :

— L'adéquation à l'état de l'art en matière d'images en couleurs: le *sRGB* est né en 1996, en tant qu'espace correspondant aux couleurs qu'on savait reproduire avec les écrans de l'époque (dans le monde Windows ; en même temps, dans le monde MacIntosh, naissait le profil *Colormatch* avec des primaires voisines mais d'autres règles de gamma)

— A l'époque, toutes les images étaient numérisées en mode 8-bit, avec 256 niveaux sur chacune des composantes RVB. Or, l'obtention de dégradés de couleur bien fluides exige que la différence entre deux couleurs distinctes d'un niveau ne soit pas perceptible ; cela devient difficile si les primaires sont trop écartées les unes des autres et qu'on veuille des dégradés qui aillent de l'une à l'autre (il faut alors passer en mode 16-bit, avec 65535 niveaux sur chacune des composantes)

On peut alors se demander pourquoi on n'en est pas resté à ces profils à « petit » gamut. Le profil *Adobe RGB 1998* a été popularisé par Adobe avec la version 5 de Photoshop en 1998-1999 ; on peut y voir une tentative de gamut plus large (qui inclurait certaines couleurs nouvellement accessibles sur certaines imprimantes), mais pas trop (afin de pouvoir continuer à travailler en mode 8-bit).

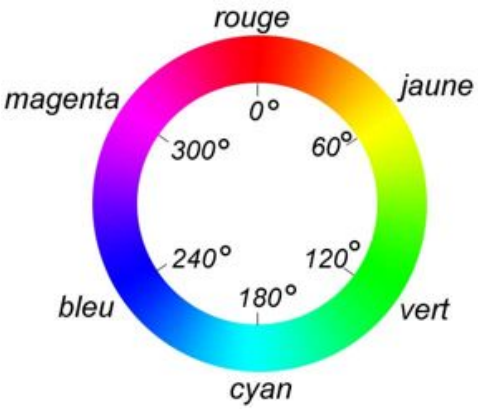
Les profils à très grand gamut (*WideGamut* ou *ProPhoto*) ont été d'abord conçus comme des profils d'archivage afin de perdre le moins possible des couleurs d'une diapositive argentique lors des numérisations, mais, les progrès techniques aidant, on les propose parfois maintenant pour le travail courant, afin de ne rien perdre des couleurs enregistrables dans les capteurs. Bien entendu, le travail dans de tels profils exige des numérisations en mode 16-bit.

> Tant qu'à faire, on peut se demander pourquoi on n'utilise pas carrément les primaires XYZ du modèle CIE-1931. C'est qu'un autre facteur intervient, l'efficacité du codage. Le processus de numérisation fait qu'on ne peut enregistrer qu'un nombre fini de couleurs différentes ; or, quand on utilise des primaires virtuelles, une certaine partie du gamut correspond à des couleurs non physiques, qui sont autant de couleurs qui ne servent à rien dans le codage. La fraction ainsi perdue dans ProPhoto est considérée comme acceptable, mais pas celle qu'on perdrait avec les primaires CIE-1931 virtuelles.

Pour plus de détails sur ces profils standard, se reporter à l'annexe A.

3.14 Le cercle chromatique

Ce cercle, représenté ci-contre, n'est qu'une déformation du contour du triangle de Maxwell ; c'est une représentation des couleurs les plus vives qu'on puisse obtenir à partir de trois primaires RVB données. On en parle souvent comme s'il s'agissait d'une entité autonome, mais il n'en est rien. Les couleurs qu'il réunit dépendent des trois primaires utilisées ; autrement dit, il dépend de l'espace colorimétrique dans lequel on le construit. Traditionnellement, on place les trois primaires à 120° les unes des autres sur ce cercle — sans qu'il y ait de justification profonde de ce choix.



On se sert souvent de ce cercle pour distinguer les *teintes* entre elles (on reviendra sur cette notion de teinte dans les pages suivantes) en les repérant par leur angle compté à partir du rouge sur le cercle; la figure indique les conventions utilisées dans Photoshop.

4 — La couleur des objets : du système de Munsell au LAB

4.1 Le système de Munsell pour la couleur des objets.

Tout ce qui précède sur la synthèse trichrome portait sur la *couleur des rayonnements*, c'est-à-dire sur la couleur que l'on perçoit quand ce rayonnement tombe sur un diffuseur blanc. On peut évidemment remplacer ce diffuseur blanc par un objet colorié, mais les composantes RVB qu'on va ainsi obtenir vont dépendre fortement de la lumière qui éclaire l'objet et on voit mal comment accommoder ce résultat avec l'intuition psychologique que cet objet a une couleur bien définie.

Or, on a ressenti de longue date la nécessité de pouvoir reproduire exactement certaines nuances, notamment dans l'industrie textile ou dans l'industrie des cosmétiques. C'est par exemple à ce besoin que répond le nuancier Pantone développé dans les années 1950, bien avant l'avènement de la gestion de la couleur. Mais encore bien auparavant et pour les mêmes nécessités, Munsell avait proposé vers 1910 un système permettant de caractériser n'importe quelle couleur.

Ce système est basé sur les trois propriétés psycho-physiologiques que chacun accorde aux couleurs des objets :

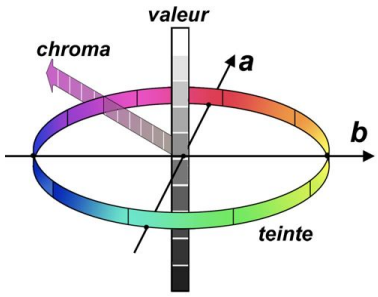
- Chaque couleur est perçue comme plus ou moins sombre : on dit qu'elle a une *valeur* (ou *valeur tonale*) correspondant à sa luminosité, allant de 0 pour le noir à 100% pour un blanc pur. En fait, nous avons déjà rencontré cette notion au §3.10.

- Quand un peintre ajoute du blanc à une couleur, la couleur s'affadit et finit par disparaître si on va assez loin. Il y a donc une notion de vivacité des couleurs. On pourrait parler de *saturation* mais ce mot étant quelque peu ambigu (on l'utilise dans plusieurs modèles mathématiques avec des définitions contradictoires), on préfère parler de *chroma*.
- La troisième dimension des couleurs est leur *teinte*, ce qui fait qu'un rouge n'est pas un jaune, ni un orange, etc.

Dans l'esprit d'un peintre, toutes les couleurs envisageables peuvent donc être obtenues de la manière suivante

— d'abord en collectant les pigments les plus purs et les plus saturés possible. On forme ainsi l'équivalent d'un cercle chromatique
— on les désature progressivement en leur ajoutant du blanc,
— et on les assombrit en leur ajoutant du noir.

Apparemment, on aboutit ainsi à une infinité de couleurs. En pratique, on n'en a pas tant que ça... et on peut même les compter. Il existe une notion de différence ou d'écart « juste perceptible » (*just-perceptible difference*) : on part une couleur donnée et on la modifie très légèrement dans une direction donnée (c.à.d. on lui ajoute un peu de blanc, ou de noir ou un peu d'un pigment différent), et chaque fois on compare avec le ton initial. Au début, on ne fait pas de différence, puis on convient qu'il y a bien une modification perceptible : on a alors atteint cette différence juste perceptible. On recommence alors et autant de fois qu'on le pourra dans cette direction donnée, jusqu'à ce qu'il n'y ait plus de modification possible. On arrive au bout en un nombre étonnamment petit d'étapes, une centaine, par exemple, pour passer du noir au blanc pur. Bien entendu, ce nombre est très approximatif ; quelqu'un de très entraîné et très sensible pourrait en trouver 50% en plus, deux fois plus peut-être, mais certainement pas dix fois plus.



La tâche à laquelle s'était attelé Munsell était d'organiser toutes les couleurs en une sorte d'atlas, une sorte de bibliothèque dûment cotée à partir de laquelle, par simple comparaison, on pourrait attribuer une cote à n'importe quelle couleur, c'est-à-dire un ensemble de trois nombres spécifiant la valeur, la chroma et la teinte. Trois nombres, ça devient trois coordonnées pour une nouvelle représentation abstraite des couleurs. On a choisi le système schématisé ci-contre : des coordonnées cylindriques avec la valeur le long d'un axe vertical et la teinte et la chroma en coordonnées polaires dans le plan de section droite (plus tard, on remplacera ces coordonnées polaires par des coordonnées cartésiennes a et b le long de deux axes perpendiculaires, mais patience...). De la sorte, les teintes se repèrent le long d'un cercle chromatique ; la chroma est nulle sur l'axe des valeurs et elle augmente de plus en plus au fur et à mesure qu'on s'écarte de cet axe.

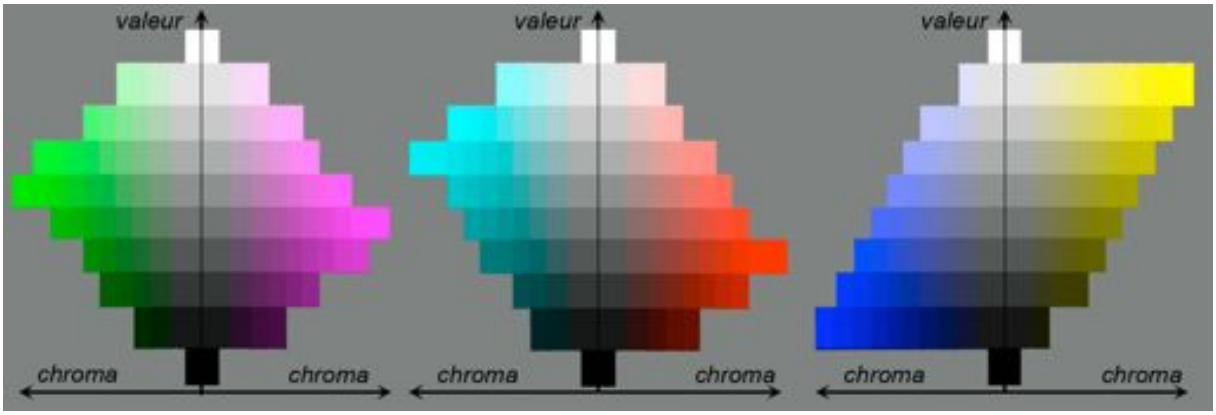
Enfin, Munsell s'était imposé une autre contrainte très importante, dite *d'uniformité perceptuelle* : que les couleurs soient uniformément réparties dans cette représentation. Nous avons vu qu'on peut dénombrer les couleurs ; il fallait que le nombre de couleurs contenues dans un petit domaine de cet espace soit (à peu près) proportionnelle au volume de ce domaine.

Les résultats sont assez surprenants pour le profane.

- Le cercle chromatique n'est pas organisé autour des 3 primaires à 120° les unes des autres, mais autour de deux axes perpendiculaires jaune-bleu et magenta-vert (les axes

a et *b* de la figure précédente). Les couleurs diamétralement opposées restent complémentaires, c.à.d. que leur combinaison donne un gris.

- Et surtout, il n'y a aucune symétrie de révolution dans le volume des couleurs. Dans les demi-plans de teinte donnée, les chromas les plus fortes ne sont pas du tout atteintes pour les mêmes valeurs. La figure ci-après représente schématiquement trois sections de ce volume, dans le plan vert-magenta (axe des *b*), dans le plan cyan-rouge, et dans le plan bleu-jaune (axe des *a*). On a une charte de gris sur l'axe vertical — les tons complètement désaturés —, et la chroma augmente quand on s'écarte de cet axe ; puis le volume s'arrête, là où il n'existe pas de couleur physiquement réalisable qui soit plus saturée encore dans la teinte considérée.



L'atlas de Munsell est toujours commercialisé. Bien entendu, l'illustration précédente n'est qu'une figure de principe, la discrétisation dans l'atlas est beaucoup plus fine et il y a aussi tout un système de repérage qui sert à désigner objectivement les couleurs ; nous n'en dirons rien de plus sinon que l'ensemble est pleinement opérationnel... à tel point que la CIE a absolument voulu tirer quelque chose de ressemblant à partir de ses mesures physiques de composantes RVB.

> On pourrait avoir l'impression que ce système offre une caractérisation absolue des couleurs, comme s'il s'agissait de quelque chose de définitif et d'absolument intangible. On a vu au §2.6 que la réalité est plus subtile ; pour être plus précis quand on se sert de l'atlas de Munsell, il faudrait préciser sous quel éclairage on fait les comparaisons.

Les modèles TSL

On ne confondra pas ce système de Munsell (et le modèle LAB qui va en découler) avec les modèles TSL (pour *Teinte, Saturation, Luminosité*), qui sont de simples déguisements des modèles RVB. Pour plus de détails sur ces modèles, se reporter à l'annexe D.

4.2 Le passage des XYZ à la couleur des objets.

Nous avons déjà dit que la stabilité de la couleur des objets venait de ce que l'œil faisait une comparaison entre la lumière qu'il recevait de ces objets et la lumière ambiante. En ce qui concerne ce qui vient d'un objet, nous avons vu que l'oeil ne retient que trois informations

qu'on peut présenter de différentes façons, l'une d'entre elles étant la donnée des trois tristimulus X,Y,Z. Concernant l'appréciation de la lumière ambiante, on ne sait pas trop comment l'œil se débrouille, mais il est apparemment capable d'apprécier les tristimulus X_W,Y_W et Z_W correspondant à cette lumière ; s'il y a un objet blanc dans la scène, il tirerait directement ces tristimulus de la lumière renvoyée par cet objet.

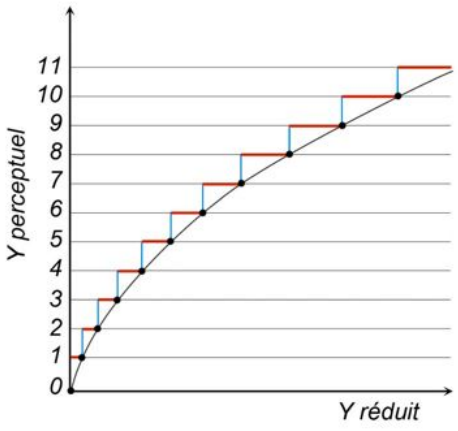
On simule le fonctionnement de l'oeil en formant les tristimulus réduits X/X_W, Y/Y_W et Z/Z_W (en quelque sorte, on fait très littéralement le rapport entre la lumière reçue des objets et la lumière ambiante) et *on fait l'hypothèse que ces rapports sont caractéristiques de la couleur des objets*. On peut être surpris de la simplicité de cette approche, mais elle sera validée a posteriori par le succès de ses applications pratiques.

On conçoit immédiatement que ça marche bien pour la valeur tonale. En effet, par construction même, la composante Y correspond à l'impression de luminosité (cf §3.10) et elle ne peut pas être plus grande que la composante correspondante Y_W de la lumière ambiante ; le rapport Y/Y_W compris entre 0 et 1 semble donc bien un bon candidat pour chiffrer cette notion de valeur.

Par contre, il ne semble pas très évident d'extraire les notions de chroma et de teinte. Cependant, ce n'est pas à ce problème que les chercheurs de la CIE se sont attelés en priorité, mais à la notion *d'uniformité perceptuelle*.

4.3 Une échelle de valeurs avec uniformité perceptuelle

Pour le moment, la valeur tonale est chiffrée par le rapport $y_R= Y/Y_W$ (avec l'indice R pour « réduit »), c'est-à-dire un nombre qui varie de 0 à 1. Quand on étudie les *différences juste perceptibles*, on constate que ces quantum de perception varient beaucoup le long de l'échelle des valeurs ; ils sont très petits pour des valeurs faibles et beaucoup plus grands pour des valeurs élevées. Le principe pour construire une échelle avec uniformité perceptuelle est expliqué dans la figure ci-contre.



On part de deux axes, un axe horizontal pour notre valeur tonale entre 0 et 1 et un axe vertical qui va servir à compter les niveaux de valeur qu'on peut distinguer les uns des autres ; les chiffres portés sur cet axe correspondent précisément à ce décompte. Pour la première valeur qu'on peut différencier du noir, on se place sur la droite « 1 » et on porte en rouge la différence juste perceptible à partir du noir et on marque le premier point. Pour la deuxième valeur, on se déplace vers le niveau « 2 » (segment en bleu) et on porte à nouveau en rouge la nouvelle différence juste perceptible, et ainsi de suite. On construit ainsi la suite des points marqués dans la figure et il ne reste plus qu'à trouver une formule mathématique pour construire une courbe qui passe par tous ces points, l'enfance de l'art pour les chercheurs de la CIE... (et sur laquelle nous jetterons un voile pudique). Par construction même, on aura bien l'uniformité perceptuelle désirée sur l'axe vertical.

4.4 Naissance du modèle LAB

La CIE aurait bien voulu aboutir à un modèle de couleurs avec cette uniformité perceptuelle sur les trois paramètres de couleur et non pas pour la seule valeur tonale. Les études ont duré longtemps, et, bien que l'on ne soit pas alors parvenu à un plein succès, on a finalement arrêté des recommandations en 1976 : on ne gardait que deux modèles en course, le « LUV », qui glisse depuis peu à peu dans l'oubli, et le « LAB », qui a servi de base à la gestion de la couleur.

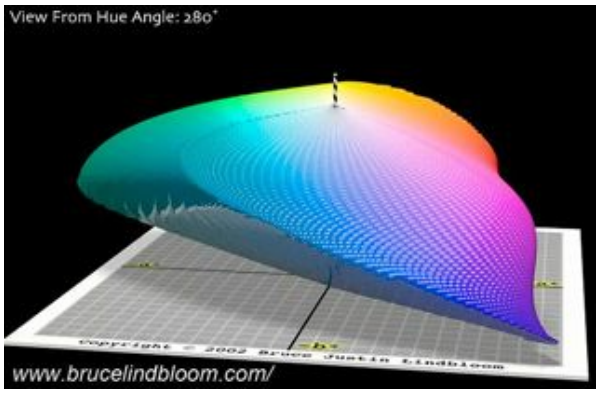
On peut concevoir ce modèle LAB comme un essai de mathématisation empirique du modèle de Munsell, où le couple des coordonnées polaires teinte/chroma est remplacé par le couple de coordonnées cartésiennes *a* et *b*. En cas de succès complet, on aurait bénéficié de l'uniformité perceptuelle attribuée au système de Munsell, mais ça n'a pas complètement marché, soit que le modèle de Munsell n'ait pas été aussi performant sur ce point qu'on le pensait, soit que la mathématisation ait été trop approximative (ou les deux à la fois). Mais comme on n'a rien trouvé de mieux et d'aussi pratique, on en est resté là, et, manifestement, ça marche remarquablement bien. Nous n'en dirons pas plus ici ; les formules de passage des tristimulus réduits aux *L, a* et *b* ne sont pas très compliquées mais elles sont au-delà de l'objet de ce document.

Le *L* est mis pour *luminance* mais c'est bel et bien une mesure de la valeur tonale.

4.5 La discrétisation du modèle LAB et l'ensemble des couleurs possibles

En pratique, en mode 8-bit, les images LAB sont discrétisées avec des *L* entiers allant de 0 à 100, et des *a* et *b* entiers allant de –128 à +127. Cette discrétisation correspond en gros à une nouvelle couleur discernable chaque fois qu'on se déplace d'une unité sur l'un des trois axes.

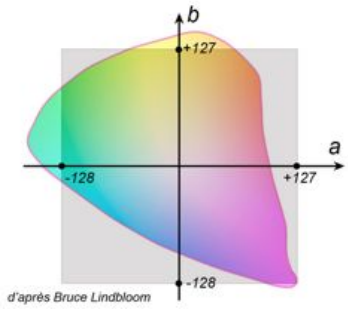
On peut se demander jusqu'où vont les couleurs visibles dans cet espace. La question n'est pas triviale puisque *le spectrum locus* qu'on a invoqué jusqu'ici pour limiter ce domaine ne concerne que des couleurs de rayonnement, et non pas des couleurs matérielles. Bruce Lindbloom a apporté une réponse toute différente, basée sur un calcul brut. On considère tous les spectres de réflectivité possibles ; avec un illuminant donné, chacun d'entre eux se traduit par une couleur donnée et donc un certain point dans l'espace Lab. On constate finalement que tous ces points se répartissent dans un volume fini, dont on voit une illustration ci-contre (la grille qu'on voit sur le plan de base est formée de carrés 10×10 en *a* et *b*)



(Voir http://www.brucelindbloom.com/index.html?LabGamutDisplayHelp.html)

La figure montre qu'une grande partie de l'espace LAB ne correspond à rien du tout (autrement dit, coder une image en Lab n'est pas d'une très grande efficacité numérique).

Nota : toutes ces couleurs sont potentiellement possibles en ce sens que chacune d'elles correspond à un spectre de réflectivité physiquement acceptable ; cela ne veut pas dire que toutes existent réellement dans la mesure où les matériaux qui auraient toutes ces réflectivités ne sont pas tous connus à l'heure actuelle ; en conséquence personne n'a pu observer toutes ces couleurs. Certaines d'entre elles exigeraient même des *a* et *b* en dehors de l'intervalle de discrétisation (-128,+127), comme le montre la figure ci-contre, projection du volume précédent sur le plan (*a*,*b*).



4.6 Les delta-E et la précision du travail en LAB

En principe, la discrétisation précédente devrait correspondre à la mise en œuvre de ces différences juste perceptibles, de telle sorte qu'on puisse associer une seule couleur à chaque petit cube de côté unité sur les trois axes, ou bien que le nombre de couleurs séparables dans un volume donné de l'espace LAB soit égal à la mesure de ce volume. Dans les faits, l'uniformité perceptuelle n'est que grossièrement réalisée ; ces nombres sont très discutables mais on les utilise néanmoins à titre indicatif.

Egalement, cette discrétisation donne une idée de la précision qu'il faudrait atteindre pour prétendre maîtriser le travail en couleurs. En général, il y a toujours un écart entre la couleur qu'on voudrait obtenir et celle qu'on saura réaliser ; ces deux couleurs correspondent à deux points distincts de l'espace LAB. Combien de tons différents de couleur peut-on distinguer entre ces deux points ? C'est ce nombre qu'on appelle l'erreur de couleur, ou *delta-E* (ou δE). Si l'uniformité perceptuelle était bien satisfaite, ce *delta-E* serait tout simplement la longueur entre ces deux points. L'idéal serait de toujours travailler avec des erreurs de couleur inférieures à 1 ; en effet, dans ce cas, on ne pourrait pas pouvoir distinguer la couleur ciblée de la couleur réalisée. En pratique, on pourra tolérer des δE de quelques unités, tout juste perceptibles.

Bien entendu, comme l'uniformité perceptuelle n'est pas vraiment atteinte, l'estimation précédente du δE (comme moyenne quadratique des trois écarts ΔL, Δa et Δb) n'est pas totalement satisfaisante et on a cherché des évaluations plus sophistiquées... dont aucune n'a remporté tous les suffrages, ce qui fait qu'elles sont toutes en application à ce jour. Pour éviter les ambiguïtés, on rappelle généralement avec quel modèle on évalue ces *delta-E* ; ainsi, la formulation élémentaire précédente est appelée *delta E-1976* et il existe aussi des *delta E-1994*, *delta E-2000*, *delta E(CMC)*... Les *delta E-1976* ont un énorme avantage de simplicité dans les calculs.

4.7 La variation des couleurs avec l'éclairage et « l'adaptation chromatique ».

Nous avons dit à plusieurs reprises que la couleur des objets variait un peu quand on changeait leur illuminant. Comment appréhender cette variation ? Il s'agit d'une question très importante pour tous les travaux de création et de reproduction d'images en couleur, car on

aimerait bien que les couleurs perçues par le spectateur correspondent au mieux aux couleurs originales, même si la reproduction est examinée sous un éclairage très différent de celui de la scène originale.

On admet que la perception des couleurs et de leur éventuelle variation est bien représentée par les valeurs des composantes Lab et leur éventuelle variation. Ce n'est pas une nouvelle hypothèse, mais une simple réaffirmation que le secret de la couleur des objets se cache dans les trois tristimulus réduits X/X_W, Y/Y_W et Z/Z_W ; les composantes *Lab* ne sont qu'un déguisement mathématique de ces trois quantités.

Dans ces conditions, si on connaît le spectre de réflectivité de l'objet et les spectres de l'éclairage initial et de l'éclairage final, on peut tout calculer : le spectre de lumière réfléchie avant et après, les XYZ pour l'objet et pour les deux éclairages, les tristimulus réduits, et finalement, les *Lab*. Mais le problème ne se présente pas comme ça dans la pratique.

Dans la vie réelle, on n'aura pas accès au spectre de réflectivité, mais seulement à la couleur sous l'éclairage initial. Comment prévoir la couleur d'arrivée ? Par exemple, on a pris une photo sous un éclairage à 4000 K et on veut la reprendre à l'ordinateur avec un moniteur calibré à 6500 K (c'est-à-dire le blanc d'un éclairage à 6500 K) ; l'ordinateur doit alors montrer ce qu'aurait été cette scène sous un éclairage à 6500 K. C'est tout le problème de *l'adaptation chromatique* et nous le rencontrerons à plusieurs reprises dans la chaîne graphique. Comme on ne peut pas remplacer tout un spectre par seulement trois composantes chromatiques, il n'y a pas de réponse rigoureuse possible mais seulement des approximations plus ou moins précises.

On trouve des indications sur les erreurs ainsi commises dans le site de Bruce Lindbloom, dans le cas des 18 couleurs d'une charte ColorChecker, avec les formules utilisées dans Photoshop (et dans les appareils numériques, espérons-le, car ce sont les plus précises). Par exemple :

- passage de 5000 K à 6500 K : delta-E moyen de 1.5, maximum de 3.2
- passage de 2800 K à 6500 K : delta-E moyen de 5.7, maximum de 11.2

Les chiffres de la première ligne sont très acceptables (cf §4.6), mais beaucoup moins ceux de la deuxième ligne... et pourtant on sera bien obligé de les accepter, faute de mieux, quand on voudra travailler sur des images prises en lumière artificielle.

(http://www.brucelindbloom.com/index.html?ChromAdaptEval.html)

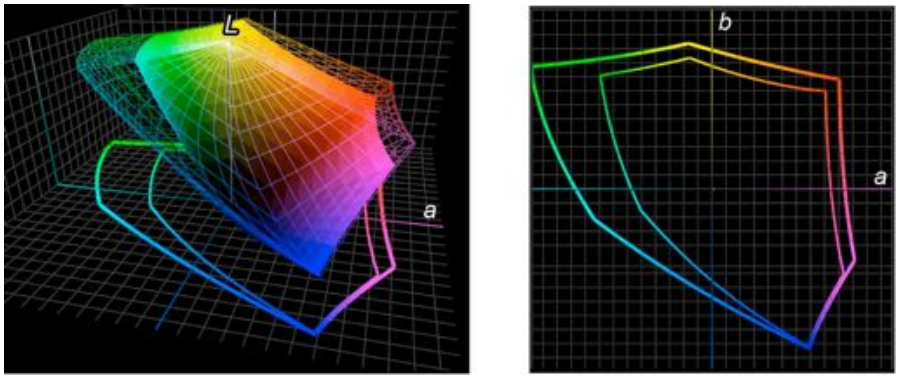
4.8 La représentation en LAB des espaces colorimétriques

Les espaces colorimétriques (sRGB, Adobe-98, etc.) servant avant tout à représenter des couleurs de rayonnement, le rapport avec l'espace LAB n'est pas immédiat. Rappelons qu'en théorie, on pourrait représenter n'importe quel rayonnement dans ces espaces, mais au prix parfois de composantes chromatiques « non physiques » si on sort du *gamut*, c'est-à-dire des RVB négatifs ou supérieurs à 100%. Dans leur emploi pratique, on écrête ces composantes non physiques à 0 ou 100%, ce qui fait que ces rayonnements hors gamut ne sont pas correctement représentés.

Maintenant, si une scène est éclairée par une lumière de corps noir avec la même température de couleur que le point blanc de cet espace, la comparaison des rayonnements renvoyés par les objets de cette scène et de ce point blanc permettent de remonter aux couleurs de ces

objets, et cela pour n'importe quelle couleur d'objet. Si ces rayonnements réfléchis sont bien dans l'espace considéré, il n'y a aucun problème : *toutes les couleurs de rayonnement reproductibles dans un espace colorimétrique peuvent être interprétées comme des couleurs d'objet d'une scène éclairée par la lumière de point blanc de cet espace*. Mais il se peut aussi que les rayonnements réfléchis soient hors gamut ; dans ce cas, on ne peut plus les représenter dans cet espace (dans leur utilisation habituelle) et les couleurs correspondantes ne peuvent pas être lues correctement. Le domaine dans l'espace LAB des couleurs correctement représentées est naturellement appelé le gamut de couleurs de cet espace colorimétrique.

La figure suivante montre l'aspect de deux de ces gamuts, pour les profils sRGB et Adobe-98. A gauche, on voit ces gamuts en 3D (surface solide pour sRGB, fil de fer pour Adobe-98) ; à droite, la représentation plane est une simple projection du gamut sur le plan *ab*. La figure confirme que Adobe-98 est plus grand ; son volume est de 1 200 000 « couleurs » contre 833 000 seulement pour sRGB — nous mettons des guillemets encore une fois pour rappeler que ce n'est un nombre indicatif, basé sur l'uniformité perceptuelle très approximative du modèle LAB. A titre de comparaison, on compterait 2 380 000 couleurs possibles dans le volume du gamut présenté au §4.5.



La forme de ces gamuts est évidemment beaucoup moins simple à interpréter que les triangles de chromaticité ; notamment, le déplacement d'une couleur primaire à une autre ne se fait plus sur un segment de droite

4.9 Le gamma des espaces colorimétriques

Nous avions annoncé que la définition des espaces colorimétriques standard comprenait des *règles de gamma* qui n'avaient rien à voir avec l'ensemble des couleurs manipulables dans ces espaces mais plutôt avec la façon de coder les valeurs numériques des composantes RVB. Nous aurions pu les présenter plus tôt, mais avoir expliqué la discrétisation dans LAB nous aidera à mieux situer la portée de ces règles.

> Par ailleurs, ce codage est de la cuisine mathématique. Il est difficile de parler de cuisine sans parler de recette ; on nous pardonnera la petite formule qui suit.

Pour le moment, nous n'avons rien dit de précis sur ce codage et nous en sommes toujours à désigner les composantes chromatiques par les fractions de puissance %R, %V et %B avec lesquelles les trois primaires sont excitées. Bref, en pratique, dans la plupart des profils, ces composantes sont codées par des valeurs numériques *R, V* et *B* telles que :

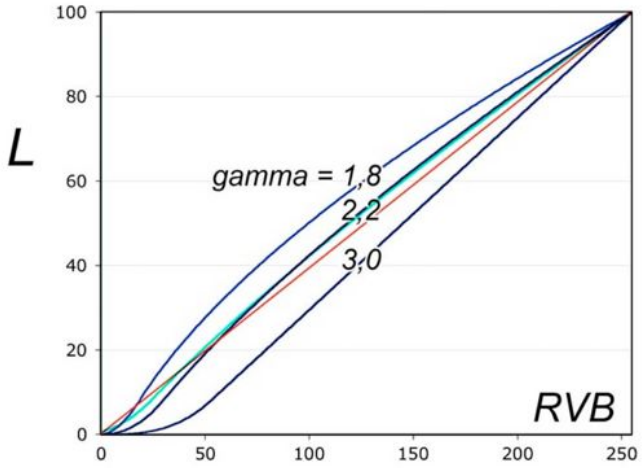
$$\%R = (R / max)^{gamma}$$

où *max* est le maximum de la valeur codée (255 pour une numérisation sur 8 bits) et où *gamma* est le « gamma » utilisé dans le profil.

Historiquement, on a utilisé deux valeurs de *gamma,* 2.2 dans le monde Windows et 1.8 dans le monde MacIntosh. Ces choix reposent autant sur des traditions empiriques que sur des considérations théoriques sur le fonctionnement de l'œil ou sur la physique des tubes cathodiques disponibles à l'époque et on a autant justifié un choix que l'autre, ce qui fait qu'il y a toujours eu une certaine confusion autour de ce gamma.

http://www.poynton.com/notes/colour_and_gamma/GammaFAQ.html

En fait, ce choix n'a pas beaucoup d'importance. On peut maintenant présenter les choses tout autrement, en disant qu'on s'arrange pour que les valeurs numériques *R=V=B* d'une gamme de gris soient le plus possible proportionnelles à la luminance *L* (la sensation de luminosité perçue par l'œil. La figure suivante visualise les variations de *L* en fonction des *RVB* pour différentes valeurs de *gamma,* le but étant de coller le plus possible à la droite en rouge : on voit que l'optimum est sensiblement 2.2. Va pour 2.2 !



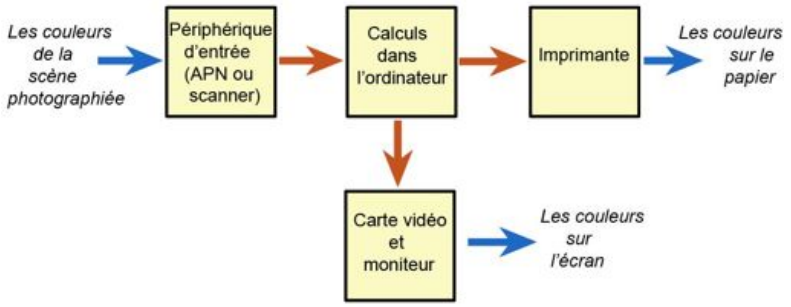
Il est cependant possible de faire mieux en compliquant un peu la formule de passage. C'est ce qu'on a fait pour le profil sRGB et on obtient alors la courbe en vert. En compliquant encore un peu plus la formule, on aurait pu obtenir exactement la droite rouge ; pourquoi a-t-on reculé, mystère... (c'est cependant bel et bien ce qu'on a fait pour le profil ECI RGB v2 — voir l'annexe A sur les profils standard.)

En fait cela n'a aucune importance... à partir du moment qu'on n'oublie pas dans quel profil colorimétrique on travaille. C'est la règle de base de la gestion de la couleur, mais on est bien obligé de constater qu'elle ne rentre que très lentement dans la vie de tous les jours, notamment sur l'internet où la plupart des navigateurs de ce début 2011 dans le monde Windows ne tiennent encore aucun compte de ces profils. Ils ne feront donc aucune différence entre les trois gammes de gris suivantes, qui associent les mêmes *RVB* à trois profils différents :

La différence entre le sRGB et Adobe RGB-1998 est très faible, sauf pour les tons sombres qui sont un peu plus foncés avec le deuxième. Le ColorMatch est un peu l'analogue de sRGB pour le monde MacIntosh, avec à peu près le même gamut mais un *gamma* de 1.8 qui conduit à un rendu général beaucoup plus clair. Soulignons que ces différences de rendu sont normales, car si ces trois gammes de gris utilisent les mêmes *RVB*, leurs trois profils différents leur donnent des significations différentes ; l'ignorance de ces profils mène à des confusions regrettables.

5 — La chaîne graphique et la gestion de la couleur

5.1 Organisation générale



On voit ci-contre un schéma général de la chaîne graphique, depuis la prise de vue jusqu'à la sortie sur l'imprimante. Les flèches bleues figurent la circulation des couleurs à l'entrée et à la sortie de la chaîne et les flèches rouges la circulation des données numériques. Le principe général de la gestion de la couleur est que ces données doivent partout représenter les couleurs de la scène photographiée, autant que faire se peut ; autrement dit, on ne fait jamais circuler des RVB sans les accompagner de l'information sur le profil colorimétrique qui leur donne une signification précise en termes de couleurs. De cette façon, si on n'a pas modifié les couleurs dans le traitement informatique, on devrait pouvoir obtenir les mêmes couleurs en sortie qu'à l'entrée, et, si on a délibérément modifié ces couleurs, on devrait avoir (à peu près) les mêmes couleurs sur la sortie papier et sur l'écran du moniteur.

Il faut noter que le moniteur ne crée pas de couleurs au sens propre, mais seulement des rayonnements que l'oeil convertit en couleurs s'il a un blanc de référence (sinon, il ne peut que comparer des sensations de couleur entre deux rayonnements sans vraiment pouvoir les qualifier de manière précise). Ce blanc est naturellement le « point blanc » fourni par le moniteur quand les trois RBV sont tous trois à 255. En pratique, on le spécifie par une température de couleur.

Les précautions oratoires, conditionnel ou « à peu près », sont là pour rappeler que l'objectif de constamment contrôler les couleurs se heurte ici et là à des impossibilités physiques. Si l'imprimante ne peut pas fournir telle ou telle couleur, aucune astuce informatique ne permettra d'obtenir cette couleur sur le papier. En plus, pour les coupeurs de cheveux en quatre, rappelons que les couleurs varient (un peu) avec les illuminants, et que, potentiellement, il y en a trois différents dans le schéma précédent :

- L'éclairage de la scène photographiée
- Le point blanc du moniteur.
- L'éclairage sous lequel on observe la sortie imprimée.

Le photographe ou son logiciel sont informés des deux premiers et le traitement numérique fait l'adaptation chromatique nécessaire pour passer de l'un à l'autre. Nous l'avons vu, cette adaptation n'est pas parfaite mais on ne peut pas l'éviter — et ce n'est pas la peine de nous attarder sur ce point car on verra que l'appareil numérique risque de faire souffrir encore davantage les couleurs à l'entrée dans la chaîne. Par contre, les conditions d'observation d'une sortie imprimée sont très variables et on ne pourra pas espérer avoir le même accord de couleurs avec l'écran quand on regarde le papier sous le soleil ou sous un éclairage tungstène. Il est donc nécessaire de définir un standard d'observation : *le consortium ICC recommande d'observer les sorties imprimées sous l'éclairage normalisé D50 (lumière solaire moyenne*),

proche d'une lumière de corps noir à 5000 K. Ce n'est que dans ces conditions que les couleurs sur le papier seront vraiment celles qu'on aura traitées dans l'ordinateur... si l'imprimante a été correctement étalonnée, bien entendu.

Il y a une adaptation chromatique chaque fois qu'on passe d'un profil colorimétrique à un autre avec une température de couleur différente, et chacune crée de petites erreurs sur la couleur. Il conviendrait de les éviter autant que possible. Comme on termine obligatoirement sur le papier à 5000 K, l'idéal serait donc de rester partout à 5000 K une fois sorti de l'appareil photo ou du scanner... mais ça ne correspond pas aux conseils qu'on peut glaner ici ou là :

— on conseille généralement de régler le moniteur à 6500 K. A mon avis, à tort ; nous reviendrons sur ce point dans le paragraphe suivant.

— Les espaces de travail de loin les plus utilisés, sRGB ou Adobe-RGB1998, ont tous deux des points blancs à 6500 K. Il n'y a malheureusement guère d'alternative offerte au photographe dans la mesure où les appareils numériques ne proposent rien d'autre, à moins de passer par des images raw et de les convertir en ProPhoto RGB ; celui-ci est bien à 5000 K, mais son gamut gigantesque impose de travailler en mode 16-bit. On trouvera dans l'annexe A quelques commentaires sur les différents profils utilisables dans la pratique et des suggestions pour contourner ce problème.

Nota : certains logiciels permettent d'étalonner les imprimantes en vue d'une observation des tirages sous un éclairage différent du D50 — comme une lumière tungstène ou bien un éclairage fluorescent —, mais cela soulève des complications dans la comparaison papier/écran ; nous n'en parlerons pas davantage dans ce document.

5.2 Comparaison entre les sorties papier et l'affichage à l'écran.

Lors de la mise au point d'une image, on se fie évidemment à ce qu'on voit sur l'écran et il est naturel de demander ensuite à l'imprimante de bien respecter les nuances ainsi introduites dans l'image. C'est l'un des buts des procédures de la gestion de la couleur, mais ce n'est pas gagné d'avance et il y aura inévitablement une période de vérification du processus d'impression pendant laquelle on essaiera de comparer l'affichage à l'écran aux sorties sur le papier.

Une comparaison précise ne peut se faire que si

— la lumière d'ambiance est suffisamment faible ;
— la feuille imprimée est placée à proximité de l'écran ;
— cette feuille est éclairée avec la même température de couleur que le blanc de l'écran ;
— la lumière éclairant le papier doit avoir le meilleur rendu des couleurs possible (un IRC au minimum de 90%, bien mieux si possible)
— la puissance de l'éclairage est telle que le blanc du papier soit aussi lumineux que le blanc de l'écran ;
— et, bien entendu, que si l'éclairage du papier ne bave pas sur l'écran.

L'optimum est de se mettre à 5000 K pour la lumière d'examen (afin de voir correctement les couleurs sur le papier) et donc de se mettre aussi à 5000 K sur l'écran. L'alternative communément proposée est de se mettre à 6500 K, mais

— on n'observe plus les couleurs du papier sous leur éclairage nominal. Côté écran, la petite déviation des couleurs qui en résulte est rattrapée en théorie par l'adaptation chromatique. Celle-ci n'est pas parfaite mais les erreurs sont acceptables (le delta-E moyen de 1,5 est négligeable, et les pointes supérieures à 3 doivent être tolérables);
— pendant longtemps on a manqué d'une solution pas trop chère pour un éclairage d'examen à 6500 K qui soit aussi performante en termes de rendu des couleurs que ce qui existait à 5000 K ; du coup, les couleurs perçues sur le papier n'étaient pas exactement ce qu'elles auraient dû être.

Le « pas trop cher » démarre tout de même autour de 150-200€, prix pour lequel on peut trouver une lampe équipée d'une excellente ampoule Solux à 5000 K avec un CRI de 99%. En fait, ce ne sont pas les ampoules ou les tubes qui sont chers, mais les lampadaires dans lesquels on va les monter. En ce début 2011, on trouve maintenant des lampes de bureau dans lesquelles on peut monter des tubes Just Normlicht à 6500 K avec un CRI de 98 %, le tout montant autour de 200€. Evidemment, si on a un budget (beaucoup) plus étoffé, on se tournera vers des stands d'examen plus professionnels comme ceux du site https://shop.colourconfidence.com/

A noter que ce n'est pas en comparant le blanc du papier et le blanc de l'écran qu'on jugera du bon accord entre l'éclairage d'examen et la température de couleur de l'écran. En effet, les papiers ont souvent une petite dominante qui perturbera les couleurs les plus claires, dominante bleutée si on a ajouté un azurant pour « blanchir » le papier ou dominante chaude pour les papiers pur coton.

Si on n'a pas le minimum d'équipement nécessaire pour examiner les couleurs imprimées, il vaudra mieux ne pas être trop exigeant sur la similitude entre ces couleurs et celles à l'écran.

Soulignons l'importance d'équilibrer la puissance de l'éclairage d'examen à la luminosité de l'écran. Les non-initiés (à la gestion de la couleur) laissent trop souvent leurs écrans sur des réglages d'usine avec une luminosité beaucoup trop forte et ils se plaignent ensuite que leurs impressions sont trop sombres.

5.3 Le choix de la température de couleur pour l'écran

Ce choix découle directement du paragraphe précédent. En pratique, il faut choisir entre 6500 ou 5000 K. Si on dispose d'un bon équipement d'examen des tirages on se mettra à la température de couleur de cet équipement, avec une préférence pour 5000 K, sinon ça n'a pas beaucoup d'importance.

Un seul argument ferait pencher la balance pour 6500 K, mais encore faudrait-il le vérifier : comme on serait plus proche du fonctionnement nominal de l'écran, son affichage des couleurs *après étalonnage* serait plus fidèle. Mais cela ne vaudrait que pour des écrans d'entrée de gamme, pas pour des écrans de qualité (plus chers, hélas) ; ces derniers fonctionnent très bien à 5000 K.

5.4 Les profils des périphériques de sortie (moniteur, imprimante)

Dans la chaîne graphique, les « périphériques » sont tout ce qui tourne autour de l'ordinateur et qui convertit les signaux numériques en couleurs ou vice versa : l'appareil photographique, le scanner, le moniteur, l'imprimante. Leurs *profils colorimétriques* (ou *profils ICC*, ou *profils*

tout court) décrivent la relation entre ces couleurs et les signaux RVB fournis ou lus par ces appareils et ils sont établis de manière empirique ; autrement dit, *on les mesure*.

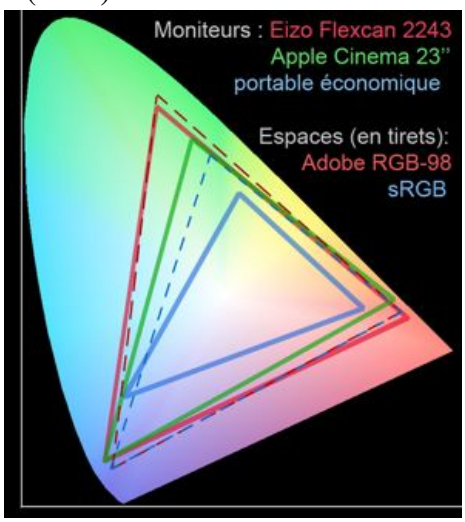
Pour les appareils de sortie (moniteur, imprimante), on envoie une suite de composantes RVB connues sur l'appareil, on analyse les couleurs correspondantes créées sur l'écran du moniteur ou sur le papier imprimé et on déduit des tables d'interpolation permettant de passer des unes aux autres ; ces tables constituent le cœur de ces profils ICC.

Les couleurs matérielles se mesurent avec un spectrophotomètre. La figure à droite montre le spectro Eye-One commercialisé par la société X-Rite. Il s'alimente depuis l'ordinateur par un cordon USB ; il illumine la zone sous la tête de lecture et il fait une analyse spectrale de la lumière réfléchie sur 36 points de mesure entre 390 et 730 nm. Les mesures débutent par un étalonnage où on analyse un blanc de référence constitué par une pastille d'oxyde de titane ; la comparaison entre le spectre réfléchi par ce blanc et celui réfléchi par un objet donne le spectre de réflectivité de l'objet.

On peut utiliser ce spectrophotomètre pour caractériser un écran, mais il est moins coûteux d'utiliser une sonde. Il s'agit d'un colorimètre qui mesure directement les composantes XYZ en analysant la lumière émise par l'écran à travers trois filtres dont les courbes de transmission simulent les fonctions x(λ), y(λ) et z(λ) du modèle CIE-1931 (§3.9). La comparaison de ces composantes avec celles du blanc de l'écran donne les différentes couleurs émises.

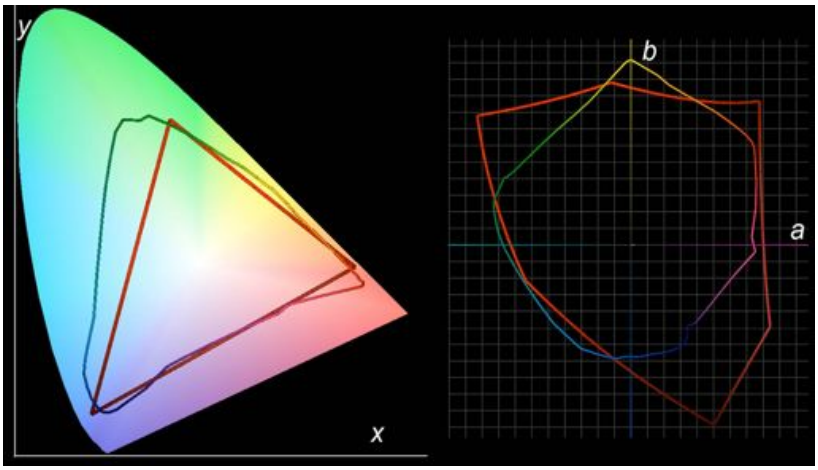
On peut se procurer d'excellents profils pour son imprimante sans avoir soi-même un spectrophotomètre et sa suite logicielle. Par contre, il est très important de disposer d'une bonne sonde pour étalonner son écran. Nous donnons quelques détails pratiques sur ces opérations dans sections 6 (étalonnage des écrans) et 7 (obtention des profils d'imprimante) de ce document.

On s'intéresse évidemment beaucoup aux gamuts de ces profils. Pour les moniteurs, comme ce sont essentiellement des dispositifs de synthèse trichrome, les gamuts sont complètement définis par les chromaticités des trois primaires et on se contente généralement du graphique *x-y* ci-contre. Les gamuts des moniteurs y apparaissent comme des triangles qu'on compare généralement aux gamuts des espaces sRGB ou Adobe-RGB(1998).

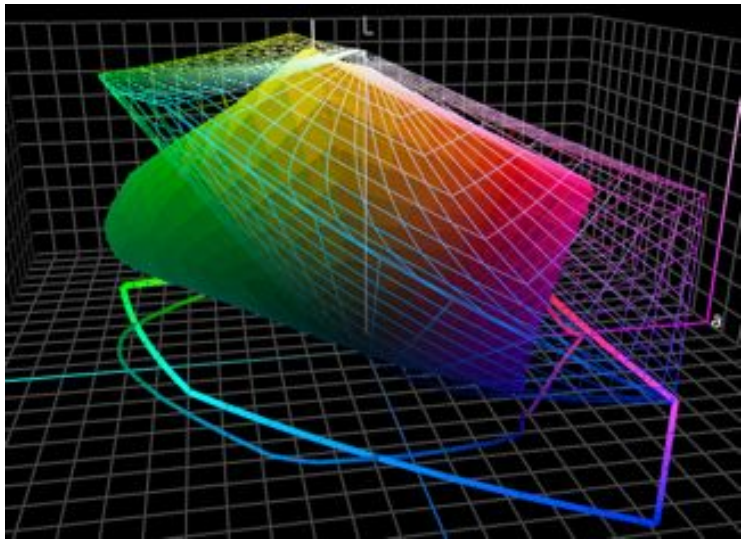


La figure montre schématiquement trois grands types de moniteurs : les plus récents (et plus coûteux), qui recouvrent l'essentiel de l'espace Adobe RGB-98, comme le Eizo Flexcan 2243, des moniteurs plus anciens avec un gamut comparable à sRGB (le Cinema 23'' dans la figure) et des écrans de certains portables économiques à petit gamut, bien plus petit que sRGB et avec lesquels il n'est pas trop conseillé de préparer ses images (attention, il y a aussi d'excellents portables avec de bien meilleurs écrans) .

Les profils d'imprimante sont beaucoup plus compliqués. Les représentations planes peuvent être très trompeuses. Par exemple, la figure ci-dessous propose deux comparaisons contradictoires entre le gamut d'un moniteur Apple Cinema 23''(en rouge) et celui d'une imprimante Epson 3800 sur un papier Epson Traditionnel. Sur la gauche (graphique de chromaticités), à peu de choses près, on conclurait que le gamut de l'imprimante englobe complètement celui du moniteur, et même qu'il en déborde nettement du côté des verts/cyans. Sur la droite, où on voit une projection sur le plan *ab* en LAB, on conclurait tout à l'opposé que c'est le gamut du moniteur qui contient celui de l'imprimante et même qu'il en déborde largement par endroits.

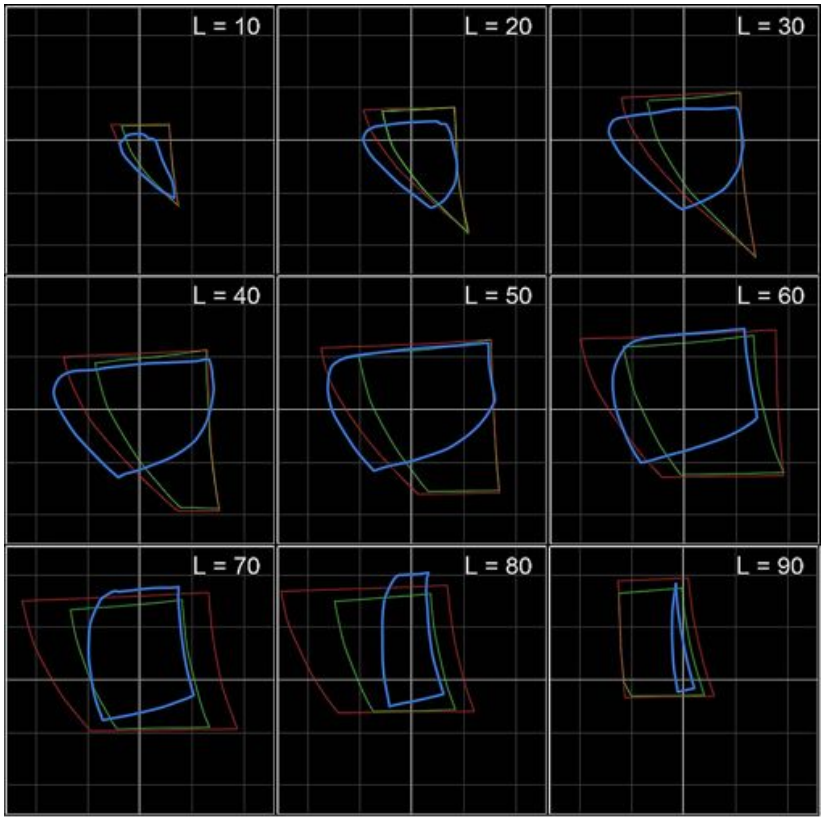


En fait la représentation en chromaticités n'a pas beaucoup de sens ; vraisemblablement, on ne la propose que par habitude, parce que c'est celle qu'on utilise le plus souvent pour les moniteurs. Les choses sont un plus rationnelles à droite, en ce sens qu'on y compare vraiment deux espaces de couleurs (et non pas un espace de couleurs et un espace de rayonnements), mais en réalité, c'est en tridimensionnel qu'il faut examiner les choses. La figure ci-dessous montre ce qui se passe dans l'espace LAB pour l'imprimante précédente (volume solide en couleur) et pour le moniteur (volume en fil de fer). On voit clairement qu'il y a des couleurs de l'un qui ne rentrent pas dans l'autre, et vice-versa.



Nota : les courbes sur le « plancher » de la figure sont précisément celles de la figure précédente, la projection des deux gamuts, à la déformation près due à la perspective 3D de la visualisation.

On est parfois réservé sur l'aspect qualitatif et peu précis de ces visualisations en perspective. En fait, on aura rarement besoin de plus de précision dans la pratique mais certains logiciels offrent toutefois de faire des coupes dans ces volumes comme dans la figure suivante :

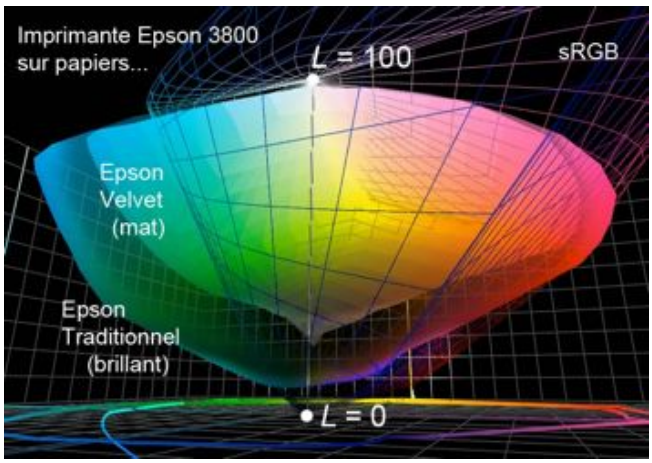


Coupes à *L* constant du gamut de l'imprimante précédente (en bleu), comparé aux gamuts des espaces sRGB (en vert) et Adobe RGB-98 (en rouge).

On note que le gamut de cette imprimante déborde même de Adobe RGB-98

Une autre information très précieuse de ces visualisations 3D est que le gamut des imprimantes ne démarre pas du noir complet et ne monte pas jusqu'au blanc pur. La profondeur du noir dépend essentiellement de la nature du papier, mat ou brillant ; les papiers mats ne descendent pas au-dessous de $L = 15\text{-}20$ tandis que les papiers brillants peuvent descendre au-dessous de $L = 6$, comme on peut le voir dans la figure suivante.

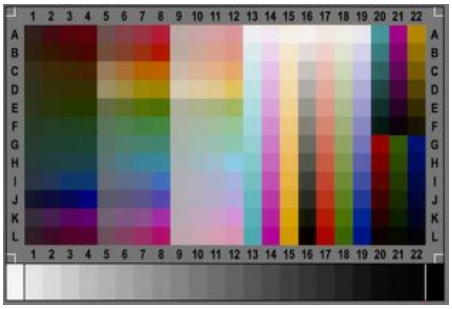
Vue rapprochée et en contre-plongée des gamuts d'un papier brillant (volume extérieur, semi-transparent) et d'un papier mat (volume intérieur) sur une Epson 3800 ; le solide en fil de fer est une partie du sRGB. On voit que les gamuts d'imprimante ne descendent pas au noir complet $L = 0$ et qu'ils ne montent pas jusqu'au blanc pur L=100.



5.5 Les profils des périphériques d'entrée (scanner, appareil photo)

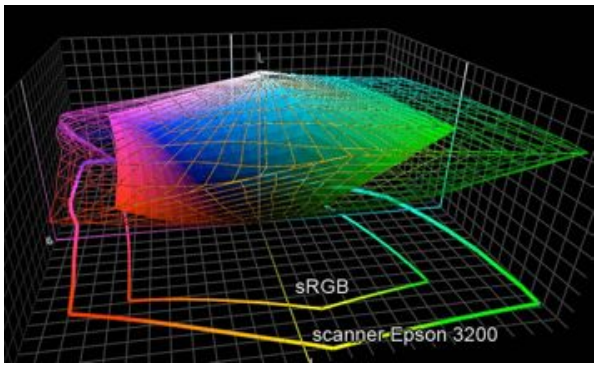
Les périphériques d'entrée sont les organes qui convertissent la couleur des objets en signaux numériques : le scanner ou l'appareil photographique. Leurs profils colorimétriques décrivent la relation entre ces couleurs et les signaux *RVB* fournis par ces appareils et ils sont établis de manière empirique.

Le cas des scanners est plus simple. Le principe consiste à examiner l'image d'une charte contenant des couleurs précalibrées, comme la charte IT8 ci-contre. A partir de ces couleurs (connues à l'avance en termes de composantes *Lab*) et des *RVB* correspondants fournis par l'appareil, on va construire une table d'interpolation qui permettra ensuite de traduire n'importe quelle couleur en composantes *RVB* : ce sera le profil du scanner.



On pourrait penser à appliquer la même méthode aux appareils photo numériques, mais on se heurte à une difficulté de principe : les capteurs de ces appareils ne mesurent pas les couleurs mais les rayonnements renvoyés par ces couleurs, et ces rayonnements dépendent fortement de l'éclairage de la scène photographiée. Ce problème est éliminé dans un scanner parce que l'éclairage est alors fourni par le scanner lui-même et que c'est toujours le même. Il en sera tout autrement pour un appareil photo, sauf si on travaille en studio avec une maîtrise complète de l'éclairage. Il y a aussi une difficulté pratique : ces chartes IT8 sont fabriquées à partir de papiers glacés et il faut absolument un éclairage à 45° sans aucune réflexion vers l'appareil (d'où à nouveau la nécessité du studio).

En fait, il y a un problème plus fondamental : les *RVB* dont nous parlons devraient être des composantes brutes de capteur, sans aucun traitement dans l'appareil. En effet, même dans un scanner, ces composantes brutes sont généralement retouchées dans l'appareil même et finalement converties vers des *RVB* « nets » dans un espace colorimétrique standard, sRGB ou autre, qui réduisent ipso facto le domaine des couleurs traitables à ce qui peut entrer dans cet espace. Or, comme on le voit ci-contre, le scanner peut très bien reconnaître un domaine bien plus étendu de couleurs ; on a donc tout intérêt à rester avec ces *RVB* bruts. Le problème se pose différemment dans les scanners et dans les appareils photo.



- Dans les scanners, il y a généralement une option « aucune correction de couleur » qui annule toute modification de ces *RVB*.
- Dans les appareils photo, tout bonnement, ces *RVB* bruts n'existent pas ! En effet, l'image est numérisée à travers un filtre mosaïque de Bayer, et, sur chacun des pixels, une seule des 3 composantes est effectivement numérisée ; les deux autres sont calculées par interpolation à partir des valeurs relevées sur les pixels voisins et il y a plusieurs façons de s'y prendre. C'est le dématriçage, déjà un début de traitement graphique, et il n'y a aucun moyen d'arrêter le traitement juste à ce point, qu'on s'y prenne dans l'appareil photo ou dans le logiciel de traitement des images RAW. Dans

les deux cas, il s'y ajoute toute une suite d'opérations (balance des blancs, niveaux, contraste, etc.). Le mieux qu'on puisse faire est de figer le paramétrage de toute cette suite d'opérations et de considérer les *RVB* qui vont en sortir comme des *RVB* bruts. On peut alors relever un profil colorimétrique pour l'appareil (ou l'ensemble appareil + logiciel RAW), mais ce profil n'aura de sens que si on travaille avec cette même suite de réglages internes.

Depuis quelques années (2008), on parle aussi de *profils DNG* pour les appareils numériques ; il ne s'agit pas des profils colorimétriques dont nous en sommes en train de discuter, mais c'est un sujet connexe sur lequel nous reviendrons plus loin.

5.6 Utilisation des profils de périphériques

Rappelons que ce sont les informations de couleur que l'on transmet quand on va d'un élément à un autre dans la chaîne graphique. Elles sont généralement codées avec des composantes *RVB* accompagnées du profil colorimétrique ad hoc qui permet de passer de ces *RVB* aux couleurs ou inversement.

- A l'entrée, l'idéal serait que le scanner ou l'appareil photo envoient des *RVB* bruts dans l'ordinateur et qu'on connaisse le profil ICC de ces appareils. Très généralement, ce profil ne sera pas transmis avec ces données ; à l'entrée dans l'ordinateur, ce sera à l'utilisateur de le retrouver et de l'ajouter, de l'*attribuer*, à ces données *RVB*.

  On pourrait continuer le traitement graphique dans ce profil, mais en général on fera suivre cette attribution par une conversion de ces données dans un espace standard comme sRGB ou Adobe RGB(1998) afin de simplifier les calculs ultérieurs.

  Si on ne dispose pas des *RVB* bruts, il faudra faire confiance aux données de couleur fournies par le scanner ou à l'appareil photo sous la forme de données *RVB* dans quelque espace colorimétrique standard. Dans l'ordinateur, on pourra poursuivre le travail dans cet espace ou bien passer dans un autre de son choix au moyen d'une conversion.
- Le moniteur est chargé d'afficher les bonnes couleurs de l'image en cours de mise au point. Dans l'ordinateur, ces couleurs sont codées par des *RVB* au sein de quelque espace colorimétrique ; ce ne sont pas ces *RVB* qu'on envoie au moniteur mais les couleurs elles-mêmes. Le travail est fait par le système d'exploitation (MacOS, Windows, Linux) en temps réel; il reçoit ces couleurs et, connaissant le profil ICC du moniteur, il en déduit les nouveaux *RVB* qu'il faut envoyer au moniteur.
- Pour l'imprimante, c'est généralement au logiciel graphique qu'on demandera de faire un travail similaire : à partir des couleurs de l'image et de la connaissance du profil de l'imprimante, il devra construire de nouveaux *RVB* à envoyer sur l'imprimante afin que celle-ci imprime précisément ces couleurs sur le papier.

  Depuis quelques années, ce travail peut toutefois être effectué au sein même du pilote d'imprimante en lui demandant gérer les couleurs au moyen du profil ICC de l'imprimante (sous MacOS, cela s'appelle l'option ColorSync). L'utilisateur doit indiquer où se trouve ce profil dans l'arborescence du système d'exploitation. Bien entendu, cela ne peut fonctionner que si l'application peut envoyer les couleurs exactes à l'imprimante et non pas simplement les RVB de l'image. Toutefois, en ce début 2011, comme il n'y a pas moyen de préciser le mode de rendu à utiliser (on verra ces modes un peu plus loin, au §5.8), cette façon de faire n'est pas à conseiller.

5.7 Retour sur l'attribution d'un profil colorimétrique

Le paragraphe précédent a mis l'accent sur deux fonctions essentielles de tout système de gestion de la couleur : l'attribution d'un profil ICC et la conversion d'un profil dans un autre. Nous allons y revenir et découvrir de nouvelles interrogations.

On fait une *attribution de profil* quand on se trouve en présence de *RVB* nus, sans profil associé. En effet, il faut bien décider de la traduction en couleurs de ces *RVB*, et cela revient à leur associer un profil colorimétrique. Dans cette opération, ces *RVB* ne changent pas, mais les couleurs (qu'on peut voir à l'écran) changeront avec le profil qu'on leur attribuera.

On a aussi souvent un problème d'*attribution implicite* avec les navigateurs Internet. En effet, beaucoup d'images sont envoyées sur Internet sans leur profil pour des questions de poids de fichier — notamment, il faut faire très attention à certains hébergeurs à qui on confie des images et qui suppriment quasiment tout en dehors des composantes *RVB*. D'autres voyagent avec leurs profils, mais de nombreux navigateurs n'en tiennent aucun compte, surtout dans le monde Windows. A quoi correspondent les couleurs qui s'affichent alors sur les moniteurs ? Tout simplement, les *RVB* du fichier seront généralement envoyées telles quelles au moniteur, c'est-à-dire qu'elles s'affichent dans le profil colorimétrique de ce moniteur (qu'on ait relevé ou non ce profil lors d'une procédure d'étalonnage, ce profil existe bel et bien) ; autrement dit, il y a une attribution implicite de ce profil à l'image. C'est évidemment très regrettable si l'auteur a consciemment utilisé un tout autre profil, car les couleurs d'origine ne seront pas respectées. Les dégâts sont minimisés si on a préparé son image dans le profil sRGB, dans la mesure où la plupart des moniteurs ont un profil voisin du sRGB... sauf pour les privilégiés qui disposent des meilleurs moniteurs du moment, qui justement se targuent d'afficher un gamut beaucoup plus grand (voir annexe C pour gérer ce problème).

> Bref, quand on envoie une image sur Internet, la sagesse consiste à la préparer dans sRGB et à y joindre explicitement ce profil ; aussi à ne pas être trop sourcilleux sur les couleurs qui pourront être affichées ici ou là. Sinon, on s'adresse délibérément à une minorité de surfeurs dotés de navigateurs qui respectent la gestion de la couleur — et on s'excuse auprès des autres.
>
> On avait un problème analogue avec Word dans ses versions anciennes (2004 et antérieures) : les images importées dans Word perdaient leur profil original et apparaissaient donc avec le profil du moniteur. Ce problème est réglé avec les versions récentes (2008)

On peut évidemment faire une attribution d'un nouveau profil à une image qui en a déjà un. Cela change ses couleurs, mais si c'est ce que l'auteur souhaite, il n'y a rien à dire !

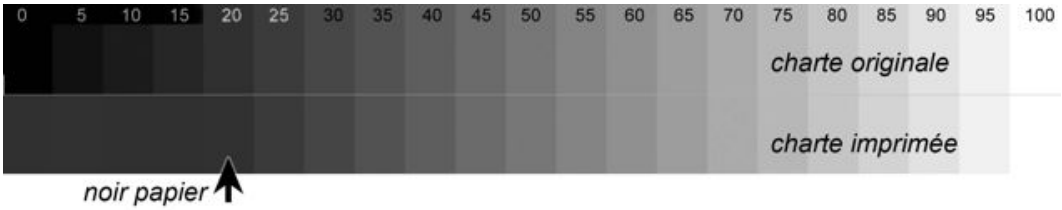
5.8 La conversion d'un profil colorimétrique dans un autre et les modes de rendu

La conversion d'un profil dans un autre est la deuxième fonction de base de la gestion de la couleur. Ce changement de profil modifie les règles de correspondance entre les *RVB* et les couleurs. En principe, on essaie de conserver les couleurs de l'image et ce sont donc ses *RVB*

qui changent ; l'image sur le moniteur ne devrait pas varier. En fait, si le deuxième profil a un gamut plus petit que le premier, il y a forcément des couleurs qu'on va perdre, celles qui sont à l'extérieur du deuxième gamut, et il y a forcément des images qui vont en souffrir.

Ce qui se passe dans les calculs quand on demande une de ces couleurs *hors gamut* (ou *non imprimable*, parce que ce problème se pose généralement pour l'impression), c'est que les formules de passage conduisent à des composantes RVB impossibles, soit supérieures à 255 (en mode 8-bit), soit négatives, et qu'on les remplace par les limites 255 ou 0. La couleur demandée est alors remplacée par une couleur voisine en bord du nouveau gamut ; l'écart n'est pas forcément très grand, mais ce n'est pas la couleur d'origine.

L'effet le plus gênant est ce qui arrive aux tons les plus sombres quand le deuxième gamut ne descend pas jusqu'à *L*=0. Par exemple quand on essaie d'imprimer un noir sur un papier, on obtient un « noir papier » en dessous duquel on ne peut pas descendre en densité. Tous les tons de l'image originale plus sombres que ce noir papier seront imprimés dans ce noir papier, avec le résultat de former des aplats de noirs bouchés généralement peu appréciés. La figure suivante est une simulation de ce qui peut arriver lors de l'impression d'une charte de gris sur un papier mat ayant son point noir (son noir papier) à *L*=20 :



Rien ne pourra faire que l'imprimante fournisse des noirs plus denses et on est obligé de composer avec cette impossibilité. Ce problème est suffisamment important dans la pratique pour que le consortium ICC ait préconisé la politique à suivre. Elle consiste à choisir entre 4 options qu'on appelle *les modes de rendu* (sous-entendu : lors d'une conversion)

- Le mode *colorimétrie relative* : c'est le plus simple, on ne fait rien (et on accepte les aplats). Autrement dit, les couleurs à l'intérieur du gamut de sortie ne sont pas modifiées et les couleurs hors gamut sont rabattues sur la frontière de ce gamut.
- Le mode *perceptif*. Son but est de conserver les rapports de valeurs tonales dans l'image, afin d'éviter la formation de ces aplats. Pour cela, on commence par rabattre les luminosités de l'image de départ dans l'intervalle (*Lmin*, *Lmax*) des luminosités du gamut de sortie, puis on fait la conversion. Evidemment, il n'y a plus de luminosités écrasées lors de cette conversion, mais on a modifié l'image juste auparavant. Il ne faut pas voir cela comme une trahison de l'idéal de la gestion de la couleur — conserver les couleurs exactes coûte que coûte — mais comme une adaptation aux contraintes du support de sortie de l'image.

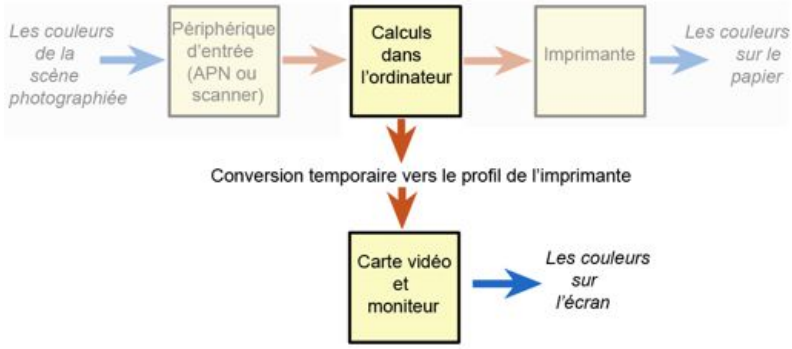
  Le consortium ICC n'a pas précisé comment il convenait de s'y prendre, laissant cette directive à la sagacité des fabricants de profils ICC ; les instructions *ad hoc* sont enfouies dans le fichier de ces profils, mais il s'agit probablement d'une simple règle de trois.

  A noter que ce mode est l'objet d'explications erronées dans la plupart des sites web traitant de la gestion de la couleur, qui invoquent à tort un mécanisme de désaturation pour préserver des rapports de couleur ; ce mode ne modifie que les valeurs tonales, pas les saturations (voir l'annexe B pour plus de détails).

- Le mode *saturation* aurait dû être une sorte de mode dual du mode perceptif, destiné à préserver tant que possible la saturation des couleurs, à charge pour les fabricants de profils ICC de se débrouiller pour ça (voir annexe B); force est de conclure qu'ils n'y sont pas arrivés et que ce mode donne en pratique des résultats très voisins du mode perceptif, sinon les mêmes.
- Le mode *colorimétrie absolue* n'intéressera pas les photographes. Il est identique au mode colorimétrie relative, à ceci près qu'on ne fait pas l'adaptation chromatique pour passer de la température de couleur du profil de départ à celle du profil d'arrivée. Si ces températures sont différentes, on obtient donc un glissement de toutes les couleurs ; si ce sont les mêmes, on a les mêmes résultats qu'en colorimétrie relative.

Logiquement, les photographes auraient dû choisir comme un seul homme le rendu perceptif... mais il faut croire qu'il y avait des regrets sur la manipulation nécessaire des valeurs de l'image dans ce rendu. En comparaison, le respect absolu des couleurs imprimables inhérent au mode de colorimétrie relative séduisait beaucoup... mais tout de même avec le défaut très gênant de boucher les noirs hors gamut. Qu'à cela ne tienne ! Les concepteurs de Photoshop ont proposé une nouvelle option pour régler ce problème, *la compensation du point noir* (à utiliser conjointement à la colorimétrie relative), offrant ainsi la grande satisfaction intellectuelle d'utiliser ce mode sans avoir de noirs écrasés. En réalité, cette option remonte elle aussi les valeurs sombres de l'image pour les ramener dans le gamut de sortie ; simplement, on ne s'y prend pas comme en colorimétrie relative, ce qui fait que les résultats peuvent être légèrement différents et ce sera à l'utilisateur de choisir. Dans les deux cas, on modifiera bel et bien les valeurs de l'image ; tout au plus les tons clairs de l'image seraient moins modifiés en colorimétrie relative.

5.9 L'affichage d'épreuve (le soft-proof virtuel)



Cette fonction du logiciel graphique offre une aide visuelle pour choisir le mode de rendu parmi toutes les options du paragraphe précédent. Quand on active cette fonction, l'image subit une conversion vers le profil de l'imprimante avant d'arriver au moniteur et celui-ci, en principe, affiche alors ce qui arrive lors de cette conversion, et on peut donc choisir le meilleur mode de rendu en pleine connaissance de cause.

En principe, toutefois, car il va y avoir des complications. Tout d'abord, le moniteur ne peut afficher correctement que les couleurs de son propre gamut, lequel ne contient pas forcément toutes les couleurs de l'image ou de l'imprimante ; toutes les couleurs hors de ce gamut (couleurs *non affichables*) seront décalées sans qu'on sache si cela est dû à un problème lors de la conversion ou aux limitations du moniteur. Le tableau suivant résume la situation.

couleurs	affichables	non affichables
imprimables	Tout se passe bien sur l'écran et sur le papier	L'impression sera correcte, mais pas les couleurs à l'écran : *on aura l'impression que la prévisualisation ne fonctionne pas* et on ne pourra pas décider d'un simple coup d'oeil où se trouve la vérité
non imprimables	La prévisualisation fonctionne correctement : l'écran rend compte fidèlement des problèmes de conversion vers l'imprimante	Ni l'impression, ni les couleurs à l'écran ne seront correctes. En général, on verra sur l'écran qu'il y a un problème de conversion vers l'imprimante, mais le résultat sur le papier ne correspondra pas à ce qu'on aura vu sur l'écran.

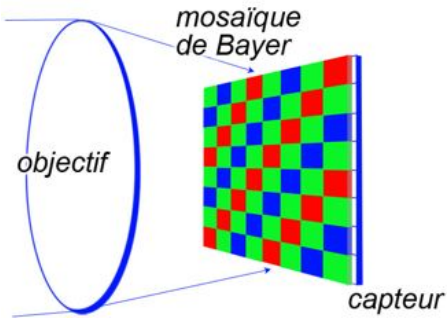
On aura toutefois généralement une fonction de *détection des couleurs non imprimables* pour aider à débroussailler ces possibles difficultés. Cette fonction compare les vraies composantes de couleur (*Lab*) avant et après la conversion et indique si l'écart est trop important. On voit ainsi les zones de l'image qui devraient poser un problème lors de l'impression. Il aurait été agréable d'avoir aussi une fonction de détection des couleurs non affichables afin de repérer les zones où on ne peut plus faire confiance au moniteur... mais il n'existe pas pour le moment de menu tout fait pour cela (on peut néanmoins y arriver en demandant un affichage d'épreuve dans le profil du moniteur, comme si on avait une imprimante avec ce profil, puis en demandant l'affichage des couleurs non imprimables).

Il y a une deuxième complication dans cette prévisualisation. Nous avons vu que les valeurs de l'image imprimée n'allaient pas d'un vrai noir au blanc pur, mais d'un « noir papier » au « blanc papier ». L'affichage d'une telle gamme restreinte pour les valeurs sur un moniteur susceptible d'afficher des noirs bien plus profonds et des blancs plus lumineux n'est pas très agréable ; notamment, *la présence des noirs qui pourraient être plus denses donne l'impression que l'image est voilée alors qu'on n'a généralement pas cette impression quand on examine l'image elle-même sur le papier* (c'est encore une compensation qui se passe dans le cerveau). Pour corriger cette impression, l'affichage par défaut de la prévisualisation va retoucher ces valeurs de manière à transformer ce noir papier en noir absolu et ce blanc papier en blanc pur — en quelque sorte, en faisant une sorte de rendu perceptif à l'envers. On pourra toutefois désactiver ce comportement de manière à retrouver une simulation des valeurs réelles sur le papier, mais au prix du retour de cette sensation désagréable.

5.10 A l'intérieur de l'appareil photo numérique. La calibration DNG.

Nous allons maintenant essayer d'expliquer comment les images numériques se forment dans l'appareil photo. Tout d'abord, l'objectif de l'appareil focalise une image optique sur le capteur, lequel est constitué par un assemblage de plusieurs millions de petites cellules photoélectriques qui vont donner naissance aux futurs pixels de l'image. Chacune de ces

cellules analyse cette image à travers de petits filtres rouge, vert et bleu et délivre ainsi *les composantes RVB brutes*, celles qu'on va retrouver dans le fichier RAW de l'image.



De manière plus précise, dans la plupart des appareils, chaque pixel n'est recouvert que d'un seul de ces trois filtres, selon l'agencement illustré ci-contre de la *mosaïque de Bayer*, de telle sorte qu'on ne relève en réalité qu'une seule des trois composantes RVB sur chacun des pixels ; les deux autres sont obtenues par un algorithme d'interpolation sophistiqué à partir des relèvements sur les cellules voisines (*dématriçage*) . Dans les fichiers RAW, on n'enregistre que les composantes effectivement relevées, à charge pour les logiciels de traitement de ces fichiers de faire le dématriçage. Chaque appareil et chaque logiciel utilise ses propres algorithmes ; on peut parfois trouver des différences au niveau des pixels, *mais cela n'affecte en rien la formation des couleurs dans l'image numérique*.

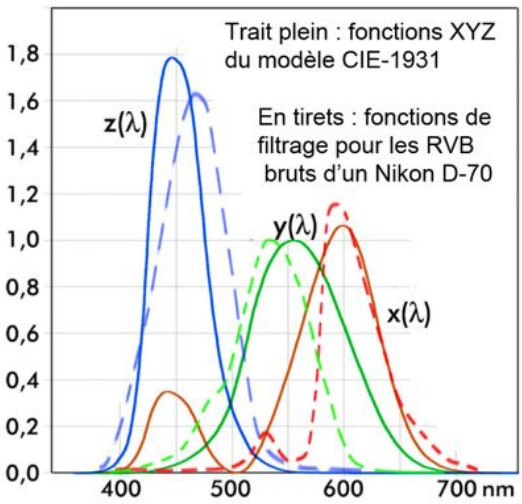
Ces composantes brutes mesurent tout simplement la puissance du rayonnement qui arrive sur les pixels après la traversée des filtres rouge, vert et bleu. L'idéal serait que les fonctions de transmission de ces filtres soient tout simplement les fonctions x(λ), y(λ) et z(λ) du modèle CIE-1931 (voir §3.9). On obtiendrait alors directement les tristimulus X, Y et Z du rayonnement, c'est-à-dire une évaluation exacte de la façon dont l'œil perçoit ce rayonnement. Ensuite,

(i) l'opération suivante consisterait à faire la balance des blancs, que ce soit le photographe ou l'appareil qui impose son estimation ; on obtient ainsi une estimation des tristimulus de l'éclairage de la scène et le rapport de ces deux jeux de tristimulus donne les couleurs de la scène (cf § 4.2) ; celles-ci sont momentanément transmises au moniteur de l'appareil pour un contrôle éventuel de la prise de vue.

(ii) Si on enregistre en RAW, on enregistre les composantes brutes avant dématriçage ; l'estimation du blanc n'est jointe qu'à titre d'information.

(iii) Si on enregistre en JPEG ou en TIFF, les couleurs de la scène (telles que les voit l'appareil) sont converties dans l'espace colorimétrique choisi par le photographe, généralement sRGB ou Adobe-RGB(1998), et on enregistre les nouveaux RVB et le profil utilisé.

Malheureusement, les fonctions de transmission spectrales des filtres de Bayer sont assez loin des courbes idéales. La figure ci-contre montre ce qui se passe pour un Nikon D-70.



Comparaison des fonctions x(λ), y(λ) et z(λ) du modèle CIE (en trait plein) et des courbes de transmission spectrales des filtres de Bayer pour un Nikon D-70 (en tirets, d'après Christian Buil, *http://astrosurf.com/buil/d70v10d/eval.htm*)

On voit que ces courbes n'ont pas la bonne forme, surtout pour le rouge, et que leurs maxima ne sont pas aux bons endroits — il est possible qu'on ait un meilleur accord pour des capteurs plus récents (ce genre de courbes est difficile à trouver) .

En réalité, la situation n'est pas du tout désespérée. Il est certes impossible de trouver une combinaison des RVB bruts qui donne *exactement* les XYZ souhaités, mais il est tout à fait possible de proposer des formulations approchées avec lesquelles on aura des erreurs acceptables sur tel ou tel ensemble de couleurs. Il n'y a pas de solution unique. Chaque logiciel de traitement des images RAW et chaque appareil aura une façon particulière de s'y prendre ; le résultat est que les différents appareils devant les mêmes scènes ne donneront pas exactement les mêmes couleurs, tout comme les différents logiciels de dématriçage ne donneront pas les mêmes résultats à partir des fichiers RAW. Le but des tout récents logiciels « de calibration DNG » est de proposer d'autres compromis par le biais de « profils DNG » à utiliser dans Camera Raw ou Lightroom.

Ces logiciels (*DNG Editor* d'Adobe ou *ColorChecker Passport* de X-Rite) proposent d'optimiser le rendu des couleurs de la charte ColorChecker ci-contre à partir d'une photographie de cette charte enregistrée en RAW. On n'a pas à faire de balance du blanc pour cette image, celle-ci est faite automatiquement à partir des plages grises de la charte. Le « profil » obtenu est juste une combinaison pour passer des RVB bruts aux XYZ ; on pourra l'utiliser pour un éclairage complètement différent, mais il donnera ses meilleurs résultats pour la température de couleur pour laquelle on aura photographié la charte.

Bien comprendre que ces « profils DNG » sont complètement différents des profils ICC qu'on peut parfois établir pour les images TIFF ou JPEG produites par un appareil dans des conditions très précises d'éclairage. Ces profils ICC sont établis à partir de chartes avec bien plus de plages de couleurs (comme la charte IT-8 du §5.5) ; en principe, ces profils ICC devraient être bien plus précis sur le rendu des couleurs et des densités, mais à l'intérieur d'un gamut restreint (celui du profil sRGB ou Adobe RGB-1998 avec lequel on a enregistré les images) alors qu'un appareil numérique peut capter davantage de couleurs ; et bien entendu, ces profils ICC ne sont valables que pour un éclairage et un réglage de l'appareil bien précis, ceux avec lesquels on a étalonné l'appareil.

6 — Quelques détails pratiques sur l'étalonnage des écrans

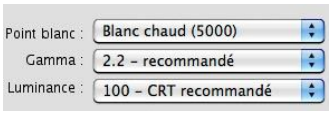
On trouve beaucoup d'informations ici et là sur Internet. Je n'ai pas voulu réinventer la poudre ; les sites sur lesquels je me suis appuyé pour rédiger sont référencés dans le texte.

6.1 La procédure

Tout d'abord, il faut utiliser une sonde. On propose encore de temps à autres des solutions purement logicielles, dans la lignée du célèbre utilitaire *Adobe Gamma* qui accompagnait les toutes premières versions de Photoshop (on est dans les années 90, la préhistoire !), mais aucune ne peut fournir des résultats suffisamment précis pour les exigences actuelles, cf http://www.oitregor.com/numeric/calibration/ . On discutera plus loin du choix de cette sonde.

Toutes ces sondes s'utilisent avec un assistant logiciel (un « wizard ») qui s'efforce de guider l'utilisateur pas à pas avec le plus d'explications possible — mais, bien sûr, jamais assez pour certains... En principe, l'étalonnage se déroule en trois phases.

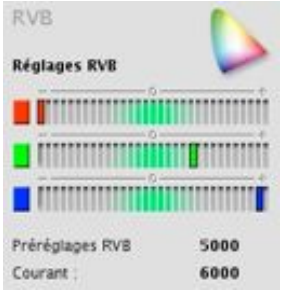
- On choisit tout d'abord la cible à atteindre pour les réglages de l'écran : la température de couleur, le gamma et la luminosité maximale de l'écran. Selon la sonde utilisée et son logiciel, on a plus ou moins de latitude dans ce choix ; par exemple, on peut parfois demander n'importe quelle température de couleur et parfois on ne peut choisir qu'entre 6500 et 5000 K. Plus gênant, avec certaines sondes, on ne peut pas régler la luminosité de l'écran.



- On s'efforce ensuite d'ajuster les réglages de l'écran pour l'amener le plus près possible de cette cible, au moyen du menu OSD spécifique de l'écran (OSD = « On Screen Display »). Ce menu étant immanquablement la terreur des néophytes, il est très recommandé de l'explorer avant toute tentative d'étalonnage. Il convient d'y trouver où se règlent la luminosité, le contraste, et le niveau des trois canaux RVB ; aussi où on peut positionner la fenêtre de dialogue de ce menu ailleurs que sur la fenêtre du logiciel de la sonde.

  Tous les écrans ne disposent pas de tous ces réglages ; certains même n'en ont quasiment aucun. Bah ! Quand un réglage fait défaut, on passe tout simplement à la suite, cela ne compromet pas forcément le résultat final (par exemple, les moniteurs Apple Cinema HD23 ne disposent que du réglage de luminosité et de rien d'autre, et ils donnent néanmoins d'excellents résultats, même à 5000 K)

  Dans cette phase dite de *calibration*, le logiciel de la sonde ouvre des jauges qui permettent d'ajuster les réglages du menu OSD. Par exemple, dans la figure ci-contre, relative au réglage de la température de couleur, on a un rappel de la cible demandée (5000 K) et la mesure du moment (6000 K) ; il faut agir sur les commandes RVB du menu OSD pour amener les curseurs des trois jauges sur le milieu des plages vertes.



- On passe enfin à la troisième phase, l'étalonnage proprement dit. C'est une opération entièrement automatique, où un certain nombre de plages de diverses couleurs défilent sur l'écran, que la sonde les analyse une à une. Finalement, le logiciel construit le profil de l'écran et l'enregistre au bon endroit dans le système afin qu'il soit désormais le profil reconnu pour cet écran.

Il existe aussi des procédures simplifiées où les deux premières phases sont omises. Comme le logiciel a néanmoins besoin de connaître les paramètres cibles, je suppose (sans aucune garantie) qu'il va les chercher dans le profil écran du moment, celui qu'on cherche à refaire. On propose parfois deux types de procédures simplifiées, une pour les écrans de table, l'autre pour les portables ; je ne sais pas ce qui les distingue l'une de l'autre, mais les portables se trouvent nettement mieux de leur procédure spécifique.

6.2 Quelle sonde choisir ?

Dans les années 95-2000 le monde des professionnels de la colorimétrie était dominé par de grands noms comme Gretag-Macbeth (suisse), X-Rite (US), Pantone (US) tandis qu'un nouveau venu, ColorVision (suisse allemand), essayait de se faire une place au soleil. En 2011, X-Rite a absorbé Gretag-Macbeth et Pantone tandis que ColorVision, rebaptisé DataColor, tient apparemment bien le coup.
Finalement, le choix est assez limité en cette mi-2011 pour les sondes d'étalonnage (pas trop chères) :

Constructeur	Haut de gamme	Intermédiaire	Entrée de gamme
X-Rite	Display 2 (210 €)	Display LT (140 €)	Pantone Huey Pro (95 €)
DataColor	Spyder 3 Elite (190 €)	Spyder 3 Pro (130 €)	Spyder 3 Express (92 €)

Les prix ont été relevés sur Internet www.graphic-reseau.com , shop.colourconfidence.com/ . On trouvera des comptes-rendus d'essai de toutes ces sondes dans le site de Keith Cooper www.northlight-images.co.uk/reviews.html ; d'autres comptes-rendus, plus parcellaires, sur le site de QuestionsPhoto www.questionsphoto.com/ (parrainé par les éditions Eyrolles).

Nota : juste après la rédaction de document, X-Rite a présenté un remplacement de sa Display 2, sous le nom de Display Pro, légèrement plus chère (238 € TTC chez graphic-réseau). On trouvera également un rapport d'essai chez Keith Cooper.

On peut aussi étalonner son écran avec un spectrophotomètre, mais c'est nettement plus cher (voir section 7). C'est également un peu plus précis, mais en a-t-on besoin ? Certains le pensent et critiquent même ce qu'on fait avec un spectromètre ; dans cette ligne de pensée, ils saluent l'arrivée d'un tout nouveau produit, basicICCColor DISCUS, basé lui aussi sur un spectrocolorimètre, mais fort coûteux (www.colorwiki.com/wiki/DISCUS_Review ; on trouvera une autre analyse sur le site de Keith Cooper)

Dans les deux lignées de produits du tableau précédent, les hauts de gamme sont sensiblement équivalents et donneront toute satisfaction ; les économies de prix avec les matériels moins chers se paient par un choix plus réduit dans les options de réglages, voire des options manquantes. Le tout sera de savoir si ce qui reste sera suffisant ; l'utilisateur peu au fait de ces questions aura bien du mal à décider par lui-même. Je donne ici quelques opinions personnelles :

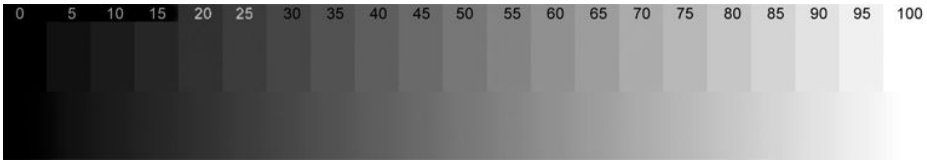
— le peu de choix pour les règles de gamma n'a aucune importance ;

— les sondes d'entrée de gamme ne permettent pas de régler la luminosité de l'écran. C'est ennuyeux, mais néanmoins contournable, sachant que le problème est d'avoir une luminosité adaptée à son environnement de travail — et surtout pas trop élevée. Faute de mieux, on pourra se servir de son APN en guise de posemètre. Avant l'étalonnage, on réglera la luminosité de l'écran de manière à ce que l'APN indique 1/30 sec à F/5.6 et 200 ISO pour une plage blanche ; cela correspond en gros à 100 cd/m2, et on pourra augmenter ou diminuer la luminosité selon son confort personnel.
— Les sondes de haut de gamme offrent une fonction spéciale pour tester la précision du profil obtenu. A nouveau, ce n'est pas vraiment indispensable, mais c'est un grand confort pour surveiller les dérives de l'affichage et pour fixer la périodicité des réétalonnages — également, on le verra, pour guetter une défaillance de la sonde elle-même.

Bref, je conseillerais de faire un petit effort et de s'offrir le haut de gamme. Personnellement j'utilise une sonde Display 2 et je n'hésiterai pas à la conseiller (avec les sondes de la génération précédente, j'avais trouvé que la Display-1 était un peu plus performante que la Spyder-2, mais cette conclusion pourrait bien être caduque, toutes les revues s'accordant sur les progrès de DataColor).

6.3 Comment vérifier la qualité de l'étalonnage ?

En général, on se contentera d'un contrôle qualitatif en observant ce que devient une image de test ; on doit avoir une impression de véracité des couleurs et des contrastes. En fait, si le moniteur se comporte bien comme un dispositif de synthèse trichrome, on pourrait se contenter d'observer l'affichage d'une gamme de gris régulièrement étagée en luminances : on doit avoir des gris parfaitement neutres avec des valeurs régulièrement étagées.



Depuis quelques années, les sondes de haut de gamme offrent une fonction spéciale de validation du profil, qui envoie une séquence de certaines valeurs *RVB* sur l'écran (en général celles qui ont servi à la calibration) qui doivent correspondre à des couleurs *LAB* bien précises d'après le profil. La sonde analyse les couleurs réellement émises et permet d'évaluer les erreurs *delta E*. Celles-ci peuvent être dues

— à un manque de précision dans l'établissement du profil
— à une dérive du moniteur depuis le moment où on a établi le profil en cours d'examen ; si cette dérive est trop importante, il convient de refaire la calibration.

En principe, il faudrait avoir des *delta E* tous inférieurs à 1 ; en pratique, on pourra tolérer quelques exceptions pourvu que l'erreur moyenne reste inférieure à 1.

> Il y a encore quelques petits mystères à propos de ces fonctions de validation. Clairement, ces *delta E* ne se réfèrent pas aux *Lab* bruts fournis par le profil mais à des couleurs corrigées par une sorte de compensation du point noir tenant compte du noir écran (c.à.d. le « noir » obtenu pour des *RVB* nuls). Ce noir pourrait être obtenu en remesurant le noir-écran lors de la validation, mais j'ai l'impression qu'on va le chercher dans certaines informations

non normalisées incluses dans le profil — cela pourrait expliquer pourquoi le logiciel X-Rite refuse de valider les profils DataColor et réciproquement.

Le nouveau logiciel *i1Profiler* de X-Rite propose un processus de validation assez différent , où le contrôle ne se fait pas sur les couleurs qui ont servi à la construction du profil, mais sur celles des chartes ColorChecker et il donne des résultats beaucoup plus sévères que la validation des Display-2. Encore des mystères.. et ce logiciel ne fonctionne actuellement qu'avec le spectrophotomètre Eye-One et sans doute avec la toute nouvelle Display Pro). Pour finir sur le sujet, rappelons ma propre tentative beaucoup plus naïve www.oitregor.com/numeric/calibration/Controle_profils_ecran2.pdf (mais trop laborieuse à mettre en œuvre)

6.4 Comment choisir son écran ?

C'est une question qu'on se pose régulièrement au moment où on s'équipe ou quand on renouvelle son matériel. Tous les écrans ne se valent pas pour travailler ses images. Il est difficile d'aller au delà de conseils très généraux, ceux par exemple qu'on pouvait trouver dans la revue de *Réponses Photo* de mars 2011 (no 228) :

- éviter les écrans brillants comme ceux des iMac. Ce n'est pas qu'ils ne donnent pas de bonnes couleurs (encore que j'ai entendu dire, sous toute réserve, que leur surface vitrée gênait l'étalonnage), mais ils génèrent forcément des reflets gênants.
- Parmi les trois technologies d'écran plat, éviter les dalles TN (*twisted nematic*), à cause de leur faible angle de vision et de l'artifice qu'elles utilisent pour créer les millions de couleurs ;
- ne restent que les technologies PVA (*patterned vertical alignment*) et IPS (*in plane switching*). C'est cette dernière qui assure le plus grand angle de vision.
- Les écrans de portable sont très généralement déconseillés. Les portables sont généralement destinés à la bureautique et pas aux arts graphiques. Ils souffrent souvent d'une surface réfléchissante et d'un angle de vision beaucoup trop étroit. En plus, leur gamut est souvent beaucoup plus petit que sRGB, ce qui pourra gêner le travail sur des images très coloriées, cf www.oitregor.com/numeric/ecrans_portable/texte.html. Par contre, on pourra souvent leur brancher un écran secondaire de qualité sur lequel on pourra travailler plus sereinement ses images.

On trouve de temps à autre des comparaisons entre différents modèles. Malheureusement, les fabricants de moniteurs renouvellent très souvent leurs gammes et ces comparaisons deviennent vite caduques. Parmi les caractéristiques désirables, outre le bon angle de vision, une bonne résolution (si possible, 1900x1200) me paraît plus importante que l'affichage de 95% ou de la totalité du gamut Adobe-RGB98.

Pour vous rendre compte de l'intérêt de passer à un écran à grand gamut pour votre style de photographie, il faut chercher les couleurs de vos images qui ne passent pas bien sur votre écran actuel et son gamut proche de sRGB. Pour cela, ouvrez le menu *Affichage >Format d'épreuve >Personnalisé* et demandez sRGB ou votre profil de moniteur comme périphérique de simulation ; puis faites des pressions répétées sur le raccourci clavier **CTRL+MAJ+Y** (pour le menu *Couleurs non imprimables*), pour faire clignoter en gris les couleurs mal affichées. Zoomez éventuellement sur l'image autour des zones les plus coloriées pour chercher ces points... et tirez vos conclusions.

6.5 A propos des écrans de portables

Les écrans de portable ne disposent d'aucun réglage de colorimétrie autre que la luminosité. Ce n'est pas un handicap en soi ; ces écrans s'étalonnent très bien si on utilise les fonctions spécifiques des sondes pour ce type d'écran. On peut ainsi faire disparaître les dominantes colorées et obtenir une restitution correcte d'une charte de gris ; évidemment, on ne résout rien ainsi des difficultés liée à un angle de vision trop étroit.

Rappelons que ces écrans ont généralement un gamut très étroit qui peut fortement gêner le travail sur des images avec des couleurs très saturées. Au minimum, il faut alors reprendre l'expérience décrite juste au-dessus pour savoir où sont les couleurs qui ne sont pas affichées correctement, mais ça indique seulement qu'on a un problème, ça ne donne pas la solution.

Egalement, je n'ai pas souvent lancé le processus de validation d'un profil pour les portables, mais je n'ai jamais obtenu de résultat aussi bons que pour les (bons) écrans de tables : par exemple, un Macbook, qui a pourtant l'un des meilleurs écrans pour un portable, me conduit à un *delta E* moyen de 2,2 avec la validation de Display 2, avec des pointes à 7...

6.6 Le profilage d'un système à 2 écrans

Le plus souvent, on utilise deux écrans parce qu'on n'a pas assez de place sur le premier écran pour afficher confortablement l'image et les multiples palettes ouvertes par Photoshop. On peut alors regrouper les palettes sur un écran et afficher l'image sur l'autre. Bien entendu, la carte graphique doit être assez évoluée pour gérer ces deux écrans et considérer que l'un est la suite de l'autre dans un espace d'affichage global. Des cartes plus simples ne permettront qu'un mode miroir où le deuxième écran n'affiche qu'une simple copie du premier. Ce mode miroir sera néanmoins intéressant pour les portables, dans la mesure où il permettra d'afficher l'image avec un écran plus performant.

On cherchera généralement à étalonner chaque écran indépendamment de l'autre, mais ce ne sera pas toujours possible ; c'est une question de carte graphique, de système d'exploitation, et de sonde d'étalonnage (ou plutôt de son logiciel). A nouveau, on aura moins de surprises désagréables avec les matériels de haut de gamme. Avec la Display-2, pour étalonner le deuxième écran, il suffit de faire glisser la fenêtre de dialogue sur cet écran pour que le logiciel de la sonde comprenne qu'on s'intéresse à ce deuxième écran.

> En pratique, les choses ne sont pas toujours aussi simples que cela. Par exemple, dans www.northlight-images.co.uk/article_pages/dual_monitor_calibration.html , Keith Cooper se fait l'écho dans de difficultés avec Windows XP — qui, je l'espère, sont maintenant aplanies avec Vista ou Win 7. Pour ma part, je n'ai qu'une expérience très faible (limitée à un Macbook) et j'ai eu des problèmes avec une Display 2 : il a fallu que je m'y reprenne à deux fois, la première tentative m'ayant conduit à un gamut anormalement faible ; le deuxième essai était satisfaisant... sans que j'ai compris ce que j'avais fait de différent. Par ailleurs, la fonction de validation donne des résultats aberrants pour le deuxième écran.

6.7 Sur la durée de vie des sondes

Les sondes ne sont pas éternelles. Leurs détecteurs et surtout les filtres colorés qu'elles utilisent vieillissent et elles n'ont aucune possibilité de tarage pour recaler leur fonctionnement (au contraire des spectrophotomètres). Je n'ai pas trouvé d'information précise à ce sujet sur le web, mais nous avons bel et bien constaté au club la mise hors d'usage d'une sonde Display-1 au bout de quelques années. La dégradation des performances a été assez insidieuse ; elle s'est surtout manifestée par des difficultés croissantes et finalement anormales lors des phases de calibration.

> Evidemment, une expérience unique ne fait pas statistique, mais renouveler sa sonde tous les cinq ou six ans serait peut-être une sage précaution. ***Une autre, d'application plus immédiate, est de faire systématiquement une validation des profils***. Cette opération ne permettra sans doute pas de chiffrer de manière précise la dégradation des profils parce que la vérification avec une sonde déréglée devrait masquer les erreurs commises lors de l'étalonnage établi avec cette même sonde, mais les performances apparentes devraient tout de même baisser... Nous ne pouvons pas être tout à fait affirmatif sur ce point parce que nous ne faisions pas de validation lors de notre mésaventure, mais cela paraît vraisemblable. Il faudra ensuite décider si la montée progressive des *delta E* résulte du vieillissement du moniteur ou de la sonde...

7 — Quelques détails pratiques sur l'étalonnage des imprimantes

7.1 Obtention des profils d'imprimante

Tout d'abord, il faut bien comprendre qu'il n'y a pas ***un*** profil pour une imprimante donnée, , mais autant qu'il y a de différents papiers utilisés avec cette imprimante. On devrait même multiplier les profils pour un papier donné si on change les réglages physiques pour l'impression (par exemple, si on change de finesse d'impression), mais on n'ira généralement pas jusque là ; on notera les réglages avec lesquels on aura établi ce profil et on s'y tiendra.

Il y a trois façons de se procurer ces profils.

- On peut d'abord utiliser des *profils génériques* tout faits. Par exemple, quand on installe un pilote d'imprimante, on installe automatiquement les profils prévus par le constructeur pour sa propre gamme de papiers (on peut aussi télécharger ces fichiers depuis le site web du constructeur). Bien entendu, si on préfère d'autres papiers, il faut aller chercher fortune ailleurs ; on trouvera souvent sur le site du fabricant du papier

des profils établis pour une grande variété des imprimantes les plus populaires du moment.

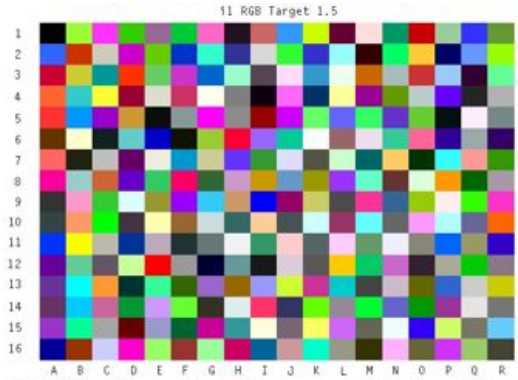
Ces profils tout faits donnent souvent des résultats très honorables, mais pas toujours. Et même quand ça marche, ils ne peuvent évidemment pas tenir compte des petites particularités propres à votre imprimante. L'autre méthode consiste donc à établir les profils adaptés à votre imprimante, et il y a deux façons de s'y prendre :

- Soit vous vous débrouillez tout seul, en recourant à diverses solutions logicielles et matérielles, à des prix allant de quelques centaines d'euros... à quelques milliers. Parmi les offres les moins coûteuses, citons les kits ColorMunki (X-Rite, autour de 400 €), Spyder 3 Studio SR (Datacolor, 450 € environ), puis les kits Eye-One (X-Rite, à partir de 1200 €). Ces derniers fournissent des profils excellents, mais ils sont chers... et il y a des solutions encore plus « pro » et encore plus coûteuses. Nous revenons sur ces divers matériels un peu plus loin
- Soit vous faites appel à diverses sociétés sur Internet. Typiquement, vous téléchargez des fichiers de calibration à imprimer, vous postez le résultat à ces sociétés (avec un chèque) et elles vous renvoient votre profil par email. Le travail est fait avec des ensembles haut de gamme genre X-Rite. Nous connaissons au moins deux autres adresses, www.profilicc.com ou www.cmp-color.fr/ qui vous feront un excellent travail pour environ 50 € par profil.

Enfin, en général, seuls les profils créés avec des matériels professionnels seront exempts de reproche. Les autres auront parfois des faiblesses auxquelles on peut tenter de remédier au moyen de logiciels éditeurs de profil (qu'on trouvera avec les logiciels de ces kits de calibration) mais l'existence même de ces logiciels implique que la qualité des profils est parfois sujette à caution.

7.2 Principe de la calibration et de l'utilisation du profil ICC

Le principe consiste à imprimer des gammes de couleurs unies avec des composantes RVB *qu'on ne devra pas modifier lors de l'impression* (donc, pas de conversion à la sortie de Photoshop) et en mettant l'imprimante dans une configuration bien définie — sur laquelle nous reviendrons à la fin de ce paragraphe. Les couleurs obtenues sur le papier sont ensuite lues avec un spectrophotomètre qui en mesure les composantes LAB sous le pilotage d'un logiciel spécifique. A la fin de l'analyse, le logiciel en déduit le profil ICC du couple imprimante + papier.



Feuille de calibration pour kit Eye-One

Ensuite, quand on voudra utiliser ce profil, il faudra

- demander à Photoshop de convertir l'image dans ce profil (via l'option *laisser Photoshop gérer les couleurs* et en choisissant ce profil dans la liste déroulante des profils d'imprimante).
- et surtout *remettre l'imprimante dans la même configuration que lorsqu'on a imprimé les feuilles de calibration.*

Dans cette configuration, on doit d'abord désactiver toute gestion des couleurs par l'imprimante, que ce soit les réglages spécifiques à cette imprimante ou le recours que certaines imprimantes peuvent faire d'elles-mêmes aux profils ICC (dans les machines Epson, cela se traduit par une option « calibration désactivée» ou « aucune correction » ; pour les réglages à prendre sur d'autres machines, voir www.cmp-color.fr/10%2015.html).

> Cette désactivation de l'intervention de l'imprimante n'est pas obligatoire en soi, mais elle vise à lui donner un fonctionnement aussi simple et « naturel » que possible ; en plus elle élimine une foule de paramètres (réglages de luminosité, contraste, saturation etc.) qu'il faudrait noter pour bien reproduire cette configuration.

Il reste néanmoins quelques réglages très importants dont il faudra prendre note et qui agissent sur le fonctionnement physique de la machine. On n'a pas forcément les mêmes sur toutes les machines ; par exemple, sur les Epson, il s'agit de :

- la résolution d'impression des gouttelettes, entre 1440 dpi et 2880 dpi (en général, on prendra 2880 dpi pour les papiers brillants pour avoir des noirs plus denses, mais pas sur papier mat où cela donnerait des noirs trop encrés et bouchés) ;
- la vitesse d'impression, rapide ou non (peu d'effet, du moins sur les machines récentes) ;
- et surtout, le type de support : papier ordinaire, papier mat, glacé, semi-glacé, fine art, d'épreuvage, etc. avec de nombreux sous-catégories dans les machines modernes. Cette dernière option est très importante, car elle détermine grandement le débit de l'alimentation des buses de l'imprimante et l'encrage sur le papier. Evidemment, si on travaille avec un papier (Epson) plus ancien que le pilote de l'imprimante, celui-ci proposera généralement un choix spécifique bien adapté à ce papier ; si on essaie un papier plus récent, il faudra chercher de l'information sur le site Epson.

Si on essaie un papier de tierce origine, c'est le type de support qui est l'option la plus importante et la bonne option à prendre n'est pas toujours évidente. On lira avec profit l'article de Keith Cooper www.northlight-images.co.uk/article_pages/media_settings.html à ce sujet... encore que l'aventure qu'il rapporte — l'optimum pour le couple Epson 1160 + papier Canon Photo étant le réglage « papier ordinaire » — ressemble beaucoup à une provocation qui n'a sans doute pas de portée générale.

7.3 Comment imprimer les images de calibration

Le problème est d'imprimer ces images sans modifier leurs composantes RVB avant de les faire analyser. On peut y arriver en opérant depuis le logiciel du kit de calibration, quand on dispose de ce kit, mais avec l'inconvénient qu'on ne peut généralement pas renseigner l'image avant de lancer l'impression. Or, il est commode de lui ajouter diverses informations utiles : noms de l'imprimante, nom du papier, réglages de l'imprimante, date. Certes on peut toujours inscrire ces annotations à la main sur la feuille après l'impression, mais il est plus confortable d'opérer depuis son logiciel de traitement graphique. Par ailleurs, les personnes qui impriment les feuilles téléchargées depuis le web n'ont guère d'autre choix.

Or, il y a une difficulté avec Photoshop. En quelque sorte, il s'agit de trouver une option « impression sans gestion de la couleur » où on envoie l'image telle qu'elle, sans la convertir. Historiquement, dans les versions anciennes, il fallait trouver son chemin parmi des dénominations plus ou moins cryptiques, mais on y arrivait. Puis cette option est apparue en toutes lettres avec la version CS2, à côté des options *laissez l'imprimante gérer les couleurs*

ou *laissez Photoshop gérer les couleurs*. Puis, progrès aidant... elle a disparu. Pire, avec la CS4, on ne pouvait plus imprimer correctement des feuilles de calibration ! Adobe a reconnu son erreur, mais, assez piteusement, au lieu de rétablir l'option dans Photoshop, l'entreprise a proposé un utilitaire spécial gratuit, *Adobe Color Printer Utility* ; ça marche, mais à nouveau avec l'inconvénient qu'on ne peut pas ajouter d'annotations — et en prime qu'on ne peut pas gérer le format du papier (du moins sur Mac)

La solution pratique depuis un Photoshop récent consiste à

- ***attribuer*** un profil simple (Adobe-98 ou sRGB) aux feuilles de calibration (cette opération ne modifie pas les RVB),
- puis, au moment de l'impression, demander l'option *laissez Photoshop gérer les couleurs*
- enfin, en guise de profil d'imprimante, prendre le même profil simple Adobe-98 ou sRGB (afin que la conversion vers l'imprimante ne change rien). Les options de rendu ne devraient pas avoir d'influence, mais dans le doute, prenez donc *Colorimétrie relative* et décochez la compensation du point noir.

7.4 Comparaison entre les différents kits de calibration.

Le lecteur qui envisage de faire ses propres profils d'imprimante aimerait certainement savoir s'il peut se contenter d'investir autour de 400 € ou s'il doit allègrement dépasser les 1200 € ; il aimerait voir des comparaisons entre les différents kits évoqués plus haut ; savoir si les profils faits avec l'un sont aussi satisfaisants, ou pas, que ce qu'on fait avec un autre. Je ne connais rien de tel. Ce qui s'en rapproche le plus est la collection des essais rapportés par Keith Cooper dans son site, mais ce sera à vous de lire entre les lignes et de tirer vos conclusions :

Pour mémoire : Eye-One Photo (avec *Eye-Match*)	www.northlight-images.co.uk/article_pages/eye_one_printer_profiling.html http://www.northlight-images.co.uk/reviews/eye-one_match_update.html
Eye-One Photo Pro (avec *i1Profiler*)	www.northlight-images.co.uk/reviews/profiling/i1_profiler_overview.html
ColorMunki	www.northlight-images.co.uk/reviews/profiling/colormunki_printing.html
Spyder 3 Print SR	www.northlight-images.co.uk/reviews/profiling/spyder3print_sr.html

(nota : les deux premières lignes correspondent au même spectro Eye-One, mais avec deux logiciels différents ; *Eye-Match* était le logiciel originel hérité de Gretag-Macbeth, mais il est désormais remplacé par le *i1Profiler* de X-Rite)

Je n'ai pratiqué ni ColorMunki, ni Spyder3, mais il me semble bien que les kits Eye-One sont de loin les plus faciles à utiliser. Maintenant, savoir si cette commodité vaut le surcoût... Ce peut être le cas si on prévoit de faire de nombreux profils, mais réfléchissez bien. Quant à la qualité des profils obtenus, Keith Cooper a l'air d'affirmer qu'on peut y arriver dans tous les cas... mais tout en glissant qu'il faut opérer avec « suffisamment de soin ».

> Par exemple, il écrit le compliment ambigu *for the market the ColorMunki Photo is aimed at, I have to say that I was generally pleased with the results*, en précisant ailleurs que le public

concerné est celui qui ne veut pas trop se casser la tête à bien comprendre ce qu'il fait ; et il conclut sa revue par *it can, with care, produce rather good profiles*.

En fait, on se heurte au problème difficile de qualifier la qualité des profils. Nous y reviendrons plus loin, au § 7.8.

Un mot sur les appareils utilisés. Les kits Eye-One et ColorMunki utilisent de vrais spectrophotomètres, c'est à dire que le rayonnement réfléchi par la couleur analysée tombe sur un réseau de diffraction qui sépare les différentes longueurs d'onde, tout comme le prisme de Newton séparait les couleurs de l'arc-en-ciel ; on détecte ensuite les rayonnements diffractés au moyen d'une batterie de photodétecteurs, de sorte que chacun d'eux mesure ce qui arrive dans un petit intervalle de longueurs d'ondes (tous les 10 nm pour les 36 détecteurs du spectro Eye-One). Le « spectro-colorimètre » du kit Spyder 3 est plus original : une vingtaine de diodes LED quasi-monochromatiques éclairent à tout de rôle la couleur analysée et un détecteur unique capte la lumière réfléchie, fournissant ainsi un échantillonnage du spectre sur une vingtaine de points (la figure ci-contre, empruntée à Keith Cooper, montre la lumière émise par les différentes diodes pendant une fraction de seconde).

7.5 Comment choisir ses papiers

Il y a actuellement une foule de papiers disponibles à côté de ceux que proposent le constructeur de l'imprimante. Tous les grands fabricants de papiers traditionnels ou papiers photo, comme Hahnemuhle, Canson, Permajet, Ilford, Harman..., ont une offre. Tous ces papiers se distinguent par la façon dont ils reçoivent les encres et par leur qualités plastiques, la teinte, la texture, le grammage ; ces papiers se touchent autant qu'ils se regardent,

C'est tout un monde à explorer. Plusieurs fabricants vont au-devant de votre curiosité et proposent des pochettes d'échantillons, avec une ou deux feuilles par type de papier, pour faire des essais. On ne va évidemment pas établir un profil pour chacun d'eux et on fera confiance aux profils génériques proposés par les fabricants ; même si le profil n'est pas très bon, ça devrait suffire pour se rendre compte des qualités plastiques du papier sur une impression réelle. Si on est séduit et qu'on adopte ce papier pour faire des tirages plus sérieux — et si le profil générique n'est pas assez satisfaisant – on sacrifiera ensuite deux ou trois feuilles pour établir soi-même son propre profil.

7.6 Où mettre les profils ICC ?

Cette question ne se pose pas pour vous si tous vos profils proviennent de logiciels tournant sur votre machine (installation de pilotes d'imprimantes, logiciels d'étalonnage pour votre écran ou votre imprimante) ; ces logiciels installent d'eux-même les profils au bon endroit.

Par contre, si vous vous procurez des profils sur Internet ou si vous achetez des profils personnalisés sur le web, il faudra les installer vous-même dans votre système :

- Mac-OSX : Bibliothèque/ColorSync/Profiles dans le volume Système
- Mac-OS9 : Dossier Système/Profils ColorSync

- Windows XP et suivants : C:\WINDOWS\SYSTEM32\spool\drivers\color
- Windows 98 : C:\windows\system\color

7.7 Travail avec un imprimeur extérieur

Si vous travaillez avec un imprimeur externe qui utilise les techniques de gestion de la couleur, en règle générale, il vaudra mieux ne pas tenter de réinterpréter votre image selon son profil, à moins d'être certain qu'il fera ensuite une impression brute de vos données RVB (ou CMJN) sans aucun retraitement (sinon, il y aura une double interprétation fâcheuse de votre image). Néanmoins, la connaissance de son profil sera fort utile pour prévisualiser les résultats de l'impression.

Il se peut aussi que votre imprimeur externe ne suive pas ces techniques de gestion de la couleur. C'est notamment le cas des laboratoires équipés de machines Fuji Frontier. Dans ce cas, il ne tiendra pas compte de l'espace colorimétrique de votre image. Néanmoins vous pourrez établir son profil colorimétrique à l'aide des techniques citées plus haut (ou le trouver sur le site Internet de votre imprimeur) et vous pourrez alors prévisualiser le résultat de l'impression au moyen d'un affichage d'épreuve avec ce profil. Les meilleures impressions seront obtenues en convertissant votre image dans ce profil avant de la faire imprimer ; à défaut, envoyez votre image en sRGB.

7.8 Comment tester ses profils ?

Cette étape est particulièrement importante quand on fait soi-même (ou qu'on fait faire) des profils sur mesure pour sa propre imprimante. En effet, on n'est jamais à l'abri d'une erreur de manipulation et il convient de la détecter au plus tôt.

Faute de matériel spécialisé — et des connaissances ésotériques pour s'en servir —, on ne peut guère que procéder à l'intuition. La méthode générale est d'imprimer une image de test et de voir si le résultat a une bonne tête. Normalement, si le moniteur est correctement étalonné et si vous êtes bien installé (pas de lumière vive autour de l'écran ou sur celui-ci), vous devez avoir un bon accord entre l'image à l'écran et l'image imprimée, voire excellent — *attention, ne réclamez tout de même pas l'identité entre l'écran et le papier, surtout si vous n'avez pas un éclairage normalisé à la même température de couleur que votre moniteur*.

On trouve de nombreuses images sur le web pour faire cet examen. On pourra à nouveau aller sur le site de Keith Cooper www.northlight-images.co.uk/article_pages/test_images.html pour faire son choix. Ajoutons-y www.photo-i.co.uk/Reviews/printers/images/Test.jpg s'il faut en ajouter une. L'impression des visages et des gammes de gris sera très révélatrice.

Le rendu du bébé de photo-i.co.uk est un test particulièrement sensible.

Quand on vérifiera la qualité des profils, on prendra également soin de vérifier la qualité de l'affichage d'épreuve — on a parfois des surprises de ce côté, avec des impressions correctes, mais u affichage d'épreuve plus fantaisiste. En théorie, les petits désaccords entre l'impression et l'image en affichage normal sur le moniteur devraient disparaître quand on passe en affichage d'épreuve sur le profil imprimante.

> ***Une caractérisation objective ?***
> Le nouveau logiciel *i1Profiler* de X-Rite propose de tester la fidélité des couleurs imprimées sur la base des 24 couleurs des charte ColorChecker ; bien entendu il faut disposer d'un spectrophotomètre. Il est certain qu'on obtient ainsi des *delta E* — dûment chiffrés et très objectifs — entre ce que vous avez vu sur l'écran (supposé bien étalonné) et sur ce qui est arrivé sur le papier. Cela peut-il fournir une caractétisation objective ? J'en doute. Quand on a vu les gammes de gris imprimées avec les encres couleurs, on sait très bien que certains tons peuvent être corrects (les six gris de la ColorChecker, par exemple) et que d'autres tons seront affectés de dominantes gênantes.

7.9 Et, euh... ça marche vraiment à tous les coups ?

Comment je l'ai déjà dit, je ne peux pas parler pour les profils faits avec ColorMunki ou Spyder 3. J'ai fait une foule de profils avec le kit Eye-One Photo et une bonne dizaine d'imprimantes diverses, surtout des Epson, sans autre validation que subjective, basée sur l'impression plus ou acceptable des images de test.

Je n'ai connu qu'un seul échec clair et net, sur une machine d'entrée de gamme Epson R285. Les autres profils ont tous globalement donné satisfaction... avec tout de même deux points délicats :

- il a longtemps été très difficile d'obtenir des gammes de gris bien homogènes, ce qui rendait très problématique l'impression du noir et blanc (nous parlons ici d'imprimer ces images avec l'ensemble des encres couleur, en tant que cas particulier d'images RVB). On s'est donc orienté vers de tout autres techniques pour imprimer le N&B, ne faisant usage que des encres noires ou grises, mais le problème reste sensible pour imprimer des images avec des couleurs très peu saturées (N&B fortement virées ou images en bichromie)
- sur certaines machines (Epson 2100 et 4000), les impressions sur papier mat étaient affectées d'une légère dominante chaude, peu sensible sur des images très coloriées, mais très perceptibles sur les tons chairs. En principe, il est possible de corriger ce défaut avec l'utilitaire de retouche des profils inclus dans le kit Eye-One Photo mais je ne l'ai jamais fait (je me suis toujours contenté de faire une légère correction par courbe au moment de l'impression ; j'accorde que ça ressort du bricolage, mais c'est facile à mettre en œuvre)

En fait, il me semble que ces deux points faibles ont tendance à se résorber avec l'apparition de nouvelles machines plus performantes (et plus coûteuses) comme les Epson 3800 ou 7900

Le vrai problème concerne surtout l'impression des couleurs hors gamut, en particulier les nuances vives et sombres sur papier mat. Comme l'imprimante ne peut pas fournir ces couleurs, il est inutile d'espérer qu'on puisse les obtenir sur le papier. Si l'image s'en trouve trop déséquilibrée, il faudra la modifier en fonction des possibilités de l'imprimante et en s'appuyant sur l'affichage d'épreuve ; voir www.oitregor.com/numeric/hors_gamut/

Annexe A : les principaux profils ICC standard pour les images

Cet annexe présente les principaux profils sous lesquels on peut travailler ses images. La liste ci-dessous est extraite du site de Bruce Lindbloom. Ces profils ont été classés en deux groupes selon leurs points blancs à D50 ou D65. Le tableau indique les gammas et le volume dans l'espace LAB (qui donne une idée du nombre de couleurs dans leur gamut)

Dénomination	Gamma	Point blanc	Volume	Remarques
ColorMatch RGB	**1,8**	**D50**	**836.975**	
ECI RGB v2	**L**	**D50**	**1.331.362**	alternative à Adobe98 pour l'Europe
Ekta Space PS5	2,2	D50	1.623.899	proposé par Joseph Holmes
Beta RGB	2,2	D50	1.717.450	proposé par Bruce Lindbloom
Don RGB 4	2,2	D50	1.802.358	proposé par Don Hutcheson
Best RGB	2,2	D50	2.050.725	proposé par Don Hutcheson
Wide Gamut RGB	2,2	D50	2.164.221	développé par Adobe
ProPhoto RGB	**1,8**	**D50**	**2.879.568**	développé par Kodak
Apple RGB	1.8	D65	798.403	
sRGB	**≈2.2**	**D65**	**832.870**	
Bruce RGB	2.2	D65	988.939	proposé par Bruce Fraser
Adobe RGB (1998)	**2.2**	**D65**	**1.208.631**	développé par Adobe
CIE RGB 1931	*2.2*	*D55*	*1.725.261*	*le profil historique de 1931*

Quelques commentaires :

- Les profils les plus utilisés par les photographes sont soulignés en gras et en brun. Le plus populaire de tous est le sRGB, suivi de Adobe RGB (1998)
- Le sRGB a été conçu à partir de la gamme de couleurs disponibles sur les écrans cathodiques de l'époque pour le monde Windows. On peut concevoir le ColorMatch comme une sorte d'alternative à sRGB pour le monde Mac ; son gamma de 1.8 le rend plus approprié pour être attribué aux images anciennes préparées sur un Mac avant la gestion de la couleur (donc en s'appuyant sur les couleurs du moniteur de l'époque)
- Adobe RGB (1998) a été conçu pour offrir un gamut plus large que sRGB, suffisamment pour englober toutes les couleurs disponibles dans le monde de la presse CMJN, mais pas trop large afin de ne pas imposer de travailler les images en mode 16-bit.
- Adobe RGB (1998) a deux défauts : son blanc en D65 impose des conversions chromatiques malvenues pour des travaux d'impression et son gamut n'est pas adapté aux encres CMJN utilisées en Europe. Le consortium ECI (European Color Initiative) a donc proposé en alternative l'espace ECI RGB v2, avec un point blanc en D50 et un gamut mieux situé mais à peine plus large, permettant donc de rester en mode 8-bit ; en prime, il a adopté en règle de gamma de choisir la formule de passage LAB. Ce profil est téléchargeable depuis le site de l'ECI... si on arrive à trouver le chemin, sinon essayez sur http://www.ad-hoc-graphic.com/Support/telechargement.html
- Tous les profils « proposés » par un tel ou un tel sont des propositions de chercheurs impliqués dans les études sur la gestion de la couleur. A part le Bruce RGB, sorte d'intermédiaire entre le sRGB et Adobe RGB(1998), on voit que ce sont tous des profils en D50 (donc bien adaptés aux travaux d'impression) et à grand gamut, imposant de passer en mode 16-bit.
- Le plus large de tous ces espaces est ProPhoto RGB. C'est le seul profil en D50 qui soit proposé en sortie de Camera Raw, mais comme il englobe tous les autres, on peut

ensuite convertir vers l'espace de son choix. Il faut d'abord créer l'image sous ProPhoto RGB en mode 16-bit, faire la conversion de profil, puis passer en mode 8-bit si le nouveau profil n'est pas trop large. En ce sens, le fait que ProPhoto RGB soit le seul profil à grand gamut proposé en sortie des images RAW n'est pas une limitation.

D'autres programmes de conversion d'images RAW comme Nikon Capture NX2 ou, Ufraw dans le monde Unix permettent une conversion directe vers n'importe quel profil.

- On ne gagne rien à convertir une image en Adobe RGB(1998) vers le profil ECI RGB ; les couleurs qui seraient absentes au départ ne reviendront pas dans la conversion. La seule façon d'utiliser correctement ce profil ECI dans Photoshop et Camera Raw est celle qui est décrite dans le paragraphe précédent : prendre des images en RAW, sortir de Camera Raw en ProPhoto, puis convertir en ECI RGB.
- Le gamma de 1,8 de ProPhoto RGB détonne par rapport aux autres. Comme la conception du profil est assez ancienne, résulte-t-il d'une influence du monde Mac (en avance à l'époque sur la gestion de la couleur) ou d'un rapprochement avec la sensitométrie de certains films Kodak, mystère. Rappelons que cela n'a aucune incidence sur le travail des images, d'autant plus qu'on est forcé de travailler en mode 16-bits avec un tel profil.

Annexe B : à propos des modes de rendu « perceptif » et « saturation »

Rendu perceptif

Historiquement, la gestion de la couleur a eu beaucoup de mal à pénétrer le public des photographes ; même maintenant, on en applique les recettes mais les comprend-on toujours ? L'insuffisance des premières présentations du sujet qu'on a pu trouver n'y est certainement pas pour rien ; les explications sur le rendu perceptif en donnent un exemple amusant.

Au départ, la parole de l'évangile selon le consortium ICC n'est pas si hermétique que ça (un peu tout de même) :

> A.3.2 Rendu perceptif :
> La mise en œuvre de ce rendu est propre à chaque fabricant de profil. Il implique des compromis, notamment sur la préservation du contraste, afin de conserver les détails à travers toute la gamme des valeurs tonales. Ce rendu est utile à la reproduction générale des images et des photographies.
>
> *(texte original extrait de Specification ICC.1:2001-04 :*
> *the exact gamut mapping of the perceptual intent is vendor specific and involves compromises such as trading off preservation of contrast in order to preserve detail throughout the tonal range. It is useful for general reproduction of images, particularly pictorial or photographic-type images).*

L'un des premiers apôtres de la gestion de la couleur aura confondu « valeurs tonales » et « tons de couleurs » , bien que l'expression *tonal range* me paraisse plus claire en anglais qu'en français, et les suivants lui auront emboîté le pas sans broncher. Par exemple, Bruce Fraser a écrit

> Le rendu perceptif essaie de comprimer le gamut d'origine dans le gamut de destination. Il appartient aux fabricants de profils de faire ce qu'il faut pour ça, mais typiquement, ce rendu désature toutes les couleurs pour les amener dans le profil de destination tout en maintenant

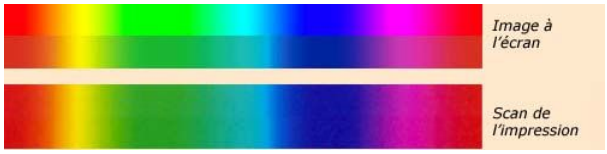
plus ou moins le rapport entre les couleurs. Préserver ce rapport de couleurs aide à préserver l'apparence générale des images.

Perceptual rendering attempts to compress the gamut of the source space into the gamut of the target space. Exactly how this is accomplished is left to the discretion of the tool used to build the profile, but typically perceptual rendering desaturates all colors to bring the out-of-gamut colors into the target gamut while more or less maintaining the overall relationship between colors. Preserving the relationship between colors helps preserve the overall appearance of images.

http://www.creativepro.com/article/out-of-gamut-realizing-good-intentions-with-rendering-intents

Je ne dis pas qu'il est à l'origine de cette confusion, mais il aurait dû savoir et ne pas s'en faire l'écho! On retrouve la même confusion sous d'autres grandes signatures comme Ian Lyons ou Martin Evening et sous beaucoup d'autres moins célèbres ; parmi les auteurs français, Arnaud Frich ou Jean Delmas ont tenu des propos similaires. D'autres enfin sont restés prudemment dans le vague.

En fait, il n'est pas très difficile de construire une image où des couleurs différentes s'imprimeront de la même façon, infirmant ipso facto toute « préservation du rapport des couleur ».



On commence par imprimer un cercle chromatique (dégradé « spectre » dans Photoshop). A partir des couleurs relevées sur le papier, on construit un deuxième cercle chromatique, nettement différent du premier à l'écran, mais qui s'imprime de la même façon.

Il n'y a donc aucune désaturation des couleurs. Il y a bel et bien une compression du gamut dans le rendu perceptif, mais seulement dans le sens des valeurs tonales (le long de l'axe des *L*)

Rendu « saturation »

Les mots du consortium ICC sont les suivants :

A.3.3 Saturation Intent
The exact gamut mapping of the saturation intent is vendor specific and involves compromises such as trading off preservation of hue in order to perserve the vividness of pure colors. It is useful for images which contain objects such as charts or diagrams.

Il s'agit cette fois d'un compromis entre la « vivacité » (saturation ?) des couleurs et leur teinte ; on aurait donc le droit de modifier ces teintes — donc de tourner autour de l'axe des valeurs — si cela permet de conserver les saturations. Comme cela vient en opposition avec les jeux sur les valeurs tonales du rendu perceptif, on peut sous-entendre qu'on devrait opérer à valeur tonale inchangée. Pas facile ! L'exemple de l'impression du cercle chromatique dans la figure précédente montre surtout un net assombrissement. Quoi qu'il en soit, en pratique, on constatera généralement très peu d'écart avec les autres rendus, mais on peut toujours essayer !

Annexe C : comment naviguer sur le web avec un moniteur à grand gamut sans souffrir d'images trop saturées

Le problème vient des (nombreuses) images qui sont mises en ligne sans profil ICC incorporé. Dans la plupart des navigateurs, elles sont envoyées telles qu'elles vers la carte vidéo ; cela revient à leur attribuer le profil du moniteur. Comme la plupart de ces images ont été préparées avec un profil sRGB et que la plupart des moniteurs ont un profil voisin de sRGB, leurs couleurs n'en souffrent généralement pas trop. Malheureusement, de plus en plus de photographes utilisent des moniteurs « à grand gamut » (proche de Adobe-RGB98) qui vont afficher ces images avec une saturation excessive.

Pour éviter cet effet, il ne suffit pas d'avoir un navigateur Internet qui tienne compte du profil des images ; il faut en plus que ce navigateur attribue le profil sRGB aux images qui n'en ont pas. En ce début 2011, nous ne connaissons que Firefox qui en soit capable, mais à condition de modifier son comportement par défaut. La manœuvre n'est toutefois pas triviale :

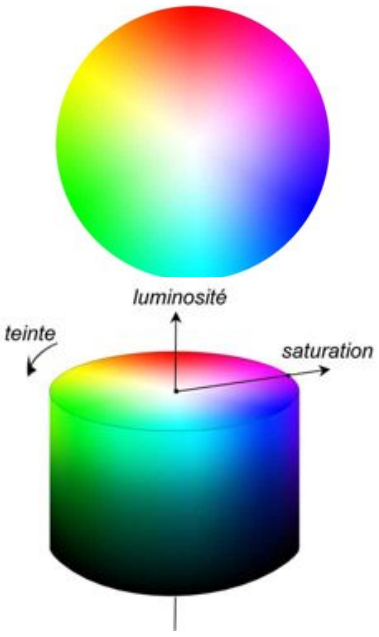
(i) entrer *about:config* dans la barre d'adresse (la suite à vos risques et périls)
(ii) cliquer sur la ligne *gfx.color_management*
(iii) entrer la valeur 1 dans la boîte de dialogue
(iv) redémarrer Firefox

Dans (iii) la valeur par défaut est 2, c.à.d. que Firefox tient compte du profil des images quand il y en a un, sinon ne fait rien (c.à.d. ces images prennent le profil de l'écran). La valeur 1 attribue sRGB comme profil par défaut pour les images toutes nues et la valeur 0 désactive toute gestion de la couleur.

Annexe D : les modèles TSL (teinte, saturation, luminosité)

Le but de cet annexe est de présenter rapidement ces modèles et de bien montrer que leur construction n'a pas grand chose à voir avec celle du modèle LAB. Nous allons présenter les deux que Photoshop utilise dans ses menus et boîtes de dialogue — sans prévenir le moins du monde que les vocables saturation et luminosité vont changer de sens de l'un à l'autre. On les présente habituellement avec quelques formules simples (http://www.oitregor.com/numeric/saturation/TSL.html), mais nous contenterons ici de quelques dessins.

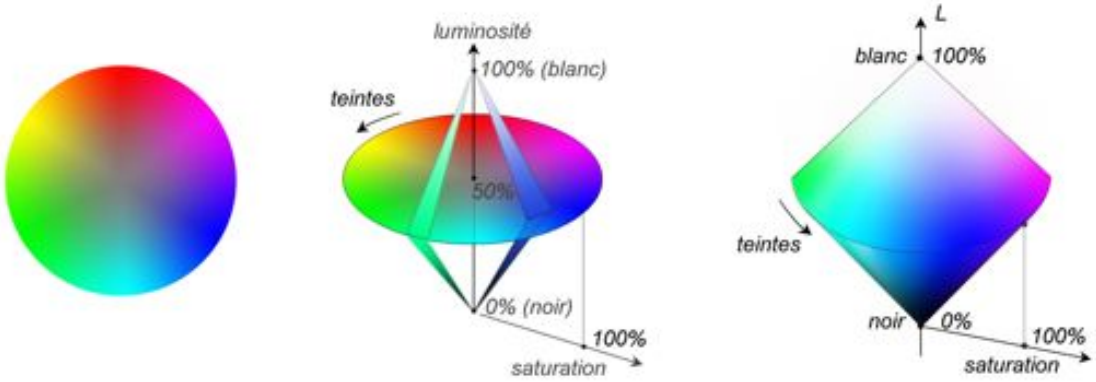
Le premier modèle est celui qui est utilisé dans le sélecteur de couleurs. On part d'un cercle chromatique modifié comme indiqué ci-contre : on a les couleurs pures sur la circonférence et on rajoute progressivement du blanc jusqu'au blanc pur au centre du cercle. On obtient ainsi les couleurs les plus lumineuses qu'on puisse obtenir avec les primaires RVB utilisées. On construit ensuite un volume cylindrique en assombrissant progressivement les couleurs (c.à.d. en diminuant les composantes RVB du même facteur) jusqu'à l'obtention d'un cercle uniformément noir sur la base inférieure du cylindre.



La luminosité est évaluée par la hauteur dans le cylindre et on la compte en pourcentage, de 0% tout en bas à 100% tout en haut ; la saturation est évaluée avec la distance à l'axe des luminosités et on la chiffre également par un pourcentage, de 0% sur l'axe à 100% sur la périphérie. Les teintes sont évalués en degrés le long du cercle chromatique.

Le gros défaut de ce modèle est qu'il accorde des « saturations » allant jusqu'à 100% pour des couleurs très sombres pour lesquelles l'œil est bien incapable de discerner de la couleur.

Le deuxième modèle est celui qui intervient dans le réglage teinte/saturation de Photoshop. Sa construction est expliquée dans la figure suivante



On va obtenir le volume biconique figurant à droite, la pointe du haut correspondant au blanc et celle du bas au noir. La première étape est de modifier le cercle chromatique précédent en faisant converger les couleurs au centre non pas vers le blanc mais vers un gris médian (*RVB=128,128,128*). Ce cercle va former la base médiane du volume biconique. Ensuite, la figure du milieu explique comment on remplit les deux cônes : à partir d'un point quelconque du cercle médian, on trace les deux segments allant vers les points blanc et noir et on fait glisser la couleur vers le blanc au fur et à mesure qu'on monte vers le sommet blanc, ou vers le noir au fur et à mesure qu'on descend vers le sommet noir. On remplit tout le volume en partant des différents points du cercle médian.

Comme précédemment, la luminosité va de 0 à 100 % le long de l'axe vertical, la saturation correspond à la distance à l'axe des L, comptée en pourcentage avec 100% sur le pourtour du cercle médian et les teintes sont évaluées le long du cercle chromatique.

Ce deuxième modèle est un peu plus satisfaisant en ce que les couleurs très sombres ont forcément une saturation faible. Cependant, l'un et l'autre ne sont que de simples déguisements des RVB ; ni l'un ni l'autre n'explique les valeurs tonales distinctes des différentes couleurs et ni l'un ni l'autre ne prétend à l'uniformité perceptuelle.