

# Il n'y a pas de couleur sans lumière . . . mais il y a couleurs . . . et couleurs

(2<sup>me</sup> partie)

## Des couleurs et des chiffres - Comment « mesure-t-on » les couleurs ?

**Yvon Renotte**, Dr Sci., enseignant-chercheur honoraire de l'Université de Liège  
Past-prof invité, co-fondateur du HOLOLAB, Dépt AGO (Astrophysique, Géophysique et Océanographie)  
[y.renotte@uliege.be](mailto:y.renotte@uliege.be) – <https://orbi.uliege.be/profile?uid=p041181> - [www.linkedin.com/in/yvon-renotte-54a91a13](https://www.linkedin.com/in/yvon-renotte-54a91a13)

### Coordonnées chromatiques : de CIE-1931 (RGB/XYZ) à CIE-1976 (LUV/LAB et post - Rappels

#### Le système standard RGB (sRGB) – décimal et hexadécimal

Exemple des « roses »

#### Systèmes HSV, HSL et HSI

Annexe : Exemples de transfert des coordonnées CIE à sRGB et dérivés

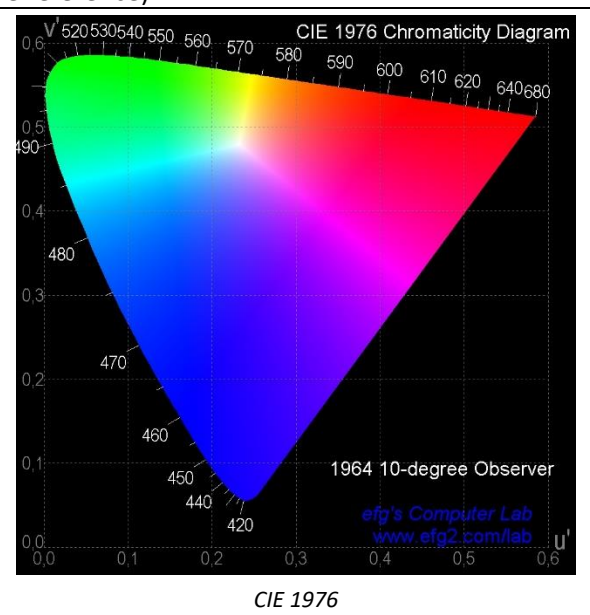
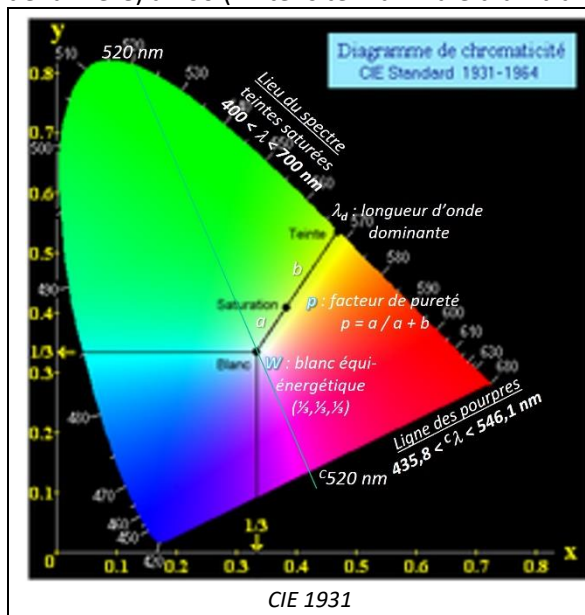
Transfert des coordonnées RGB/XYZ aux coordonnées LMS

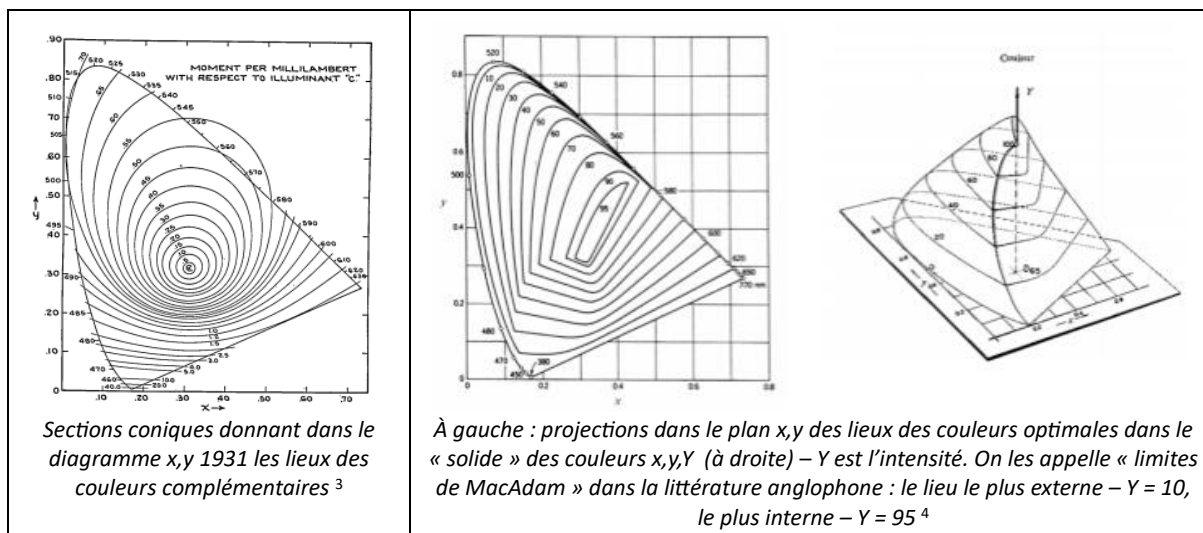
Comme signalé précédemment, on ne « mesure » pas la couleur, pour une raison toute simple : la couleur n'est pas une grandeur physique l'énergie, la force ou la puissance. C'est une « illusion d'optique », une impression visuelle qui nécessite trois paramètres pour être « numérisée », un photométrique et deux chromatiques. C'est le principe de la trichromie.

### Coordonnées chromatiques : de CIE-1931 (RGB/XYZ) à CIE-1976 (LUV/LAB et post) - Rappels

J'ai proposé récemment quelques notes rappelant l'évolution des processus de perception, de quantification et de reproduction des couleurs, depuis l'acte fondateur de Newton qui démontra que contrairement à ce que l'on croyait depuis l'Antiquité, la couleur blanche est composée d'une suite continue de couleurs monochromatiques allant du violet au rouge foncé (ce que l'on appelle communément « le spectre visible »), jusqu'aux systèmes de coordonnées chromatiques promus par la CIE (Commission Internationale de l'Éclairage), via l'introduction du concept de la trichromie par Young au début du 19<sup>e</sup> s, théorisé par Maxwell et propagé par Helmholtz <sup>1</sup>.

Aujourd'hui, nous représentons donc une teinte par un triplet de coordonnées, deux chromatiques et une photométrique caractérisant l'intensité lumineuse (la luminance s'il s'agit d'un émetteur, l'éclairement pour un récepteur) <sup>2</sup>. Dans certains cas, cette dernière est « normalisée » de 0 (l'absence de lumière) à 100 (l'intensité maximale d'un blanc de référence).

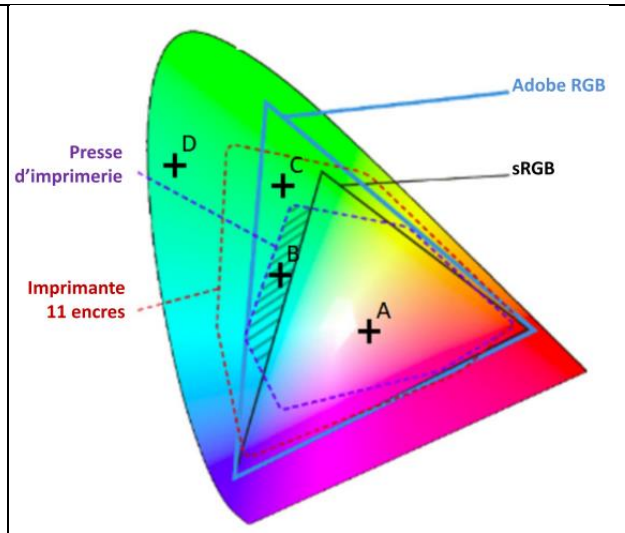
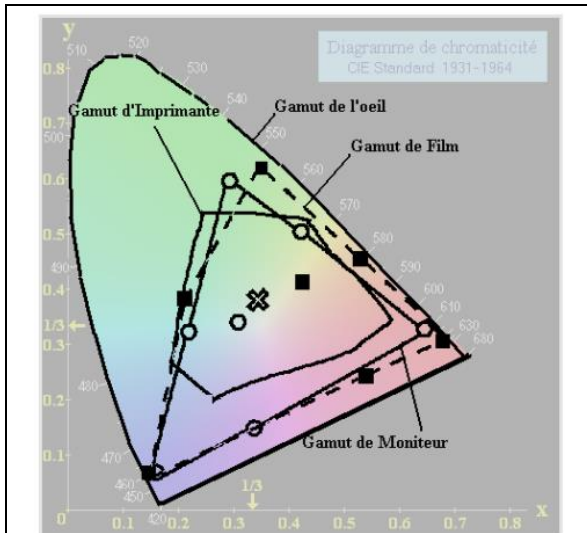




Pour rappel, la CIE a retenu deux espaces chromatiques uniformes communément appelés CIELUV 1976 et CIELAB 1976 dans le souci d'uniformiser la représentation des sensations colorées<sup>5</sup>. Ils ont connu des adaptations régulières en fonction des évolutions technologiques, adaptations détaillées dans les procès-verbaux des commissions et réunions périodiques de la CIE. Le(a) lecteur(trice) intéressé(e) peut s'y référer. On notera que le système x,y 1931 est encore largement utilisé dans la pratique.

### **Le système standard RGB (sRGB) – décimal et hexadécimal**

Et pourtant, si vous souhaitez colorer des figures sur votre ordinateur, celui-ci ne vous propose pas de définir les teintes souhaitées par des triplets tel ceux définis supra. Il vous propose une palette de teintes construites à partir de trois couleurs, « un rouge », « un vert » et « un bleu », chacune numérisée de 0 à 255 : 0, 0, 0 étant le noir et 255, 255, 255 le blanc. Ou sous format hexadécimal<sup>6</sup>, un système de numérotation en base 16, plus pratique pour l'usage informatique : de # 000000 (le noir) à # FFFFFFFF (le blanc). Ainsi, la couleur jaune est représentée par 255, 255, 0 (mélange du rouge et du vert) ou # FFFF00. Cette représentation a été dictée par la pratique, notamment en tenant compte des gamuts des imprimantes, des écrans TV, des PC et des smartphones, . . .<sup>7</sup> qui peuvent d'ailleurs varier d'un constructeur / éditeur à l'autre. Ce système de coordonnées dénommé **sRGB** (standard RGB)<sup>8</sup> peut être associé à celles adoptées par la CIE à l'aide de matrices de transfert plus ou moins complexes disponibles dans la littérature spécialisée. Des logiciels permettent également ces opérations. La norme sRGB, a été proposée par les sociétés *Hewlett-Packard* et *Microsoft* en 1996 pour les dispositifs numériques et est devenue la norme CIE 61966-2-1 en 1999 comme « espace chromatique commun de stockage » pour que les équipements et systèmes d'exploitation différents puissent communiquer simplement.



Un gamut est défini par le volume des couleurs réalisables par un système informatique (ou industriel) exprimé dans un espace colorimétrique de référence<sup>9</sup>

Toutes les couleurs perçues par l'œil humain standard ne sont pas reproductibles par un dispositif de capture ou de reproduction d'images : - les couleurs reproductibles par ces dispositifs sont celles appartenant à son gamut

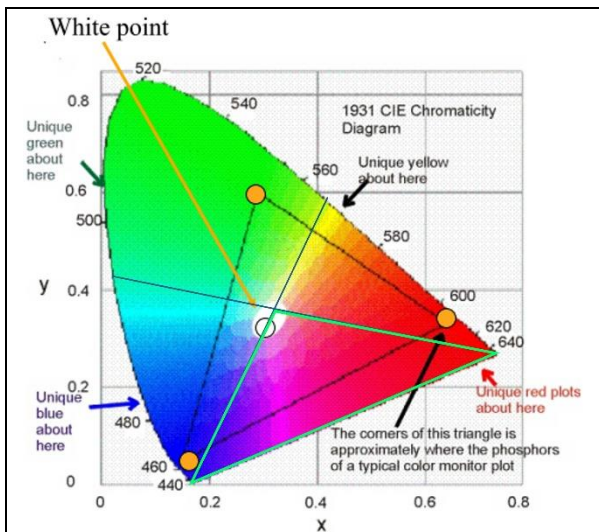
- les couleurs hors de ce gamut seront légèrement différentes de celles réellement perçues par l'œil humain standard



couleur appartenant au gamut d'un ordinateur



la « même » couleur reproduite par une imprimante



Gamut du système sRGB dans le diagramme de chromaticité CIE 1931 : triangle noir – sommets jaunes

Le triangle vert dont la base est la droite des pourpres est le domaine des couleurs non spectrales, complémentaires des verts dont les longueurs d'onde sont comprises entre  $\pm 497$  et  $\pm 570$  nm

	x	y	$\lambda$	pureté d'excitation
Blanc (D65)	0,3127	0,3290	—	0
Rouge	0,64	0,33	612 nm	92 %
Vert	0,30	0,60	547 nm	74 %
Bleu	0,15	0,06	464,5 nm	93 %

Espace sRGB : Coordonnées des couleurs primaires dans l'espace CIE xyY – le point blanc correspond à l'illuminant D65<sup>10</sup>

La transformation des coordonnées XYZ en sRGB ne peut pas se faire simplement via une matrice de transformation ad hoc – elle nécessite une étape intermédiaire pour que les valeurs du second système soient contenues dans son gamut :  $0 < \text{coordonnées sRGB} < 1$

Il suffit de les multiplier par 255 et arrondir à l'entier si les valeurs doivent être comprises entre 0 et 255 par exemple pour un affichage 8 bits

Il en est de même pour la transformation de sRGB en XYZ

Heureusement d'excellents logiciels sont disponibles sur le net qui permettent aisément de multiples conversions ainsi que le relevé des coordonnées sur des plages colorées<sup>11</sup>

### Exemple des « roses »

Pour illustrer mon propos, j'ai volontairement choisi de traiter des couleurs « un peu particulières », qui n'ont pas de teinte spectrale dominantes sur le « lieu du spectre » : des roses dont la teinte dominante est sur la « droite des pourpres ». Elles sont donc caractérisées par la longueur d'onde  $\lambda_d^c$  de leur couleur dominante complémentaire (un vert de longueur d'onde dominante  $\sim 497 \text{ nm} \leq \lambda_d \leq \sim 570 \text{ nm}$ ), leur facteur de pureté  $p$  et leur intensité (normalisée – exprimée de 0,00 à 1,00 -

ou non – exprimée de 0 à 255 - selon le système chromatique utilisé) – en réalité la *luminance* de la plage colorée considérée ( $W/m^2.sr$  – MKSA - ou  $cd/m^2$  – unités photovisuelles).

Cinq teintes ont été arbitrairement sélectionnées dans un nuancier <sup>12</sup> en allant du « rose pâle » vers le « fuchsia », aucune n'est saturée. Elles sont notées Ti et leurs complémentaires Ci (i = 1 à 5) et sont identifiées par leur code *sRGB hexadécimal*.

D'autres gamuts ont été développés par diverses sociétés pour rencontrer des besoins spécifiques. Nous ne les détaillerons pas, ils sont disponibles dans la littérature spécialisée <sup>9</sup>. Nous nous limiterons à l'un des plus couramment utilisé par le grand public, évoqué supra : le **sRGB**.

teintes	Rose chair		Rose saumon		Rose bonbon		Rose Barbie		Rose shocking		Hexa
	T1	C1	T2	C2	T3	C3	T4	C4	T5	C5	
sRGB	# FDC3AD	# 023C52	# FF91A4	# 006E5B	# F9429E	# 06BD61	# D91883	# 26E77C	# FC0FC1	# 03F03E	0-255
	253-195-173	0-60-82	255-145-164	0-110-91	249-66-158	6-189-97	217-24-131	38-231-124	252-15-193	3-240-62	0,00-1,00
	0,99-0,76-0,68	0,01-0,24-0,32	1,00-0,57-0,64	0,00-0,43-0,36	0,98-0,26-0,62	0,02-0,74-0,38	0,85-0,09-0,51	0,15-0,91-0,49	0,99-0,06-0,76	0,01-0,94-0,24	
CIE-xyY	0,37828	0,20310	0,40650	0,23944	0,43423	0,27183	0,45195	0,27340	0,39186	0,29226	X
	0,35234	0,24741	0,30938	0,38198	0,24395	0,49625	0,23319	0,48877	0,19531	0,57133	Y
	62,933	3,853	44,196	11,906	26,511	37,294	17,048	59,015	24,893	62,683	Y

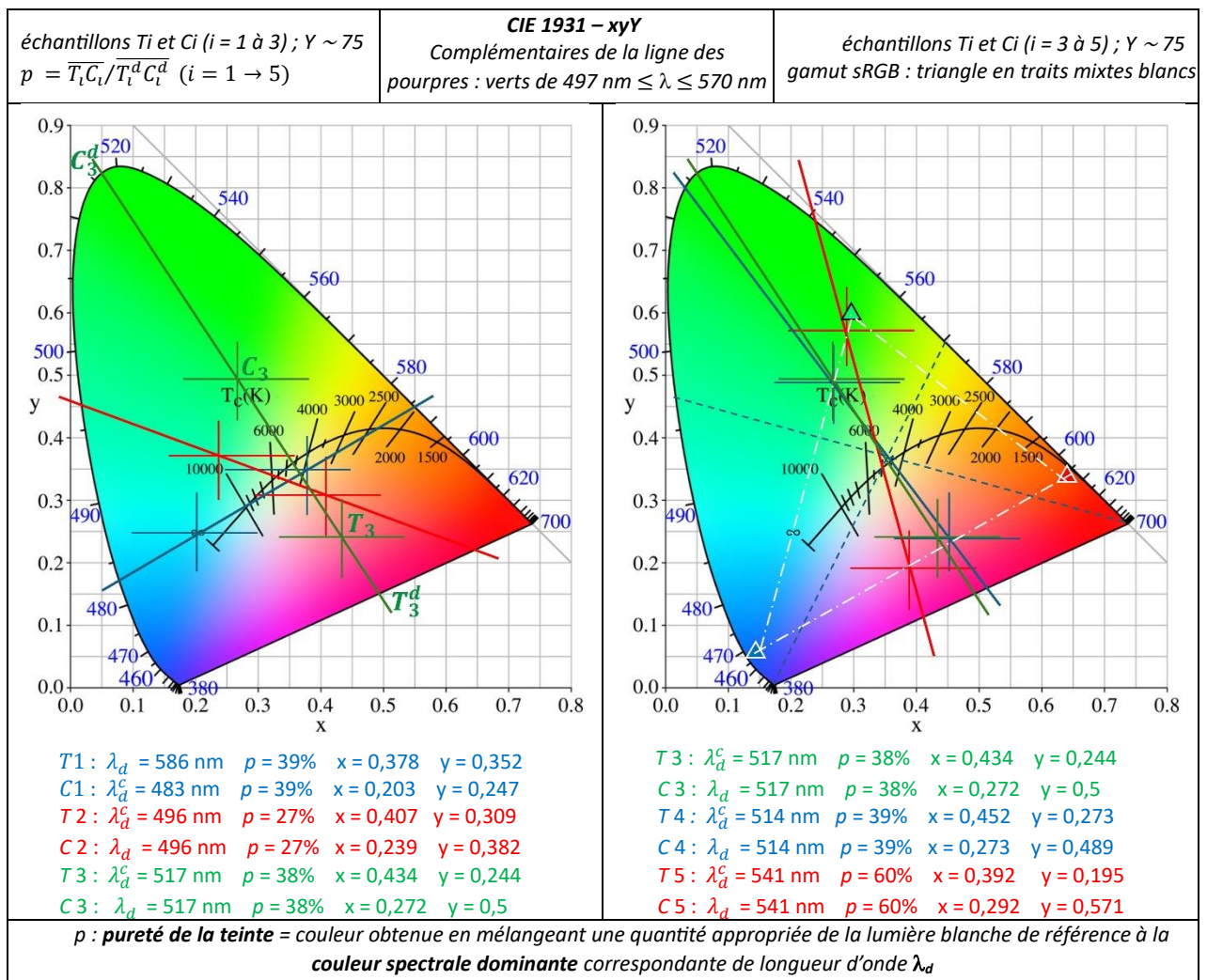
illuminant D65, ouverture 2°

Si l'on fait varier Y, la *luminance* (ou la clarté), en maintenant x et y, la luminosité de la couleur va être modifiée sans en changer la *nature* (la teinte et la saturation). En augmentant Y, la couleur devient plus claire et plus lumineuse, en diminuant Y, elle s'assombrit. Si Y = 0, on obtient du *noir absolu*.

Le tableau suivant montre les teintes correspondant à celles analysées supra en maintenant pour chacune les valeurs de x et y mais en modifiant la luminance (la valeur de Y).

teintes	T1	C1	T2	C2	T3	C3	T4	C4	T5	C5	
	#FDC3AD	#023C52	#FF91A4	#006E5B	#F9429E	#06BD61	#D91883	#26E77C	#FC0FC1	#03F03E	hexa
	0,378	0,203	0,407	0,239	0,434	0,272	0,452	0,273	0,392	0,292	x
	0,352	0,247	0,309	0,382	0,244	0,500	0,273	0,489	0,195	0,571	y
	62,933	3,853	44,196	11,906	26,511	37,294	17,048	59,015	24,893	62,683	Y
Y croissants	#856559	#08749B	#9E5764	#007B66	#C1317A	#007D3D	#BB3D6A	#0E7C40	#CA089A	#007E1C	15
	#A88071	#0D93C4	#C76F7E	#009B81	#F3409A	#009E4E	#EB4F86	#159D52	#FD0DC2	#009F26	25
	#E5B09C	#16C9FF	#FF99AD	#00D4B1	#FF5AD2	#00D86D	#FF6EB8	#20D773	#FF16FF	#01D938	50
	#FFD3BC	#1DF1FF	#FFB8D0	#00FDD4	#FF6EFB	#00FF84	#FF85DC	#29FF8B	#FF1CFF	#01FF44	75
	#FFDFC6	#1FFFFFF	#FFC2DC	#00FFF1	#FF74FF	#00FF8C	#FF8DE8	#2CFF93	#FF1EFF	#01FF49	85
	#FFEFD5	#1FFFFFF	#FFD1EC	#00FFF1	#FF7DFF	#00FF97	#FF98FA	#30FF9E	#FF21FF	#01FF4F	100

Le système chromatique *CIE 1931-xyY* est encore très souvent utilisé aujourd'hui, dans la pratique par exemple pour définir les gamuts comme le sRGB, car il reste « une sorte de référence universelle ». Il a connu plusieurs modifications dans le souci d'en améliorer l'uniformité pour des usages analytiques. En 1960, x et y ont été remplacés par u et v, eux-mêmes remplacés par u' et v' en 1976, conduisant à des formats plus précis – *CIE1976 L\*U\*V\** et *CIE1976 L\*a\*b\**, évoqués antérieurement <sup>5</sup>, pour mieux approcher la mesure de la perception réelle.



### Systèmes HSV HSL et HSI

Indépendamment des adaptations de la CIE « parfaites » pour les machines, des systèmes plus intuitifs ont été développés, conçus pour être plus proches de la perception humaine de la couleur : les systèmes **HSV** (*Hue, Saturation, Value*) et **HSL** (*Hue, Saturation, Lightness*)<sup>13</sup>. **H** est identique dans les deux, on le représente sur un cercle chromatique de  $0^\circ$  à  $360^\circ$  :  $0^\circ / 360^\circ$  : rouge,  $60^\circ$  : jaune,  $120^\circ$  : vert,  $180^\circ$  : cyan,  $240^\circ$  : bleu, et  $300^\circ$  : magenta. La **Saturation S** représente l'intensité ou la "pureté" de la couleur (de 0 % pour du gris à 100 % pour une couleur vive).

Le modèle **HSV** (*Teinte, Saturation, Valeur*, aussi appelé **HSB** pour *Brightness*)<sup>14</sup> simule la manière dont les peintres mélangent les couleurs. **V** représente l'intensité lumineuse : à 0 %, c'est le noir total, à 100 %, la couleur est à son maximum de « force » (cela peut être un rouge vif ou un blanc pur selon la saturation). On peut établir l'analogie : imaginez que vous ajoutez de la peinture noire à un pigment pur pour l'assombrir.

Le modèle **HSL** (*Teinte, Saturation, Luminosité*)<sup>15</sup> est souvent privilégié par les designers web et les artistes car il est « plus symétrique ». La grande différence d'avec HSV réside au niveau de la définition de **L** : à 0 %, c'est le noir, à 50 %, la couleur est "pure" (si la saturation est à 100 %), à 100 %, c'est le blanc pur quelle que soit la teinte ou la saturation. L'analogie précédente devient : Imaginez que vous ajoutez de la peinture noire pour assombrir (0-50 %) ou de la peinture blanche pour éclaircir (50-100 %).

Résumé	HSV (Value)	HSL (Lightness)
Point blanc	S = 0 ; V = 1	L = 1 (peu importe S)
Couleur pure	S = 1 ; V = 1	S = 1 ; L = 0,5
Intuition	Mélange de pigments	Gestion de l'éclairage
Utilisation	Graphisme pro, Photoshop	CSS*, Design Web, UI**

\*) CSS (*Cascading Style Sheets*) <sup>16</sup> « feuilles de style en cascade » est un langage informatique utilisé pour décrire la présentation d'un document écrit en HTML ou XML. Le langage XML (*eXtensible Markup Language*) <sup>17</sup> est un standard du W3C utilisé pour structurer, stocker et échanger des données de manière hiérarchisée, indépendante de toute plateforme ou logiciel. Il permet de créer des balises personnalisées pour décrire le contenu, se distinguant du HTML qui sert à l'afficher.

\*\*\*) UI (*User Interface*) <sup>18</sup> « interface utilisateur » désigne l'ensemble des éléments graphiques et interactifs (couleurs, typographies, boutons, mise en page) permettant à un utilisateur d'interagir avec un produit numérique. Le design UI se concentre sur l'esthétique et la clarté, rendant la navigation intuitive, fluide et agréable.

Un modèle analogue aux précédents existe, l'espace **HSI** (*Hue, Saturation et I pour intensité*) <sup>19</sup>. Ce système présente l'avantage d'être proche de la perception humaine de la couleur. Alors que les coordonnées RGB pourraient s'apparenter aux coordonnées cartésiennes dans cet espace, les coordonnées HSI s'apparenteraient, elles, aux coordonnées cylindriques. L'intensité est généralement exprimée sous la forme d'une *valeur normalisée* ou d'un *pourcentage*. C'est une unité relative : 0% pour l'absence totale de lumière (le noir), 100% pour l'intensité maximale (le blanc si S = 0). Dans la pratique informatique (fichiers images, programmation), cette valeur est très souvent convertie sur 8 bits. On retrouve alors une échelle allant de 0 à 255. À noter que dans le modèle HSI, l'intensité est une simple *moyenne arithmétique* des composantes Rouge (R), Vert (V) et Bleu (B) :  $I = (R + V + B)/3$ . *Ce modèle ne tient pas compte de la perception humaine (le fait que notre œil soit plus sensible au vert qu'au bleu). Pour ce faire, on utilisera plutôt le modèle HSL ou HSV, ou des calculs de luminance pondérés.*

*Dans la littérature, on trouve régulièrement des représentations cylindriques ou (bi)coniques des espaces évoqués ci-avant. On peut donc raisonnablement se demander si elles sont équivalentes et/ou si l'on peut les utiliser indifféremment ?*

Les modèles mathématiques sont différents, mais leurs représentations géométriques (cylindre ou cône) sont des choix de visualisation souvent interchangeables. Ils sont initialement définis dans un cylindre mais cette forme est souvent critiquée car elle n'est pas "physiquement" intuitive.

La *représentation cylindrique* est la plus simple et la plus courante dans les logiciels de design (Photoshop, CSS) parce qu'elle est pratique mathématiquement : on garde une saturation de 0 à 100% sur toute la hauteur. Problème : dans un cylindre, le sommet est un disque blanc entier alors que, techniquement, il n'y a qu'un seul "blanc" pur, ce qui crée une redondance visuelle.

La *représentation conique* paraît donc plus logique. Pour corriger l'aspect visuel, on utilise souvent :

- Le cône simple (pour HSV) : à la base (pointe), la valeur est 0 (noir) ; plus on monte, plus le cercle s'élargit pour exprimer la diversité des couleurs.

- Le double cône ou bicône (pour HSL et HSI) puisque le noir (L/I = 0) et le blanc (L/I = 1) sont des points « uniques » : la forme s'affine aux deux extrémités et s'élargit au centre (L/I = 0,5), là où les couleurs sont les plus saturées.

	Modèle HSV	Modèle HSL	Modèle HSI
Représentation cylindre			$H = \cos^{-1} \frac{2R - V - B}{\sqrt{R^2 + V^2 + B^2 - (RV + VB + BR)}}$ si $V \geq B$ ; sinon $H = 2\pi - H$ $S = 1 - \frac{3 \min(R, V, B)}{R + V + B} ; I = \frac{R + V + B}{3}$ <p>L'intensité représente la luminosité globale sur l'axe vertical central (axe achromatique). La base du cône est noir (I=0), le sommet est blanc (I=1). Le long de cet axe on ne trouve que des niveaux de gris. La circonférence la plus large correspond aux couleurs pures où l'intensité est de 1/3 ou 2/3</p>
Représentation (bi)conique			

En résumé, le (bi)cône est une représentation géométrique fidèle des relations colorimétriques. Le cylindre est une représentation géométrique pratique mais spatialement fautive, utilisée pour simplifier les interfaces utilisateurs. Il « déforme » la réalité en élargissant artificiellement le sommet (blanc) et la base (noir) pour qu'ils aient le même diamètre que le centre uniquement pour faciliter l'utilisation dans les interfaces graphiques, les « sélecteurs de couleurs ».

**Exemple : Cas des couleurs pures**

sRGB hexa	#FF0000	#FFFF00	#00FF00	#00FFFF	#0000FF	#FF00FF	#FFFFFF	#000000
sRGB 255	255,0,0	255,255,0	0,255,0	0,255,255	0,0,255	255,0,255	255,255,255	0,0,0
H	0	0,16667	0,333	0,5	0,66667	0,83333		
H (en °)	0	60	120	180	240	300		
S	1	1	1	1	1	1		
V	1	1	1	1	1	1	1	0
L	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	1	0
I	0,33	0,67	0,33	0,67	0,33	0,67	1	0
x	0,64	0,42	0,3	0,22	0,15	0,32	0,31	
y	0,33	0,51	0,6	0,33	0,06	0,15	0,33	
Y	21,267	92,78	71,52	78,73	7,22	28,49	100	0

### Annexe – exemples de transfert des coordonnées CIE à sRGB et dérivés

La suite de l'exposé est « relativement technique » et suppose un minimum de connaissances en calcul matriciel. Le/La lecteur/trice non averti(e) ou non intéressé(e) peut la « sauter » sans problème.

Exemple d'analyse d'une teinte (le rose shocking) et de sa complémentaire : les échantillons T5 (x = 0,392 ; y = 0,195) et C5 (x = 0,292 ; y = 0,571) sous la luminance Y = 75. Nous avons choisi de « partir » des valeurs précédentes, arbitrairement j'en conviens . . . mais « il faut bien partir de quelque part » et

le système de coordonnées colorimétrique CIE 1931 – xyY est un des premiers à avoir été développé ! Nous allons l'associer au système CIE 1931 - RGB dont il est issu et aux notations sRGB couramment utilisées. Pour rappel, les notations sRGB hexa respectives de T5 et C5 sont #FF1CFF et #01FF44, les notations sRGB 0-255 : (255-28-255) et (1-255-68). On notera qu'elles sont « assez proches » des couleurs pures « vert » et « cyan » ce qui les situe à la limite ou hors du gamut du système considéré, comme on peut l'observer sur les diagrammes de chromaticité correspondants.

Teintes	CIE 1931 – xyY (RGB/rgb – XYZ/xyz) <sup>1,2</sup>						sRGB <sup>8</sup>				
	X R	Y G	Z B	x r	y g	z b	0 - 255	0,0 - 1,0	hexa		
T5	150,77 38,033	75 7,682	158,85 28,317	0,392 0,5137	0,195 0,1038	0,413 0,3825	255-28-255	1,0-0,11-1,0	#FF1CFF		
C5	38,35 2,66	75 15,718	17,96 0,0009	0,292 0,1447	0,571 0,8552	0,137 0,00005	1-255-68	0,004-1-0,27	#01FF44		
$X = Yx/y ; Z = Yz/y$ $z = 1 - x - y ; S = X + Y + Z$ $x = X/S ; y = Y/S ; z = Z/S$						$T = R + G + B$ $r = R/T ; g = G/T ; b = B/T$ $r + g + b = 1$			<b>Matrice de transfert de la notation XYZ à la notation sRGB</b> L'opération s'effectue en deux étapes 1 <sup>re</sup> étape : $\begin{pmatrix} X' \\ Y' \\ Z' \end{pmatrix} = C * \begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix}$ $C = 1$ si $X, Y, Z \in [0,1]$ , sinon $C = 10^{-2}$ 2 <sup>e</sup> étape : $N = (1,055 K^{1/2,4}) - 0,055$ si $K > 0,0031308$ , sinon $N = 12,92 K$ $R, G, B$ de sRGB(0 – 255) = $ 255 * N $		
$\begin{pmatrix} R' \\ G' \\ B' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0,418454 & -0,158657 & -0,0828317 \\ -0,0911647 & 0,252426 & 0,0157053 \\ 0,0009209 & -0,0025498 & 0,178595 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix}$ <b>Matrice de transfert du système XYZ au système RGB – CIE1931</b> [NB : l'opération « de normalisation » RGB → XYZ est intervenue en premier]											
$s \begin{pmatrix} R' \\ G' \\ B' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 3,2406 & -1,5372 & -0,4986 \\ -0,9689 & 1,8758 & 0,0415 \\ 0,0557 & -0,204 & 1,057 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} X' \\ Y' \\ Z' \end{pmatrix}$ $K = R', G', B'$ de sR'G'B' ; $N = R, G, B$ de sRGB (0,0 – 1,0)											
<b>Exemple numérique – traitement de</b> $C \notin [0,1] \rightarrow C = 10^{-2}$ et $\begin{pmatrix} X' \\ Y' \\ Z' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0,3835 \\ 0,75 \\ 0,17,96 \end{pmatrix} \rightarrow s \begin{pmatrix} R' \\ G' \\ B' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 2,8 \cdot 10^{-4} \\ 1,0427 \\ 0,0557 \end{pmatrix}$ et $s \begin{pmatrix} 35,7 \cdot 10^{-4} \\ 1,0185 \\ 0,2684 \end{pmatrix}_{(0,0-1,0)} = s \begin{pmatrix} 0,9115 \\ 259,7175 \\ 68,442 \end{pmatrix}_{(0-255)} \rightarrow$ sRGB 0 – 255 « normalisé » = $\begin{pmatrix} 1 \\ 255 \\ 68 \end{pmatrix}^{(*)}$ *) les valeurs sont arrondies à l'entier « le plus proche », celles « hors gamut » (> 255), sont « égalées » à 255											

Teintes	CIE 1960 - uvY		CIE 1970 – u'v'Y		Espaces uniformes	CIE – LUV <sup>5,20</sup>		CIE – LAB <sup>5,20</sup>	
	u	v	u'	v'	L*	u*	v*	a*	b*
T5	0,3442	0,3307	0,3442	0,3852	89,393	170,042	-96,606	128,845	-45,119
C5	0,1260	0,3868	0,1260	0,5545	89,393	-83,457	100,118	-84,798	71,957
$u = 4X/(X + 15Y + 3Z)$ $= 4x/(-2x + 12y + 3)$ $v = 6Y/(X + 15Y + 3Z)$ $= 6y/(-2x + 12y + 3)$ $u' = u$ $v' = 9Y/(X + 15Y + 3Z)$ $= 9y/(-2x + 12y + 3)$					L* représente l'axe des luminances également considéré comme axe neutre (axe des niveaux de gris) u*v* et a*b* représentent la chrominance. Les plans qu'ils définissent sont à luminance / éclaircissement constant(e). Ils sont construits sur deux oppositions de couleurs : rouge-vert et bleu-jaune.				
$L^* = 116 (Y/Y_r)^{1/3} - 16$ si $Y/Y_r > 0,008856$ sinon $L^* = 903,3 (Y/Y_r)$ Référence : diffuseur à réflexion parfaite éclairé par l'illuminant D65 – 2° : $x_r, y_r$ sous $Y_r = 100$ $\rightarrow$ tristimulus $X_r = 95,047, Y_r = 100, Z_r = 108,883$ <sup>11</sup> (cf supra) et $u'_r = 0,19784, v'_r = 0,46834$ $u^* = 13L^*(u' - u'_r) ; v^* = 13L^*(v' - v'_r)$ $a^* = 500 [f(X/X_r) - f(Y/Y_r)] ; b^* = 500 [f(Y/Y_r) - f(Z/Z_r)]$ $f(\vartheta) = \vartheta^{1/3}$ si $\vartheta > 0,008856$ sinon $f(\vartheta) = 7,787\vartheta + (16/116)$									

Les systèmes suivants sont conceptuellement différents des précédents. Ils sont « associés » au *sRGB* tout en présentant des analogies avec *CIE-LUV* et *LAB*. Ils sont détaillés dans la première partie de cette note.

Teintes	H		S	L	S	V	S	I
	0,0-1,0	0-360°	$M = \max(R, G, B) ; m = \min(R, G, B) ; C = M - m$					
<b>T5</b> 255-28-255 1,0-0,11-1,0	0,8333	300°	1	0,5549	0,8902	1	0,8439	0,7033
<b>C5</b> 1-255-68 0,004-1-0,27	0,3773	135,83°	1	0,502	0,9961	1	0,9907	0,4235
$0 \leq R, G, B, S \text{ et } L \leq 1,00$			$L = (M + m)/2$ $S = C/2L \text{ si } L \leq 0,5$ $= C/(2-2L) \text{ si } L > 0,5$ $= 0 \text{ si } M = m$		$V = M$ $S = C/M$ $= 0 \text{ si } M = 0$		$I = (R + G + B)/3$ (*) $S = 1 - (m/I)$ (**) $= 0 \text{ si } R = G = B$ (***)	

\*) I ne dépend pas de la couleur mais uniquement de la quantité de lumière globale

\*\*) si l'une des composantes est nulle, S est maximale = 1

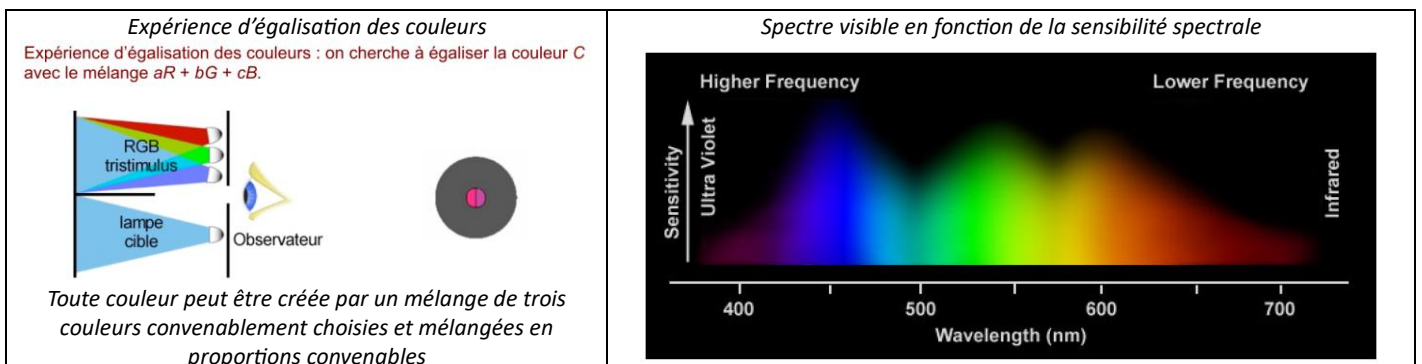
S prend en compte « la moyenne des couleurs » ce qui rend le modèle plus sensible aux variations de luminosité réelle dans une scène enregistrée par un capteur

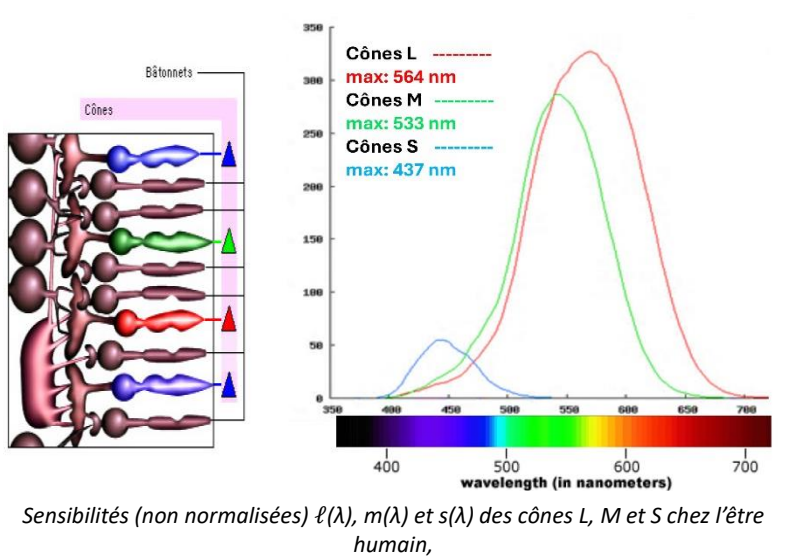
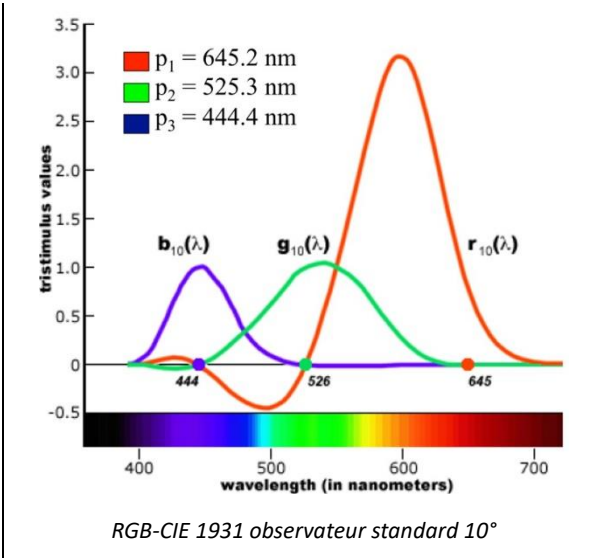
''') la couleur est un niveau de gris

Nous terminerons avec le **système de coordonnées LMS**<sup>5,21</sup>.

Nous allons le comparer au système *RGB(-XYZ)* avec lequel on a parfois (souvent ?) tendance de le confondre. Celui-ci, et ses dérivés (détaillés supra), reposent tous, directement ou indirectement, sur un processus d'égalisation photométrique et colorimétrique d'une plage colorée, caractérisée par une teinte et une luminance / un éclairage, avec une plage blanche adjacente éclairée par les rayonnements provenant de trois sources de référence respectivement rouge, bleue et verte (les couleurs primaires) modulables en intensité. Il s'agit de l'application des principes de la trichromie / trivariance et de « l'égalisation des couleurs » issus des travaux de *Thomas Young* (1801), *Hermann Grassmann* (1853) et *James Clerck Maxwell* (1857), illustrés dans le schéma ci-après<sup>1,2</sup>.

Le système *LMS* « utilise » directement le processus physiologique de la vision / perception des couleurs par les capteurs photosensibles concernés de la rétine, les trois types de cônes L, M et S, respectivement sensibles aux « grandes », « moyennes » et « courtes » longueurs d'onde<sup>5</sup>. Il tente donc d'exprimer la manière dont nous percevons les couleurs alors que les précédents proposent des méthodes qui tentent de « numériser / quantifier les couleurs » indépendamment de la manière dont nous les percevons. Les deux approches sont donc fondamentalement différentes et donc difficiles à associer via une matrice de transfert comme nous l'avons constaté en analysant le procédé dans une étude précédente<sup>5</sup>.





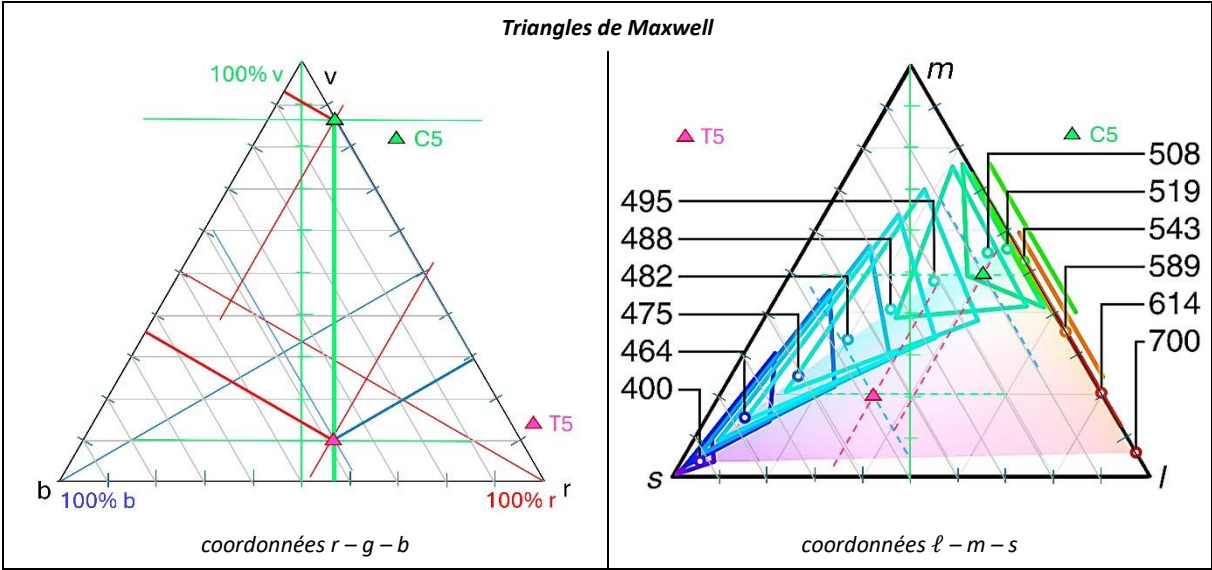
Teintes	Coordonnées rgb - XYZ			Coordonnées LMS - $\ell ms$		
	r	g	b	L	M	S
<b>T5</b> 255-28-255	0,514	0,103	0,326	100,573	60,537	145,852
<b>C5</b> 1-255-68	0,145	0,855	0,00005	66,965	79,54	16,523
	X	Y	Z	$\ell$	m	s
	150,769	75	158,846	0,328	0,197	0,475
	38,354	75	17,995	0,411	0,488	0,101

Nous avons discuté précédemment <sup>5</sup> la difficulté d'établir une matrice de transfert entre les systèmes de coordonnées CIE-1931 et LMS en raison de la dépendance de ce dernier vis-à-vis de l'environnement des plages colorées observées. Plusieurs auteurs en ont définies pour des diverses conditions. Le/la lecteur(trice) intéressé(e) pourra les consulter dans les publications de la CIE et/ou directement dans des articles spécifiques. On notera toutefois qu'une approximation est largement utilisée dans la littérature concernée, celle connue sous la dénomination « **matrice de Hunt-Pointer-Estevez** », parfois « **matrice de von Kries** ». Bien qu'elle ne soit pas « universelle », nous l'avons utilisée pour illustrer notre exemple.

$$\begin{pmatrix} L \\ M \\ S \end{pmatrix}_{D65} = \begin{pmatrix} 0,4002 & 0,7076 & -0,0808 \\ -0,2263 & 1,1653 & 0,0457 \\ 0 & 0 & 0,9182 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix}$$

$$\ell = \frac{L}{L + M + S} \quad m = \frac{M}{L + M + S} \quad s = \frac{S}{L + M + S}$$

M-HPE : matrice de Hunt-Pointer-Estevez normalisée à D65  $\ell + m + s = 1$



Les détails des différents systèmes de coordonnées chromatiques exposés supra ont été présentés dans la première partie de cette note ou dans des exposés antérieurs <sup>1,2</sup>. Rappelons que d'autres systèmes ont été développés pour des applications spécifiques (plateformes *Adobe, Java, Swift*, . . . , formats TV et autres capteurs, . . . ). Nous ne les aborderons pas ici dans le souci de ne pas « allonger inutilement » une note probablement déjà « suffisamment complexe » pour le/la lecteur/trice intéressé(e) mais non spécialisé(e), notre but n'étant pas de « les rebuter, voire les effrayer à priori » en les confrontant à des formalismes qui leur sont étrangers. Ils sont décrits dans des publications spécialisées <sup>9</sup>. Nous avons donc choisi de ne proposer que des systèmes couramment rencontrés par « l'utilisateur moyen ».

- 
1. Yvon Renotte, *Il n'y a pas de couleur sans lumière . . . mais il y a . . . couleurs et couleurs*, 17 pages (26-10-2024), <https://hdl.handle.net/2268/323862>
  2. Yvon Renotte, *La couleur, une question simple ?*, « iCube en Lumière », Campus CNRS de Cronenbourg iCube / CNRS, Université de Strasbourg, 19 juin 2015, <http://hdl.handle.net/2268/258726>
  3. David L. MacAdam, *Photometric Relationships Between Complementary Colors*, JOSA, 28 (1938), 103-111 ; Paul Kowaliski, *Vision et mesure de la couleur*, Masson, 2<sup>e</sup> éd (1990), 159-161
  4. Jaume Pujola, Francisco Martínez-Verdúb and Pascual Capilla, *Estimation of the Device Gamut of a Digital Camera in Raw Performance Using Optimal Color-Stimuli*, IS&T's 2003 PICS Conference, 530-535 ; Osamu Masuda, João M. M. Linhares, Paulo E. R. Felgueirasa, Sérgio M. C. Nascimento, *Lighting spectra for the maximum colorfulness*, Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering (May 2011), 7 pages
  5. Yvon Renotte, *OLO, une couleur que l'on n'avait jamais vue . . . science ou science fiction ?*, 22 pages (11-12-2025), <https://hdl.handle.net/2268/335269>
  6. [https://fr.wikipedia.org/wiki/Syst%C3%A8me\\_hexad%C3%A9cimal](https://fr.wikipedia.org/wiki/Syst%C3%A8me_hexad%C3%A9cimal)
  7. <https://fr.wikipedia.org/wiki/Gamut>
  8. <https://fr.wikipedia.org/wiki/SRGB>
  9. Charles A. Wüthrich, *Fundamentals of Imaging Colour Spaces*, Bauhaus-Universität Weimar, [https://www.uni-weimar.de/fileadmin/user/fak/medien/professuren/Computer\\_Graphics/3-ima-color-spaces17.pdf](https://www.uni-weimar.de/fileadmin/user/fak/medien/professuren/Computer_Graphics/3-ima-color-spaces17.pdf) ; Eric Marchand, *Colorimétrie*, Université de Rennes 1, <https://people.rennes.inria.fr/Eric.Marchand/ESIR/ESIR2/BINP/couleur.pdf> ; *Créer et analyser des couleurs*, Ressource professeur pour la 1STD2A, [https://phychim.ac-versailles.fr/IMG/pdf/cours\\_gamut.pdf](https://phychim.ac-versailles.fr/IMG/pdf/cours_gamut.pdf) ;
  10. <https://fr.wikipedia.org/wiki/D65> ; <https://fr.wikipedia.org/wiki/Illuminant> ; *C'est quoi la norme D65 ?*, <https://www.gamain.fr/fr/news/2018-08-24/c-est-quoi-la-norme-d65>
  11. <https://www.easyrgb.com/en/convert.php> ; <https://stackoverflow.com/questions/70612781/how-to-convert-ikea-light-bulb-color-xy-cie-1931-colorspace-to-rgb> ; <https://sciapps.sci-sim.com/CIE1931.html> ; <https://hellotools.org/fr/trouver-la-couleur-compl%C3%A9mentaire-dune-couleur> ; <https://www.site24x7.com/fr/tools/selecteur-de-code-couleur.html> ; <https://imagecolorpicker.com/fr>
  12. <https://thecolorfashionista.com/2022/12/01/quel-rose-choisir-selon-sa-colorimétrie/>
  13. <https://couleur-science.eu/?d=4a0178--comment-representer-une-couleur-les-formats-cylindriques-hsv-et-hsl> ; [https://fr.wikipedia.org/wiki/Teinte\\_saturation\\_luminosit%C3%A9](https://fr.wikipedia.org/wiki/Teinte_saturation_luminosit%C3%A9)
  14. [https://fr.wikipedia.org/wiki/Teinte\\_Saturation\\_Valeur](https://fr.wikipedia.org/wiki/Teinte_Saturation_Valeur)
  15. [https://fr.wikipedia.org/wiki/Teinte\\_saturation\\_lumi%C3%A8re](https://fr.wikipedia.org/wiki/Teinte_saturation_lumi%C3%A8re)
  16. [https://fr.wikipedia.org/wiki/Feuilles\\_de\\_style\\_en\\_cascade](https://fr.wikipedia.org/wiki/Feuilles_de_style_en_cascade)
  17. [https://fr.wikipedia.org/wiki/Extensible\\_Markup\\_Language](https://fr.wikipedia.org/wiki/Extensible_Markup_Language)
  18. [https://fr.wikipedia.org/wiki/Interface\\_utilisateur](https://fr.wikipedia.org/wiki/Interface_utilisateur)
  19. <https://www.geekforgeeks.org/electronics-engineering/what-is-hsi-color-space/> ; [http://pics.idemdito.org/cgi/diconame.exe?h\\_hsi](http://pics.idemdito.org/cgi/diconame.exe?h_hsi) ; [https://www.prism-astro.com/fr/aide/Menu-Trichromie/HSI\\_RVB\\_YUV/index.html#:~:text=Espace%20HSI%20%3A%20H%20pour%20Hue,s'apparenter%20aux%20coordonn%C3%A9es%20cylindriques](https://www.prism-astro.com/fr/aide/Menu-Trichromie/HSI_RVB_YUV/index.html#:~:text=Espace%20HSI%20%3A%20H%20pour%20Hue,s'apparenter%20aux%20coordonn%C3%A9es%20cylindriques)
  20. Alain Trémeau, *Éléments de base de la colorimétrie*, Laboratoire LIGIV– Université Jean Monnet, Saint-Etienne (2014), 14 pages, <Elements-de-base-de-la-colorimétrie.pdf>
  21. [https://en.wikipedia.org/wiki/LMS\\_color\\_space](https://en.wikipedia.org/wiki/LMS_color_space)