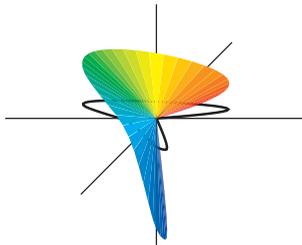


# Couleur et la vision des couleurs

## Couleurs élémentaires en informatique



Auteur:

*Prof. Dr. Klaus Richter*

**Brochure publiée dans le cadre de l'exposition  
Couleur et vision des couleurs**

at the department Lighting Technology of the  
Berlin University of Technology (TU)

Einsteinufer 19

10587 Berlin, Germany

voir: <http://www.li.tu-berlin.de>

Cette publication (FL15.PDF) paraît en versions  
écran (S), offset (L), et imprimée (P),  
en allemand (G), en anglais (E), en espagnol (S), en français (F), en italien (I) et  
en norwégien, voir

<http://farbe.li.tu-berlin.de/color> ou

<http://130.149.60.45/~farbmetrik/color>

**Table des matières**

01 Colorimétrie	4
02 Couleur et vision des couleurs	4
03 Diversité des couleurs	5
04 Solide des couleurs	9
05 Couleurs élémentaires	10
06 Cercle chromatique symétrique	13
07 Couleur à chroma maximale	17
08 Paramètres de chroma et de luminance	18
09 Paramètres de brillance et de blancheur	19
10 Spectre colorimétrique et couleurs élémentaires	20
11 Mélangeur de couleurs spectrales et réflexion	25
12 Fluorescence	27
13 Rétroreflexion	29
14 Synthèse de couleurs	30
15 Rayonnement spectral	41
16 Contraste	46
17 Valeur colorimétrique et mesure de couleurs	51
18 Propriétés spécifiques de la vision des couleurs	58
19 Couleurs élémentaires et couleurs en informatique	67
20 Sortie de couleurs élémentaires indépendantes des appareils	71
21 Reproduction afin des couleurs	72
22 Bibliographie	74
23 Acknowledgements	75
24 Tests et descriptions techniques	77

### Remarques à propos des tests en annexe

Les *tests nos 1, 2 et 3 sur le rendu des couleurs* (PF13, PF23, PF33) sont utilisés dans les domaines des technologies d'éclairages et de traitement de l'image. Les évaluations visuelles et les indices colorimétriques suivants sont possibles entre les sources de lumière réelle et référentielle (D65, D50, P4000, A) ou entre la reproduction réelle et la reproduction visée :

**Fidélité des couleurs** : différence (CIELAB  $\Delta E^*_{ab}$ ) entre la référence et le rendu.

**Localisation sur le cercle chromatique** : localisation des quatre couleurs élémentaires (CIELAB  $\Delta h_{ab}$ ) avec un rendu réel et un rendu visé.

**Echelonement des nuances** : décalage des couleurs (CIELAB  $\Delta h_{ab}$ ) dans chaque secteur.

**Couleurs métamères** : différence de couleur (CIELAB  $\Delta E^*_{ab}$ ) pour des sources lumineuses réelle et référentielle (D65, D50, P4000, A) ou pour des scanners réel et idéal.

**Préférence de couleur** : différence de couleur (CIELAB  $\Delta E^*_{ab}$ ) avec une augmentation visée de la luminosité  $L^*$  et/ou de la chroma  $C^*_{ab}$ .

Les *normes internationales* ISO/IEC 15775 et ISO 9241-306 ainsi que les séries de normes DIN 33866-1 à -5 et DIN 33872-1 à -6 utilisent des séries de couleurs à 5 et 16 paliers *visuellement équidistants* pour l'entrée et la sortie. L'équidistance est généralement évaluée de manière visuelle. La spécification colorimétrique permet de mesurer les différences de couleur d'après CIELAB (ISO 11644-4) entre les profils colorimétriques de sortie réels et ceux que l'on cherchait à atteindre.

Des informations permettant d'obtenir les profils colorimétriques de sortie visés proposent une description technique et une Fig. sur la seconde et la troisième de couverture.

# 1 Colorimétrie

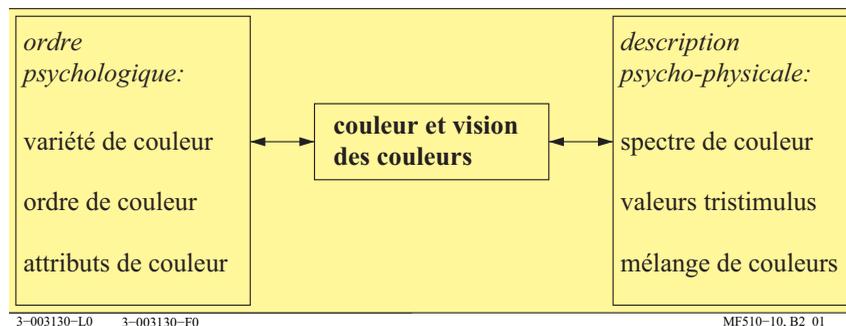
La colorimétrie sert à définir et à mesurer les couleurs ainsi que la différence visuelle entre deux couleurs. La colorimétrie repose sur la mise en pratique de la publication 15 « *Colorimetry* » de la *Commission Internationale de l'Eclairage (CIE)*.

## 2 Couleur et vision des couleurs

La description de la qualité du rendu des couleurs n'est possible que grâce à la connaissance précise du fonctionnement de perception des couleurs par l'œil humain. C'est pourquoi il est primordial d'élargir cette base à la recherche visuelle. La *Deutsche Forschungsgemeinschaft* a largement soutenu le travail de *K. Richter* (1979, 1985) qui a publié deux rapports scientifiques BAM ainsi que de nombreux articles sur ces thèmes.

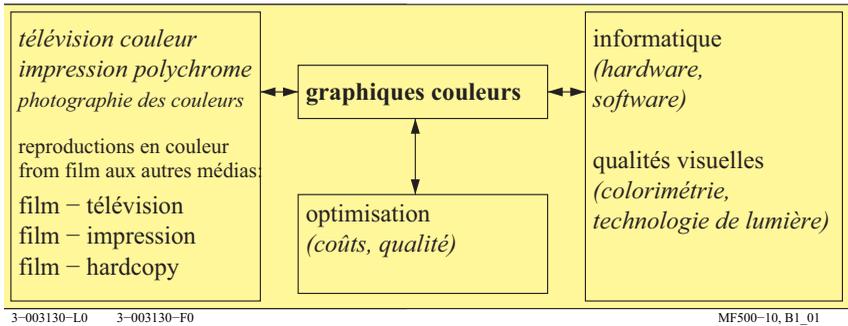
Le classement psychologique des couleurs par l'œil humain constitue un élément important de *Couleur et vision des couleurs*. La description psychophysique du système visuel repose tant sur la mesure physique des couleurs que sur leur perception visuelle.

Les principales caractéristiques de la section « *couleur et vision des couleurs* » seront présentées dans les paragraphes suivants.



**Fig. 1 : Aspects de la couleur et de la vision des couleurs**

La figure 1 montre différents aspects importants de la couleur et de la vision des couleurs, qui seront développés en détail dans les figures suivantes.



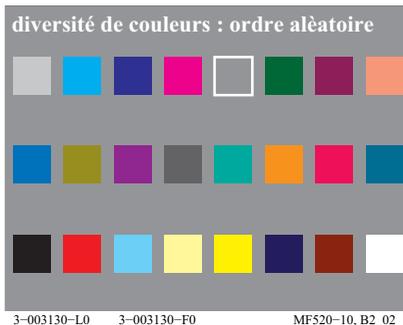
**Fig. 2 : Graphisme couleur fondé sur les caractéristiques de la vision des couleurs**

La figure 2 montre la section graphisme couleur, qui repose essentiellement sur les caractéristiques de la vision des couleurs. Les caractéristiques du processus de reproduction de la couleur en informatique forme la base qui permettra d'optimiser leur utilisation.

### 3 Diversité des couleurs

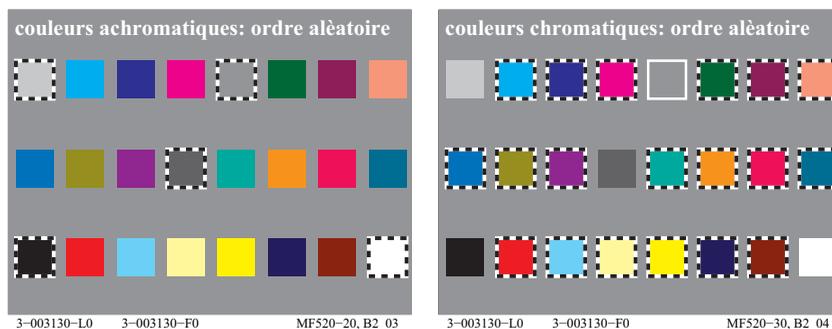
Tout ce que nous voyons possède une couleur. Les couleurs sont des éléments de nos perceptions visuelles. Ces perceptions sont différentes des matériaux et des processus qui produisent les couleurs. Cette partie est consacrée à la diversité des couleurs selon différents critères visuels. Cette classification nous amènera à réunir des couleurs répondant aux mêmes critères.

Selon *Judd et Wyszecki* (1975), des personnes ayant une perception normale de la couleur, sont capables de différencier environ 10 millions de couleurs différentes. C'est pourquoi, il est nécessaire de classer cette diversité selon des critères appropriés.



**Fig. 3 : diversité des couleurs**

La figure 3 montre différents échantillons de couleurs disposés dans un ordre aléatoire. Ces couleurs peuvent tout d'abord être divisées en deux groupes, le groupe des couleurs chromatiques et celui des couleurs achromatiques.



**Fig. 4 : couleurs chromatiques et achromatiques**

Dans la figure 4, les couleurs achromatiques sont encadrées dans la partie *gauche*, et les couleurs chromatiques dans la partie *droite*.

couleurs achromatiques, couleurs intermédiaires	couleurs chromatiques, couleurs élémentaires	couleurs chromatiques, couleur périphérique
<b>5 couleurs achromatiques: "ni-ni" couleurs</b>	<b>4 couleurs élémentaires (e):</b>	<b>six couleurs périphérique (d):</b>
$N$ noir	$R = R_e$ rouge	$C = C_d$ bleu cyan (cyan)
$D$ gris foncé	$ni\ jaumâtre\ ni\ bleuâtre$	$M = M_d$ magenta rouge (magenta)
$Z$ gris central	$G = G_e$ vert	$Y = Y_d$ jaune
$H$ gris clair	$ni\ jaumâtre\ ni\ bleuâtre$	$O = R_d$ orange rouge (rouge)
$W$ blanc	$B = B_e$ bleu	$L = G_d$ feuille verte (vert)
<b>2 couleurs intermédiaires:</b>	$ni\ verdâtre\ ni\ rougeâtre$	$V = B_d$ bleu violet (bleu)
$C_e = G50B_e$ bleu-verte	$J = Y_e$ jaune	
$M_e = B50R_e$ blue-red	$ni\ verdâtre\ ni\ rougeâtre$	
3-003130-L0    3-003130-F0		MF580-10

**Tableau 1 : couleurs élémentaires et couleurs des appareils périphériques en informatique**

Le tableau 1 montre la définition des couleurs élémentaires (index e) et des couleurs engendrées par des appareils périphériques (index d=device). Il y a quatre couleurs élémentaires  $RGBY_e$  et six couleurs périphériques  $RGBCMY_d$ . Pour certaines utilisations, les couleurs visuelles moyennes Vert-Bleu  $C_e$  et Bleu-Rouge  $M_e$  sont ajoutées aux quatre couleurs élémentaires, ce qui donne six couleurs (en bas à gauche). Le tableau 1 comprend 5 couleurs achromatiques  $NDZHW$ , allant du noir  $N$  jusqu'au blanc  $W$  en passant par un gris moyen  $Z$ . Toutes les autres couleurs sont chromatiques.

Les initiales  $O$ ,  $L$  et  $V$  sont utilisées dans un grand nombre de documents normatifs, (par ex. ISO/IEC 15775, ISO/IEC 24705, ISO 9241-306, DIN 33866-1 à -5 et DIN 33872-1 à -6). Les initiales  $O$ ,  $L$  et  $V$  présentent l'avantage d'être brèves et correspondent à l'aspect visuel. Mais jusqu'à présent, leur usage ne s'est malheureusement pas imposé. La lettre  $L$  est utilisée pour la luminance dans toutes les normes techniques d'éclairage (z. B. in ISO/IEC/CIE 8589).

C'est pourquoi, nous utiliserons ici les initiales  $R_d$ ,  $G_d$  et  $B_d$  au lieu des lettres  $O$ ,  $L$  et  $V$ . Ces couleurs de périphériques (*index d*) rouge  $R_d$ , vert  $G_d$  et bleu  $B_d$  se distinguent des couleurs élémentaires définies dans le tableau 1 (*index e*) rouge  $R_e$ , vert  $G_e$  et bleu  $B_e$ . Pour les couleurs non définies rouge, vert et bleu, on utilisera les initiales  $R_$ ,  $G_$  et  $B_$  (*lettre + sous tiret \_*). Ces couleurs ne correspondent ni aux couleurs d'appareils  $R_d$ ,  $G_d$  et  $B_d$  ni aux couleurs élémentaires  $R_e$ ,  $G_e$  et  $B_e$ . Les couleurs élémentaires rouge  $R_e$ , vert  $G_e$  et bleu  $B_e$  présentent l'avantage d'avoir une *définition visuelle* et d'être *indépendantes des appareils* périphériques selon la CIE R1-47:2009 "Hue Angles of Elementary Colours".

De nos jours, la gestion des couleurs est numérisée au niveau du traitement de l'image. On considère qu'il faut un minimum de 4096 couleurs. Trois couleurs périphériques (index d correspondant à l'anglais device)  $R_d$  (couleur rouge),  $G_d$  (couleur verte) et  $B_d$  (couleur bleue) sont utilisées afin d'engendrer 16 nuances de chaque couleur. Pour les écrans ou les projecteur vidéo, ce mélange additif produit 4096 couleurs (=16x16x16).

C'est pourquoi les 16 nuances aux nombres décimaux compris entre 0 et 15, sont notées selon un système fondé sur les chiffres allant de 0 à 9, et sur les lettres allant de A à F pour les nombres compris entre 10 et 15.

La figure 5 montre les notations attribuées aux différentes couleurs dans le système hexadécimal. Les trois signes, par exemple 00Fd, sont alignés dans cet ordre pour les codes de couleurs  $rgb_d$ . Les trois couleurs de périphériques sont nommées selon leur apparence visuelle  $R_d=O$  (pour orange-rouge),  $G_d=L$  (pour vert feuille) et  $B_d=V$  (pour bleu-violet).



Fig. 5 : codes de couleurs  $rgb_d$ ,  $cmy_d$  et codes de couleurs  $rgb_{de}$ ,  $cmy_{de}$

Dans la figure 5 (*gauche*) les couleurs de périphérique achromatiques (index  $d$ =device) présentent trois nombres hexadécimaux identiques. Pour les couleurs chromatiques, au moins l'un de ces nombres est différents. Les codes des couleurs de périphérique  $rgb_d$  et  $cmy_d$  sont convertis pour le profil de sortie, selon la relation dite de « 1 moins » entre les données  $rgb_d$  et  $cmy_d$ . Par exemple, le code  $rgb_d$  00F<sub>d</sub> pour le bleu périphérique devient FF0<sub>d</sub> en code  $cmy_d$ . Si l'on utilise ces deux définitions colorimétriques dans le fichier couleur, cela peut donner des couleurs de sortie identiques ou différentes. Un fichier conçu selon la norme DIN 33872-4 permet de tester si les couleurs de sortie sont identiques pour les deux définitions, cf

<http://www.ps.bam.de/De14/10L/L14e00NP.PDF>

La figure 5 (*droite*) montre les codes  $rgb_{de}$  et  $cmy_{de}$  pour les couleurs élémentaires de sortie (*Index de = device to elementary data*), codes à trois chiffres hexadécimaux. Les données  $rgb_{de}$  sont de nouveau converties en  $cmy_{de}$  selon la relation « 1 moins ». Par exemple dans la figure 5 (*gauche*), le bleu  $B_d$  (première rangée, troisième couleur) est défini par le nombre hexadécimal 00F<sub>d</sub>. Pour le bleu élémentaire  $B_e$  la figure 5 (*droite*) montre les nombres hexadécimaux 09F<sub>de</sub> dans le cas de l'écran *sRGB*, 06F<sub>de</sub> dans le cas de l'impression standard offset et 04F<sub>de</sub> dans le cas de l'imprimante laser couleurs. Le bleu  $B_d$  et le bleu  $B_e$  sont différents. Le bleu  $B_d$  tend vers le rouge, tandis que  $B_e$  ne tend ni vers le rouge ni vers le vert.

Pour les dégradés, tendant vers des écarts perçus comme réguliers, par exemple une série de gris à 16 paliers réguliers, on utilisera le signe \* pour les coordonnées colorimétriques. On emploiera par exemple le signe  $L^*$  pour la luminance. De la même manière, on peut ajouter le signe \* aux données  $rgb^*_e$ , qui deviendront donc des données  $rgb^*_e$ . La lecture de cette notation implique que pour la

série de codes hexadécimaux  $rgb^*_e = 000, 111, 222, \dots, EEE, FFF$ , il résultera une série de gris *visuellement équidistants*.

Au lieu de codes hexadécimaux, il est également possible d'utiliser des nombres compris entre 0 et 1. Pour le nombre hexadécimal 5, on aura le nombre décimal  $5/F = 5/15 = 0,333$ . En informatique moderne, les 16 paliers de 0 à 9 et de A à F sont remplacés par les 256 paliers de 00 à FF en passant par 9F et A0. Ceux-ci peuvent également être convertis en nombres décimaux. Le nombre hexadécimal 55 correspond au nombre décimal ( $=55/FF = 85/255$ ).

Différents problèmes surviennent lors de la sortie des codes *rgb* et *cmy0*, équivalents au niveau colorimétrique. Sur écran, les codes équivalents donnent des résultats différents avec le logiciel *Adobe Acrobat (toutes les versions à partir de la troisième, sur Mac et Windows)* et des résultats identiques avec le logiciel *Adobe FrameMaker (version 8, Windows, 2011)*. Sur des imprimantes *postscript* couleur, le résultat est en général différent, alors que la plupart du temps, il est identique sur une *PostScript* noir et blanc. Des fichiers conformes aux normes DIN 33872-4 und -2, permettent de tester si les résultats sont identiques, cf <http://www.ps.bam.de/33872E>.

### 4 Solide des couleurs

*Leonardo da Vinci (?-1519)* résumait la totalité des couleurs à six couleurs simples; un couple achromatique (blanc - noir) et deux couples chromatiques (rouge - vert et jaune - bleu). Le double cône chromatique de la figure 6 illustre cette conception. L'axe vertical correspond aux couleurs achromatiques tandis que les lignes les plus longues correspondent aux couleurs purement chromatiques.

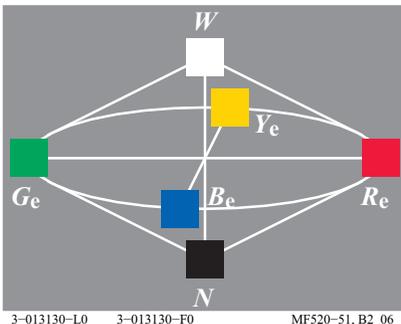


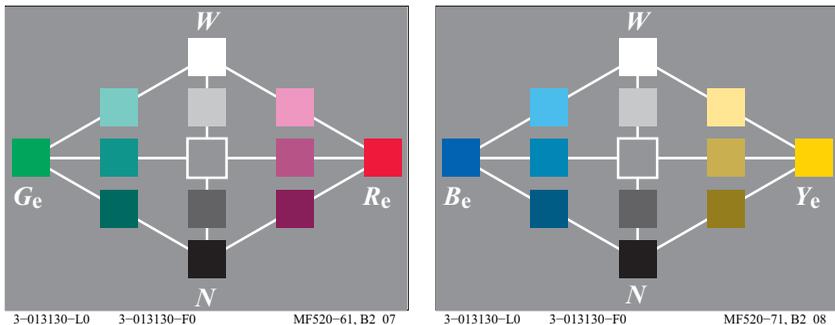
Fig. 6 : double cône chromatique

La figure 6 montre les six couleurs « simples », à savoir :

$W$ blanc	$Y_e$ jaune	$R_e$ rouge
$N$ noir	$B_e$ bleu	$G_e$ vert

Les couleurs « simples » sont ici les couleurs élémentaires visuelles (index  $e$ ).

Le comité technique ISO TC 159/WG2/SC4 *Ergonomie, visual display requirements* recommande de réaliser les quatre couleurs élémentaires  $RYGB_e$  à l'aide des quatre codes d'entrée  $rgb^*_e$  suivants 100, 110, 010 et 001, cf CIE R1-47. Il y a au moins trois méthodes permettant de calculer les codes  $rgb_{de}$  : grâce au fabricant de l'appareil, à un logiciel de traitement de l'image ou encore grâce à un fichier-cadre (frame file). C'est le fichier-cadre qui a été utilisé dans cette publication, pour convertir tous les codes  $rgb$  des images dans le périphérique de sortie. Le fichier-cadre comprend 729 (=9x9x9) codes  $rgb$ - et les données CIELAB correspondantes (données de mesure colorimétrique) du périphérique de sortie.



**Fig. 7 :  $RG_e$  et  $YB_e$  teintes de surfaces**

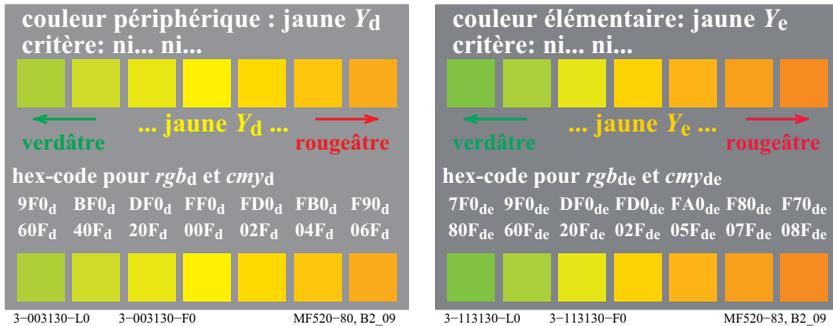
La figure 7 montre le double cône chromatique avec de nombreux paliers intermédiaires au niveau rouge - vert (*gauche*) et jaune - bleu (*droite*). L'axe achromatique blanc - noir se trouve au centre.

## 5 Couleurs élémentaires

Chaque cercle chromatique présente les quatre couleurs chromatiques perçues comme pures/parfaites, cf fig. 1 à la page 6. Nous les appelons les couleurs élémentaires, et distinguons le jaune, le rouge, le bleu et le vert élémentaires.

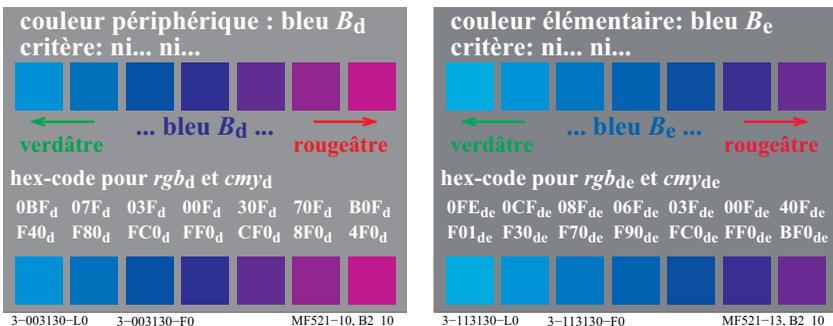
Une évaluation rapide, permet de repérer facilement dans le cercle chromatique le jaune élémentaire en tant que couleur « ni-ni » (ne tendant ni vers le rouge ni vers le vert) par rapport aux couleurs « doubles » jaune-rouge et jaune-vert.

Les couleurs « ni-ni » sont souvent désignées par le terme d'« unique » dans la littérature.



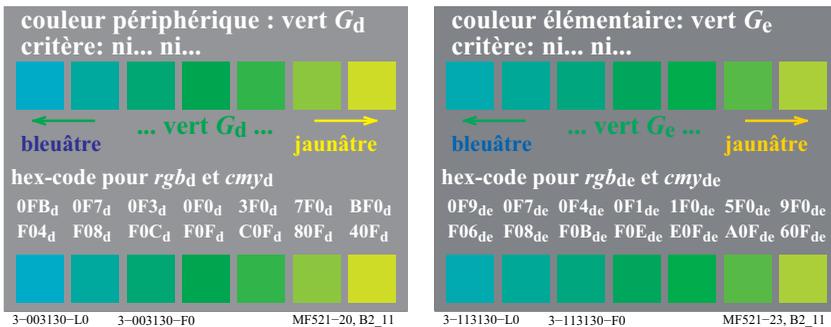
**Fig. 8 :** couleur élémentaire et dépendante de périphérique répondant au critère du jaune élémentaire  $Y_e$

La figure 8 montre le critère permettant de déterminer la couleur élémentaire jaune  $Y_e$  dans le champ jaune d'un cercle chromatique. Les codes d'entrée  $rgb_d$  (1 1 0)<sub>d</sub> (données séparées par un espace) ou FF<sub>d</sub> engendrent la couleur moyenne jaune périphérique  $Y_d$ . Les caractéristiques visuelles du jaune élémentaire  $Y_e$  qui ne tire ni vers le vert ni vers le rouge, sont produites avec le code d'entrée  $rgb_{de}$  (1 0,86 0)<sub>de</sub> = FD<sub>de</sub> dans le cas de l'écran *sRGB*, (1 0,86 0)<sub>de</sub> = FD<sub>de</sub> dans le cas de l'impression standard offset et (1 0,79 0)<sub>de</sub> = FC<sub>de</sub> dans le cas de imprimante laser couleurs. Les différences entre le jaune périphérique  $Y_d$  et le jaune élémentaire  $Y_e$  sont maximales pour une imprimante laser couleurs.



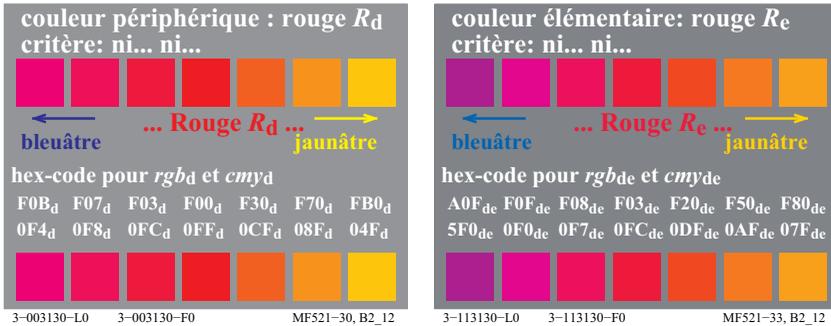
**Fig. 9 :** couleur périphérique et élémentaire répondant au critère du bleu élémentaire  $B_e$

La figure 9 montre les caractéristiques permettant de définir la couleur élémentaire bleue dans le champ bleu d'un cercle chromatique. Les codes  $rgb_d$   $(0\ 0\ 1)_d$  ou  $00F_d$  engendrent la couleur moyenne bleue périphérique  $B_d$ . Les caractéristiques visuelles du bleu élémentaire  $B_e$ , qui ne tire ni vers le vert ni vers le rouge, sont produites avec le code d'entrée  $rgb_{de}$   $(0\ 0,60\ 1)_{de} = 09F_{de}$  dans le cas de l'écran *sRGB*,  $(0\ 0,40\ 1)_{de} = 06F_{de}$  dans le cas de l'impression standard offset, et  $(0\ 0,27\ 1)_{de} = 04F_{de}$  dans le cas de imprimante laser couleurs. Les différences entre le bleu périphérique  $B_d$  et le bleu élémentaire  $B_e$  sont minimales pour une imprimante laser couleurs.



**Fig. 10 : couleur périphérique et couleur élémentaire répondant au critère du vert élémentaire  $G_e$**

La figure 10 montre les critères définissant la couleur élémentaire verte dans le champ vert d'un cercle chromatique  $G_e$ . Les codes  $rgb_d$   $(0\ 1\ 0)_d$  ou  $0F0_d$  engendrent la couleur moyenne  $G_d$ , vert périphérique. Le critère du vert élémentaire  $G_e$ , ne tendant ni vers le bleu ni vers le jaune, sont produites avec le code d'entrée  $(0\ 1\ 0,67)_{de} = 0FB_{de}$  dans le cas de l'écran *sRGB*,  $(0\ 1\ 0,07)_{de} = 0F1_{de}$  dans le cas de l'impression standard offset et  $(0\ 0,87\ 0,13)_{de} = 0D2_{de}$  dans le cas de l'imprimante laser couleurs. Les différences entre le vert périphérique  $G_d$  et le vert élémentaire  $G_e$  sont minimales pour l'impression offset.



**Fig. 11 :** couleur périphérique et couleur élémentaire répondant au critère du rouge élémentaire  $R_e$

La figure 11 montre les critères définissant la couleur rouge élémentaire dans le champ rouge d'un cercle chromatique. Le code  $rgb_d$  (1 0 0)<sub>d</sub> ou F00<sub>d</sub> engendre la couleur moyenne rouge périphérique  $R_d$  (gauche). Le critère du rouge élémentaire  $R_e$  ne tendant ni vers le bleu ni vers le jaune est atteint. Le rouge élémentaire  $R_e$  est produit avec le code d'entrée  $rgb_{de}$  (1 0 0,27)<sub>de</sub> = F04<sub>de</sub> dans le cas de l'écran  $sRGB$ , (1 0 0,20)<sub>de</sub> = F03<sub>de</sub> dans le cas de standard impression offset et (1 0 0,27)<sub>de</sub> = F04<sub>de</sub> dans le cas imprimante laser couleurs. Les différences entre le rouge périphérique  $R_d$  et le rouge élémentaire  $R_e$  sont minimales pour une impression offset.

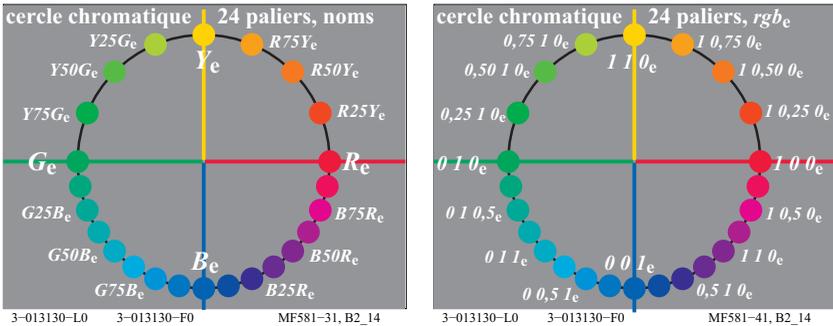
*K. Miescher* (1948) a déterminé, à la lumière naturelle et avec 28 observateurs, les couleurs élémentaires d'un cercle chromatique de 400 couleurs. La marge d'erreur était de 4 teintes pour  $R_e$ ,  $Y_e$  et  $G_e$  (1% = 4 de 400 teintes) et de 8 teintes pour  $B_e$  (2%), cf. CIE R1-47. Le cercle chromatique présentait un large éventail de couleurs par rapport aux couleurs test CIE n° 9 à 12, comparez avec la figure 52 à la page 56.

## 6 Cercle chromatique symétrique

Des deux côtés des deux axes des couleurs élémentaires  $R_e$ - $G_e$  et  $Y_e$ - $B_e$ , les couleurs tendent de plus en plus vers le jaune ou vers le bleu, ou encore vers le rouge ou vers le vert, au fur et à mesure qu'elles s'éloignent du centre achromatique.



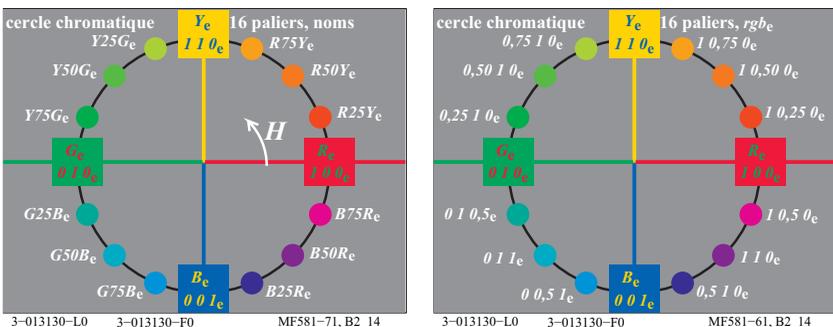




**Fig. 14 :** cercle chromatique élémentaire à 24 paliers utilisé en informatique

La figure 14 montre la relation entre les teintes élémentaires  $RYGB_e$  (gauche) et les codes  $rgb^*_e$  (droite) utilisés en informatique pour un cercle chromatique à 24 nuances. Selon cette figure, les teintes élémentaires  $RYGB_e$  doivent correspondre aux codes  $rgb^*_e$   $(1\ 0\ 0)_e$ ,  $(1\ 1\ 0)_e$ ,  $(0\ 1\ 0)_e$  et  $(0\ 0\ 1)_e$ . Le workflow *fichier-sortie* doit produire les codes  $rgb_{de}$  qui donneront les teintes élémentaires voulues à la sortie. Dans le meilleur des cas, le fabricant a prévu la transformation dans son appareil. La norme DIN 33872-5 comprend un test pour les formats PDF et PS (*PostScript*). La qualité des *teintes élémentaires* à la sortie est généralement contrôlée de manière visuelle. Mais elle peut également être définie selon des critères colorimétriques.

Etant donné la différence de teinte minimale des couleurs de surface, dans le *champ sombre* allant du vert au rouge en passant par le bleu, il est recommandé de n'utiliser qu'une teinte sur deux dans ce champ.



**Fig. 15 :** cercle chromatique à 16 teintes élémentaires utilisé en informatique.

La figure 15 montre la relation entre les teintes élémentaires  $RYGB_e$  (gauche) et les codes  $rgb^*_e$  (droite) utilisés en informatique pour un cercle chromatique à 16 paliers. Les teintes élémentaires  $RYGB_e$  correspondent aux codes  $rgb_e$   $(1\ 0\ 0)_e$ ,  $(1\ 1\ 0)_e$ ,  $(0\ 1\ 0)_e$  et  $(0\ 0\ 1)_e$ . La teinte change en fonction de l'angle, de la même manière que l'angle  $h_{ab}$  dans le système CIELAB (ISO 11564-4). Selon CIE R1-47, les angles des teintes élémentaires dans le système CIELAB-System ont un angle  $h_{ab} = 26, 92, 162$  et  $272$  degrés. En particulier le rouge  $R_e$  et le vert  $G_e$  ne sont pas situés sur l'axe horizontal du système CIELAB.

## 7 Couleurs à chroma maximale

Pour chaque série de concentration d'un coloris, allant des couleurs blanchâtres aux couleurs noirâtres en passant par les couleurs chromatiques, il y a une couleur perçue et désignée comme la couleur à chroma maximale.

Une évaluation rapide permet de choisir le rouge le plus « saturé » parmi des échantillons allant du blanc au rouge pâle, au rouge puis au rouge sombre et enfin au noir. Le rouge « le plus saturé » sera déterminé dans cette série selon les critères de chromatisme ou d'achromatisme, de blancheur ou de noirceur.

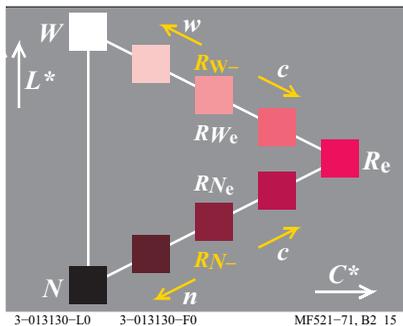


Fig. 16 : chroma maximale

Dans la figure 16, il est facile de repérer la couleur « la plus saturée ». Les critères définissant la couleur à chroma maximale dans la gamme de concentration d'un coloris sont exposés dans la figure 16 et sont les suivants :

$R_e$ rouge	$W$ blanc (=Weiß)	$N$ noir
$c$ plus chromatique	$w$ plus blanc	$n$ plus noir
$C^*$ chroma	$L^*$ luminance	

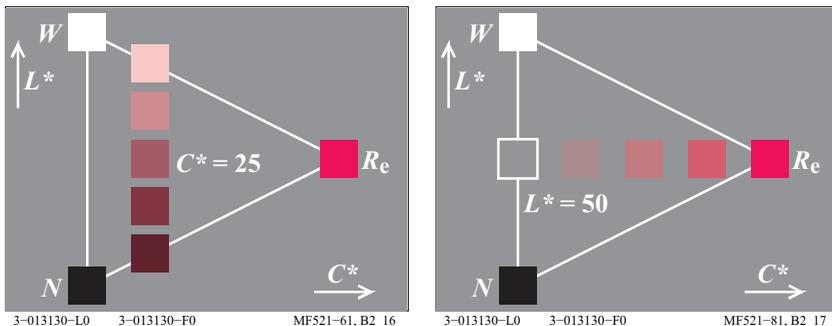
En informatique, la couleur à chroma maximale (couleur à chroma maximale  $C^*_{ab}$  dans le système colorimétrique CIELAB) est généralement mélangée avec du blanc  $W$  ou du noir  $N$ . Pour le mélange de la couleur à chroma maximale  $R_e$

et le blanc  $W$ , la différence de couleur CIE entre  $R_e$  et  $W$  diminue progressivement, tandis qu'elle reste pratiquement constante pour le mélange de  $R_e$  avec du noir  $N$ . Les mélanges additifs nécessaires pour un écran couleur et les mélanges généralement soustractifs de l'impression offset sont traités au chapitre 20 à la page 71.

Dans la figure 16, les couleurs moyennes visuelles  $R_{W_e}$  et  $R_{N_e}$  entre  $R_e$  et  $W$  ou  $N$  devraient apparaître. Comme dans la figure 12 à la page 14, elles se situent généralement dans un vaste champ dépendant d'un appareil périphérique (*champ jaune*).

## 8 Paramètres de chroma et de luminance

Une couleur est définie selon trois paramètres colorimétriques. La teinte constitue le premier paramètre dans la plupart des systèmes colorimétriques, comme par exemple le système *Munsell*, le système DIN 6164 et le système *NCS*. Ces systèmes colorimétriques se distinguent les uns des autres par le choix des deux autres paramètres. Une comparaison des systèmes colorimétriques nécessite un système de coordonnées analogue. En colorimétrie, on utilise généralement une coupe du solide des couleurs afin d'obtenir un plan d'une même teinte. Nous placerons la chroma  $C^*$  sur l'axe des abscisses et la luminance  $L^*$  sur l'axe des ordonnées.



**Fig. 17 : la chroma  $C^*$  et la luminance  $L^*$  ont la même valeur**

La figure 17 (*gauche*) montre les couleurs issues d'une même teinte de chroma  $C^* = 25$ . Les couleurs présentant le même paramètre de chroma sont situées sur une droite verticale parallèle à l'axe des gris. Pour le rouge le plus intense  $R_e$ , le paramètre de chroma  $C^* = 100$  peut être choisi en colorimétrie.

La figure 17 (*droite*) montre les couleurs issues d'une même teinte de la luminance  $L^* = 50$ . Les couleurs, présentant une luminance égale, sont situées sur

les lignes horizontales perpendiculaires à l'axe gris. La colorimétrie définit la luminance  $L^* = 100$  pour le blanc  $W$ . C'est pourquoi cette série correspond à une luminance  $L^* = 50$ .

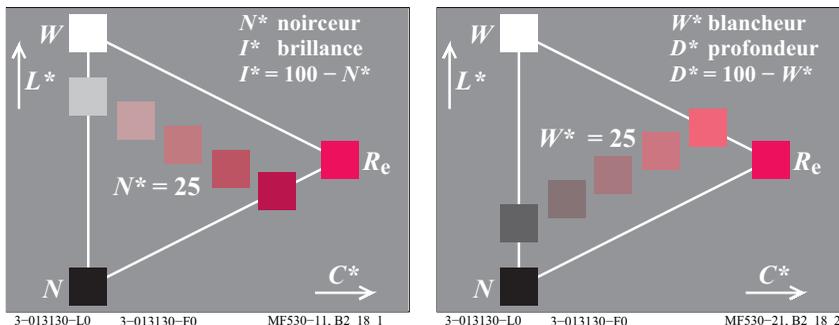
Des séries de couleurs d'une même teinte, aux paramètres constants de chroma et de luminance, ont été tout d'abord présentées dans le système américain de *Munsell*, en tant qu'échantillons de couleurs pour 40 teintes différentes. Les espaces colorimétriques les plus utilisés de nos jours, ISO 11564-4 et -5, définissent également les coordonnées de chroma  $C^*$  (nom  $C^*_{ab}$  pour CIELAB et  $C^*_{uv}$  pour CIELUV) et de luminance  $L^*$ .

Dans le système colorimétrique *RAL-Design*, les échantillons de couleur pour 36 teintes CIELAB  $h_{ab} = 0$ , de 10 à 350 degrés, forment une grille avec des écarts de chroma  $\Delta C^*_{ab} = 10$  et de luminance  $\Delta L^* = 10$ .

## 9 Paramètres de brillance et de blancheur

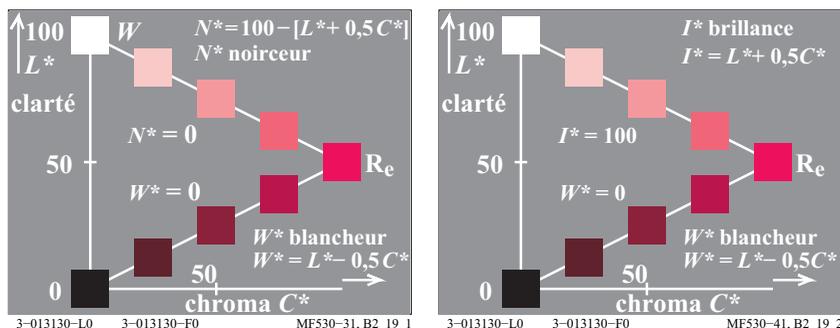
Il existe d'autres paramètres en plus de ceux de teinte, de chroma et de luminance. Pour une teinte constante, les autres paramètres colorimétriques de noirceur (opposé à la brillance) et de blancheur (opposé à la profondeur) sont en relation linéaire avec la chroma et la luminance.

Les paramètres de noirceur et de brillance décrivent les mêmes propriétés, mais leurs valeurs sont inversement proportionnelles, comme par exemple pour la clarté et l'obscurité. Il en va de même pour les paramètres de blancheur et de profondeur. La noirceur est un paramètre important dans *le modèle suédois, Natural Color System (NCS)*. Le système colorimétrique *NCS* utilise les paramètres de teinte, de noirceur et de chroma. Le paramètre de luminance du système *Munsell* en est absent.



**Fig. 18 : la noirceur  $N^*$  et la blancheur  $W^*$  ont la même valeur**

La figure 18 montre des couleurs d'une noirceur  $N^*$  égale (*gauche*), à savoir d'une noirceur  $N^* = 25$ , et d'une blancheur  $W^*$  égale (*droite*), à savoir d'une blancheur  $W^* = 25$ . La noirceur  $N^*$  peut être remplacée par le paramètre de luminance  $I^* = 100 - N^*$ . La blancheur  $W^*$  peut être remplacée par le paramètre de profondeur  $D^* = 100 - W^*$  ( $D = \text{deepness}$ ).



**Fig. 19 : noirceur  $N^*$ , blancheur  $W^*$  et brillance  $I^*$**

La figure 19 montre la relation entre les paramètres de noirceur  $N^*$  et de blancheur  $W^*$  et les paramètres de luminance  $L^*$  et de chroma  $C^*$ . La figure 19 montre ces relations sous forme d'équations linéaires.

On s'attend à trouver un rapport entre les relations linéaires et les signaux physiologiques chromatiques et achromatiques de la figure 54 à la page 59 et les valeurs de teintes de la figure 58 à la page 67 (*en bas à gauche*).

## 10 Spectre colorimétrique et couleurs élémentaires

### 10.1 Valeur lumineuse et clarté

Le spectre de lumière du jour, obtenu par exemple à l'aide d'un prisme et analysé en détail par *Newton* (mort en 1727), comprend des ondes courtes comme le bleu à nuances rouges (violet, approximativement  $R60B_c$ ) et des ondes longues comme le rouge à nuances jaunes (approximativement  $Y90R_c$ ). Les lumières colorées se distinguent par *la répartition spectrale de leur rayonnement*. La répartition spectrale des radiations lumineuses, perçue par l'oeil, est préalablement transformée par la réflexion de surfaces qui apparaissent colorées. Ces couleurs de surface sont engendrées par des colorants issus de l'industrie chimique.

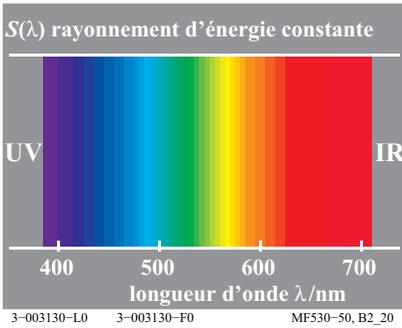


Fig. 20 : spectre visible

La figure 20 montre schématiquement le champ de radiations de toutes les longueurs d'onde du spectre visible entre environ  $\lambda = 380\text{nm}$  et  $\lambda = 720\text{nm}$  ( $1\text{nm} = 10^{-9}\text{m}$ ). Les radiations au-delà des limites du champ spectral visible sont appelées ultraviolet UV et infrarouge IR. La figure 20 montre un spectre que l'on peut également obtenir à l'aide d'un filtre interférentiel à bande passante dans le passe-vue d'un projecteur de diapositives. Le filtre interférentiel à bande passante laisse passer des radiations d'environ 380nm à 720nm sur la largeur de format diapo (36 mm).

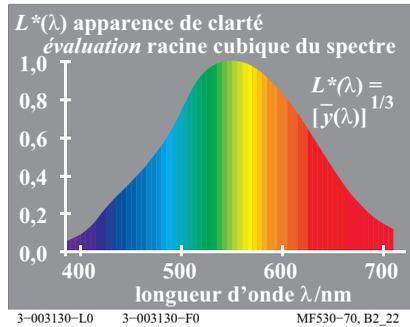
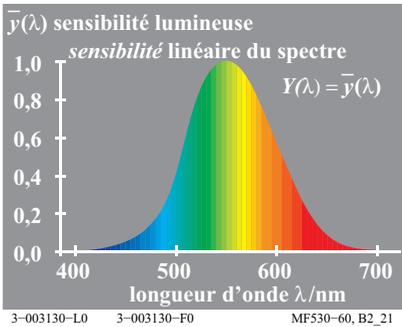


Fig. 21 : sensibilité lumineuse spectrale et apparence de clarté

Dans la figure 21 (*gauche*), la sensibilité lumineuse  $Y(\lambda)$  du spectre décroît des deux côtés du pic central clair jaune-vert. Cette caractéristique est due à la sensibilité lumineuse spectrale de l'oeil humain  $Y(\lambda) = V(\lambda) = y_q(\lambda)$ , qui atteint un maximum à 555nm et qui se réduit à moins de 1% de sa valeur maximale aux environs de 400nm et de 700nm. La sensibilité lumineuse spectrale  $y_q(\lambda)$  marque la *valence* des couleurs spectrales et une énergie de radiation égale dans le mélange de couleurs. La valeur décrite par la sensibilité lumineuse spectrale  $y_q(\lambda)$ , peut être nommée valeur lumineuse ou valence lumineuse.

Dans CIE 15 « *colorimétrie* », la valeur de référence lumineuse  $Y$  est définie par la norme  $Y_w = 100$  pour le blanc  $W$ , comparer avec le paragraphe 17 à la page 51.

A la différence des fonctions *linéaires*  $Y(\lambda)$ , une fonction *non linéaire*  $L^*(\lambda)$  est celle qui décrit l'apparence de la clarté des couleurs spectrales d'une même énergie radiante. Cette fonction non linéaire décroît de manière non linéaire depuis le pic central du spectre vers ses deux extrémités. Cette fonction tend vers la racine cubique dans le champ gris et vers la racine carrée dans le champ blanc, comparer avec le paragraphe 16 à la page 46.

La figure 21 (*droite*) montre l'apparence de clarté  $L^*(\lambda)$ . La fonction  $L^*(\lambda)$  diminue beaucoup moins que  $Y(\lambda)$  (*gauche*).

Remarque : le CIE 15 définit la relation suivante entre la luminance  $L^*$  et la valeur de référence lumineuse  $Y$  :

$$L^* = 116 [Y/100]^{1/3} - 16 \quad (Y > 0,8)$$

Les approximations sont des relations :

$$L^* = 100 [Y/100]^{1/3} \text{ et } L^* = Y^{1/3},$$

qui est utilisés dans le figure 21 des couleurs spectrales.

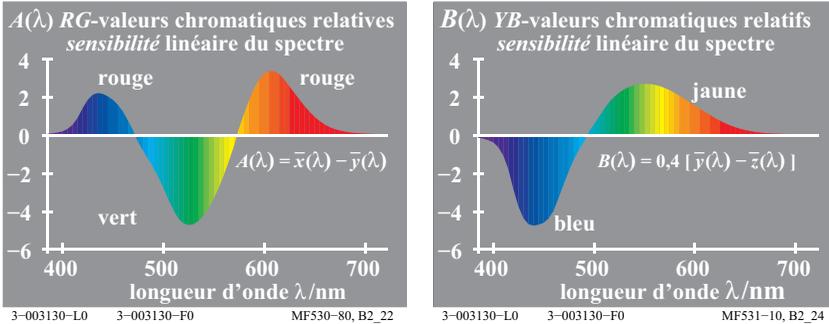
## 10.2 Valeur chromatique et chroma

Dans le mélange des couleurs, le spectre est décrit à l'aide des « valeurs lumineuses » et des « valeurs chromatiques ».

Le spectre visible contient une suite continue de teintes. On peut repérer trois couleurs élémentaires spectrales. Les couleurs élémentaires spectrales se situent à proximité des 475nm du bleu élémentaire  $B_e$ , des 503nm du vert élémentaire  $G_e$  et des 574nm du jaune élémentaire  $Y_e$ .

Le rouge élémentaire se situe en dehors du spectre et peut être engendré à partir du mélange proportionnel des couleurs spectrales  $\lambda = 400\text{nm}$  und  $700\text{nm}$ . Les couleurs pourpres ainsi obtenues sont caractérisées par une longueur d'onde compensatoire par rapport à l'illuminant E (même énergie radiante). Pour le rouge élémentaire  $R_e$ , il en résulte la longueur d'onde de la même teinte  $\lambda_{d,E} = 494\text{c nm}$ , voir figure 50 à la page 51.

Entre les deux extrémités du spectre, les valeurs chromatiques jaune-bleu passent du positif au négatif. Le rouge élémentaire  $R_e$  peut être mélangé à partir des deux couleurs spectrales jaune-rouge de la fin et bleu-rouge du début du spectre

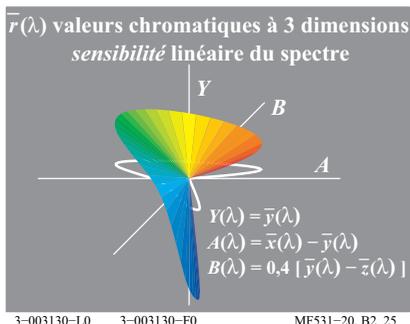


**Fig. 22 : valeurs chromatiques RG et valeurs chromatiques YB**

La figure 22 (*gauche*) montre les valeurs chromatiques rouge-vert, ce sont les valences rouge-vert dans le mélange coloré, en tant que fonction de la longueur d'onde. Les points d'intersection à 475nm et 574nm marquent les deux couleurs élémentaires spectrales bleue  $B_e$  et jaune  $Y_e$ .

La figure 22 (*droite*) montre les valeurs chromatiques jaune-bleu, ce sont les valences jaune-bleu dans le mélange coloré, en tant que fonction de la longueur d'onde. Le point d'intersection à 503nm marque la couleur élémentaire spectrale verte  $G_e$ .

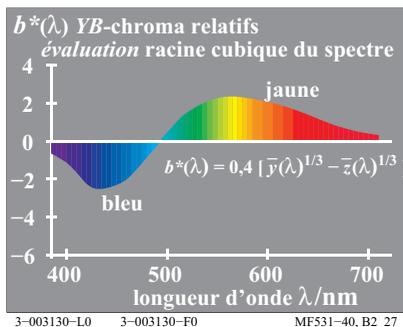
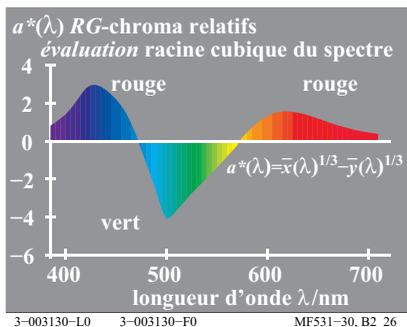
Pour les couleurs spectrales d'une même énergie radiante, les valeurs lumineuses et les valeurs chromatiques rouge-vert et jaune-bleu, constituent trois valeurs chiffrées (un vecteur) pour chaque longueur d'onde  $\lambda$ , par exemple de l'ordre de 10nm, entre 380nm et 720nm. Dans un espace en trois dimensions, on définit un point aux coordonnées suivantes :  $A$  pour la valeur chromatique rouge-vert,  $B$  pour la valeur chromatique jaune-bleu et  $Y$  pour la valeur lumineuse ou valeur de référence lumineuse. Dans la figure 23, les points de toutes les couleurs spectrales sont situés sur une courbe en trois dimensions.



**Fig. 23 : valeurs chromatiques à trois dimensions**

La figure 23 montre les composantes trichromatiques dans l'espace colorimétrique à trois dimensions ( $A$ ,  $B$ ,  $Y$ ) ainsi que la projection sur un plan ( $A$ ,  $B$ ) sous la forme d'une courbe blanche. La courbe en trois dimensions coupe le plan ( $B$ ,  $Y$ ) à 475nm (bleu élémentaire) et 574nm (jaune élémentaire). Le plan ( $A$ ,  $Y$ ) est coupé à 503nm (vert élémentaire). La figure 23 comprend des relations linéaires entre les valeurs lumineuses et les valeurs chromatiques spectrales,  $Y(\lambda)$ ,  $A(\lambda)$  et  $B(\lambda)$  et les valeurs tristimulus  $x_q(\lambda)$ ,  $y_q(\lambda)$  et  $z_q(\lambda)$ .

Il existe une différence entre la valeur chromatique (valence dans le mélange de couleurs) et chroma, une différence analogue à celle qui existe entre valeur lumineuse et clarté.



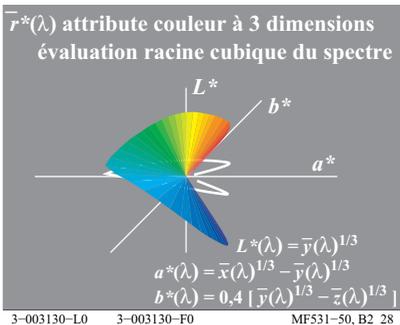
**Fig. 24 : chroma RG et chroma YB**

La figure 24 (*gauche*) montre les chromas rouge-vert  $a^*(\lambda)$ , lesquelles décrivent la chroma apparente des couleurs spectrales allant du rouge au vert. Les points zéro sont situés à proximité de 475nm et de 575nm, et marquent les deux couleurs élémentaires spectrales bleue  $B_e$  et jaune  $Y_e$ .

La figure 24 (*droite*) montre les chromas jaune-bleu  $b^*(\lambda)$ , lesquelles décrivent les chromas apparentes des deux couleurs spectrales jaune et bleue. Le point zéro est situé à proximité de 503nm, et marque la couleur élémentaire spectrale verte  $G_e$ .

Pour les couleurs spectrales d'une même énergie radiante, la clarté ainsi que les chromas rouge-vert et jaune-bleu forment trois valeurs chiffrées (un vecteur) pour chaque longueur d'onde  $\lambda$  comprise entre 380nm et 720nm. Dans l'espace en trois dimensions, un point de coordonnées chroma rouge-vert  $a^*$ , chroma jaune-bleu  $b^*$  et clarté  $L^*$  est défini pour chaque longueur d'onde.

Il est nécessaire de définir le concept théorique de paramètres de couleur (en allemand *Farbheit*), qui réunit les termes de clarté, chroma rouge-vert, chroma jaune-bleu, blancheur, noirceur, brillance ainsi que d'autres paramètres colorimétriques visuels.



**Fig. 25 : paramètres de couleur en 3-dimensions**

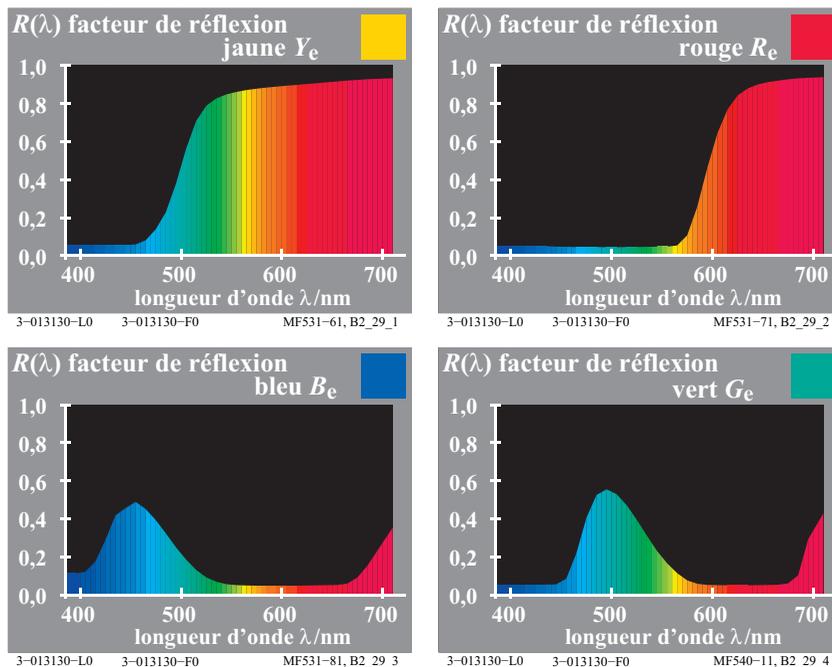
La figure 25 montre trois *Farbheiten* / paramètres de couleur  $L^*$ ,  $a^*$ ,  $b^*$  dans un espace colorimétrique en trois dimensions ( $a^*$ ,  $b^*$ ,  $L^*$ ) et la projection sur le plan ( $a^*$ ,  $b^*$ ) sous la forme d'une courbe blanche. La courbe en trois dimensions coupe le plan ( $b^*$ ,  $L^*$ ) à 475nm (bleu élémentaire  $B_e$ ) et 574nm (jaune élémentaire  $Y_e$ ). Le plan ( $a^*$ ,  $L^*$ ) est coupé à 503nm (vert élémentaire  $G_e$ ).

La projection de la courbe en trois dimensions sur le plan ( $a^*$ ,  $b^*$ ) est représentée par une courbe blanche dans la figure 25. La figure 25 représente la relation non linéaire des clartés et des chromas spectrales  $L^*(\lambda)$ ,  $a^*(\lambda)$  et  $b^*(\lambda)$  avec les valeurs tristimulus  $x_q(\lambda)$ ,  $y_q(\lambda)$  et  $z_q(\lambda)$ .

## 11 Mélangeur de couleurs spectrales et réflexion

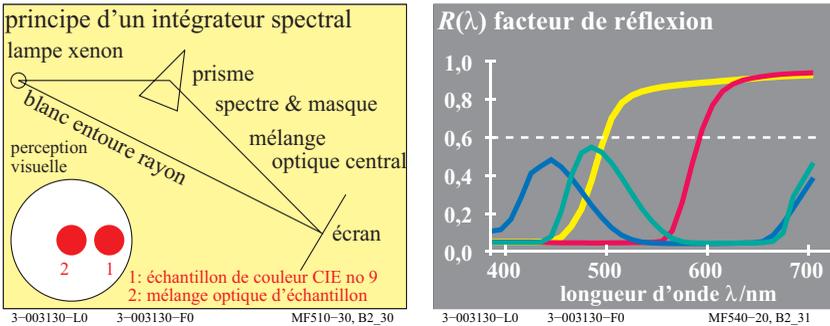
Un spectrophotomètre est un appareil qui permet de mesurer la réflexion spectrale d'une radiation pour chaque longueur d'onde. En comparant la réflexion de la couleur d'une surface avec celle du blanc de référence, on obtient une courbe

de réflexion spectrale avec des valeurs numériques comprises entre 0,0 et 1,0 pour chaque longueur d'onde.



**Fig. 26 :** facteur de réflexion spectrale des quatre couleurs élémentaires  $RYGB_e$

La figure 26 montre les facteurs de réflexion spectrale, qu'il est possible de transposer sur des « masques » grâce à des facteurs de transmissions adaptés. A l'aide d'un mélangeur de couleurs spectrales, il est ainsi possible de générer au niveau optique les couleurs élémentaires  $RYGB_e$ .



**Fig. 27 : principe du mélangeur de couleurs spectrales et facteur de réflexion en tant que masque**

La figure 27 (*gauche*) montre le principe d'un mélangeur de couleurs spectrales. Deux faisceaux partent d'une source de lumière blanche Xenon. Un faisceau projette un disque de lumière blanche sur l'écran en guise de fond.

Dans le faisceau interne, la lumière est décomposée par un prisme. Le mélange optique des couleurs de ce spectre engendre un champ intérieur blanc de forme circulaire. Sur l'écran de projection, la lumière blanche du faisceau interne et celle du faisceau externe sont les mêmes.

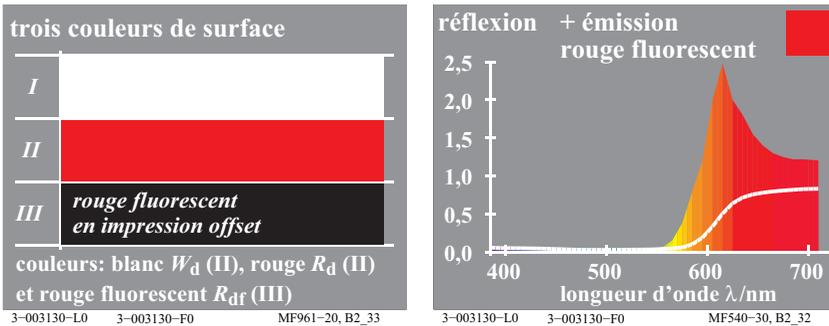
A l'endroit du spectre, l'utilisation de masques permet de supprimer complètement ou partiellement les couleurs spectrales. Les parties restantes sont mélangées au niveau optique. Différents masques engendrent différentes couleurs dans le champ intérieur, par exemple pour la couleur test CIE n° 9 (rouge élémentaire  $R_e$  conformément à CIE R1-47).

La figure 27 (*droite*) montre les masques adaptés aux couleurs élémentaires  $RYGB_e$ . Ces masques correspondent aux facteurs de réflexion  $R(\lambda)$  des quatre couleurs-tests CIE n° 9 (rouge  $R_e$ ), n° 10 (jaune  $Y_e$ ), n° 11 (vert  $G_e$ ) et n° 12 (bleu  $B_e$ ). Selon CIE 13.3, ces couleurs-tests CIE et d'autres sont utilisées pour caractériser le rendu des couleurs de sources lumineuses. De surcroît, il y a également un facteur de réflexion constant  $R(\lambda) = 0,6$  correspondant à une couleur gris clair.

## 12 Fluorescence

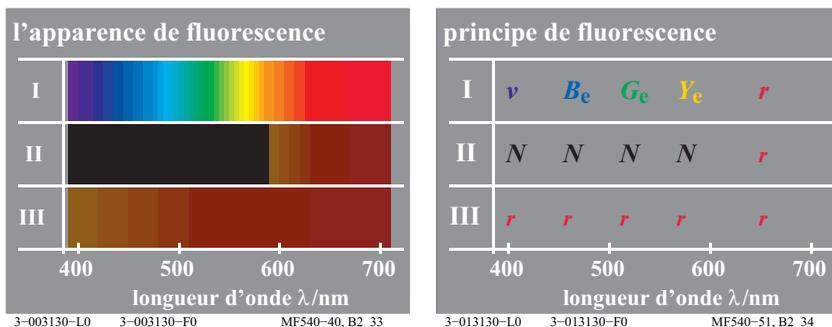
La fluorescence transforme une émission lumineuse à ondes courtes en une émission à ondes longues. Cet effet est utilisé dans les azurants optiques qui permettent d'éclaircir le papier et le linge, et de raviver les colorants. Le rouge fluorescent est par exemple utilisé comme couleur de signalisation. Les cou-

leurs fluorescentes élargissent de manière conséquente l'espace colorimétrique des surfaces de couleurs normales (non fluorescentes.)



**Fig. 28 :** surfaces de couleurs, réflexion et émission d'une couleur fluorescente

La figure 28 montre trois surfaces de différentes couleurs : une blanche  $W_d$  (I), une rouge  $R_d$  (II) et une rouge fluorescente  $R_{df}$  (III) (gauche), ainsi que la réflexion et l'émission d'une couleur rouge fluorescente  $R_{df}$  (droite). Les couleurs fluorescentes réfléchissent plus la lumière à ondes longues (d'apparence rouge) qu'un échantillon (conventionnel) d'un rouge à réflexion diffuse. Pour la couleur fluorescente rouge d'après la figure 28 et dans le champ spectral des ondes longues, la somme de l'émission et de la réflexion spectrale est supérieure à 1,0. La couleur de cette surface apparaît comme étant d'un rouge particulièrement lumineux. C'est est pourquoi, nous parlons de couleurs lumineuses.



**Fig. 29 :** apparence spectrale et principe de fluorescence

La figure 29 montre l'apparence (gauche) et le principe (droite) de fluorescence. Le spectre est très différent selon qu'il apparaît sur une surface blanche (I), une surface d'un rouge normal (II) ou sur une surface d'un rouge fluorescent (III) (gauche).

On voit donc que le spectre subit des modifications visibles de son apparence selon la couleur de la surface de fond. On engendre un spectre avec un filtre interférentiel à bande passante. Le spectre est projeté sur trois surfaces de couleurs I à III :

- Le spectre projeté sur la surface blanche (I) présente son apparence habituelle avec ses couleurs violet  $v$ , bleu  $B_e$ , vert  $G_e$ , jaune  $Y_e$ , rouge  $r$  (*gauche*). Cela est également représenté par les lettres correspondant aux couleurs (*droite*).
- Le spectre projeté sur la surface rouge (II) apparaît sombre dans les champs allant du violet  $v$  au jaune  $Y_e$  et offre dans le champ rouge une réflexion analogue à celle de la surface blanche (*gauche*). La lettre  $N$  (=noir) indique l'absorption dans le champ allant du violet  $v$  au jaune  $Y_e$ , et la lettre  $r$  la réflexion (*droite*).
- Le spectre projeté sur la couleur rouge fluorescente (III) apparaît comme rouge  $r$  sur l'ensemble du spectre, du violet  $v$  au rouge  $r$  (*gauche*). Dans le champ spectral allant du violet  $v$  au jaune  $Y_e$ , il y a une émission de lumière rouge  $r$ . La lettre  $r$  indique cette propriété de réflexion sur l'ensemble du spectre (*droite*).

### 13 Rétroréflexion

Les matériaux rétro-réfléchissants apparaissent comme des couleurs particulièrement lumineuses sous des éclairages spéciaux et dans certaines conditions d'observation. La couleur est ici engendrée par l'illuminant D65, par un matériau d'une surface achromatique (d'apparence blanche) doté de certaines propriétés de réflexion géométrique, ainsi que par une couche supérieure de couleur transparente agissant comme un filtre. Les transmissions spectrales de ce filtre varient en fonction de sa couleur.

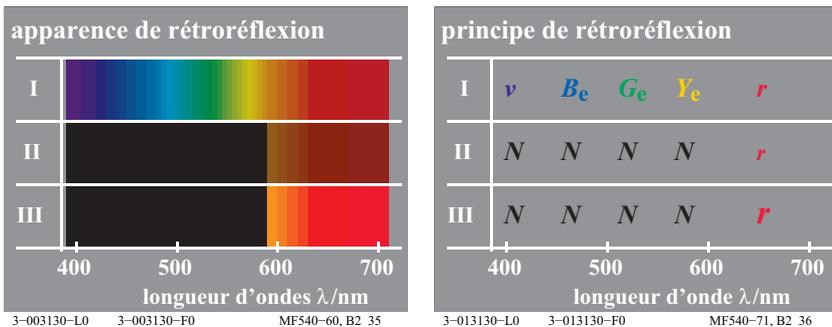


Fig. 30 : apparence spectrale et principe de rétroréflexion

La figure 30 montre l'apparence (*gauche*) et le principe (*droite*) de la rétro-réflexion. Le spectre présente des apparences très différentes selon qu'il s'agit d'une surface blanche (I), rouge (II) ou rouge rétro-réfléchissante (III) (*gauche*).

Les surfaces de différentes couleurs entraînent des modifications au niveau de l'apparence des couleurs spectrales. On engendre un spectre avec un filtre interférentiel à bande passante. Le spectre est projeté sur trois surfaces de couleurs de I à III :

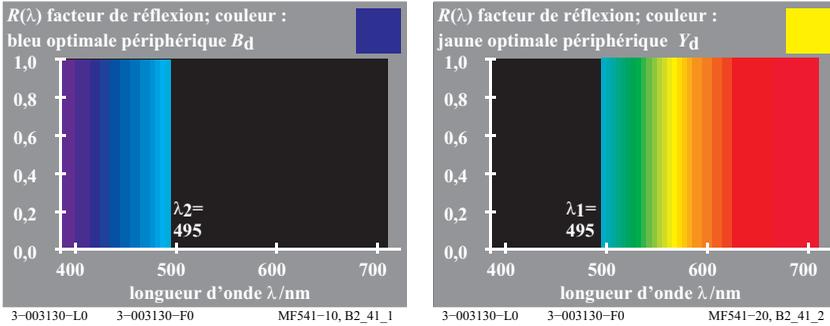
- L'apparence du spectre projeté sur une surface blanche (I) et sur une surface rouge normale (II) a déjà été décrite dans la figure 29.
- Projeté sur une surface rouge rétro-réfléchissante, le spectre présente une apparence sombre dans le champ allant du violet  $v$  au jaune  $Y_e$ , et dans le champ rouge, il peut avoir une réflexion analogue à celle d'une surface blanche (*gauche*). La lettre  $N$  (=noir) indique l'absorption dans le champ allant du violet  $v$  au jaune  $Y_e$ , et la lettre *grand format*  $r$  montre une augmentation de la réflexion (*droite*). Cette réflexion atteint un maximum lorsque l'orientation de l'éclairage est en accord avec celle de l'observation.

## 14 Synthèse de couleurs

### 14.1 Synthèse dichromatique additive

*Miescher* appelle synthèse dichromatique le mélange additif de deux couleurs. De la même manière, une synthèse trichromatique correspond au mélange de trois couleurs. D'après *Miescher* (1961, 1965), on appelle synthèse antichromatique, le mélange additif de deux couleurs complémentaires donnant une couleur achromatique.

A l'aide d'un mélangeur de couleurs spectrales, il est possible de générer des couleurs de différentes compositions spectrales, voir figure 27 à la page 27. Il est également possible de générer des *couleurs optimales* représentant les limites de toutes les surfaces de couleurs. C'est parmi les couleurs optimales que l'on trouve les couleurs les plus intenses, par exemple le rouge le plus rouge, ce qui est très important pour les technologies de l'image, voir paragraphe 19 à la page 67.



**Fig. 31 :** couleurs de périphérique optimales obtenues par synthèse additive dichromatique  $B_d$  et  $Y_d$

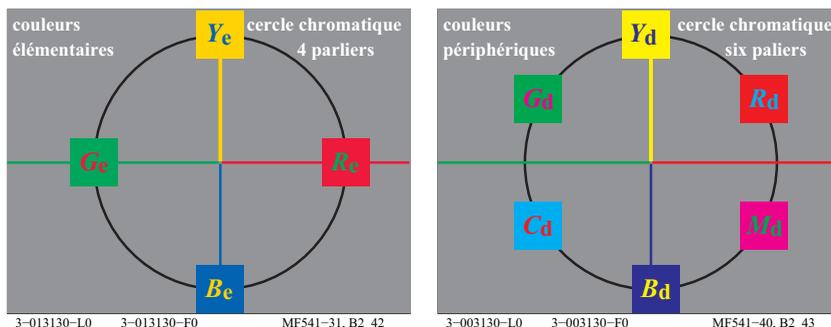
La figure 31 montre une synthèse dichromatique de blanc. Le blanc  $W$  est additivement composé de paires de couleurs optimales dites *complémentaires* (par exemple Bleu  $B_d$  et jaune  $Y_d$ ). Pour le processus de reproduction présenté ici, nous utilisons un jaune verdâtre, que nous désignons par l'abréviation d'usage  $Y_d$  ( $Y$ = yellow,  $d$ =device=appareil périphérique) et un bleu rougeâtre  $B_d$ .

Dans la figure 31 (*gauche*), la courbe de réflexion de la couleur optimale bleue  $B_d$  présente un point de discontinuité à 495nm, passant brutalement de 1,0 à 0,0. Sa courbe de réflexion est à 1,0 entre 380nm et 495nm, et à 0,0 entre 495nm et 720nm.

Dans la figure 31 (*droite*), la courbe de réflexion de la couleur optimale jaune  $Y_d$  est à 0,0 entre 380nm et 495nm, présente un point de discontinuité à 490nm, passant brutalement de 0,0 à 1,0, et conserve la valeur 1,0 entre 495nm et 720nm.

La synthèse additive des deux couleurs optimales  $B_d$  et  $Y_d$  donne une couleur achromatique avec une courbe de réflexion spectrale  $R(\lambda) = 1,0$  pour toutes les longueurs d'onde. Cette couleur est en apparence blanche.

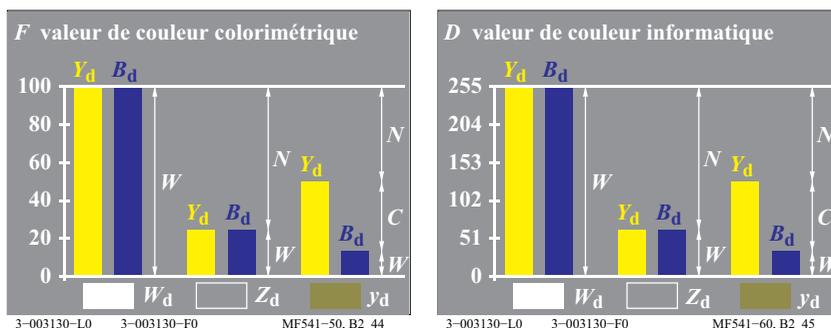
Les couleurs de périphérique montrées dans la figure 31, jaune  $Y_d$  et bleu  $B_d$ , sont différentes des couleurs élémentaires jaune  $Y_e$  et bleu  $B_e$ .



**Fig. 32 :** quatre couleurs élémentaires  $YRGB_e$  et six couleurs de périphérique  $RYGCBM_d$

La figure 32 (*gauche*) montre les quatre couleurs élémentaires rouge  $R_e$ , jaune  $Y_e$ , vert  $G_e$  et bleu  $B_e$  dans le cercle chromatique symétrique

La figure 32 (*droite*) montre six couleurs chromatiques  $RYGCBM_d$  provenant d'un cercle chromatique à 6 teintes, sur lequel est basée la reproduction des couleurs. Conformément à leur agencement sur le cercle chromatique, le jaune  $Y_d$  présente une nuance légèrement verdâtre par rapport au jaune  $Y_e$ , et le bleu  $B_d$  une nuance rougeâtre par rapport au bleu  $B_e$ .



**Fig. 33 :** valeurs dichromatiques en colorimétrie et dans les technologies numériques

La figure 33 montre à *gauche*, les valeurs  $F$  de la colorimétrie, et les valeurs  $D$  du numérique (*droite*). En colorimétrie, on utilise 100 degrés, et 255 dans les technologies numériques.

La figure 33 montre des couleurs hybrides obtenues à partir de la couleur propre jaune  $Y_d$  et de la couleur complémentaire bleu  $B_d$  : blanc  $W_d$ , gris central  $Z_d$ , et une couleur jaune  $y_d$  en bordure inférieure.

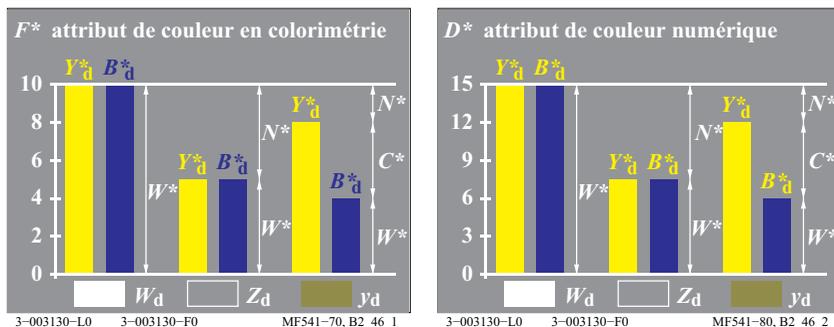
Si on utilise 100% de la couleur propre  $Y_d$  ainsi que de la couleur complémentaire  $B_d$ , on obtient la couleur blanche  $W_d$  avec un facteur de réflexion spectral s'élevant à 1,0 partout. Dans la partie de gauche : la valeur blanche  $W = 100$ , la valeur noire  $N = 0$  et la valeur chromatique  $C = 0$ . La couleur de synthèse  $W_d$  est indiquée en bas à gauche.

Si on n'utilise que 25% de la couleur propre  $Y_d$  ainsi que de la couleur complémentaire  $B_d$ , on obtient la couleur achromatique gris central  $Z_d$ . Sur le mélangeur de couleurs spectrales, il est possible de choisir les masques, de manière à ce que les courbes de réflexion ne présentent que deux points de discontinuité entre 0,0 et 0,25. Dans la partie du milieu avec le gris central  $Z_d$  : la valeur blanche  $W = 25$ , la valeur noire  $N = 75$  et la valeur chromatique  $C = 0$ .

Si la couleur propre  $Y_d$  est plus importante que la couleur complémentaire  $B_d$ , on obtient une couleur chromatique, qui contient la teinte de la couleur propre. Dans la partie de droite : la valeur blanche  $W = B_d = 15$ , la valeur noire  $N = 100 - Y_d = 50$  et la valeur chromatique  $C = Y_d - B_d = 35$ .

Le traitement de l'image conduit de plus en plus à la reproduction de séries équidistantes de paramètres colorimétriques. Par exemple, les racines carrées des valeurs colorimétriques donnent sur un fond blanc des séries de clartés équidistantes  $\Delta L^* = \text{constante}$ . Par exemple, les valeurs de référence lumineuse  $Y$  mit  $Y=1, 4, 9, 16, \dots, 81, 100$  correspondent aux valeurs de clarté équidistantes  $L^*=10, 20, 30, \dots, 90, 100$ .

Les coordonnées des paramètres colorimétriques sont les paramètres  $F^*$  (Farbheit) de la colorimétrie ou les paramètres  $D^*$  (Farbheit) de la technologie numérique. Le terme général de Farbheit comprend les paramètres colorimétriques de clarté, chroma, blancheur, noirceur, brillance et d'autres. Le terme général de valeur colorimétrique comprend la valeur de référence lumineuse, la blancheur, la noirceur, la valeur chromatique et d'autres. Il existe une relation non linéaire (racine carrée) entre les deux termes généraux, par exemple entre la clarté  $L^*$  et la valeur de référence lumineuse  $Y$  d'un échantillon sur fond blanc (papier ou écran blanc).

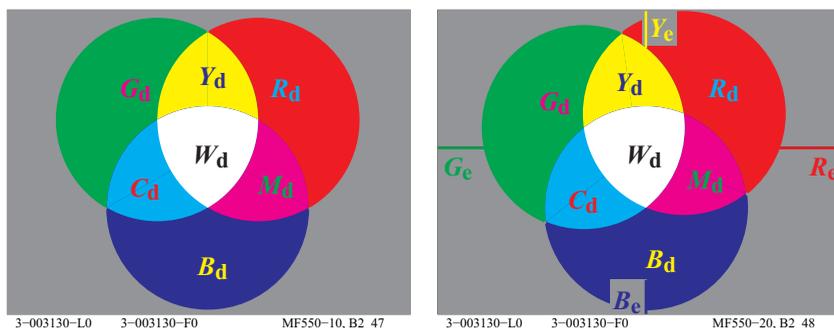


**Fig. 34 :** Farbheit en colorimétrie et en technologie numérique

La figure 34 (*gauche*) montre les couleurs  $F^* = Y^*$  ou  $B^*$  entre 0 et 10 en colorimétrie. Le système colorimétrique de *Munsell* utilise 10 degrés. La figure 34 (*droite*) montre les couleurs  $D^*$  entre 0 et 15 dans le traitement numérique de l'image. La norme CEPT pour vidéotext (*Btx*) utilise 15 degrés.

## 14.2 Synthèse trichromatique additive

Le blanc  $W_d$  peut également être obtenu par la synthèse additive des trois couleurs optimales rouge  $R_d$  (ou rouge-orange  $O$ ), vert  $G_d$  (ou vert-feuillage  $L$ ) et bleu  $B_d$  (ou bleu-violet  $V$ ). *Miescher* a désigné ce mélange de trois couleurs primaires par le terme de synthèse trichromatique.

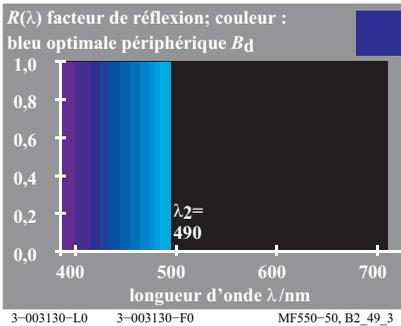
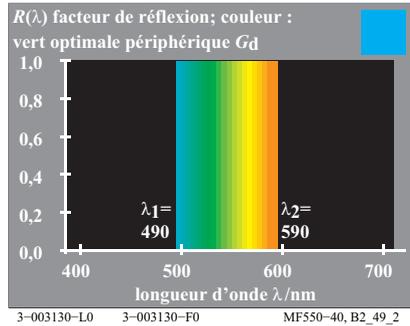
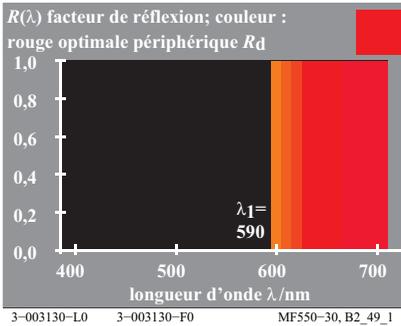


**Fig. 35 :** synthèse trichromatique additive et position des couleurs élémentaires

La figure 35 (*gauche*) montre la synthèse additive composée des trois couleurs de base rouge  $R_d$  (ou rouge-orange  $O$ ), vert  $G_d$  (ou vert-feuillage  $L$ ) et bleu  $B_d$  (ou bleu-violet  $V$ ). Celles-ci se mélangent pour former les trois couleurs hybrides

des dichromatiques jaune  $Y_d$ , cyan  $C_d$  et magenta  $M_d$ . Le blanc  $W_d$  est une couleur hybride trichromatique obtenue par le mélange de ces trois couleurs primaires.

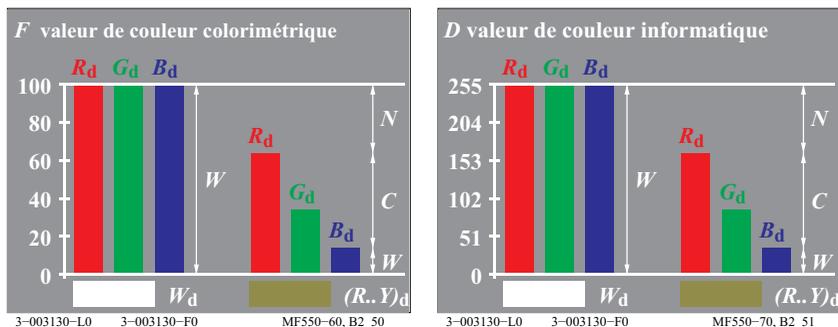
La figure 35 (droite) montre la position des couleurs primaires additives, des couleurs hybrides dichromatiques  $CMY_d$  et de la couleur hybride trichromatique  $W_d$  par rapport aux quatre couleurs élémentaires  $RYBG_e$ . On notera la différence entre  $R_d$  et  $R_e$  ainsi qu'entre  $G_d$  et  $G_e$ .



**Fig. 36 : synthèse trichromatique additive de couleurs optimales**

La figure 36 montre les trois couleurs optimales rouge  $R_d$ , vert  $G_d$  et bleu  $B_d$ , qui se mélangent additivement pour donner le blanc. La synthèse additive de différents composants des trois couleurs primaires rouge  $R_d$ , vert  $G_d$  et bleu  $R_{B_d}$ , est utilisée en technologie.

Dans la figure 37 les valeurs colorimétriques des couleurs primaires de périphériques  $R_d$ , vert  $G_d$  et bleu  $B_d$  sont classées par ordre de grandeur. Cet exemple nous présente  $R_d > G_d > B_d$ .



**Fig. 37 :** valeurs colorimétriques trichromatiques  $RGB_d$  en colorimétrie et dans la technologie numérique

La figure 37 montre sur la gauche, les valeurs colorimétriques  $F = R_d, G_d$  et  $B_d$  entre 0 et 100 en colorimétrie, et sur la droite les valeurs colorimétriques  $D = R_d, G_d$  et  $B_d$  entre 0 et 255 dans le numérique. La relation entre la valeur noire  $N$ , la valeur blanche  $W$  et la valeur chromatique  $C$  des couleurs est indiquée.

attributs de la colorimétrie inférieur et supérieur	mode de mélange de couleurs dichromatique trichromatique	
<i>colorimétrie inférieure</i>	(pour $Y_d \geq B_d$ )	(pur $R_d \geq G_d \geq B_d$ )
valeur blanche $W$	$B_d$	$B_d$
valeur noire $N$	$100 - Y_d$	$100 - R_d$
valeur chromatique $C$	$Y_d - B_d$	$R_d - B_d$
<i>colorimétrie supérieure</i>	(pour $Y^*_d \geq B^*_d$ )	(pour $R^*_d \geq G^*_d \geq B^*_d$ )
blancheur $W^*$	$B^*_d$	$B^*_d$
noirceur $N^*$	$100 - Y^*_d$	$100 - R^*_d$
chroma $C^*$	$Y^*_d - B^*_d$	$R^*_d - B^*_d$

**Tableau 2 :** type de synthèse, valeurs colorimétriques et paramètres de couleurs (Farbheit) en colorimétrie

Le tableau 2 montre deux types de synthèse de couleurs. Il présente la relation entre les paramètres et les valeurs colorimétriques  $Y_d$  et  $B_d$  du mélange dichromatique ainsi que la relation entre les valeurs colorimétriques  $R_d, G_d$  et  $B_d$  du mélange trichromatique.

La colorimétrie supérieure utilise les paramètres de couleurs (blancheur, noirceur, chroma). Ces paramètres sont indiqués dans le tableau par le signe\* (astérisque), voir par exemple la blancheur  $W^* = B^*_d$ .

Dans la figure 33 à la page 32, ainsi que dans la figure 37 à la page 36 et dans le tableau 2, les abréviations utilisées signifient :

Fig. 33 à la page 32 pour  $Y_d \geq B_d$ :

$Y_d$  couleur propre       $B_d$  couleur complémentaire  
 $W$  blanc                       $Z$  gris central                       $y_d$  jaune clair

Fig. 37 à la page 36 pour  $R_d \geq G_d \geq B_d$

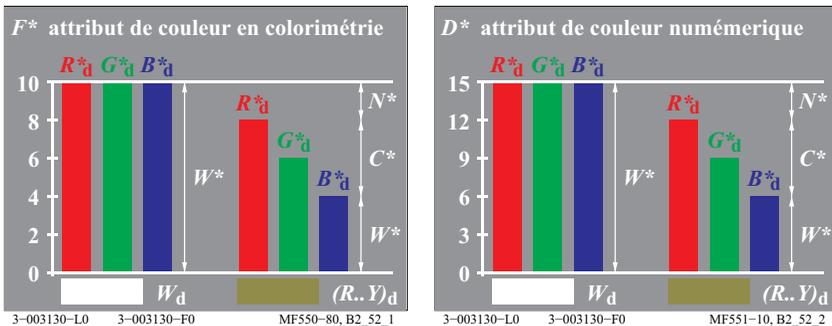
$R_d$  rouge                       $G_d$  vert  
 $B_d$  bleu                       $(Y..R)_d$  jaune-rouge

Dans le tableau 2, les valeurs colorimétriques de la couleur propre jaune  $Y_d$  et de la couleur complémentaire  $B_d$ , ou encore des trois couleurs de base rouge  $R_d$ , vert  $G_d$  et bleu  $B_d$ , sont en simple relation avec les paramètres de blancheur relative  $w$ , de noirceur relative  $n$  et de valeur chromatique relative  $c$  définis par Ostwald.

On considère comme valable (comparer la fig. 33 à la page 32 et la fig. 37 à la page 36) :

$w$  valeur blanche relative      = valeur blanche / 100      =  $W / 100$   
 $n$  valeur noire relative          = valeur noire / 100          =  $N / 100$   
 $c$  valeur chromatique relative   = valeur chromatique / 100 =  $C / 100$

On peut calculer la valeur blanche  $W$ , la valeur noire  $N$  et la valeur chromatique  $C$  à partir des trois valeurs  $RGB_d$  utilisées en colorimétrie ou dans le numérique. En raison des relations non linéaires entre la valeur colorimétrique et les paramètres de couleurs (Farbheit), les deux quotients valeur blanche / valeur noire et blancheur/noirceur sont différents.



**Fig. 38 :** les paramètres de couleurs  $RGB^*_d$  dans les domaines colorimétriques et numériques

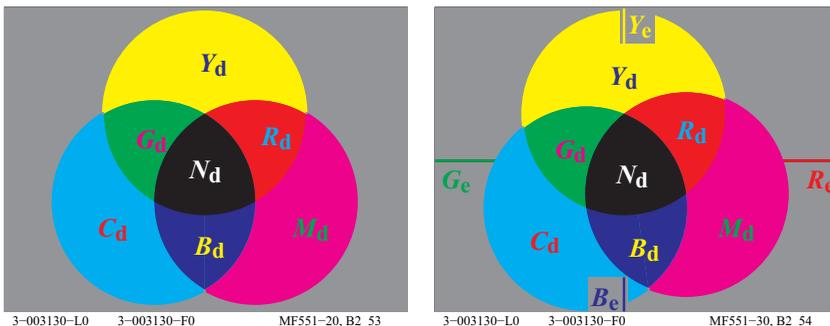
La figure 38 montre les paramètres de couleurs  $R^*_d$ ,  $G^*_d$  ou  $B^*_d$  entre 0 et 10 en colorimétrie (*gauche*) et entre 0 et 15 dans le domaine numérique (*droite*). La relation avec la noirceur  $N^*$ , la blancheur  $W^*$  et la chroma  $C^*$  des couleurs est indiquée.

*Remarque* : dans le système CIELAB, la clarté  $L^*$  et la chroma  $C^*$  varie dans le champ compris entre 0 et 100 au lieu de 0 et 10, comme par exemple dans le système de *Munsell*.

Tout le monde connaît l'application technologique de la synthèse additive, à savoir les écrans couleurs de la télévision et des ordinateurs. Ici, l'image est composée à partir de triplés de points de trame disposés les uns contre les autres, rouges  $R_d$ , verts  $G_d$  et bleus  $B_d$ . La luminance de ces points peut être réglée par des signaux de la télévision ou au moyen d'un logiciel spécial. Pour un récepteur de télévision aux normes, il y a au moins 1,2 millions de points lumineux, qu'un oeil humain est incapable de distinguer à 3 m de distance dans des conditions normales. Il en résulte une synthèse additive de couleurs tramées.

### 14.3 Synthèse trichromatique soustractive

En introduisant successivement trois filtres colorés appropriés dans *un faisceau de lumière blanche* (projeté sur une surface blanche), on obtient du noir, si presque toute la lumière est absorbée. Contrairement au mode additif de la synthèse des couleurs décrit plus haut, les filtres sont mis en place les uns derrière les autres dans *un faisceau de lumière unique*.

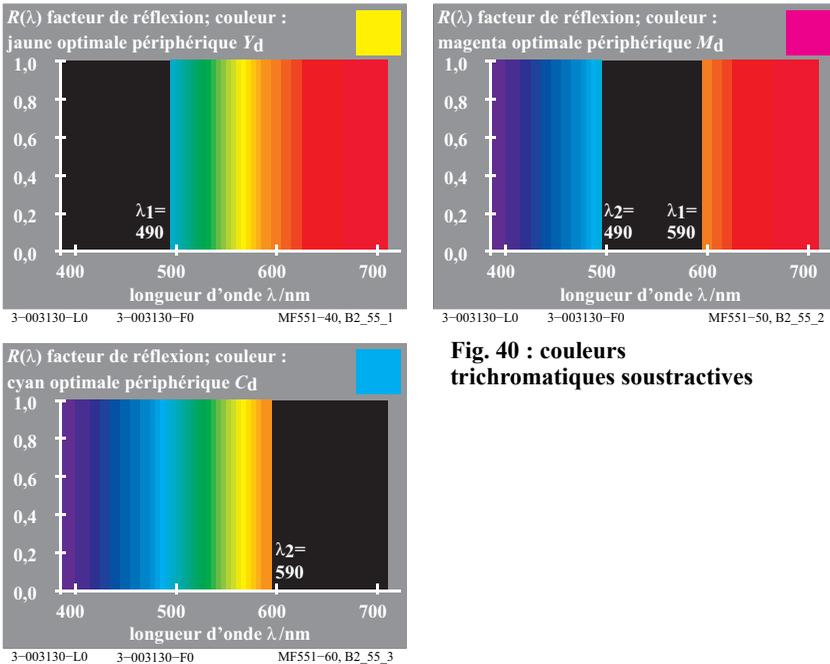


**Fig. 39 :** Synthèse trichromatique soustractive et position des couleurs élémentaires

La figure 39 (*gauche*) montre une synthèse soustractive à partir des trois couleurs primaires cyan  $C_d$ , magenta  $M_d$  et jaune  $Y_d$ . On obtient les trois couleurs hybrides dichromatiques rouge  $R_d$ , vert  $G_d$  et bleu  $B_d$ . Le noir  $N_d$  est la couleur hybride trichromatique issue des trois couleurs de base. Pour la technique de

synthèse soustractive, il faut *trois* filtres spéciaux dont les courbes de transmission spectrales correspondent à celles des couleurs optimales cyan  $C_d$ , magenta  $M_d$  et jaune  $Y_d$ , voir fig. 40 à la page 39.

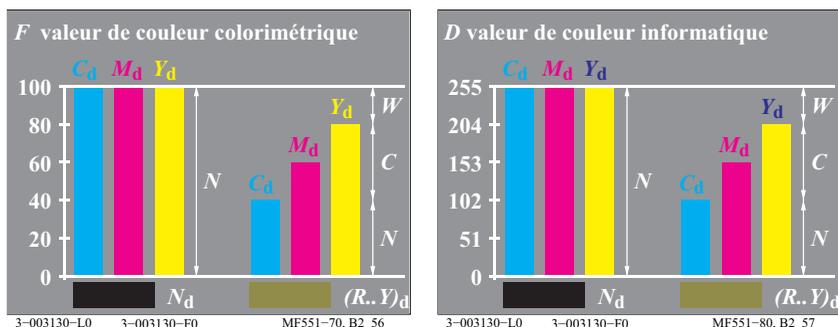
La figure 39 (*droite*) montre la position des couleurs primaires soustractives  $CMY_d$ , des couleurs hybrides dichromatiques  $RGB_d$  ainsi que de la synthèse trichromatique  $N_d$ . La position relative par rapport aux quatre couleurs élémentaires  $RYGB_e$  est représentée. Il existe une différence importante entre  $R_e$  et  $R_d$  ou  $M_d$ . Dans l'imprimerie, le terme de *rouge* remplace souvent celui de *magenta* pour désigner  $M_d$ . Il existe également une différence entre  $B_e$  et  $B_d$  ou  $C_d$ , que les imprimeurs désignent souvent par le terme de *bleu* au lieu de *cyan*.



**Fig. 40 : couleurs trichromatiques soustractives**

La figure 40 montre les facteurs de réflexion spectrale  $R(\lambda)$  (ou les facteurs de transmission  $T(\lambda)$  de filtres), particulièrement bien adaptés à la synthèse soustractive : la couleur optimale jaune  $Y_d$  avec  $R(\lambda) = 1$  à partir d'une longueur d'onde de 490nm, la couleur optimale magenta  $M_d$  avec  $R(\lambda) = 1$  jusqu'à une

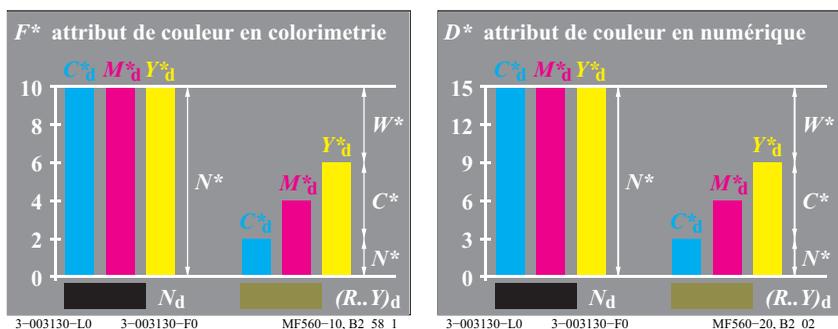
longueur d'onde de 490nm et à partir de 590nm, ainsi que la couleur optimale cyan  $C_d$  avec  $R(\lambda) = 1$  jusqu'à une longueur d'onde de 590nm.



**Fig. 41 :** valeurs  $CMY_d$  en colorimétrie et dans la technologie numérique

La figure 41 (*gauche*) montre la norme des valeurs  $F$  comprises entre 0 et 100 en colorimétrie. La figure 41 (*droite*) montre la norme des valeurs  $D$  comprises entre 0 et 255 dans le numérique.

La spécification des couleurs hybrides issues des trois couleurs d'imprimerie cyan  $C_d$ , magenta  $M_d$  et jaune  $Y_d$  est indiquée. Lorsque le jaune  $Y_d$  et le magenta  $M_d$  sont prédominants par rapport au cyan  $C_d$ , le mélange de  $Y_d$  et  $M_d$  donnera en premier lieu un rouge  $R_d$ . Comme le jaune prédomine, la teinte hybride sera nécessairement une couleur jaune-rouge  $(R..Y)_d$ .



**Fig. 42 :** paramètres de couleurs  $CMY^*_d$  en colorimétrie et dans le numérique

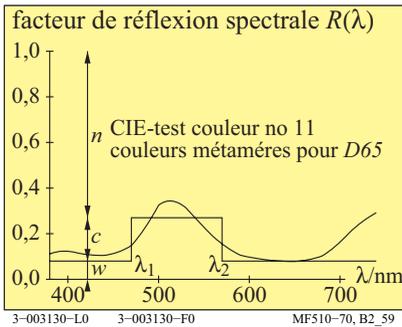
La figure 42 montre sur la gauche les paramètres (Farbheiten)  $F^*$  de la colorimétrie, et sur la droite, les paramètres (Farbheiten)  $D^*$  de la technologie numérique pour une synthèse trichromatique soustractive.

La *photographie couleur* est l'application technique la plus connue de la *synthèse soustractive*. Dans le cas d'un film inversible, trois filtres colorés cyan  $C_d$  magenta  $M_d$  et jaune  $Y_d$  sont superposés. Les facteurs de transmission des couches sont contrôlés par l'exposition et ensuite par le processus de développement du film.

L'impression polychrome standard repose autant sur des synthèses soustractives et additives. Pour une impression polychrome, on utilise la synthèse additive lorsque les couleurs sont imprimées côte à côte, et la synthèse soustractive lorsqu'il s'agit d'imprimer plusieurs couches transparentes les unes sur les autres.

## 15 Rayonnement spectral

Les couleurs présentant une même apparence sont parfois constituées de radiations spectrales très différentes. Des procédés numériques permettent de calculer ce genre de couleur métamères (ou semblables dans certaines conditions) en fonction de l'éclairage.



**Fig. 43 : facteurs de réflexion de couleurs métamères**

La figure 43 montre la couleur-test CIE n° 11 (vert), conforme à CIE 13.3, et une couleur métamère de forme rectangulaire pour D65. De nos jours, on essaie d'éviter les couleurs métamères pour différentes parties de produits industriels, car ces couleurs n'ont une apparence identique que sous une certaine lumière. Lorsque l'on passe par exemple de la lumière du jour à un éclairage artificiel, *des différences de couleur* apparaissent et les couleurs métamères ne sont plus identiques.

La figure 43 présente la valeur noire *relative*  $n$ , la valeur chromatique *relative*  $c$  et la valeur blanche *relative*  $w$ . L'équation d'*Ostwald* :  $n + c + w = 1$  est valide.

Les deux longueurs d'onde complémentaires limites  $\lambda_1=480\text{nm}$  et  $\lambda_2=580\text{nm}$  pour l'illuminant D65 appartiennent à une couleur optimale avec la teinte

élémentaire verte  $G_e$ . Cette couleur optimale possède la plus grande valeur chromatique  $C_{AB}$  et forme selon *Ostwald* un *Farbenhalb*.

Il existe de nombreuses couleurs complémentaires dichromatiques dont la synthèse est le blanc, par exemple le bleu  $B_d$  dans la figure 36, page 33, et le jaune  $Y_d$  dans la figure 40, page 37. Il en va de même pour le vert  $G_d$  et le magenta  $M_d$  ainsi que pour le rouge  $R_d$  et le cyan  $C_d$  de ces deux figures. De surcroît, il existe des couleurs dichromatiques spéciales avec des longueurs d'onde complémentaires  $\lambda_1$  et  $\lambda_2$ , qui selon *Ostwald*, forment des « demi-teintes ». Ce sont par exemple les couples de couleurs vert-magenta avec approximativement les longueurs d'onde limites  $(\lambda_1, \lambda_2) = (475\text{nm}, 575\text{nm})$  ; bleu - jaune avec les longueurs d'onde limites  $(\lambda_1, \lambda_2) = (495\text{nm}, 700\text{nm})$  ; cyan - rouge avec les longueurs d'onde limites  $(\lambda_1, \lambda_2) = (400\text{nm}, 565\text{nm})$ . Ces longueurs d'onde limites figurent dans le tableau de normes sur des droites passant par le point achromatique E (ou approximativement D65), voir la figure 50 à la page 51 (*droite*).

Dans la figure 43, il résulte de  $n=0,73$  et  $w=0,08$  les valeurs  $rgb_e$  linéaires correspondantes :

$$rgb^*_e = (w, (1-n), w) = (0,08 \ 0,27 \ 0,08)$$

Les valeurs  $rgb^*_e$  non linéaires correspondantes (*visuelles*) donnent (pour une relation de racine carrée sur un fond blanc) :

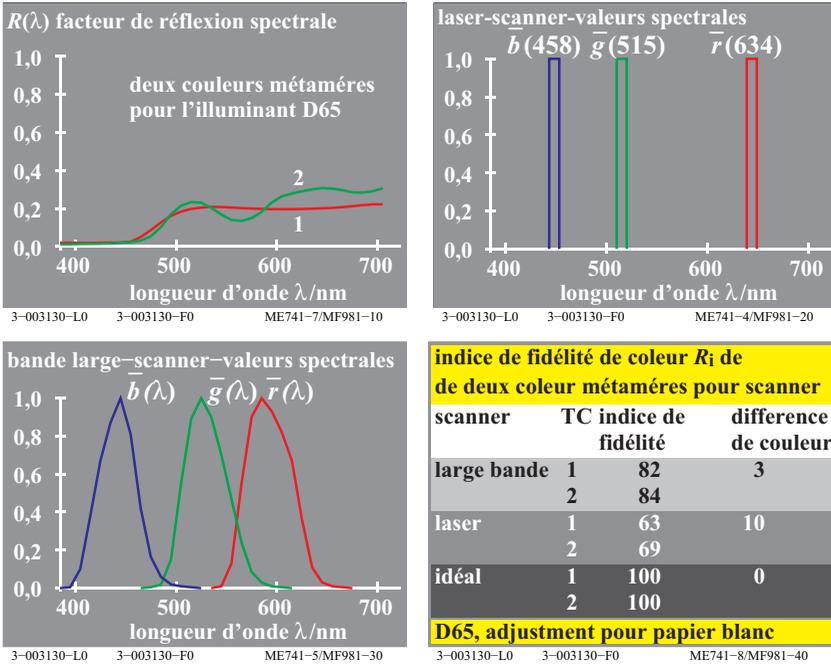
$$rgb^*_e = (w^{1/2}, (1-n)^{1/2}, w^{1/2}) = (0,28 \ 0,52 \ 0,28)$$

Pour la reproduction de la couleur-test CIE n° 11 en impression couleur ou sur écran couleur, il faut calculer les valeurs- $rgb_{de}$  (*de = device to elementary hue*), qui correspondent par exemple aux valeurs suivantes :

$$rgb_{de} = (w, (1-n), w+0.20w) = (0,08 \ 0,27 \ 0,10)$$

D'après la figure 10 à la page 12, la  $b$ -valeur doit être augmentée de 20% ( $=3/F\%=3/15\%$ ) de 0,08 à 0,10 pour générer la couleur élémentaire  $G_e$ .

Tous les calculs présentés ici ont été utilisés par un logiciel pour imprimer cette brochure. Le logiciel utilise les mesures de 729 ( $=9 \times 9 \times 9$ ) couleurs du périphérique de sortie pour le contrôle de sortie.



**Fig. 44 : deux couleurs-tests métamères, signaux du scanner et rendu de couleurs**

La figure 44 (*en haut à gauche*) montre deux couleurs-tests métamères, scannées par un scanner laser, un scanner large bande et un scanner idéal d'une sensibilité CIE. Les signaux des scanners sont généralement réglés sur  $r=g=b=1$  pour le blanc du papier.

En fonction du type de scanner, les couleurs n° 1 et n° 2 de la figure 44 (*en haut à gauche*) correspondent en général à des données  $rgb$  différentes. Cependant, les deux couleurs paraissent similaires pour l'illuminant D65 et présentent les mêmes données  $XYZ$  CIE.

Les valeurs  $rgb$  du scanner sont généralement analysées dans l'espace colorimétrique  $sRGB$  conformément à IEC 61966-2-1, et converties en données  $XYZ$  CIE et en différences de couleurs  $\Delta E^*$ . Pour un scanner idéal à large bande sensible aux valeurs spectrales standard, les signaux  $rgb$  sont identiques. Les maxima ou les minima des facteurs de réflexion ainsi que les valeurs spectrales du scanner définissent les différences de valeurs  $rgb$ . Dans la figure 44 (*en bas à droite*) les écarts  $\Delta E^*$  se situent entre les deux échantillons de couleurs métamères n° 1 et n° 2, dans un champ de 0 à 10.

Dans le cas idéal, l'indice du rendu des couleurs  $R_i$ , conformément à CIE 13.3, correspond à une valeur de 100. Il diminue selon la formule  $R_i = 100 - 4,6 \Delta E^*$ . Il a par exemple la valeur  $R_i = 86$  ( $= 100 - 3 \cdot 4,6$ ) pour l'écart  $\Delta E^* = 3$ . Pour les deux échantillons, il y a des écarts  $\Delta E^*_{ab}$  entre les données du scanner correspondant aux sensibilités CIE idéales et les sensibilités réelles du laser ou de la large bande. Il en résulte deux indices de rendu des couleurs pour les deux échantillons n° 1 et n° 2.

Pour la presse offset et les imprimantes couleurs, les couleurs achromatiques peuvent être imprimées exclusivement avec la couleur achromatique noir  $N_d$ , ou avec les trois couleurs chromatiques cyan  $C_d$ , magenta  $M_d$  et jaune  $Y_d$  (en particulier dans les images couleurs). Les couleurs achromatiques, qui sont imprimées uniquement à partir du noir  $N_d$ , ont généralement une courbe de réflexion constante. Les couleurs achromatiques, qui sont imprimées uniquement à partir de  $CMY_d$ , présentent généralement jusqu'à trois maxima et minima, voir fig. 44 (*en haut à gauche*).

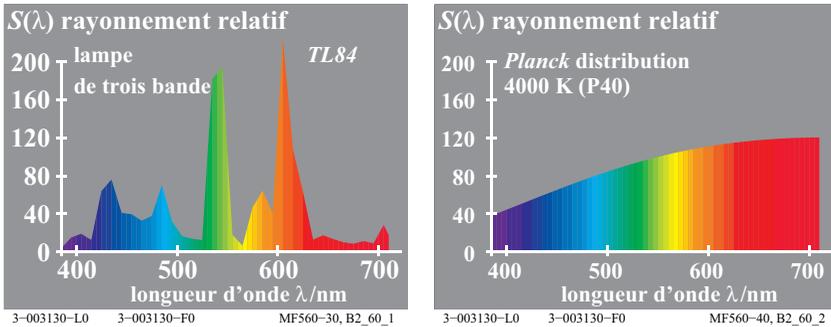
Les couleurs-tests et métamères, adaptées aux illuminants CIE D65 et A ainsi qu'aux illuminants CIE D50 et une radiation de *Planck* ( $P$ ) avec la température de couleur  $T = 4000K$  ( $P40$ ) sont évoquées dans les tests n° 1 à 3 en annexe, en format A4 paysage. Les facteurs de réflexion spectrale des échantillons utilisés pour les trois tests sont donnés. Les codes *rgb* sont indiqués et les données CIE pour les six illuminants D65, D50, P40, A, C, E, ont été calculées. Les échantillons sont basés sur le cercle chromatique à 16 teintes, du système colorimétrique élémentaire *RECS* (*Relative Elementary colour system*), voir DIN 33872-1 à -6.

La CIE R1-47 définit les angles des teintes élémentaires pour l'illuminant standard D65. Le jaune élémentaire  $Y_e$  et le bleu élémentaire  $B_e$  présentent des angles de teinte de 92 et 272 degrés. Pour l'illuminant CIE A, les angles des teintes élémentaires se décalent, passant de 92 et 272 degrés à environ 82 et 262 degrés en CIELAB (pour D65 et A). Les angles précis ne sont pas connus. C'est pourquoi, les teintes élémentaires sous l'illuminant D65 n'apparaissent plus comme des teintes élémentaire sous l'illuminant A. Le bleu élémentaire sous D65 apparaît rougeâtre sous l'illuminant A. De la même manière, le jaune élémentaire apparaît verdâtre sous l'illuminant A. Dans le futur, la CIE pourrait déterminer les angles des teintes élémentaires sous différents illuminants CIE.

Si dans la presse offset ou dans l'imprimante couleur, les couleurs achromatiques sont imprimées uniquement à partir des trois couleurs chromatiques *CMY* au lieu de  $N$ , cela multiplie par trois le matériel nécessaire. Si les couleurs achromatiques sont obtenues uniquement à partir de *CMY*, le coût de revient peut être multiplié par six. Le prix des couleurs *CMY* est généralement deux fois plus élevé que pour  $N$ . Au niveau des impressions *CMY*, les scanners entraînent souvent des différences de couleur  $\Delta E^* = 10$  pour les couleurs méta-

mères, en raison des maxima et des minima des courbes de réflexion, cf. fig. 44 (en bas à droite).

En annexe, les tests n° 2 et n° 3 (PF2311L et PF3311L) utilisent les deux techniques d'impression pour imprimer les couleurs achromatiques. La presse offset engendre des couleurs métamères pour les quatre illuminants CIE D65, D50, P40 et A. En plus, il existe des couleurs métamères pour un cercle chromatique à 8 teintes avec une demie chroma CIELAB  $C^*_{ab}$  par rapport à la chroma maximale de la presse offset.



**Fig. 45 :** répartition du rayonnement spectral relatif

La figure 45 montre la répartition spectrale relative  $S(\lambda)$  d'un tube fluorescent d'une grande efficacité lumineuse (économique) et d'une source lumineuse (hypothétique) d'une température de couleur s'élevant à 4000K (P40) conformément à loi de *Planck* sur le rayonnement (P). Ces deux sources lumineuses présentent une apparence identique, bien qu'elles n'aient pas le même rayonnement spectral.

Un éclairage alternatif de couleurs-tests chromatiques avec des sources lumineuses métamères génère des différences au niveau de l'apparence des couleurs-tests. On parle de *différents rendus de couleurs*, comparer CIE 13.3 et DIN 6169 « rendu des couleurs ». Les *deux couleurs métamères* des figures 43 et 44 de la page 40, qui paraissent identiques à la lumière du jour, semblent très différentes sous les rayonnements TL84 et 4000K (P40) présentés dans la figure 45.

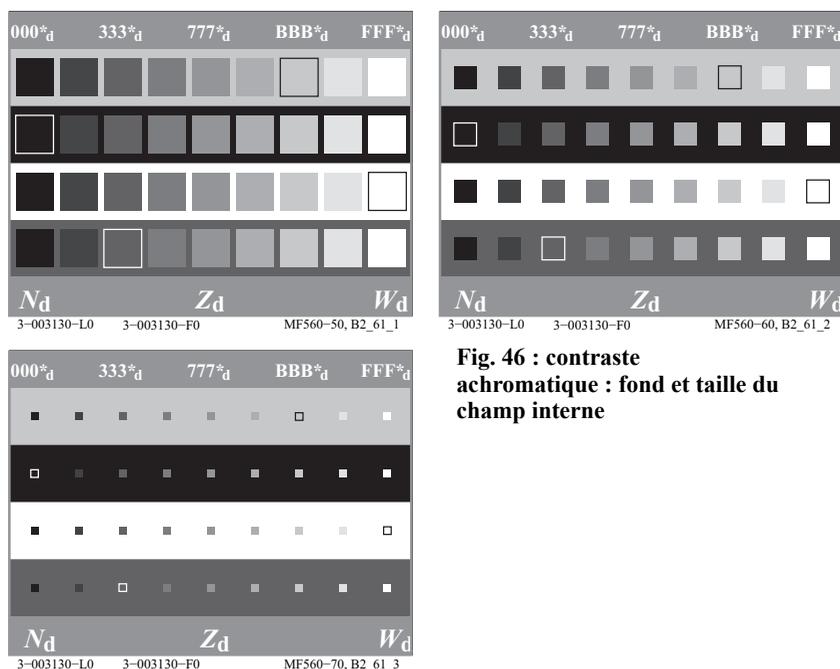
Les tests n° 1 à n° 3, en annexe, permettent non seulement un *jugement visuel*, mais également une *spécification colorimétrique* des caractéristiques du *rendu des couleurs* des lampes LED ainsi que des *caractéristiques des reproductions de couleurs* en informatique. Les tests sont fondés sur le système relatif des couleurs élémentaires RECS, voir DIN 33872-1 à -6.

Le test n° 1 comprend le cercle chromatique en 16 teintes élémentaires de DIN 33872-5, ainsi qu'un cercle chromatique en 8 teintes élémentaires à demi saturées (CIELAB). La première de couverture de la brochure montre les 24 couleurs des deux cercles chromatiques élémentaires, non pas ordonnées selon un alignement horizontal mais en formation circulaire.

## 16 Contraste

Le contraste, que *Léonard de Vinci* connaissait déjà et dont *Goethe* (1749-1832) a fait une description détaillée, est *l'un des éléments essentiels de l'art*, de l'artisanat d'art et du design. Le contraste repose les influences que les différentes parties du champ de vision exercent les unes sur les autres.

### 16.1 Contraste achromatique



**Fig. 46 : contraste achromatique : fond et taille du champ interne**

Le facteur de luminance d'une surface sur un fond clair se décale dans le sens inverse. Par exemple la luminance des différents degrés de quatre séries de gris *physiquement identiques* varie selon l'environnement. Sans un fond référentiel clair, il n'y a ni gris ni noir.

La figure 46 montre l'effet de la clarté de quatre séries, entre le noir  $N_d$  et le blanc  $W_d$ , de gris équidistants et physiquement identiques sur quatre fonds de luminances différentes. Un encadrement spécial indique les endroits où la luminance de l'échantillon est identique à celle du fond.

Le code  $rgb^*_d$  indique que, sur un fond gris moyen, il s'agit d'une série de gris visuellement équidistants à neuf degrés, avec une clarté CIELAB  $L^* = 15, 25, 35, \dots, 95$ . Les échantillons apparaissent *plus sombres* sur un fond blanc et *plus clair* sur un fond noir que sur un fond gris central ( $Z_d =$  gris central, ici sous la forme d'une bande en haut et en bas)

Selon *Miescher* (1961) on obtient un échelonnage équidistant de la clarté  $L^*$  de 100 échantillons sur des fonds blanc, noir et gris, si les valeurs de référence lumineuse  $Y$  des couleurs achromatiques sont soumises à la formule suivante :

- fond blanc :  $L^*_W = 100 ( Y_W / 100 )^{1/2}$

Pour un échantillon gris moyen avec  $L^*_W = 50$ , on obtiendra selon cette formule la valeur de référence lumineuse  $Y_W = 25$ .

- fond gris central :  $L^*_Z = 100 ( Y_Z / 100 )^{1/2,4}$

Pour un échantillon gris central avec  $L^*_Z = 50$  on obtiendra selon cette formule la valeur de référence lumineuse  $Y_Z = 19$ .

- fond noir :  $L^*_N = 100 ( Y_N / 100 )^{1/3,0}$

Pour un échantillon gris central avec  $L^*_N = 50$  on obtiendra selon cette formule la valeur de référence lumineuse  $Y_N = 12,5$ .

Sur un fond gris central, l'échantillon gris central  $Y_Z = 19$  présente dans son état original la clarté  $L^*_Z = 50$ . Selon la formule ci-dessus  $Y_W = 19$  présente sur fond blanc une clarté  $L^*_W = 44$ . Sur fond noir  $Y_N = 19$  présente une clarté  $L^*_N = 58$ .

Les formules valables pour le dégradé de gris sur différents fonds, ne forment qu'un premier point de départ permettant la description du contraste provoqué par les différentes influences des champs de vision.

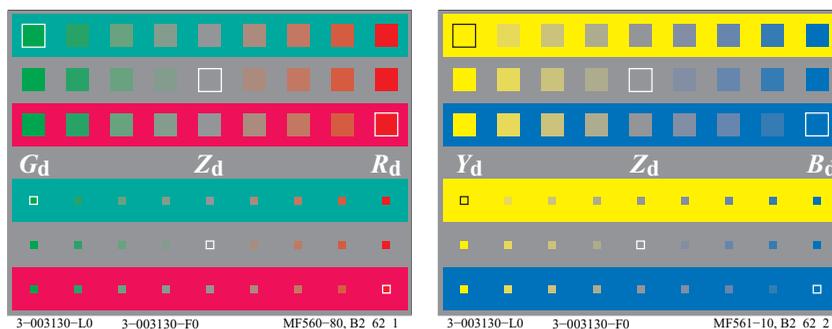
Plus la luminosité augmente, plus il est aisé de distinguer les différents degrés de gris. Plus la luminosité augmente, plus le blanc devient blanc et plus le noir devient noir. Cela signifie que la différence entre le blanc et le noir augmente. Si l'éclairement lumineux de la série de gris passe de 500 à 5000 lux, la différence augmente d'environ 20%. L'effet est peu important comparé au coefficient 10 (1000%) de la variation de l'éclairement lumineux.

La figure 46 comprend trois parties dans lesquelles les échantillons sont de tailles différentes par rapport à leur environnement. Les effets de contrastes les

plus intenses sont engendrés pour un échantillon interne avec un champ de vision d'environ  $1^\circ$  et si le fond est au moins dix fois plus grand ( $>10^\circ$ ).

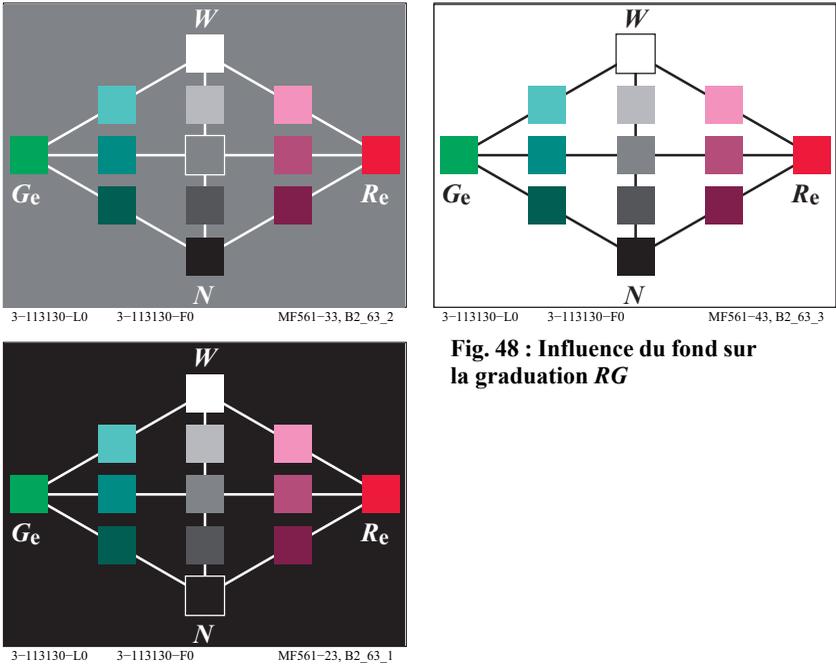
## 16.2 Contraste chromatique

La couleur d'un fond chromatique influence l'apparence de la couleur dans le champ interne, et tous les paramètres colorimétriques se décalent dans la direction opposée.



**Fig. 47 : contraste chromatique : fond et taille du champ interne**

La figure 47 présente trois séries de chroma identique avec des degrés équidistants disposés sur des fonds respectivement gris central  $Z_d$ , rouge  $R_d$  et vert  $G_d$ . Dans la figure 47, les échantillons rouges paraissent plus rouges sur le fond vert que sur le fond rouge. Les échantillons verts paraissent plus verts sur le fond rouge que sur le fond vert. Les échantillons gris  $Z_d$  ne paraissent pas achromatiques sur les fonds rouge et vert.

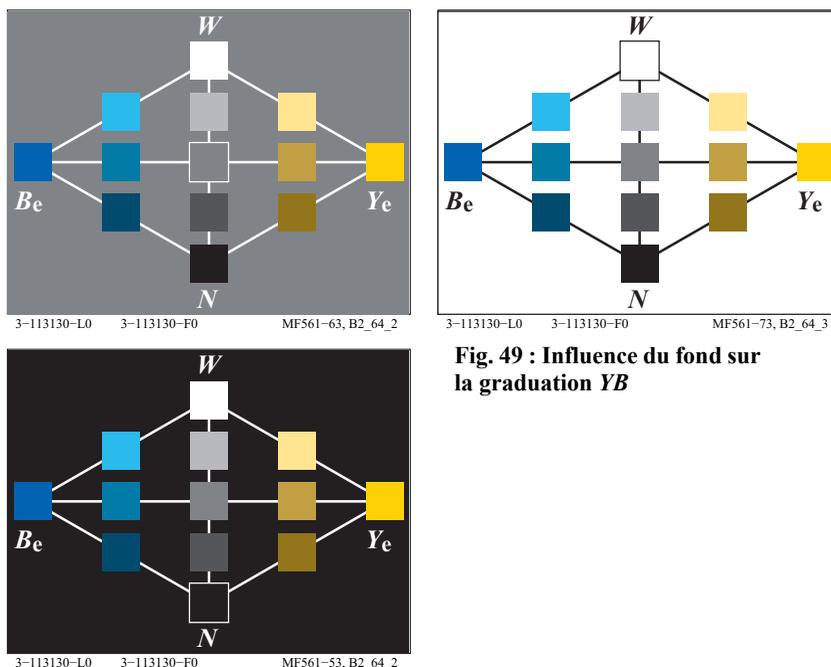


**Fig. 48 : Influence du fond sur la graduation RG**

La figure 48 montre une autre caractéristique importante du contraste chromatique et achromatique pour les couleurs du champ rouge-vert.

Sur un fond gris central, les couleurs apparaissent plus diversifiées et la gamme de couleurs plus grande que sur un fond noir ou blanc. Sur un fond noir, la plupart des couleurs apparaissent plus lumineuses, mais l'élément « noircissant » est absent. Sur fond blanc, la plupart des couleurs apparaissent « noircies », il manque l'élément « lumineux ». Sur fond gris moyen, les deux éléments « noircissant » et « lumineux » sont présents en proportion appropriée, comme dans la nature.

La figure 48 montre que par rapport à la figure 7 à la page 10, toutes les couleurs rouges présentent une teinte visuellement très proche de la teinte élémentaire  $R_e$ . Dans la figure 48, une linéarisation en trois dimensions a été utilisée, afin de calculer les coordonnées  $rgb_{de}$  (*Index de = device to elementary hue*) à partir des données  $rgb$  indéfinies. Pour toutes les couleurs rouges, les coordonnées  $rgb_{de}$  donnent la teinte CIELAB  $h_{ab}=26$  à la sortie, définie en CIE R1-47 pour la teinte élémentaire rouge  $R_e$ .

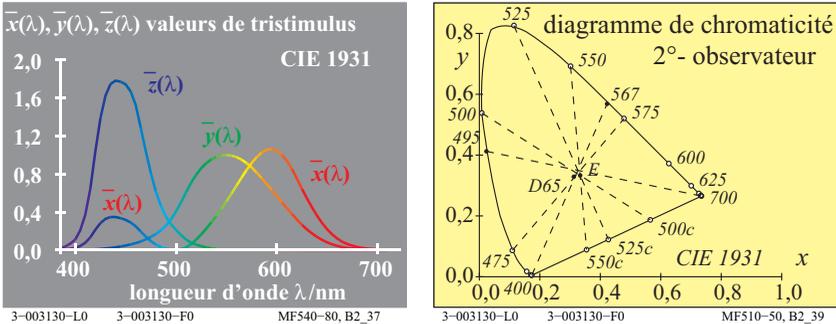


**Fig. 49 : Influence du fond sur la graduation  $YB$**

La figure 49 montre la diversité des couleurs et la gamme de couleurs du plan jaune-bleu. Comme pour le plan rouge-vert, le fond gris fait apparaître une diversité accrue et une gamme de couleurs plus grande que sur les fonds noir et blanc.

La variation de l'apparence des couleurs en fonction de la couleur du fond dépend des processus physiologiques qui se produisent à l'intérieur de l'oeil. Jusqu'à présent, nous n'avons que des ébauches de descriptions de ces processus, comparer aussi avec le paragraphe 18 à la page 58.

## 17 Valeurs colorimétriques standard et mesure des couleurs



**Fig. 50 :** valeurs spectrales standard et diagramme de chromaticité pour l'observateur standard 2°

La figure 50 (*gauche*) présente les fonctions des valeurs spectrales standard  $x_q(\lambda)$ ,  $y_q(\lambda)$  et  $z_q(\lambda)$  pour l'illuminant E (rayonnement énergétique égal) entre 380nm et 720nm. Dans la figure 50, les points de la courbe montrent les valeurs des couleurs spectrales. Il y a trois fonctions que l'on peut en gros caractériser par les couleurs bleu  $z_q(\lambda)$ , vert  $y_q(\lambda)$  et rouge  $x_q(\lambda)$ .

Pour les couleurs spectrales la CIE a défini les proportions de valeurs de chromaticité spectrale suivantes :

$$\begin{aligned}
 x(\lambda) &= x_q(\lambda) / [ x_q(\lambda) + y_q(\lambda) + z_q(\lambda) ] \\
 y(\lambda) &= y_q(\lambda) / [ x_q(\lambda) + y_q(\lambda) + z_q(\lambda) ] \\
 z(\lambda) &= z_q(\lambda) / [ x_q(\lambda) + y_q(\lambda) + z_q(\lambda) ] = 1 - x(\lambda) - y(\lambda)
 \end{aligned}$$

Les fonctions des valeurs standard, le rayonnement spectral et la réflexion spectrale des échantillons de couleurs servent à calculer les valeurs standard  $X, Y$  et  $Z$  ainsi que les proportions de valeurs de chromaticité  $x, y$  et  $z$ .

$$\begin{aligned}
 x &= X / ( X + Y + Z ) \\
 y &= Y / ( X + Y + Z ) \\
 z &= Z / ( X + Y + Z ) = 1 - x - y
 \end{aligned}$$

*K. Richter* (1996) donne des exemples de ces calculs pour les trois couleurs optimales additives, pages 276-277. A télécharger voir (288 pages, 2,8 MB) <http://130.149.60.45/~farbmetrik/BUA4BF.PDF>

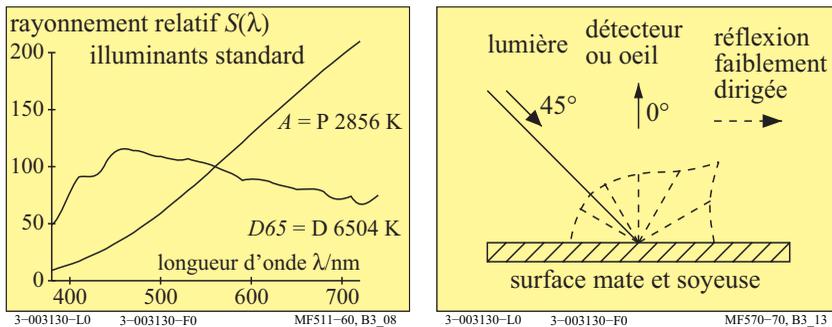
Dans la figure 50 (*droite*), les proportions de valeurs de chromaticité spectrale  $x$  et  $y$  marquent les limites du diagramme dit de chromaticité ( $x, y$ ). Associées à la

droite pourpre, cela forme une surface délimitée. La droite pourpre est engendrée par la relation des extrémités des couleurs spectrales à ondes longues et courtes, approximativement  $\lambda = 400\text{nm}$  et  $700\text{nm}$ .

Toutes les couleurs, par exemple les couleurs de surface, les couleurs optimales et les couleurs spectrales, ont des positions à l'intérieur ou sur les bords du diagramme de chromaticité.

Les proportions de valeurs de chromaticité spectrale  $x$  et  $y$  ainsi que la valeur de référence lumineuse  $Y$ , qui selon la norme DIN 5033 « mesure de couleurs » possède la valeur 100 pour un blanc référentiel, caractérisent une couleur de manière aussi univoque que les trois valeurs standard  $X$ ,  $Y$  et  $Z$ . Conformément à CIE 15 Colorimetry pour l'illuminant E, les valeurs numériques de  $X$ ,  $Y$  et  $Z$  varient entre 0 et 100. Les proportions de valeurs spectrales standard restent toujours inférieures à 1,0. Elles caractérisent la position d'une couleur dans le diagramme de chromaticité aux coordonnées orthogonales  $x$  et  $y$ .

Dans le diagramme de chromaticité, les coordonnées  $(x, y)$  correspondent à une série de couleurs présentant des valeurs de références lumineuses  $Y$  différentes, comprises entre une valeur minimale proche de 0 et une valeur maximale de 100. C'est pourquoi une couleur aux chromaticités constantes  $(x, y)$  dans le champ jaune du diagramme, peut apparaître comme presque noire (par ex. avec une valeur de référence lumineuse  $Y = 4$ ) ou jaune vif (par ex. avec la valeur de référence lumineuse  $Y = 90$ ). Une couleur est en premier lieu définie par ses coordonnées et sa valeur de référence lumineuse.



**Fig. 51 : rayonnement spectral des illuminants D65 et A et mesures géométriques CIE**

Les valeurs colorimétriques standard dépendent de l'illuminant, par exemple l'illuminant CIE D65 ou A, voir la figure 51 (*gauche*). L'angle d'éclairage par rapport à la surface est généralement de  $45^\circ$ . L'angle d'observation ou de mesure est généralement de  $0^\circ$ , voir la figure 51 (*droite*). La surface soyeuse et

mate de l'impression offset standard engendre généralement une réflexion diffuse, mais avec une certaine tendance vers une réflexion brillante ou miroitante de -45°. C'est pourquoi les couleurs paraissent plus noires à 0° qu'à -45°. La valeur de référence lumineuse s'élève à  $Y=2,5$  pour un angle de 0°, et se rapproche de  $Y=5$  pour un angle de -45°.

<b>colorimétrie inférieure: (données: relation linéaire à CIE 1931)</b>		
<b>term linéaire des couleurs</b>	<b>nom et rapport aux valeurs de tristimulus ou de chromaticité</b>	<b>remarques</b>
<b>valeurs de tristimulus</b>	$X, Y, Z$	
<b>val. chromatique</b>	<i>diagramme valeur chromatique linéaire (A,B)</i>	$n=D65$
rouge-vert	$A = [ X / Y - X_n / Y_n ] Y = [ a - a_n ] Y$ $= [ x / y - x_n / y_n ] Y$	(fond)
jaune-bleu	$B = - 0,4 [ Z/Y - Z_n/Y_n ] Y = [ b - b_n ] Y$ $= - 0,4 [ z / y - z_n / y_n ] Y$	
radial	$C_{AB} = [ A^2 + B^2 ]^{1/2}$	
<b>chromaticité</b>	<i>diagramme chromaticité linéair (a, b)</i>	<b>comparer stimulation</b>
rouge-vert	$a = X / Y = x / y$	<b>des cônes linéaires</b>
jaune-bleu	$b = - 0,4 [ Z / Y ] = - 0,4 [ z / y ]$	$L/(L+M)=P/(P+D)$
radial	$c_{ab} = [ ( a - a_n )^2 + ( b - b_n )^2 ]^{1/2}$	$S/(L+M)=T/(P+D)$

3-003130-L0

3-003130-F0

MF980-70

**Tableau 3 : coordonnées de la colorimétrie inférieure ou mesure de la valence colorimétrique**

Le tableau 3 montre les coordonnées de la colorimétrie inférieure ou de la valence colorimétrique. Toutes les coordonnées sont des transformations linéaires des valeurs standard  $X, Y, Z$  ou des proportions de valeurs spectrales standard  $x, y$ . On les appelle les valeurs chromatiques  $A, B, C_{AB}$  et les valeurs de chromaticité  $a, b, c_{ab}$ . Les valeurs chromatiques dépendent des valeurs colorimétriques standard ou des proportions de valeurs spectrales standard dans le champ achromatique (*indice n*). En règle générale, on utilise la chromaticité  $x_n=0,3127$  et  $x_n=0,3390$  de l'illuminant CIE D65.

La sensibilité des récepteurs CIE en matière de vision des couleurs  $l_q(\lambda), m_q(\lambda)$  et  $s_q(\lambda)$  selon CIE 170-1 sont les fonctions linéaires des valeurs spectrales stan-

dard  $x_q(\lambda)$ ,  $y_q(\lambda)$ , et  $z_q(\lambda)$ . La sensibilité lumineuse  $y_q(\lambda)$  se rapproche de la somme de  $l_q(\lambda)$  et  $m_q(\lambda)$ . Le paragraphe 18 à la page 58 montre les sensibilités des récepteurs CIE.

D'après le tableau 3, la valeur de chromaticité (contenu rouge ou vert) est en gros égale au quotient  $L/(L+M)$  et la valeur de chromaticité b (contenu bleu ou jaune) est en gros égale au quotient  $S/(L+M)$ . Dans les publications, les lettres  $L$ ,  $M$ ,  $S$  sont parfois remplacées par  $P$ ,  $D$ ,  $T$  qui indiquent les trois déficiences de la perception des couleurs  $P$ =protanopie,  $D$ =deutéranopie et  $T$ =tritanopie.

Les anomalies de la perception des couleurs se produisent au niveau des récepteurs de la rétine oculaire ou au niveau de la transmission neuronale, engendrent une dyschromatopsie partielle ou totale. 8% des hommes en sont atteints contre 0,5% des femmes (rapport 16:1). La plupart de ces personnes confondent le rouge et le vert. Ces deux couleurs leur apparaissent grises.

Les personnes atteintes de dyschromatopsie ne peuvent pas exercer certains métiers, comme pilotes, conducteurs de train, chauffeurs de bus ou de taxi, techniciens d'imprimerie. Les personnes incapables de distinguer le jaune du bleu sont rares. Quant aux monochromates qui ne voient que les couleurs achromatiques (blanc, gris et noir), ils sont encore plus rares. Des tests permettent de dépister la dyschromatopsie, comme par exemple le test de *Ishihara* (1953) à base de nombres et de symboles. Selon que le patient a une perception normale ou déficiente des couleurs, il ne voit pas les mêmes chiffres ni les mêmes symboles sur les tableaux qu'on lui présente. L'anomaloscope de *Nagel*, en accord avec la norme DIN 6160, permet de déterminer le type et le degré de dyschromatopsie.

<b>colorimétrie supérieure (données: relation non linéaire à CIE 1931)</b>		
<b>terme non linéaire</b>	<b>nom et rapport aux valeurs de tristimulus ou de chromaticité</b>	<b>remarque</b>
<b>clarté</b>	$L^* = 116 ( Y / 100 )^{1/3} - 16 \quad (Y > 0,8)$ approximation: $L^* = 100 (Y/100)^{1/2,4} \quad (Y > 0)$	CIELAB 1976
<b>chroma</b>	<i>transformation non linéaire des valeurs A, B</i>	
rouge-vert	$a^* = 500 [ ( X / X_n )^{1/3} - ( Y / Y_n )^{1/3} ]$ $= 500 ( a' - a'_n ) Y^{1/3}$	CIELAB 1976
jaune-bleu	$b^* = 200 [ ( Y / Y_n )^{1/3} - ( Z / Z_n )^{1/3} ]$ $= 500 ( b' - b'_n ) Y^{1/3}$	CIELAB 1976 <i>n=D65</i>
radial	$C^*_{ab} = [ a^{*2} + b^{*2} ]^{1/2}$	<i>(fond)</i>
<b>chromaticité</b>	<i>transformation non linéaire x/y, z/y</i>	<i>comparer log stimulation des cônes</i>
rouge-vert	$a' = ( 1 / X_n )^{1/3} ( x / y )^{1/3}$ $= 0,2191 ( x / y )^{1/3}$ pour D65	$\log[L / (L+M)]$
jaune-bleu	$b' = -0,4 ( 1 / Z_n )^{1/3} ( z / y )^{1/3}$ $= -0,08376 ( z / y )^{1/3}$ pour D65	$= \log[P / (P+D)]$ $\log[S / (L+M)]$
radial	$c'_{ab} = [ ( a' - a'_n )^2 + ( b' - b'_n )^2 ]^{1/2}$	$= \log[T / (P+D)]$

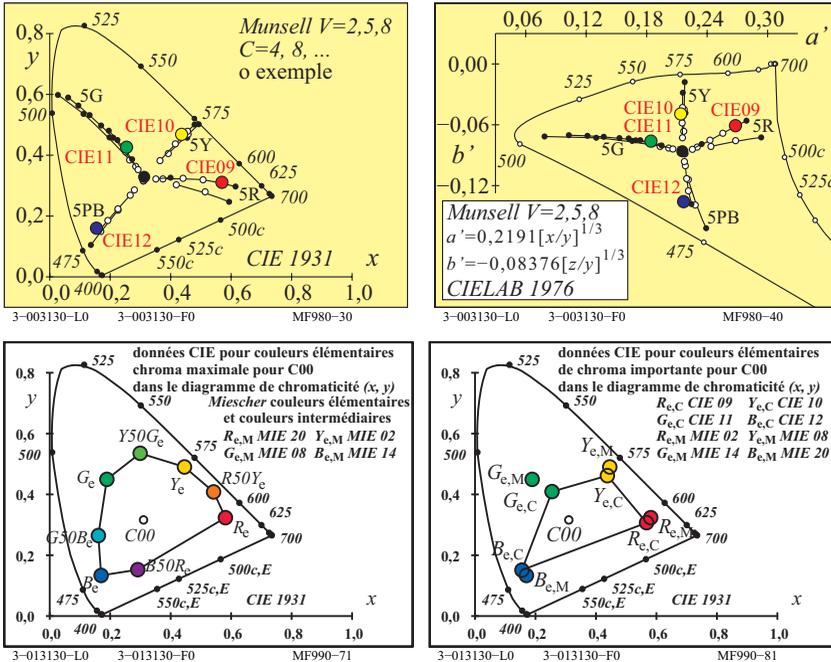
3-003130-L0

3-003130-F0

MF981-70

**Tableau 4 : coordonnées de la colorimétrie supérieure ou mesure de la couleur perçue**

Le tableau 4 montre les coordonnées de la colorimétrie supérieure ou de la couleur perçue. La clarté  $L^*$ , les chromas  $a^*$ ,  $b^*$ ,  $C^*_{ab}$ , ainsi que les chromaticités  $a'$ ,  $b'$ ,  $c'_{ab}$  sont des coordonnées essentielles de la colorimétrie supérieure ou de la couleur perçue. Selon le tableau 4, les chromaticités *non linéaires*  $a'$  et  $b'$  servent également à calculer les chromas  $a^*$ ,  $b^*$  de l'espace colorimétrique CIELAB. La chromaticité ( $a'$ ,  $b'$ ) de CIELAB n'est pas définie dans CIE 15 ni dans ISO 11664-4. De par sa forme, la chromaticité *non linéaire* ( $a'$ ,  $b'$ ) ressemble à la chromaticité linéaire ( $u'$ ,  $v'$ ) de CIELUV dans CIE 15.



**Fig. 52 :** Les couleurs de *Munsell*, *Miescher* et *CIE* dans  $(x, y)$  et  $(a', b')$

La figure 52 montre dans les quatre parties, quatre couleurs élémentaires  $RYGB_e$  ainsi que les couleurs intermédiaires de *Miescher*  $R50Y_e$ ,  $Y50G_e$ ,  $G50B_e$  et  $B50R_e$  (en bas à gauche). Les couleurs des quatre teintes de *Munsell*  $5R$ ,  $5Y$ ,  $5G$  et  $5PB$  réelles (o) et extrapolées ( $\bullet$ ), de *Value* 2, 5 et 8 sont représentées (en haut à droite et à gauche). Dans le diagramme  $(a', b')$ , elles forment des courbes plus droites que dans  $(x, y)$ . La chroma des quatre couleurs élémentaires du cercle chromatique de *Miescher* est supérieure à celle des quatre couleurs-test *CIE* n<sup>os</sup> 9 à 12, conformément à *CIE* 13.3 (en bas à droite). Le cercle chromatique de *Miescher* est formé de 11 couleurs et sa chroma est également supérieure au cercle chromatique du système colorimétrique élémentaire relatif *RECS*, qui n'est formé que de trois couleurs  $C$ ,  $M$  et  $Y$  dans l'impression offset, comparer avec la figure 59 à la page 70 (en bas, à gauche et à droite).

Le diagramme  $(a', b')$  est défini dans le tableau 4. Il s'élargit vers la chromaticité  $\lambda=400\text{nm}$ . Cela n'a aucune incidence pour son application en informatique, car ces couleurs sont généralement absentes de l'imprimerie offset et des écrans d'ordinateurs. Toutes les couleurs réelles se situent dans le champ de la figure 52 (en haut à droite).

La figure 52 montre les couleurs élémentaires de *Miescher* dans le diagramme de chromaticité  $(x, y)$ . Ces échantillons de couleurs ne sont pas vraiment ordonnés en cercle autour de l'illuminant CIE C, qui a également été utilisé dans le système de *Munsell*. La position de l'illuminant C n'est pas très différent de celui de l'illuminant D65. Les couleurs élémentaires jaune  $Y_e$  et bleue  $B_e$  forment approximativement une droite avec l'illuminant, cela signifie que la synthèse additive de ces deux couleurs en proportions appropriées donnera une couleur achromatique. Les couleurs élémentaires rouge  $R_e$  et vert  $G_e$  *ne forment pas de droite* avec l'illuminant, ce qui signifie que la synthèse additive de ces deux couleurs donnera un vert-jaune, ou une couleur tirant vers le jaune ou le jaune-rouge, mais jamais la couleur achromatique correspondant à D65.

Le tableau 3 à la page 53 et le tableau 4 à la page 55 montre les paramètres de la colorimétrie inférieure et supérieure. On suppose que la synthèse additive des couleurs de périphériques complémentaires jaune  $Y_d$  et bleu  $B_d$  donne du blanc. On pourra donc produire uniquement des tons achromatiques, jaunes ou bleus. Si la valeur du jaune est supérieure à celle du bleu ( $Y_d > B_d$ ), alors les valeurs de blanc, de noir et chromatiques seront calculées conformément au tableau 3 de la page 55.

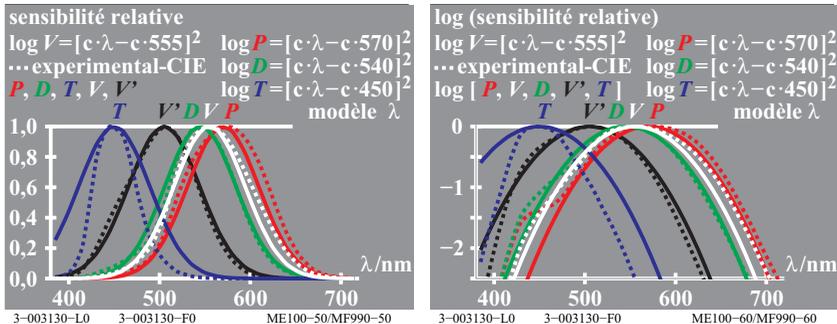
Les synthèses dichromatique et trichromatique jouent un rôle primordial en informatique. Toutes les couleurs peuvent être engendrées sur un écran, à l'aide d'un projecteur ou dans l'impression polychrome, à partir des trois couleurs de base  $RGB_d$  ou  $CMY_d$ . La synthèse additive sur l'écran et au projecteur, engendre un mélange dichromatique à partir de deux couleurs et de la troisième couleur, par exemple :

$$\begin{aligned} W_d &= R_d + (G_d + B_d) = R_d + C_d \\ W_d &= G_d + (B_d + R_d) = G_d + M_d \\ W_d &= B_d + (R_d + G_d) = B_d + Y_d \end{aligned}$$

En informatique, les couleurs d'une valeur chromatique maximale  $C_{AB}$  et approchant de la chroma maximale  $C^*_{ab}$ , sont engendrées à partir des couleurs complémentaires optimales dotées de longueurs d'onde de compensation  $\lambda_d$  et  $\lambda_c$ . Si l'on veut créer un vaste espace colorimétrique de reproduction, il faut des couleurs de départ de valeurs chromatiques importantes, dont la synthèse dichromatique donnera du blanc. Le chapitre 19 propose des solutions colorimétriques permettant d'atteindre cet objectif.

## 18 Propriétés spécifiques de la vision des couleurs

Les propriétés de la vision des couleurs reposent sur les propriétés des trois récepteurs *LMS* ou *PDT* pour la vision de jour.



**Fig. 53 :** sensibilité relative des récepteurs *PDT* (ou *LMS*),  $V(\lambda)$  et  $V'(\lambda)$

La figure 53 montre les sensibilités des récepteurs *PDT* (correspondant aux dyschromatopsies  $P$  = protanopie,  $D$  = deutéranopie et  $T$  = tritanopie ou *LMS* selon CIE 170-1). Les sensibilités maximales atteignent presque les longueurs d'onde 570, 540 et 450nm. Une combinaison linéaire des sensibilités photopiques (vision de jour)  $V(\lambda)$  et des sensibilités scotopiques (vision de nuit)  $V'(\lambda)$  avec un maximum proche de 500nm est utilisée pour décrire la vision méso-pique, entre la vision de jour et de nuit.

Le récepteur longues ondes (*L* ou *P*) est doté d'une sensibilité maximale non pas dans le champ rouge, mais dans le champ jaune-vert. La longueur d'onde  $\lambda_m = 570\text{nm}$  de la sensibilité maximale est inférieure à la longueur d'onde dominante  $\lambda_d = 574\text{nm}$  du jaune élémentaire  $Y_e$ . Pour des ordonnées logarithmiques, une parabole présentant une forme presque identique pour tous les récepteurs est appropriée. La forme de la parabole est approximativement reproduite pour les sommes et les différences, voir la figure 53 (*droite*). Dans ce cas, les sommes et les différences possèdent des propriétés spécifiques :

$$\log V(\lambda) = \log P(\lambda) + \log D(\lambda) \quad (\text{nouveau maximum } 555\text{nm à partir de } 570 \text{ et } 540\text{nm})$$

$$\log P(\lambda) = \log V(\lambda) - \log D(\lambda) \quad (\text{maximum connu } 570\text{nm à partir de } 555 \text{ et } 540\text{nm})$$

$$\log R(\lambda) = \log P(\lambda) - \log D(\lambda) \quad (\text{nouveau maximum } 600\text{nm à partir de } 570 \text{ et } 540\text{nm})$$

Nous retrouvons de nouveau une forme parabolique et une *sensibilité rouge*  $R(\lambda)$  est définie avec un maximum atteignant les 600nm.

La sensibilité lumineuse  $V(\lambda)$  joue un rôle spécifique dans la vision des couleurs.  $V(\lambda)$  sert de base à la définition de la luminance. D'après CIE 15 Colorimetry,  $V(\lambda)$  est linéairement calculé conformément à la loi de *Grassmann* :

$$V(\lambda) = P(\lambda) + D(\lambda)$$

Selon les formules logarithmiques mentionnées ci-dessus, le calcul donne

$$V_{\log}(\lambda) = 10^{[\log P(\lambda) + \log D(\lambda)]}$$

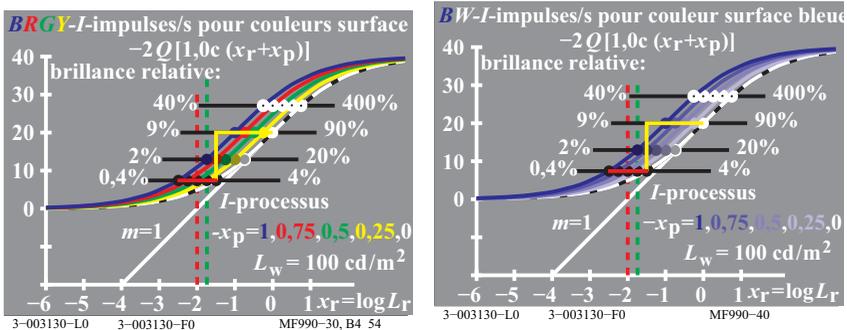
Les différences entre  $V(\lambda)$  et  $V_{\log}(\lambda)$  est d'environ 1% pour les deux longueurs d'onde de 400 et 700nm par rapport à un maximum proche de 555nm, voir *K. Richter* (1996). Le seuil différentiel chromatique est également aux environs de 1%. C'est pourquoi les deux méthodes de calculs sont équivalentes dans de nombreuses applications. La sensibilité lumineuse spectrale  $V(\lambda)$  joue un rôle important au niveau des technologies d'éclairage. Les quotients correspondant à  $V(\lambda)$  ont une signification spécifique au niveau du champ de couleur, par exemple

$$A(\lambda) = R(\lambda) / V(\lambda) \quad \text{chromaticité spectrale rouge-vert}$$

$$B(\lambda) = -T(\lambda) / V(\lambda) \quad \text{chromaticité spectrale bleu-jaune}$$

En matière d'application pratique, cela correspond aux quotients  $X$  et  $Y$  ainsi que  $Z$  et  $Y$ , définis dans le tableau 3 à la page 53 comme les chromaticités rouge-vert et jaune-bleu,  $a$  et  $b$  du diagramme  $(a, b)$ . En ce qui concerne l'utilisation pratique du diagramme  $(a, b)$  au lieu du diagramme  $(x, y)$  pour la définition des seuils différentiels chromatiques, voir *K. Richter* (1996).

D'autres propriétés de la vision des couleurs peuvent être étudiées au moyen de signaux chromatiques physiologiques sur la rétine de singes. *A. Valberg* (2005) a décrit de nombreux signaux chromatiques physiologiques en tant que fonction de la chromaticité et de la luminance pour les champs internes et externes.



**Fig. 54 :** signaux chromatiques des teintes de surfaces chromatiques et bleues

La figure 54 montre de manière schématique les signaux chromatiques mesurés pour des champs internes de couleurs avec une luminosité croissante sur un fond blanc. L'échelle horizontale est logarithmique. La luminance du fond (fond  $w$ ) est de  $100 \text{ cd/m}^2$ . Pour un éclairage de bureau, l'éclairage lumineux standard est de 500 lux. Cela correspond à une luminance de  $142 \text{ cd/m}^2$ . Pour une vision *photopique*, cette luminance varie approximativement entre  $1 \text{ cd/m}^2$  et  $10000 \text{ cd/m}^2$ .

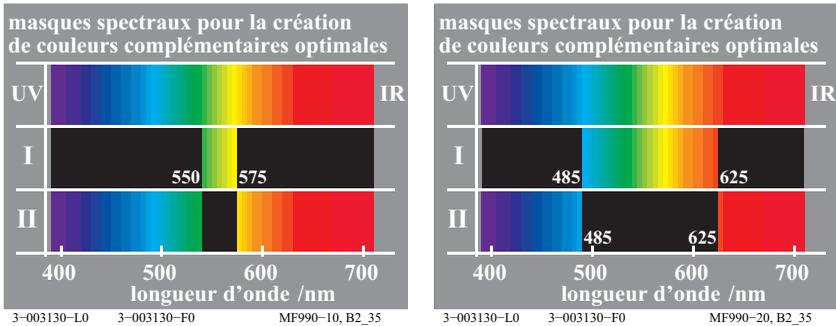
Dans la figure 54, les signaux  $I$  ( $I$ =Increment) pour les couleurs chromatiques et achromatiques suivent une courbe en forme de  $S$  avec des niveaux de chroma à 0,9% et 9000% par rapport à un fond d'une valeur de 90%. Les courbes des couleurs chromatiques (*gauche*) sont décalées vers la gauche par rapport aux couleurs achromatiques. Les courbes des couleurs chromatiques bleues (*droite*) se décalent vers la gauche d'un écart égal à celui de l'illuminant D65 dans le diagramme (*a, b*). Pour une luminance  $L$ , réduite par rapport à celle du fond  $L_w=100 \text{ cd/m}^2$  ( $w$ = fond blanc), toutes les couleurs chromatiques correspondent aux mêmes signaux.

Pour les couleurs optimales d'une grande chromaticité qui, selon *Ostwald* (1920), comprennent un *Farbenhalb* et possèdent des limites de longueurs d'onde compensées, on peut calculer la valeur de référence lumineuse  $Y$  et la valeur chromatique  $C_{AB}$  conformément au tableau 3 à la page 53. La valeur de référence lumineuse  $Y$  et la valeur chromatique  $C_{AB}$  sont linéairement reliées. Le rapport  $C_{AB}/Y$  peut servir à la description du décalage vers la gauche de la figure 54 à la page 59.

C'est en son milieu que la courbe en forme de  $S$  des signaux est la plus large. C'est donc à cet endroit que l'on s'attend à trouver une variation maximum de la luminance  $L / \Delta L$ . Pour les toutes les couleurs chromatiques et achromatiques, le seuil correspond à une luminance au maximum 36 fois inférieure à celle du fond blanc. Le facteur 36 résulte du rapport entre les valeurs de références lumineuses  $Y_w=90$  du blanc  $W$  et  $Y_N=2,5$  et du noir  $N$ .

Pour atteindre l'écart  $L / \Delta L$  le plus important, il faut vraisemblablement des luminances d'une valeur approchant celle des couleurs G0 définies par *Evans* (1967) sur la base de son observation visuelle. Sur un fond blanc, les couleurs G0 n'apparaissent ni assombries, ni lumineuses. Selon *Evans*, la valeur de référence lumineuse  $Y_s$  atteint le seuil différentiel chromatique ( $s$ =*threshold*) pour toutes les couleurs, avec un facteur environ 30 fois inférieur à la valeur de référence lumineuse des couleurs G0.

Un rapport CIE du comité CIE 1-83 "*Validity of Formulae for Predicting Small Colour Differences*" (président *K. Richter*, DE) sur les seuils différentiels chromatiques est prévu pour 2014. Un rapport CIE R1-57 "*Border between blackish and luminous colours*" (Reporter *T. Seim*, NO) est paru en 2013.

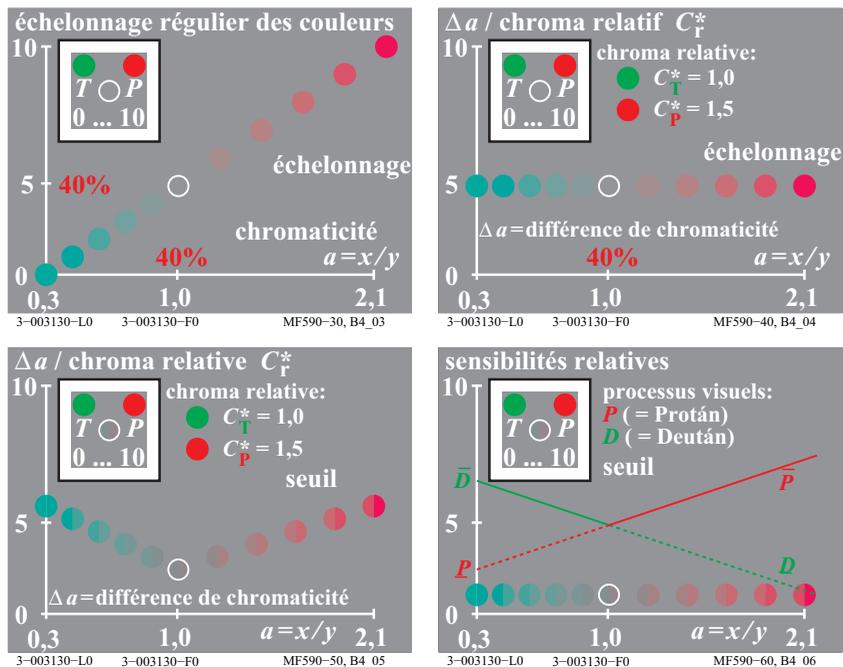


**Fig. 55 : Couleurs complémentaires optimales de différentes bandes passantes**

La figure 55 montre des couleurs complémentaires optimales avec différentes bandes passantes (*gauche et droite*). Ces couleurs complémentaires optimales apparaissent comme des spectres de *Goethe* Blanc-Noir et Noir-Blanc lors de l'observation des arêtes de différentes largeurs à travers un prisme. *Goethe* (1830) avait déjà remarqué, que les séries continues de couleurs complémentaires présentaient les mêmes différences aux endroits correspondants dans le spectre *positif et négatif*.

*T. Holsmark et A. Valberg* (1971) ont fait la synthèse des couleurs spectrales des bandes *positive* et *négative* à l'aide d'un mélangeur de couleurs spectrales. Les deux bandes génèrent des couleurs optimales très différentes, par exemple jaune et bleu (*gauche*) ou cyan et rouge (*droite*). Pour produire une différence de couleur visuelle (seuil différentiel chromatique) le décalage de la bande était approximativement le même pour les couleurs complémentaires optimales.

Afin d'améliorer la définition des seuils différentiels chromatiques, on a donc besoin de coordonnées identiques et antisymétriques. Les valeurs chromatiques *A* et *B* du tableau 3 à la page 53 présentent cette propriété indispensable, *mais pas* les chromas *a\** et *b\** de l'espace colorimétrique CIELAB. Une colorimétrie des seuils différentiels chromatiques, qui tient compte de ces résultats, doit être formulée dans le rapport du comité CIE 1-83 en 2014.



**Fig. 56 : Echelonnage des couleurs et seuils différentiels chromatiques de la série de couleurs T - D65 - P**

La figure 56 montre schématiquement différentes expériences sur l'échelonnage des couleurs et sur les seuils différentiels chromatiques en tant que fonction de la chromaticité  $a = x/y$ . L'échelonnage et les seuils différentiels chromatiques sont représentés pour des couleurs d'une même luminance  $L$ , c'est-à-dire avec une valeur de référence lumineuse constante  $Y=18$ .

La figure 56 (en haut à gauche) montre une série de couleurs échelonnées et approximativement équidistantes, allant d'un turquoise  $T$  très chromatique à un rouge pourpre  $P$ , également fortement chromatique, en passant par l'illuminant D65 (lumière du jour). La situation expérimentale est montrée dans la figure 56 (en haut à gauche). Nous avons ici un carré gris sur un fond blanc. Dans ce champ gris, on définit les couleurs des deux extrémités, ici turquoise  $T$  et rouge pourpre  $P$ . Des couleurs d'une même luminance ont pu être produites en continu dans le champ intérieur circulaire entre les deux couleurs extrêmes  $T$  et  $P$ .

L'observateur a reçu un échelonnement défini entre 0, 5 et 10 pour  $T$ ,  $D65$  et  $P$ . A l'aide d'un générateur de nombres aléatoires, on a généré au sein de l'expérience des chiffres compris entre 0 et 10 : pour le chiffre 1, l'observateur devait produire un turquoise chromatique, pour 7 un pourpre moyennement chromatique, pour 5 le gris achromatique de  $D65$  et ainsi de suite. L'observateur a également reçu des explications détaillées relatives à l'objectif visé par la production d'un échelonnement de couleurs visuellement équidistantes entre  $T$  et  $D65$  d'une part, et entre  $D65$  et  $P$  d'autre part.

La figure 56 (en haut à droite) montre les résultats des expériences allant de  $T$  vers  $P$ . L'écart  $\Delta a$  entre deux paliers de couleurs voisins divisé par leur chroma relative qui a été estimée dans un rapport de 1 pour  $T - D65$  et de 1,5 pour  $D65 - P$ , est représenté comme la fonction des coordonnées  $a = x/y$ . Des écarts égaux  $\Delta a$  (divisés par 1 ou 1,5) correspondent à des différences de chroma égales. Voici donc une simple description de différences de chroma égales pour des différences égales des coordonnées de valeurs colorimétriques (ici  $a = x/y$ ).

De surcroît, on a déterminé de manière expérimentale des seuils différentiels chromatiques, ce sont des différences de couleurs perceptibles, le long de la même série de couleurs, par ex.  $T - D65 - P$ . On a tout d'abord supposé que pour le seuil différentiel de chromaticité  $\Delta a$ , l'écart était inférieur d'une valeur constante, par exemple de 30. Mais cela est infirmé par les résultats.

La figure 56 (en bas à gauche) montre une situation expérimentale. Un carré gris est posé sur un fond blanc. Dans ce carré gris, deux couleurs extrêmes sont données, ici le turquoise  $T$  et le rouge pourpre  $P$ . Dans le cercle le plus bas, il était possible de générer en continu toutes les couleurs comprises entre les deux couleurs extrêmes  $T$  et  $P$ . Dans deux demi-cercles, on a projeté la même quantité de  $T$  et de  $P$ . En règle générale, il faut projeter 1% des couleurs extrêmes pour un seuil différentiel chromatique.

La figure 56 (en bas à gauche) montre l'écart  $\Delta a$  des seuils différentiels chromatiques, en tant que fonction des coordonnées de valeurs colorimétriques  $a = x/y$ . Les écarts des seuils différentiels chromatiques varient d'un rapport de 1 à 3. C'est pour le gris ( $D65$ ) qu'ils sont les plus petits et ils augmentent de façon linéaire après  $T$  et  $P$ . Pour le gris, 30 seuils correspondent à un palier de chroma. Pour le rouge pourpre  $P$  et le turquoise  $T$ , 10 seuils correspondent à un palier de chroma.

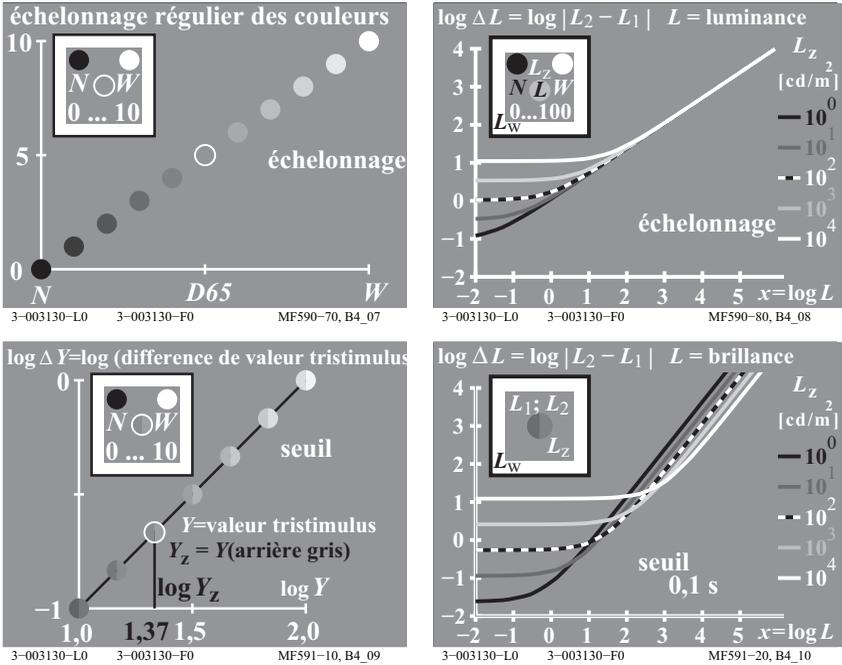
Les résultats des recherches BAM obtenus par *K. Richter* (1985) ont été confirmés par *Inamura* et *Yaguchi* (2011). En principe, il faut deux systèmes colorimétriques différents pour décrire les ellipses de *MacAdam* (au seuil différentiel chromatique) et les classifications de couleurs utilisant l'échelonnement des couleurs.

La figure 56 (*en bas à droite*) montre les sensibilités relatives de deux processus en direction rouge-vert. Pour les deux séries  $T - D65$  et  $D65 - P$ , la perceptibilité des seuils différentiels chromatiques est déterminée par un autre processus de vision des couleurs. D'après ce modèle, l'écart de chromaticité  $\Delta b$  est petit pour les couleurs achromatiques et grand pour les couleurs chromatiques. Cependant, conformément à la figure 56 (*en bas à gauche*), les résultats expérimentaux sont inversés. Le mode de vision des couleurs avec les signaux de couleurs en tant que fonction de luminance et de chromaticité peut expliquer cette propriété visuelle.

La figure 54 à la page 59 montre à droite les signaux des couleurs bleues avec une différence croissante de la chromaticité  $\Delta b$ , en comparaison avec la série achromatique. La *plus grande différence de luminance*  $L / \Delta L$  est atteinte sur une ligne *horizontale* pour une luminance décroissante des couleurs bleues par rapport au blanc achromatique. Cela est décrit par le fait que les points marquant l'augmentation *la plus forte* de tous les signaux, forment une ligne horizontale (modification de la pente des signaux). La différence de luminance  $L / \Delta L$  sur une ligne *verticale* est décroissante pour ces couleurs bleues avec une luminance égale, car la pente des courbes des signaux décroît. Si on suppose en plus une relation linéaire entre  $\Delta L$  et  $\Delta b$  sur une ligne verticale,  $\Delta b$  *décroît* pour des couleurs bleues de *luminance égale*, conformément à la figure 54 à la page 59.

La figure 56 (*en bas à droite*) semble montrer une augmentation des *sensibilités relatives* avec une différence de chromaticité. Cela n'est pas le cas et peut être expliqué de la manière suivante. La luminance du seuil différentiel noir est 36 fois plus petite que la luminance du blanc. Selon Evans (1974), la luminance du seuil de chromatisme est inférieure à celle du seuil du noir. Ce résultat est conforme à la figure 56. Cependant, pour des couleurs de luminance constante, la croissance de la courbe faiblit lorsque la différence de chromaticité augmente. C'est pourquoi le seuil chromatique décroît contrairement à la Fig. 56. (*en bas à droite*).

Les résultats exigent au moins une colorimétrie pour les seuils différentiels chromatiques et une pour l'échelonnement des couleurs, si possible avec des transitions. Dans la pratique, les seuils différentiels de chromatisme jouent un rôle important au niveau de la détermination des petites différences de couleurs tolérées. En ce qui concerne les grandes différences de couleurs, il est important d'avoir un échelonnement à intervalles réguliers, pour la spécification du rendu des couleurs. Des échantillons dans des systèmes colorimétriques présentent généralement des écarts d'environ 30 seuils différentiels chromatiques (ou  $\Delta E^*_{ab} = 10$ ). Citons à titre d'exemple le système colorimétrique *RAL-Design* (1993), il est fondé sur le CIELAB et présente des différences d'échantillons  $\Delta E^*_{ab} = 10$  dans chaque plan de teinte pour 36 teintes.



**Fig. 57 : échelonnement de la luminance et des seuils chromatiques pour les clartés N - Z - W**

La figure 57 montre schématiquement des expériences sur l'échelonnement des couleurs et des seuils chromatiques, en tant que fonction de la luminance  $L$ . Au niveau de la représentation, la luminance  $L$  peut être remplacée par la valeur de référence lumineuse  $Y$ , qui constitue une luminance relative fixé à la valeur 100 pour le blanc. La formule

$$Y = 100 L / L_w$$

utilise la luminance  $L$  du champ interne et la luminance  $L_w$  du fond (fond blanc en situation expérimentale, voir la figure 57).

La figure 57 (en haut à gauche) montre un échelonnement aux écarts égaux, pour une série de champs internes dans les deux espaces N - D65 et D65 - W.

La figure 57 (en haut à droite) montre les différences de luminance mesurées dans les champs internes  $\Delta L$ , en tant que fonction de luminance du champ interne  $L$ . On utilise une représentation doublement logarithmique. La lumi-

nance du fond est donnée comme paramètre. La courbe noir-blanc est valable pour la luminance  $L_z = 100\text{cd/m}^2$  du fond gris z. La luminance  $L_z = 100\text{cd/m}^2$  correspond à un éclairage lumineux moyen de 1500 lux ( $=5 \cdot \pi \cdot 100$  lux). Le facteur 5 est valable pour un gris central avec un facteur de réflexion de 0,2.

La figure 57 (*en bas à gauche*) montre les résultats de seuil différentiels chromatiques le long de la série de gris. Pour le champ interne, la différence des valeurs de référence lumineuse  $\Delta Y$  (proportionnelle  $\Delta L$ ) est représentée en tant que fonction de la valeur de référence lumineuse  $Y$  pour un extrait de la série de gris. Le seuil  $\Delta Y$  reste à 1% de la valeur de référence lumineuse du champ interne  $Y$ . Lorsqu'elle approche de 1 (ou 0,9) la pente est déterminée par la loi de *Weber-Fechner*  $\Delta Y / Y = \text{constante}$  ou  $\Delta L / L = \text{constante}$ .

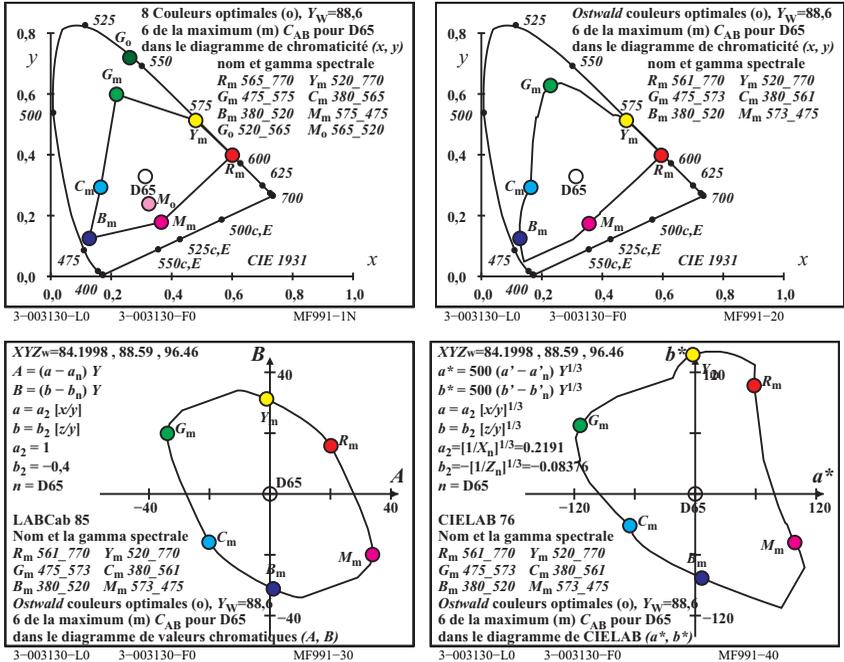
La figure 57 (*en bas à droite*) montre en plus les résultats de couleurs très foncées et très claires, pour un champ d'une luminance de six unités logarithmiques (la figure 57 (*en bas à gauche*) ne montre qu'une seule unité logarithmique). Le paramètre de la luminance du fond décrit en particulier une importante variation du seuil noir avec la luminance du fond. Pour des luminances  $L$  de champs internes et plus réduites, on atteint un seuil de noir constant  $\Delta L_s$  ( $s = \text{threshold}$ ). Les différences inférieures à  $\Delta L_s$  ne sont pas perceptibles.

La comparaison avec la figure 57 (*en haut et en bas à droite*) montre que la différence de luminance  $\Delta L_{\text{scale}}$  pour des séries de gris équidistants et  $\Delta L_{\text{seuil}}$  n'est pas proportionnelle le long de la série de gris. Les pentes différentes (env. 0,9 et 0,45) sont le fondement de cette proposition. Le long de la série des gris, les différences peuvent par exemple s'expliquer par deux processus de vision dans la direction noir-blanc, voir *K. Richter* (1996).

Dans la figure 56 à la page 62, pour des couleurs d'une même luminance le long de la série *T - D65 - P*, deux pentes distinctes marquent les écarts de chromaticité  $\Delta a_{\text{scale}}$  pour l'échelonnement et  $\Delta a_{\text{seuil}}$  pour les seuils différentiels chromatiques.

Jusqu'à présent, aucun modèle de vision des couleurs ne permet de décrire aussi bien les résultats de l'échelonnement que ceux du seuil différentiel chromatique pour toutes les couleurs.

# 19 Couleurs élémentaires et couleurs en informatique



**Fig. 58 : trois couleurs complémentaires et toutes les couleurs optimales de la maximum  $C_{AB}$**

La figure 58 montre trois couples de couleurs optimales  $R_m-C_m$ ,  $Y_m-B_m$  et  $G_m-M_m$ . Chacun des trois couples est formé de deux couleurs complémentaires, dont la synthèse donne le blanc et qui sont appelées dichromatiques. Les valeurs chromatiques  $A$  et  $B$  sont définies dans le tableau 3 à la page 53 et représentées dans la figure 58 (*en bas à gauche*). La valeur chromatique  $C_{AB}$  est identique pour les couleurs dichromatiques optimales d'un "Farbenhalb". Par exemple, les deux longueurs d'onde limites ( $\lambda_1, \lambda_2$ ) du rouge  $R_m = (561, 770)$  et les complémentaires de la couleur bleu cyan  $C_m = (380, 561)$  sont données. La réunion de toutes les couleurs de valeurs chromatiques maximales (m)  $C_{AB}$  ne forme pas un cercle mais une ellipse. La valeur chromatique maximale  $C_{AB}$  est la plus petite, et identique pour  $R_m$  et  $C_m$ , plus grande et identique pour  $Y_m - B_m$  ainsi que pour  $C_m - M_m$ .

Pour toutes les couleurs optimales, il apparaît à la place du triangle dans le repère  $(x, y)$ , une courbe de forme ellipsoïdale dans le diagramme de valeurs chromatiques  $(A, B)$ .

L'antisymétrie du diagramme de valeurs chromatiques  $(A, B)$  constitue la condition permettant la description d'un *même* seuil différentiel chromatique pour des couleurs optimales complémentaires. Pour ce résultat expérimental d'après *Holtsmark et Valberg* (1969), comparer avec la figure 55 à la page 61.

Les couleurs optimales dichromatiques, par exemple  $R_m$  et  $C_m$  comprennent pour le rouge et le cyan, des champs spectraux complémentaires allant 565nm à 770nm et de 380 à 565nm, comparer avec la figure 58 (*en haut à gauche*). A titre d'exemple, les longueurs d'onde limites  $\lambda_1=380\text{nm}$  et  $\lambda_2=565\text{nm}$  forment approximativement une droite avec l'illuminant D65.

La couleur bleu cyan  $C_m$  du champ allant de 380nm à 561nm (« *Farbenhalb* ») possède la plus grande valeur chromatique  $C_{AB}$ . Si on ajoute par exemple une couleur spectrale supplémentaire située dans le rouge d'une longueur d'onde de  $\lambda_d=600\text{nm}$ , il en résultera une couleur tendant plus fortement vers le blanc et d'une moindre valeur chromatique  $C_{AB}$ .

La figure 58 (*en haut à gauche*) montre en outre deux couleurs optimales  $G_o$  et  $M_o$  qui, dans le repère  $(x, y)$  forment un triangle avec  $RYCB_m$ . Le champ spectral compris entre 495 et 565nm de la couleur  $G_o$  est plus petit que le champ compris entre 475 et 575nm (avec limites de longueurs d'onde compensées) de la couleur  $G_m$ . Le vert  $G_o$  est donc plus sombre que  $G_m$ . Dans le repère  $(x, y)$  l'écart entre  $G_o$  et D65 est plus grand que celui entre  $G_m$  et D65. Mais pour la différence de valeur chromatique, c'est le contraire et on obtient donc :  $C_{AB,G_o} < C_{AB,G_m}$ .

La *surface* du diagramme de chromaticité des couleurs de base et de synthèse dans un repère quelconque, n'est donc pas en mesure de décrire la gamme des couleurs d'un système de reproduction. Cependant, la surface d'un diagramme dans un repère sert dans de nombreuses normes IEC et ISO à caractériser la gamme des couleurs des systèmes de reproduction. Une caractérisation plus appropriée utilise la surface du diagramme des valeurs chromatiques ou des chromas.

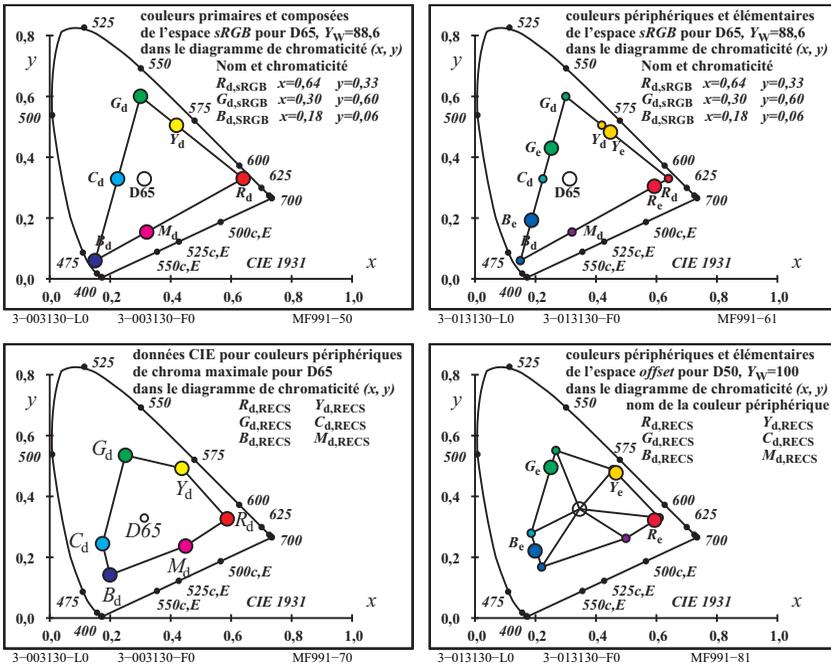
Les résultats des expériences menées par *Miescher et Weisenhorn* (1961) à propos des couleurs optimales sur fond blanc, ont mis en lumière que les couleurs optimales dichromatiques, qui ont toutes une valeur chromatique maximale, ont également la plus grande chroma. Cependant, dans un grand nombre de cas, la bande passante était légèrement plus étroite que pour le *Farbenhalb* (avec des limites de longueur d'ondes complémentaires).

La figure 58 (*en haut à droite*) montre toutes les couleurs optimales dichromatiques sous la forme d'une courbe continue dans le repère  $(x, y)$ , dans le diagramme de valeurs chromatiques  $(A, B)$  (*en bas à gauche*) et dans le diagramme de chromas CIELAB  $(a^*, b^*)$  (*en bas à droite*). Ces couleurs optimales complémentaires ont toutes une valeur chromatique maximale  $C_{AB}$  (*en bas à gauche*). Les limites de longueurs d'onde calculées (*en haut à droite*) pour l'illuminant D65, sont légèrement différentes des approximations des trois illuminants CIE D65, E et C (*en haut à gauche*).

Le système colorimétrique CIELAB est principalement fondé sur l'échelonnement du système *Munsell* et requiert des coordonnées *non linéaires*.

En ce qui concerne la description des seuils différentiels chromatiques, les modèles de vision des couleurs de *Guth* (1972) exigent par exemple uniquement des coordonnées *linéaires*.

Toutes les couleurs dichromatiques ont la même valeur chromatique  $C_{AB}$ . Pour les couleurs optimales dichromatiques, la chroma CIELAB augmente d'un coefficient 2 dans le champ rouge-jaune que dans le champ complémentaire cyan-bleu. C'est pourquoi, il est tout à fait possible que la définition de la chroma CIELAB  $C^*_{ab}$  présente une marge d'erreur d'un coefficient 2.



**Fig. 59 :** couleurs périphériques et élémentaires de l'espace colorimétrique *sRGB* et *RECS* (offset)

La figure 59 montre les couleurs de périphérique de l'écran standard *sRGB* et celles du système colorimétrique élémentaire relatif *RECS* (offset standard) (*en haut et en bas à gauche*). Les teintes élémentaires indépendantes des appareils périphériques  $RYGB_e$  conformément à CIE R1-47 avec les angles CIELAB  $h_{ab} = 26, 92, 162$  et  $272$  degrés peuvent être engendrées par les six couleurs de périphériques  $RYGCBM_d$  ( $d$ =device) (*en haut et en bas à droite*).

Dans le système colorimétrique élémentaire relatif *RECS* avec plus de 2000 couleurs, on a imprimé un cercle chromatique en 16 parties avec les quatre couleurs élémentaires  $RYGB_e$  comme couleurs de référence, voir *RECS*. Dans chacune des quatre sections, il y a trois couleurs intermédiaires. Pour les 16 couleurs, on dispose de séries à 5 et à 16 paliers pour l'impression offset standard sur du papier offset standard.

## 20 Sortie des couleurs élémentaires *indépendamment* des appareils périphériques

Pour les couleurs élémentaires, le rapport CIE R1-47 définit des angles  $h_{ab,e} = 26, 92, 162$  et  $272$  qui permettent, indépendamment de l'appareil périphérique, une sortie des couleurs sur n'importe quel appareil couleur. La figure 59 à la page 70 montre la solution pour l'espace colorimétrique *sRGB* (écran standard) ainsi que pour l'espace colorimétrique *RECS* (offset standard). Pour les données *rgb*  $(1\ 0\ 0)_e$ ,  $(1\ 1\ 0)_e$ ,  $(0\ 1\ 0)_e$ ,  $(0\ 0\ 1)_e$  on obtient des couleurs de périphérique d'une chroma maximale  $C^*_{ab,d}$  présentant des angles  $h_{ab,e} = 26, 92, 162$  et  $272$ . Cela entraîne une clarté  $L^*_d$  et une chroma  $C^*_{ab,d}$ , toutes deux dépendantes de l'appareil périphérique.

A la prochaine étape, on définira non seulement les angles CIELAB, mais également la clarté  $L^*_{oe}$  et la chroma  $C^*_{ab,oe}$  des couleurs élémentaires. Le rapport prévu CIE R1-57 «Border between blackish and luminous colours » (*T. Seim, Norway*) propose une première définition.

Pour l'illuminant D65, les couleurs optimales (*indice o et e*) avec la valeur chromatique maximale  $C_{ab,oe}$  et les angles de couleurs élémentaires CIELAB  $h_{ab,oe} = 26, 92, 162$  et  $272$  pourraient se situer à la limite « ni noircies, ni lumineuses ». Ces couleurs possèdent la clarté  $L^*_{oe}$  et la chroma  $C^*_{ab,oe}$ , toutes deux indépendantes des appareils périphériques.

Couleur	$nce^*$	$rgb^*_{oe}$	$L^*_{oe}$	$C^*_{ab,oe}$	$h_{ab,oe}$	$x_{oe}$	$y_{oe}$	$Y_{oe}$
$R_e$	(0 1 0,0)	(1 0 0)	75	65	26	0,57	0,33	48
$Y_e$	(0 1 0,25)	(1 1 0)	89	136	92	0,47	0,51	73
$G_e$	(0 1 0,50)	(0 1 0)	79	120	162	0,19	0,52	55
$B_e$	(0 1 0,75)	(0 0 1)	60	69	272	0,17	0,19	25

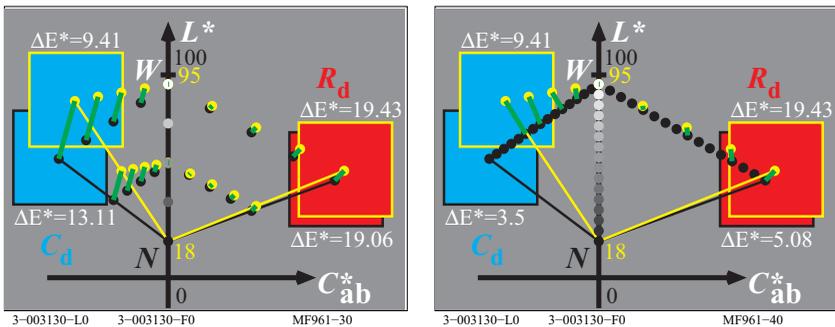
On ne sait pas si les couleurs optimales calculées ici sont situées à la limite visuelle « ni noircies, ni lumineuses ». Dans la figure 28 à la page 28, la couleur *fluorescente* imprimée se situe au-dessus de cette limite.

Pour les écrans, il est prévu d'atteindre les données CIELAB de  $RYGB_{oe}$  pour une luminosité de 142cd/m<sup>2</sup> fixée par la norme de bureau. Cette luminosité demande un éclairage lumineux de 500 lux et un papier blanc (coefficient de réflexion  $R(\lambda) = 0.886$ ).

Pour les surfaces de couleurs (sans fluorescence ou sans rétro-réflexion), il semble exclu de pouvoir atteindre les données CIELAB pour le vert  $G_c$  et pour le bleu  $B_c$ . La forme des facteurs de réflexion des surfaces de couleurs est trop différente de celles des couleurs optimales vert  $G_{oc}$  et bleu  $B_{oc}$ , comparer fig. 26 page 27.

## 21 Reproduction afin des couleurs

Dans la technologie de l'image couleur, le solide des couleurs est limité dans chaque plan de couleur par un triangle blanc - la couleur la plus chromatique - le noir. Sur l'écran comme dans l'impression sur papier, il y a une synthèse additive sur ce triangle. Dans la pratique, il est très important de trouver des solutions quant à la reproduction des couleurs à la limite et à l'intérieur du triangle.



**Fig. 60 : reproduction afin des couleurs et reproduction avec un écart minimal  $\Delta E^*_{ab}$**

La figure 60 montre la reproduction afin des couleurs (*gauche*) et une reproduction présentant un écart minimal  $\Delta E^*_{ab}$  (*droite*) entre les couleurs de l'écran (*points jaune*) et les couleurs imprimées standard (*points noirs*).

La figure 60 (*gauche*) montre que pour la couleur bleu cyan, 20% des couleurs du moniteur et 30% des couleurs imprimées se situent en dehors du champ commun. La reproduction afin utilise tout l'espace des deux appareils.

La figure 60 (*droite*) montre une solution actuelle proposée par la plupart des méthodes de gestion des couleurs. L'objectif est de réduire au maximum l'écart  $\Delta E^*_{ab}$ . Dans ce cas, 30% du champ du bleu cyan à l'impression. La norme ICC de gestion des couleurs permet aux entreprises d'avoir leurs solutions spécifiques, c'est pourquoi il y a une grande variété de résultats de sortie, qu'il convient de soumettre à des tests conformément à DIN 33872-1 à 6, voir <http://www.ps.bam.de/33872E>

Pour un formulaire DIN rempli relatif aux questions de sortie, voir <http://130.149.60.45/~farbmetrik/LE95>

Chaque utilisateur peut demander des solutions au fabricant de l'appareil, conformément à DIN 33872-1 à -6 ou par exemple ISO/IEC 15775.

Ce chapitre a montré qu'il est possible de reproduire des couleurs *indépendamment des appareils périphériques*, et qu'il est possible de procéder à la *reproduction afin* des couleurs. La prochaine étape pourrait être une reproduction des couleurs *indépendamment des appareils périphériques*, fondée sur les données CIE de la figure 58 à la page 67 au sujet des couleurs optimales dotées des valeurs chromatiques maximales  $C_{AB}$ , de même que sur le chapitre 21.

## 22 Bibliographie

### *Normes et publications du même type*

CIE 13.3:1995, Method of measuring and specifying colour rendering of light sources.

CIE 15: 2004, Colorimetry, 3rd edition.

CIE 170-1:2006, Fundamental chromaticity diagram with physiological axes

CIE R1-47:2009, Hue angles of elementary colours, see <http://div1.cie.co.at/>

ISO 11664-4:2008(E)/CIE S 014-4/E:2007: Joint ISO/CIE Standard: Colorimetry — Part 4: CIE 1976  $L^*a^*b^*$  Colour Space

DIN 33872-1 to -6 (2010), Information technology - Office machines - Method of specifying relative colour reproduction with YES/NO criteria, see <http://www.ps.bam.de/33872E>

ISO/IEC TR 24705 (2005) Information technology - Office machines - Method of specifying relative colour reproduction with YES/NO criteria

### *Publications scientifiques*

Evans, R. M. and S. B. Swenholt (1967), Chromatic Strength of Colors; Dominant Wavelength and Purity, *J. opt. Soc. Amer.* 57, S. 1319-1324

Holtzmark, T. and Valberg, A. (1969), Colour discrimination and hue, *Nature*, Volume 224, October 25, S. 366-367.

Miescher, K. (1948), Neuermittlung der Urfarben und deren Bedeutung für die Farbordnung, *Helv. Physiol. Acta* 6, C12-C13

Miescher, K., Richter, K. und Valberg, A. (1982), Farbe und Farbsehen, Beschreibung von Experimenten fuer die Farbenlehre, *Farbe + Design*, no. 23/24

Newhall, S.M., D. Nickerson and D.B. Judd (1943), Final report of the O.S.A. subcommittee on the spacing of the Munsell colors. *J. opt. Soc. Amer.* 33, S. 385-418

Richter, K. (1979), BAM-Forschungsbericht Nr. 61, Beschreibung von Problemen der höheren Farbmétrie mit Hilfe des Gegenfarbsystems, 99 Seiten, ISSN 0172-7613

Richter, K. (1980), Cube root colour spaces and chromatic adaptation, *Color Research and Application* 5, no. 1, pages 25-43

Richter, K. (1985), BAM-Forschungsbericht Nr. 115, Farbempfindungsmerkmal Elementarbutnton und Buntheitsabstände als Funktion von Farbart und Leuchtdichte von In- und Umfeld, 118 Seiten, ISBN 3-88314-420-7

Richter, K. (1996), Computergrafik und Farbmétrie - Farbsysteme, *PostScript* und geräteunabhängige CIE-Farben, VDE-Verlag, 288 pages with about 500 colour figures and many additional references, see

<http://www.ps.bam.de/buche>

Richter, K (2011) ISO-CIE trend for the description of colour threshold data by new coordinates based on the device independent elementary colour coordinates of the report CIE R1-47:2009, see

[http://130.149.60.45/~farbmetrik/CIE\\_ISO\\_10.PDF](http://130.149.60.45/~farbmetrik/CIE_ISO_10.PDF)

Valberg, A. (2005), *Light, Vision, Color*, Wiley, ISBN 0470 849037, 462 pages.

## 23 Remerciements et remarques techniques

La fondation *Karl Miescher-Stiftung zur Förderung der Farbenlehre* a apporté son généreux soutien afin de permettre la publication sur papier de la brochure *Couleur et vision des couleurs* en allemand et en anglais, ainsi que l'élaboration des versions Internet dans d'autres langues.

Depuis l'année 2000, les professeurs *H. Kaase* et *S. Voelker* ont largement participé à la mise en place et à l'entretien de l'exposition *Couleur et vision des couleurs* à l'Institut des Technologies de la Lumière de l'Université Technique de Berlin.

### ***Historique de l'exposition Couleur et vision des couleurs***

L'exposition *Couleur et vision des couleurs* a été conçue au cours des années 1963/64 par *K. Richter* sous la direction de *Dr. Karl Miescher* au laboratoire de colorimétrie du département de physique à l'Université de Bâle (CH). L'exposition a été montrée pendant 6 mois dans le cadre de l'*Exposition Nationale Suisse à Lausanne (Expo 64)*. Après *Expo 1964*, l'exposition a été installée au *Lycée des Sciences et des Mathématiques de Bâle* où elle est restée pendant 30 ans.

En l'an 2000, elle a pu être de nouveau montée à l'Université Technique de Berlin grâce au financement de la fondation *Karl Miescher-Stiftung*. A Berlin, *K. Richter* s'est régulièrement occupé de l'actualiser en y ajoutant les évolutions récentes notamment sur la gestion des couleurs en informatique. Depuis l'an 2000, l'exposition est visitée par de nombreux étudiants ainsi que par des personnes s'intéressant à la couleur.

### ***Historique des éditions précédentes et de l'édition 2012***

La première édition est parue en 1964, sans illustration couleur en allemand, en français et en italien pour l'*Exposition Nationale Suisse « Expo 64 »* à Lausanne.

Après la seconde édition en 1978, la troisième est parue en 1982 (avec 50 illustrations en couleur) dans la revue « *Farbe + Design* ». Une édition spéciale a été imprimée en allemand et en anglais au cours de la même année. Je remercie le professeur *Dr. Arne Valberg*, de Trondheim en Norvège qui en a été le co-auteur.

La quatrième édition de 2012 contient 135 illustrations couleur, qui montrent en outre les évolutions récentes en informatique. Cette édition est parue en différentes versions, pour imprimerie offset, pour moniteur et pour imprimante, ainsi

que dans une version web, en allemand et en anglais. Des versions Internet dans d'autres langues sont également prévues.

Pour télécharger gratuitement la dernière version web et pour commander les versions offset, voir

<http://130.149.60.45/~farbmetrik/color>

### ***Objectif et application des éditions spéciales 2012***

Les éditions spéciales sont utilisées dans l'enseignement comme introduction à la théorie des couleurs. Différents domaines d'application de la couleur sont mis en rapport sans connaissance préalable de la couleur et avec un minimum de sens technique, par exemple

Fondements visuels et propriétés de la vision des couleurs

Méthode de mesure des couleurs et colorimétrie

Système relatif de couleurs élémentaires *RECS* en informatique.

Pour une étude plus poussée, nous recommandons un ouvrage spécialisé intitulé « Computergrafik und Farbmetrik - Farbsysteme, PostScript, geräteunabhängige CIE-Farben », paru en 1996 aux éditions VDE-Verlag avec 500 illustrations couleurs, et des légendes d'illustrations en allemand et en anglais. Les illustrations peuvent être utilisées individuellement dans un but pédagogique. Les fichiers PDF du livre et les illustrations peuvent être téléchargés gratuitement, voir.

<http://130.149.60.45/~farbmetrik/buche.html>

Le secrétariat du département des techniques lumineuses de l'Université Technique de Berlin organise sur demande des visites guidées de l'exposition « *Couleur et vision des couleurs* », voir

<http://www.li.tu-berlin.de>

Copyright de la quatrième édition de « *Couleur et vision des couleurs* »

*Prof. Dr. Klaus Richter*, Walterhoferstrasse 44, D-14165 Berlin, Germany

Internet: <http://130.149.60.45/~farbmetrik/>

Fax: +49 30 84509039, email: [klaus.richter@me.com](mailto:klaus.richter@me.com)

### ***Objectifs et applications des versions 2013 dans différentes langues***

Pour la traduction à partir de l'anglais vers d'autres langues, je remercie tout particulièrement

*Prof. Dr. Manuel Melgosa* (University of Granada, Spain)

email: [mmelgosa@ugr.es](mailto:mmelgosa@ugr.es).

Sa traduction en espagnol a soulevé différentes questions et occasionné de nombreuses suggestions, ainsi que les versions Internet 2013 en cinq langues. La version italienne sera achevée sous peu.

## 24 Tests et descriptions techniques

### Noms des tests à sept caractères

Exemples : *PE40S0S*, *PG7011S*, *PG7311L*, *PF4611P*, *PG7911P*

Le premier caractère désigne le registre principal du fichier (ici *P*). Le second caractère indique la langue (*E* = anglais, *G* = allemand, *F* = français, *S* = espagnol et *I* = italien).

Les deux chiffres suivants se réfèrent au domaine allant de 00 à 99. Le deuxième chiffre 0 définit une sortie sur un écran *sRGB*. Si le deuxième chiffre est un 3 ou un 6, il s'agit d'une sortie en impression offset sur papier *L* avec deux possibilités de séparations de couleurs : *CMYK* pour 3 ou *CMY0* pour 6. Lorsque le deuxième chiffre est un 9, cela correspond à une sortie sur imprimante, sur papier *A* avec une séparation *CMYK*.

Les deux caractères suivants *S0* correspondent à une sortie de départ (*S0*) dans un fichier associant les données *rgb* et *cmyk*. Les signes 00 et 01 définissent un transfert *rgb* pour la sortie des couleurs périphériques (00) et des couleurs élémentaires (01). Les signes 10 et 11 définissent une linéarisation *rgb* 3D pour la sortie des couleurs périphérique (10) et des couleurs élémentaires (11).

Le dernier signe *S*, *L* ou *P* définit la sortie sur un écran *sRGB* (*S*), en impression offset sur papier *L* (*L*), ou sur imprimante sur papier *A* (*P*).

### Test en première de couverture (print) ou en première page

*PF7011S*, *PF7311L*, *PF7911P* :

Cercle chromatique de couleurs élémentaires en 8 et 16 parties d'après CIE R1-47 et DIN 33872-1 à 6

### Tests en annex

1. Sortie *S* sans séparation de couleur et sortie *L* et *P* avec la séparation *CMYK*.

*PF1011S*, *PF1311L*, *PF1911P* :

Test n° 1 : rendu de 54 couleurs du système *RECS*.

*PF40S0S*, *PF4000S*, *PF4001S*, *PF4010S*, *PF4011S*

*PF43S0L*, *PF4300L*, *PF4301L*, *PF4310L*, *PF4311L*

*PF49S0P*, *PF4900P*, *PF4901P*, *PF4910P*, *PF4911P* :

1080 couleurs destinées à la mesure colorimétrique pour le contrôle de sortie, sortie de départ.

*TF7011S*, *TF7311L*, *TF7911P* :

Test achromatique d'après ISO/IEC 15775, ISO/IEC TR 24705 et ISO 9241-306, annexe D.

*TF8011S, TF8311S, TF8911S :*

Test chromatique avec image ISO/IEC d'après ISO/IEC 15775, ISO/IEC TR 24705 et ISO 9241-306, annexe E.

2. Sorties *L* et *P* avec la séparation *CMY0*

*PF46S0L, PF4600L, PF4601L, PF4610L, PF4611L*

*PF46S0P, PF4600P, PF4601P, PF4610P, PF4611P :*

1080 couleurs destinées à la mesure colorimétrique pour le contrôle de sortie, sortie de départ.

3. Sorties *L* et *P* avec les deux séparations *CMYK* et *CMY0*

*PF2311L, PF2311P :*

Test n° 2 : rendu des couleurs métamères pour D65 et D50.

*PF3311L, PF3311P :*

Test n° 3 : rendu des couleurs métamères pour A et P4000.

### **Remarques techniques à propos des tableaux de la troisième et quatrième de couverture (print) ou des deux dernières pages du fichier :**

*PF91S0S, PF91S0L, PF91S0P :*

Tableau des données CIE du cercle chromatique en 48 parties.

*PF9011S, PF9311L, PF9911L :*

Séries de couleurs composées de 5 et de 16 paliers pour les teintes élémentaires rouge  $R_c$  d'après DIN 33872-4

### **Remarques techniques à propos des tableaux de la troisième de couverture (print) ou de l'avant-dernière page du fichier :**

Pour un cercle chromatique de 48 couleurs, le tableau montre en colonne 2, les données d'entrée *rgb* et les données de mesure CIELAB *LabCh\**. Dans la colonne 3, les données des angles de teintes entiers les plus proches dans l'espace CIELAB *hab* ( $0 < i = hab < 360$ ) ont été interpolés.

L'espace  $rgb_s$  (*s*=Standard) attribue aux données  $rgb_s$  (1 0 0)<sub>s</sub>, (1 1 0)<sub>s</sub>, (0 1 0)<sub>s</sub>, (0 1 1)<sub>s</sub>, (0 0 1)<sub>s</sub>, et (1 0 1)<sub>s</sub> les angles 30, 90, 150, 210, 270 et 330. De la même manière, conformément à CIE R1-49, dans l'espace  $rgb_e$  (*e*=couleurs élémentaires) les données  $rgb_e$  (1 0 0)<sub>e</sub>, (1 1 0)<sub>e</sub>, (0 1 0)<sub>e</sub>, (0 1 1)<sub>e</sub>, (0 0 1)<sub>e</sub>, et (1 0 1)<sub>e</sub> sont attribuées aux angles 26, 92, 162, 217, 272 et 329.

Par exemple les tableaux ( $0 \leq i \leq 360$ ) pour le système *sRGB*, voir le fichier

<http://130.149.60.45/~farbmetrik/RE69/RE69L0NP.PDF>

Dans les deux espaces, les données CIELAB ont été interpolées comme fonction de l'angle  $i$ . Conformément à DIN 33872-1, et pour n'importe quelles données  $rgb$  (sauf  $r=g=b$ ), on considère comme valable :

$$i = 360 \operatorname{atan} \left\{ \frac{[r \sin(30) + g \sin(150) - b \sin(270)]}{[r \cos(30) + g \cos(150)]} \right\}$$

A partir de deux tableaux avec les angles  $i$  compris entre 0 et 360 degrés, l'indice  $i$  donne au choix les données dans l'espace CIELAB  $LabCh^*$ , et les données  $rgb$  correspondantes pour les couleurs de sorties élémentaires ou de périphériques.

Dans la pratique, pour n'importe quel  $i$ , les couleurs cibles sont calculées à partir des données CIELAB  $LabCh^*$  des couleurs maximales, du blanc  $W$  et du noir  $N$ . Pour atteindre cet objectif, on utilise les données de contrôle  $rgb_{dd}$  (device to device output) et  $rgb_{de}$  (device to elementary output) résultant de la linéarisation 3D dans l'espace colorimétrique CIELAB. Pour un complément d'informations sur la linéarisation de sortie sur écran, imprimante ou impression offset, veuillez consulter le rapport prévu CIE R8-09. Des exemples de résultats de sortie pour un cercle chromatique élémentaire d'une chroma maximale, ainsi que pour un triangle chromatique de 5 à 16 paliers, pour la couleur rouge élémentaire  $R_e$ , se trouvent respectivement sur la première et la quatrième de couverture de « Couleur et vision des couleurs », voir

<http://130.149.60.45/~farbmetrik/color>

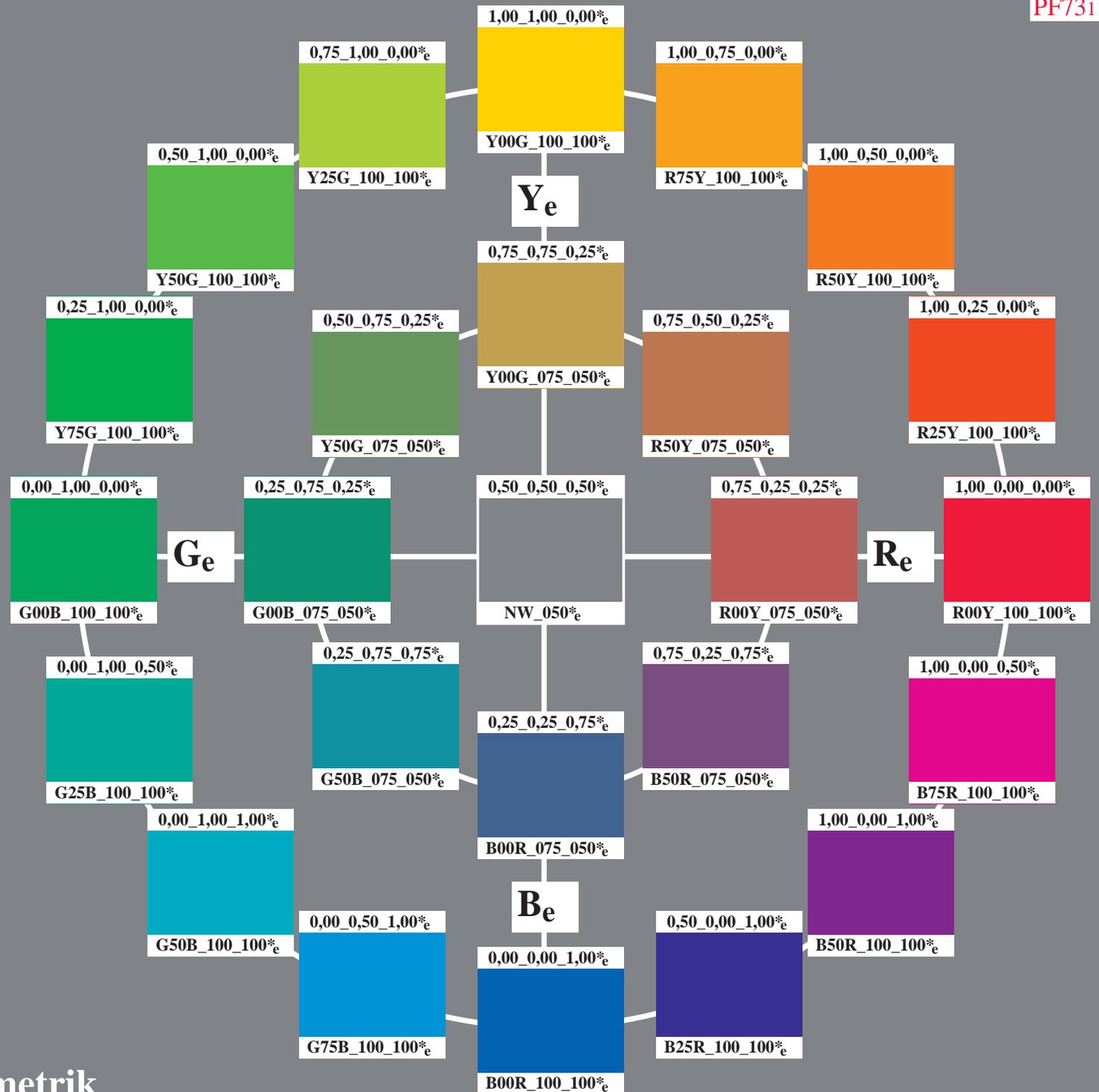
Pour une information plus détaillée au sujet de la linéarisation de sortie pour écran, impression offset et imprimante voir le “white report” qui fixe les bases d'un document normé de linéarisation

<http://130.149.60.45/~farbmetrik/outlin>

Le rapport CIE R8-09:2015 sera un résumé détaillé de ce rapport de linéarisation, et avec de beaucoup d'applications.

# Couleur et la Vision des Couleurs

## Couleurs Élémentaires en Informatique



test no 1 pour un rendu de couleurs – 54 couleurs standard pour D65; impression offset (CMYK); rgb->rgb\*de

voir fichiers similaires: <http://130.149.60.45/~farbmetrik/PF13/PF13.HTM>  
Informations techniques: <http://www.ps.bam.de> ou <http://130.149.60.45/~farbmetrik>

series :  
maximum  
m  
  
maximum  
m  
  
blancheur  
w  
  
central  
z  
  
noirceur  
n  
  
gris  
g



TUB enregistrement: 20130201-PF13/PF13L0FP.PDF /.PS  
application pour la mesure des sorties sur offset, séparation cmy6\* (CMYK)  
TUB matériel: code=thad4ta

3-113130-L0 PF130-73

graphique TUB-PF13; reproduction en couleurs  
54 couleurs standard, 3D=1, de=1, cmyk\*

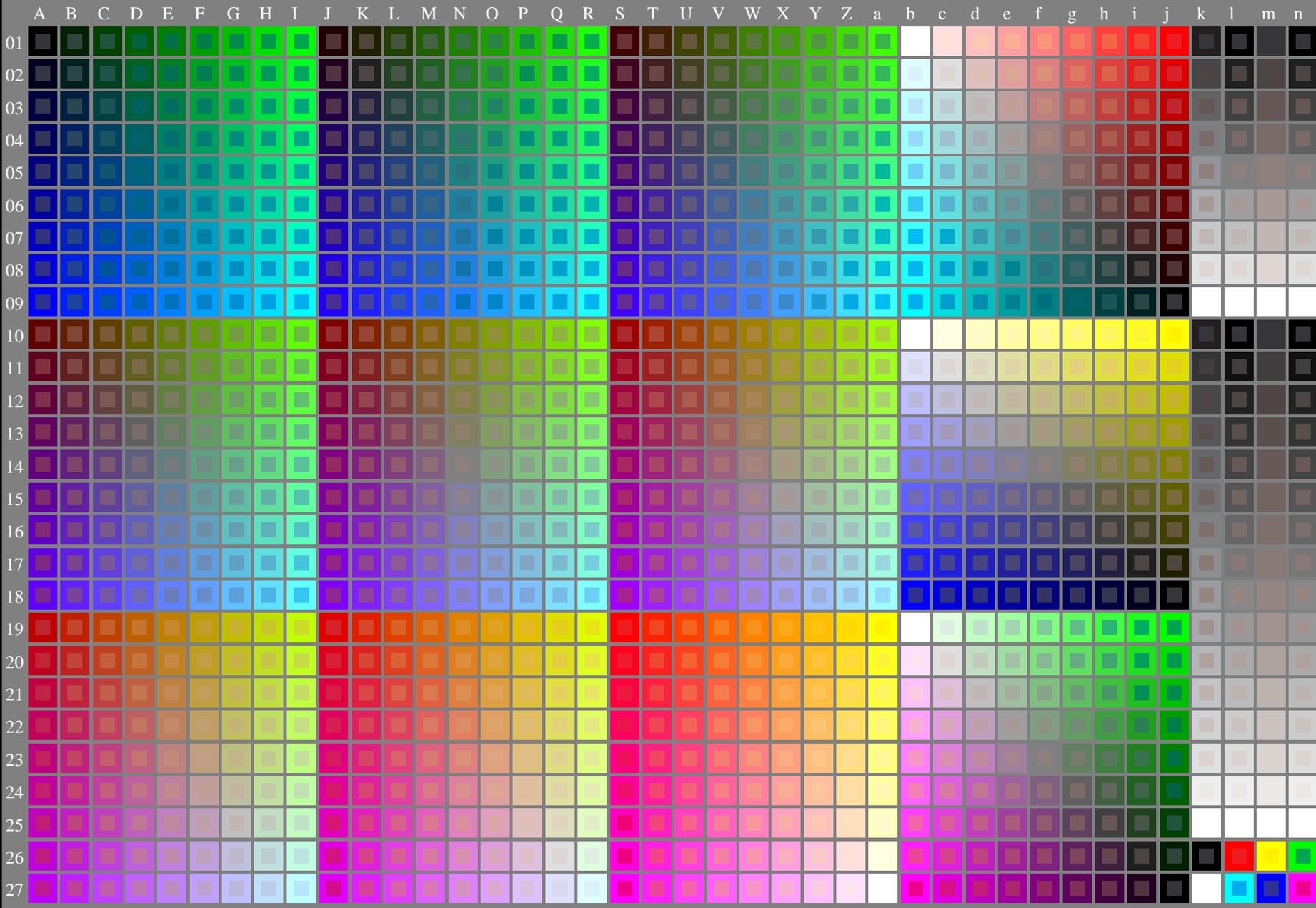
entrée : rgb/cmyk -> rgb<sub>de</sub>  
sortie : linéarisation 3D selon cmyk\*<sub>de</sub>

3-113130-F0



voir fichiers similaires: <http://130.149.60.45/~farbmetrik/PF43/PF43.HTM>  
Informations techniques: <http://www.ps.bam.de> ou <http://130.149.60.45/~farbmetrik>

TUB enregistrement: 20130201-PF43/PF43L0NP.PDF /.PS  
application pour la mesure des sorties sur offset  
TUB matériel: code=thad4ta



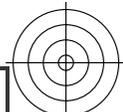
3-003030-L0

PF430-7N

Test chart G with 1080 colours; 9 or 16 step colour scales; data in column (A-n): **rgb** (A\_j+k26\_n27), **000n** (k), **w** (l), **nnn0** (m), **www** (n) + **cmy0**(all)

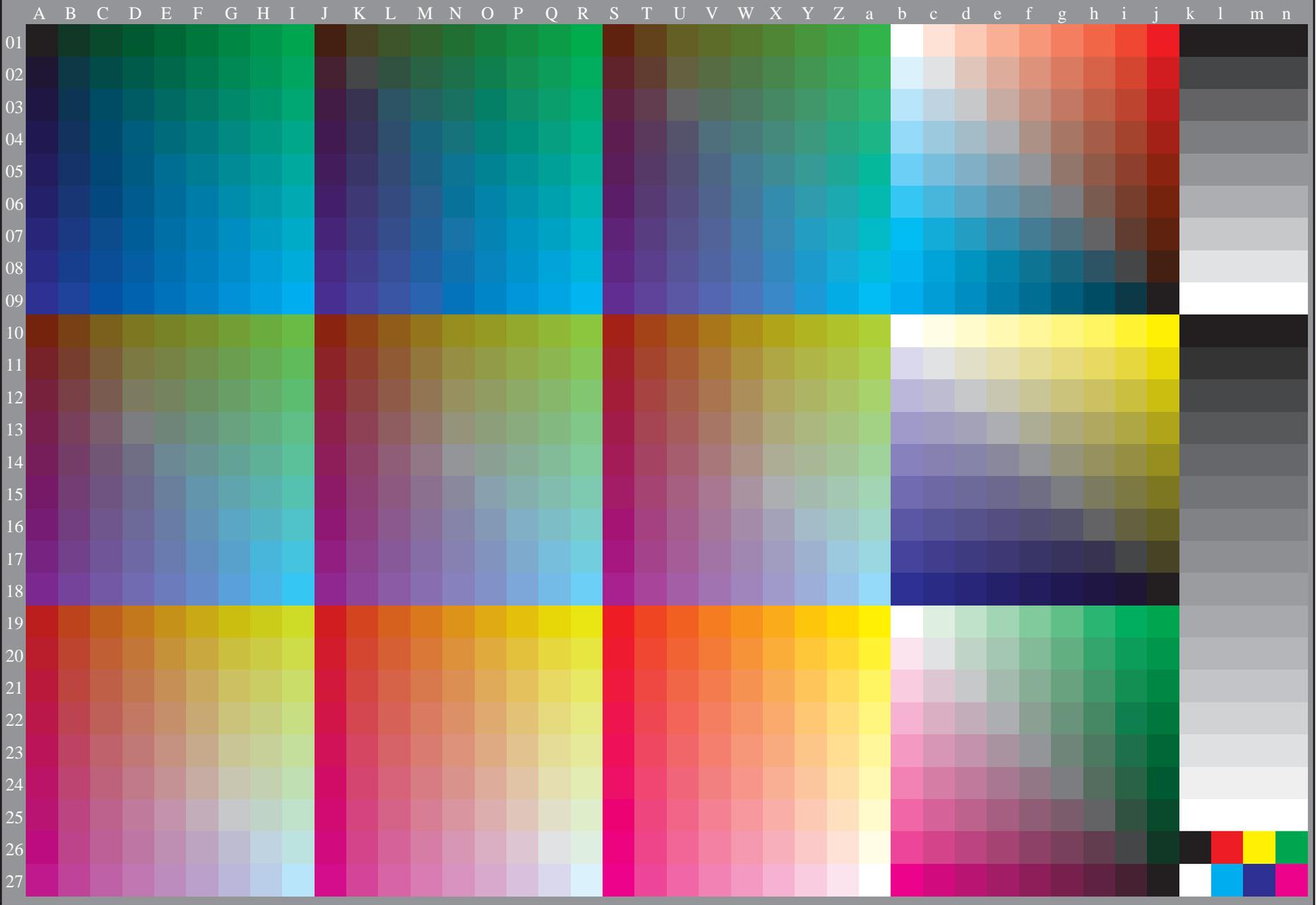
graphique TUB-PF43; échantillon pour le test  
1080 couleur de norme; image informatique

entrée : **rgb/cmyk** -> **rgb/cmyk**  
sortie : aucun changement



voir fichiers similaires: <http://130.149.60.45/~farbmetrik/PF43/PF43.HTM>  
Informations techniques: <http://www.ps.bam.de> ou <http://130.149.60.45/~farbmetrik>

TUB enregistrement: 20130201-PF43/PF43L0NP.PDF /.PS TUB matériel: code=thad4ta  
application pour la mesure des sorties sur offset, séparation cmy6 (CMYK)



3-003130-L0

PF430-70

graphique TUB-PF43; échantillon pour le test  
1080 couleur de norme, 3D=0, de=0, cmyk

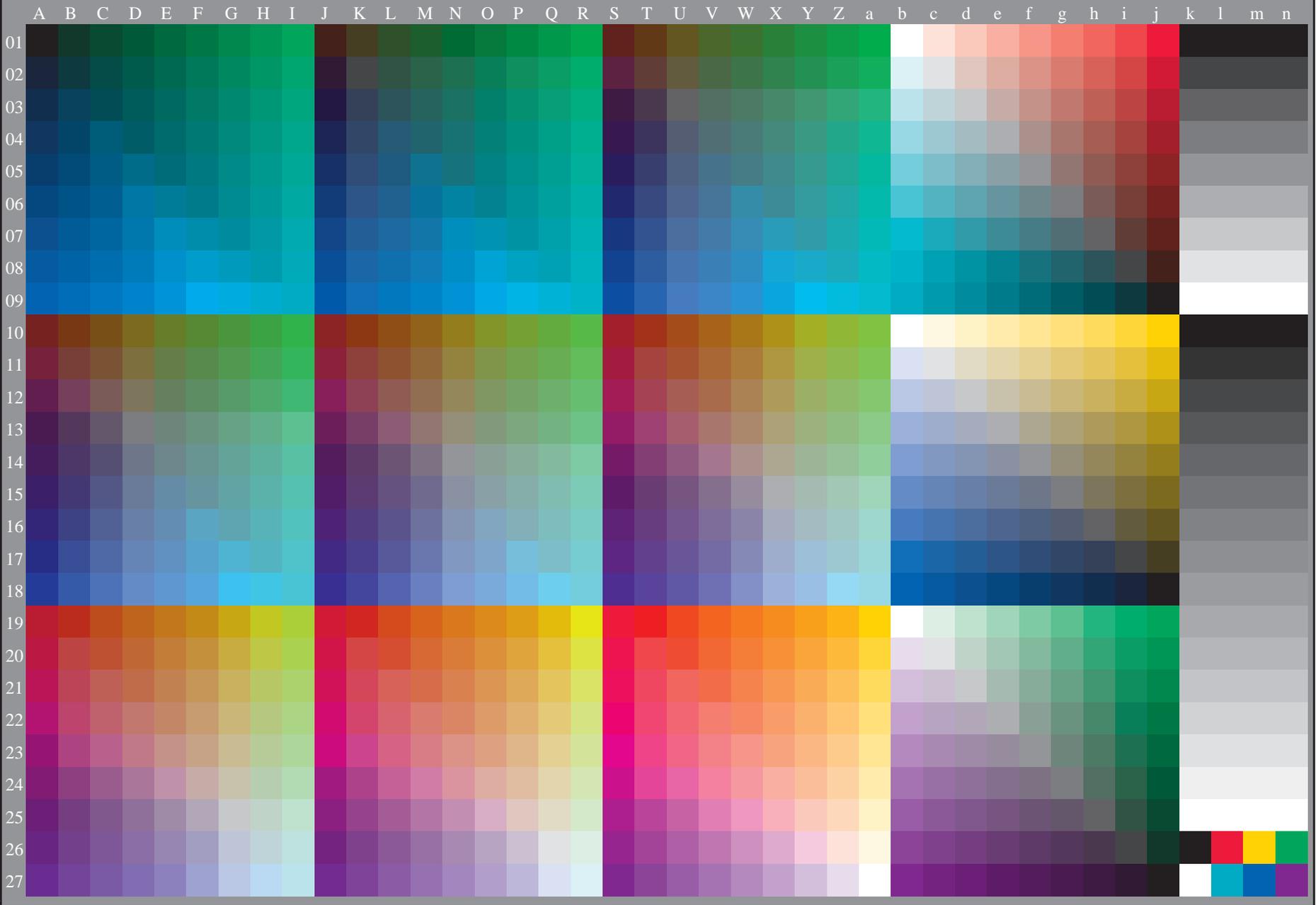
entrée : *rgb/cmyk* -> *rgb<sub>d</sub>*  
sortie : transférer à *cmyk<sub>d</sub>*

3-003130-F0

C M Y O L V C

voir fichiers similaires: <http://130.149.60.45/~farbmetrik/PF43/PF43.HTM>  
Informations techniques: <http://www.ps.bam.de> ou <http://130.149.60.45/~farbmetrik>

TUB enregistrement: 20130201-PF43/PF43L0NP.PDF /.PS TUB matériel: code=thad4ta  
application pour la mesure des sorties sur offset, séparation cmy6 (CMYK)



3-013130-L0

PF430-71

graphique TUB-PF43; échantillon pour le test  
1080 couleur de norme, 3D=0, de=1, cmyk

entrée : *rgb/cmyk* -> *rgb<sub>e</sub>*  
sortie : transférer à *cmyk<sub>e</sub>*

3-013130-F0

C

M

Y

O

L

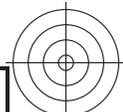
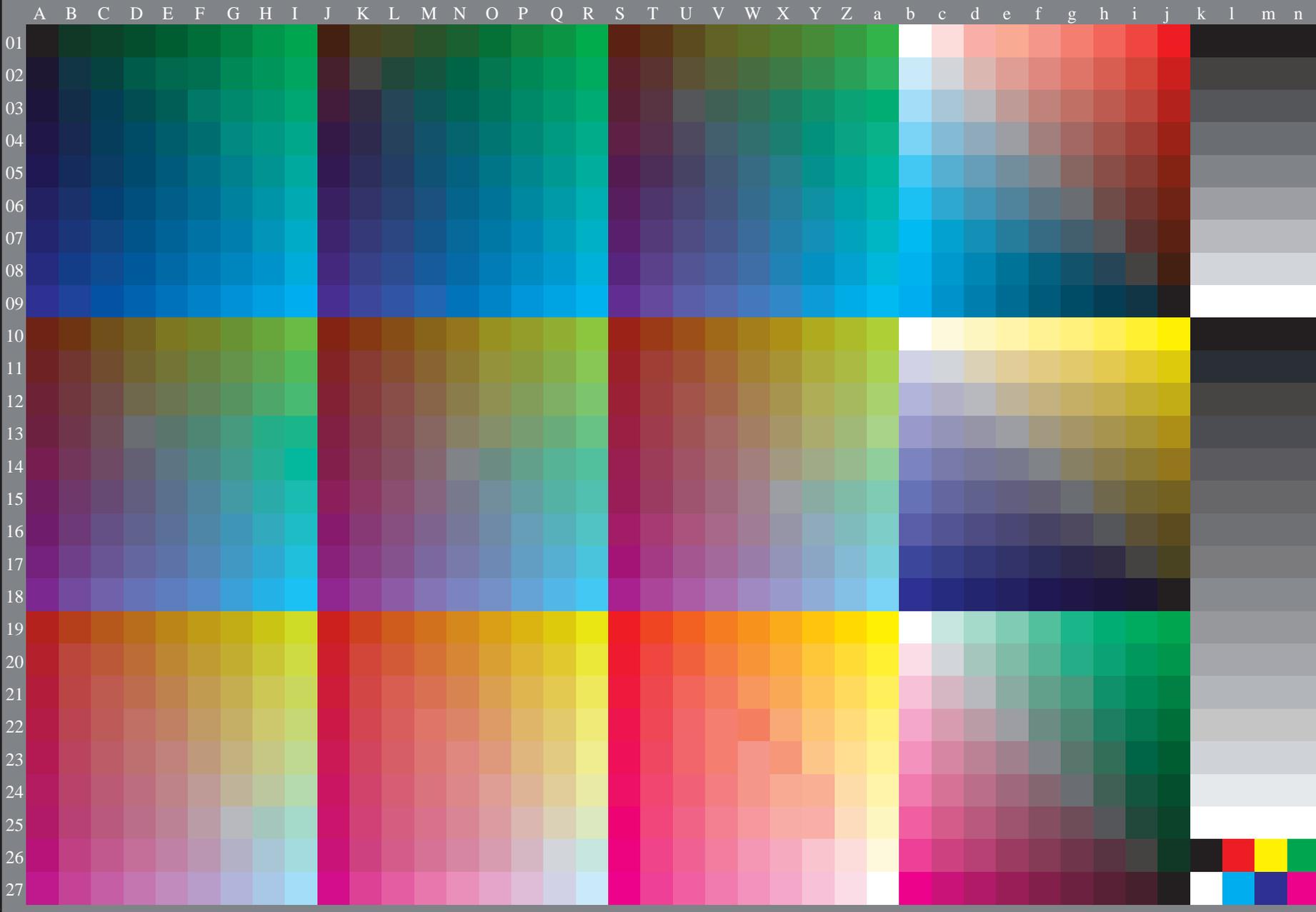
V

C



voir fichiers similaires: <http://130.149.60.45/~farbmetrik/PF43/PF43.HTM>  
Informations techniques: <http://www.ps.bam.de> ou <http://130.149.60.45/~farbmetrik>

TUB enregistrement: 20130201-PF43/PF43L0FP.PDF /.PS TUB matériel: code=thad4ta  
application pour la mesure des sorties sur offset, séparation cmyk\* (CMYK)



3-103130-L0

PF430-72

graphique TUB-PF43; échantillon pour le test  
1080 couleur de norme, 3D=1, de=0, cmyk\*

entrée : *rgb/cmyk* -> *rgb<sub>dd</sub>*  
sortie : linéarisation 3D selon *cmyk\*<sub>dd</sub>*

3-103130-F0

C

M

Y

O

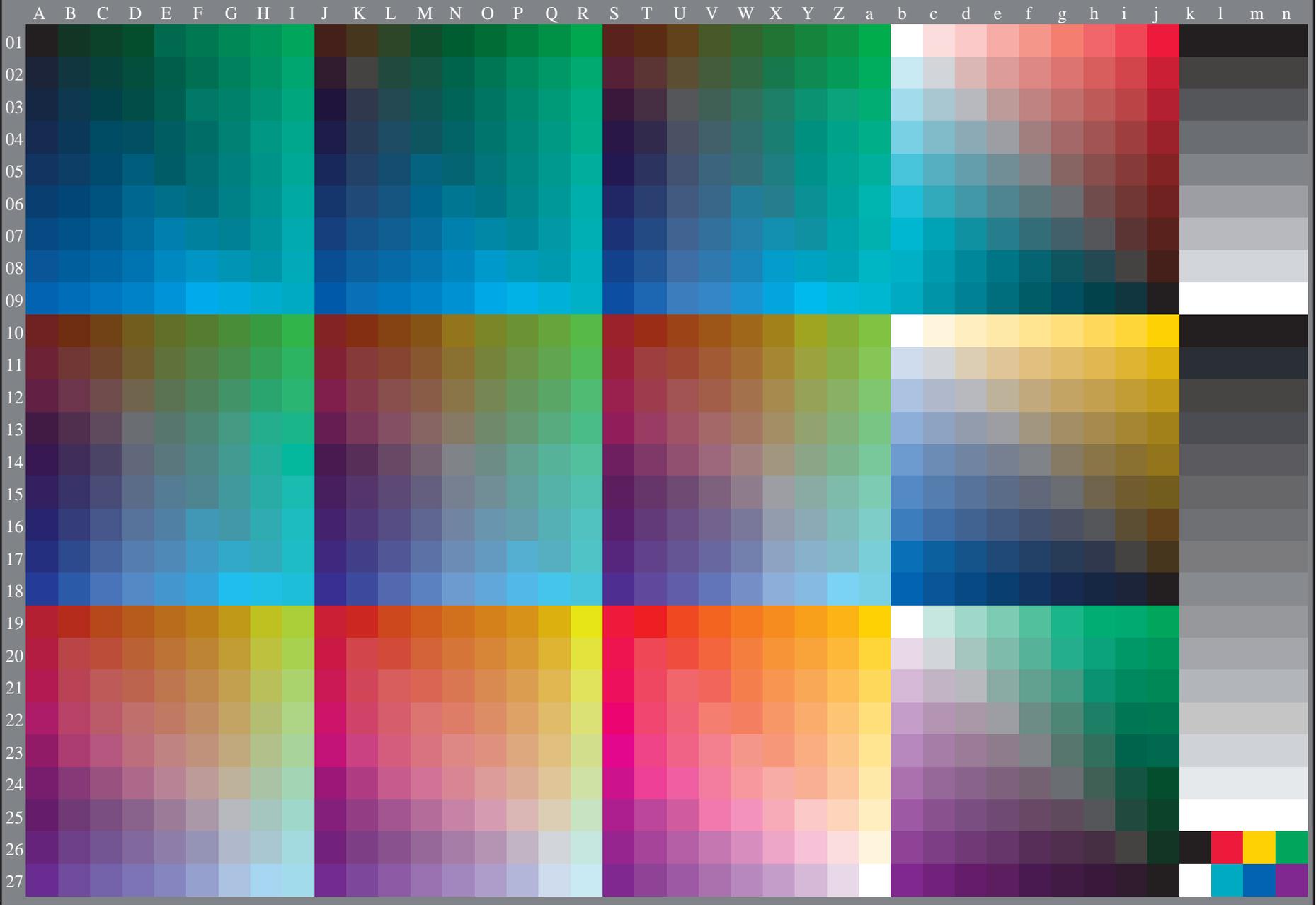
L

V

C

voir fichiers similaires: <http://130.149.60.45/~farbmetrik/PF43/PF43.HTM>  
Informations techniques: <http://www.ps.bam.de> ou <http://130.149.60.45/~farbmetrik>

TUB enregistrement: 20130201-PF43/PF43L0FP.PDF /.PS TUB matériel: code=thad4ta  
application pour la mesure des sorties sur offset, séparation cmyk\* (CMYK)



3-113130-L0

PF430-73

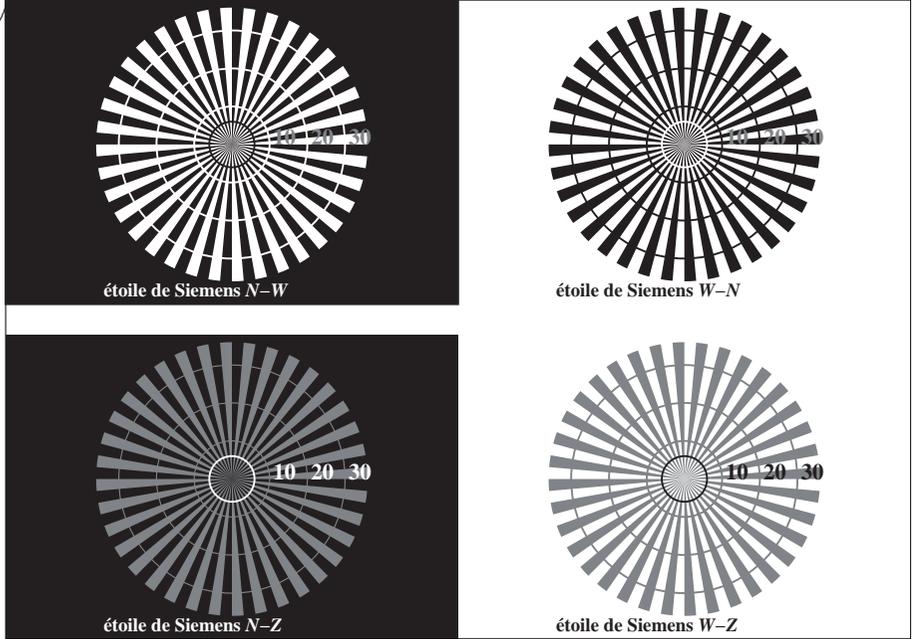
graphique TUB-PF43; échantillon pour le test  
1080 couleur de norme, 3D=1, de=1, cmyk\*

entrée : *rgb/cmyk* -> *rgb<sub>de</sub>*  
sortie : linéarisation 3D selon *cmyk\*<sub>de</sub>*

3-113130-F0

voir fichiers similaires: <http://130.149.60.45/~farbmetrik/TF73/TF73.HTM>  
Informations techniques: <http://www.ps.bam.de> ou <http://130.149.60.45/~farbmetrik>

TUB enregistrement: 20150901-TF73/TF73L0FP.PDF /.PS TUB matériel: code=rh4t4  
application pour la mesure des sorties sur offset, séparation cmy6\* (CMYK)



TF730-3, Fig. C1Wde: Élément A: étoile de Siemens N-W, W-N, N-Z et W-Z; PS opérateur : rgb/cmy0

$L^*/Y_{destin\grave{e}}$ (absolu)	18.0/18.0	37.3/37.3	56.7/56.7	76.1/76.0	95.4/95.4	$N_0$ (min.)	$W_1$ (max.)
$w^* = L^*_{CIELAB, r}$ (relative)							
$w^*_{entr\acute{e}e}$	0,000	0,250	0,500	0,750	1,000	$N_0$ (min.)	$W_1$ (max.)
$w^*_{sortie}$							

TF730-5, Fig. C2Wde: Élément B: 5 paliers de gris  $L^*$  équidistante +  $N_0$  +  $W_1$ ; PS opérateur : rgb/cmy0

$L^*/Y_{destin\grave{e}}$ (absolu)	18.0/18.0	23.2/23.2	28.3/28.3	33.5/33.5	38.6/38.6	43.8/43.8	49.0/49.0	54.1/54.1	59.3/59.3	64.4/64.4	69.6/69.6	74.8/74.8	79.9/79.9	85.1/85.1	90.2/90.2	95.4/95.4
No et code Hex	00;F	01;E	02;D	03;C	04;B	05;A	06;9	07;8	08;7	09;6	10;5	11;4	12;3	13;2	14;1	15;0
$w^* = L^*_{CIELAB, r}$ (relative)																
$w^*_{entr\acute{e}e}$	0,000	0,067	0,133	0,200	0,267	0,333	0,400	0,467	0,533	0,600	0,667	0,733	0,800	0,867	0,933	1,000
$w^*_{sortie}$																

TF730-7, Fig. C3Wde: Élément C: 16 paliers de gris  $L^*$  équidistante; PS opérateur : rgb/cmy0

échelonnement du 0 font code hex	7	E	2	8	F	
1 échelonnement anneau de Landolt	0-1	7-8	E-F	2-0	8-6	F-D
anneaux Landolt W-N						
code: fond anneaux						

TF731-1, Fig. C4Wde: Élément D: anneaux Landolt W-N; PS opérateur : rgb/cmy0

	120	128	136	144	152	160	168	176	184	192	200	208	216	224	232	240	
120 (+8)																240	
60 (+4)																120	
30 (+2)																60	
15 (+1)																30	
	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	
largeur de trame in lpi																	

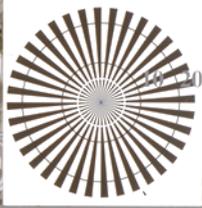
TF731-3, Fig. C5Wde: Élément E: trame linéaire à 45° (ou 135°); PS opérateur : rgb/cmy0

	120	128	136	144	152	160	168	176	184	192	200	208	216	224	232	240	
120 (+8)																240	
60 (+4)																120	
30 (+2)																60	
15 (+1)																30	
	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	
largeur de trame in lpi																	

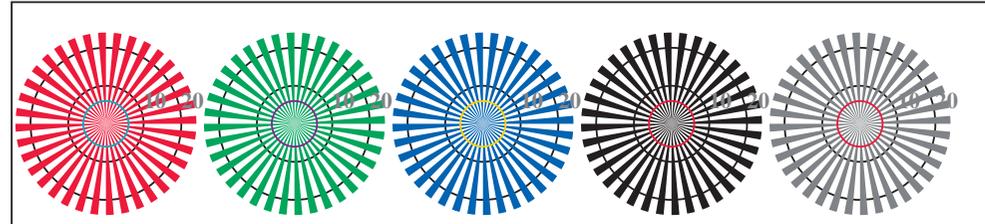
TF731-5, Fig. C6Wde: Élément F: trame linéaire à 90° (ou 0°); PS opérateur : rgb/cmy0

graphique TF73; ME16(ISO 9241-306), 3(ISO/IEC 15775) entrée : rgb/cmyk -> rgb<sub>de</sub>  
achromatic graphique de test N, 3D=1, de=1, cmyk\* sortie : linéarisation 3D selon cmyk\*<sub>de</sub>

voir des fichiers similaires: <http://130.149.60.45/~farbmetrik/TF83/TF83.HTM>  
Informations techniques: <http://www.ps.bam.de> ou <http://130.149.60.45/~farbmetrik>

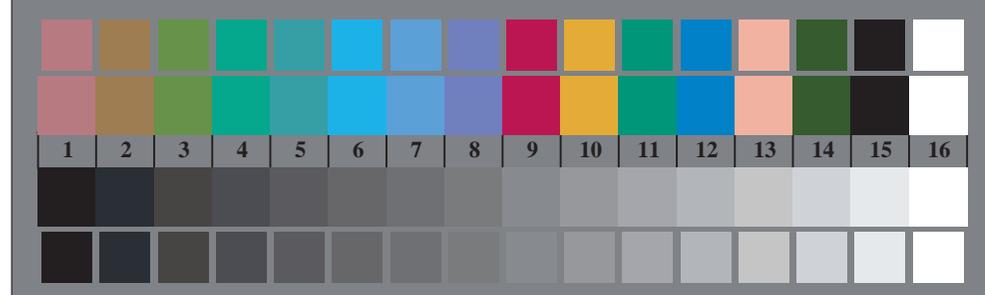


TF830-3, Fig. D1Wde: le motif fleuri, 14 CIE test couleurs et 2 + 16 gris étapes (sf); ; PS 4 colorimage



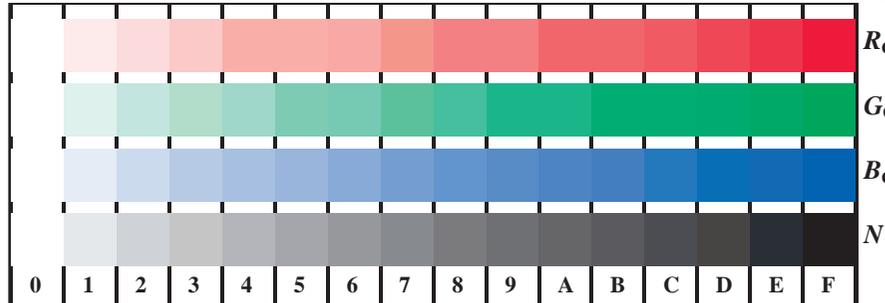
radial callebotis W-Re radial callebotis W-Ge radial callebotis W-Be radial callebotis W-N radial callebotis W-Z

TF830-5, Fig. D2Wde: radial callebotis W-Re; W-Ge; W-Be; W-N; PS operator rgb->rgbde setrgbcolor

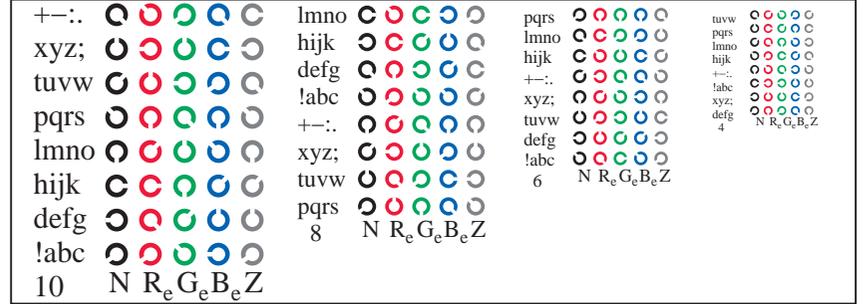


TF830-7, Fig. D3Wde: 14 CIE test couleurs et 2 + 16 gris étapes (sf); rgb/cmy0->rgbde setrgbcolor

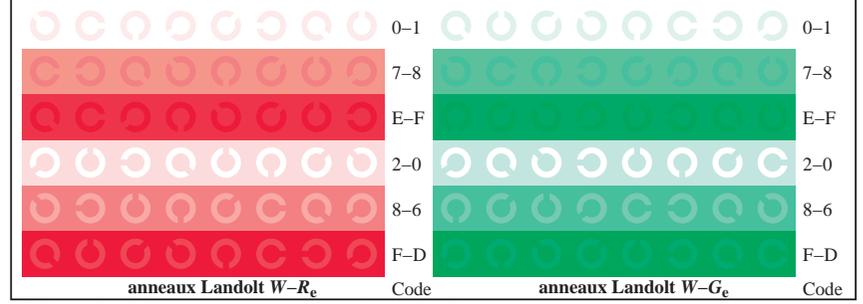
graphique TF83; 4(ISO/IEC 15775 + ISO/IEC TR 24705) entrée: rgb/cmyk -> rgbde  
chromatic graphique de test RGB, 3D=1, de=1, cmyk\* sortie: linearisation 3D selon cmyk\*\_de



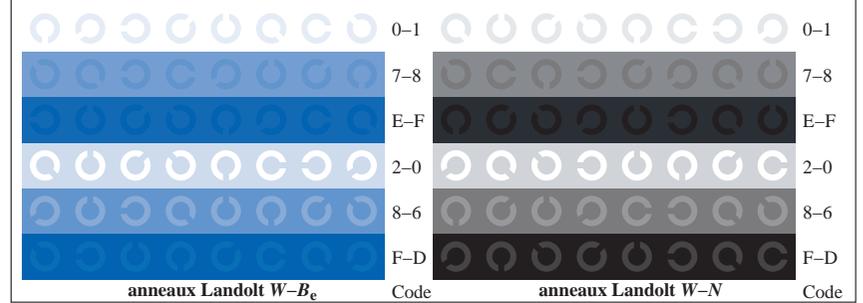
TF831-1, Fig. D4Wde: 16 équidistants étapes W-Re; W-Ge; W-Be; W-N; rgb/cmy0->rgbde setrgbcolor



TF831-3, Fig. D5Wde: code et Landolt anneauN; Re; Ge; Be; Z; PS operator rgb->rgbde setrgbcolor



TF831-5, Fig. D6Wde: anneaux Landolt W-Re; W-Ge; PS operator rgb->rgbde setrgbcolor

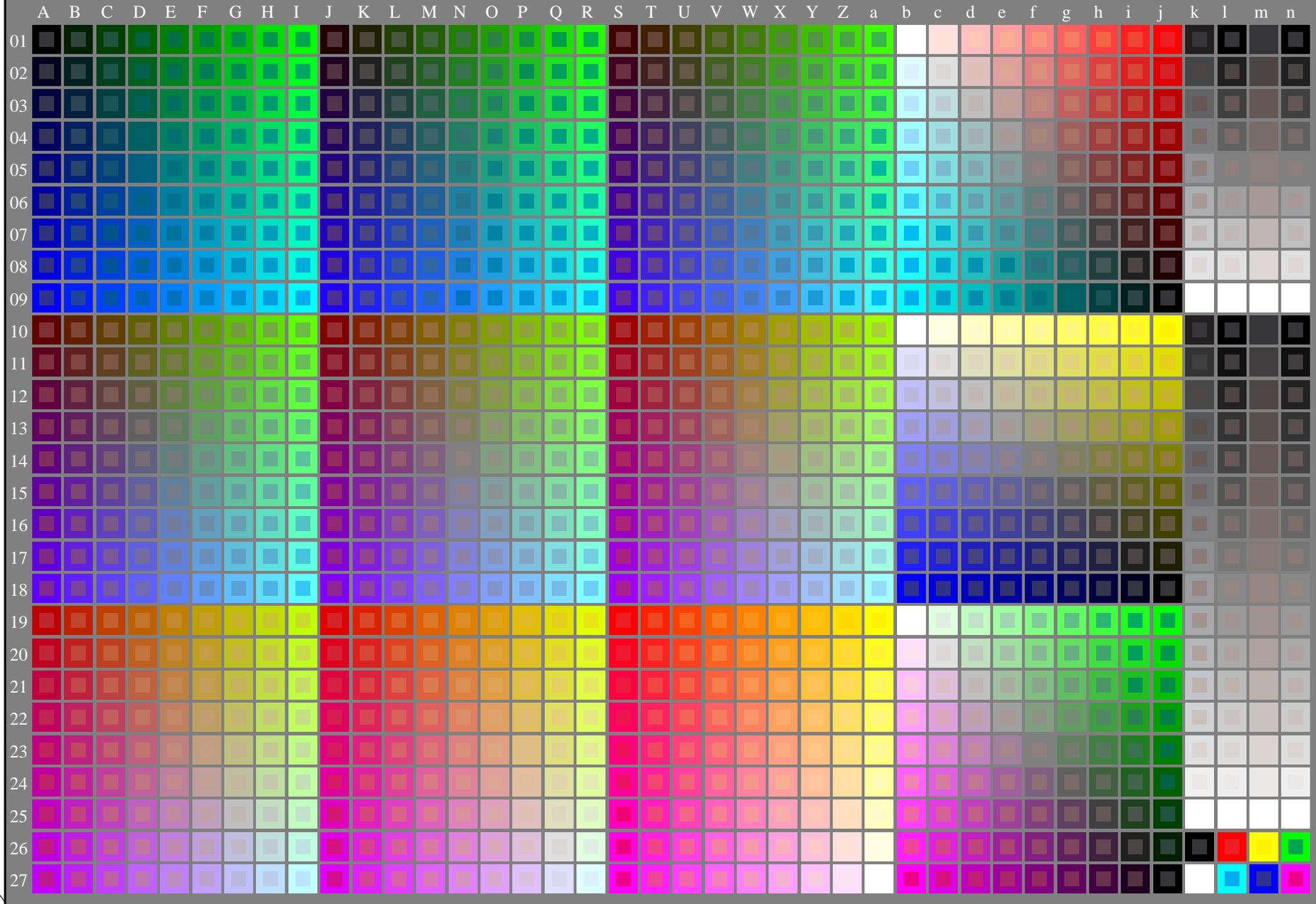


TF831-7, Fig. D7Wde: anneaux Landolt W-Be; W-N; PS operator rgb->rgbde setrgbcolor

TUB enregistrement: 20150701-TF83/TF83L0FP.PDF /.PS TUB matériel: code=th4d4a  
application pour la mesure des sorties sur offset, séparationcmykn6\* (CMYK)

voir fichiers similaires: <http://130.149.60.45/~farbmetrik/PF46/PF46.HTM>  
Informations techniques: <http://www.ps.bam.de> ou <http://130.149.60.45/~farbmetrik>

TUB enregistrement: 20130201-PF46/PF46L0NP.PDF /.PS  
application pour la mesure des sorties sur offset  
TUB matériel: code=thad4a



3-003031-L0

PF460-7N

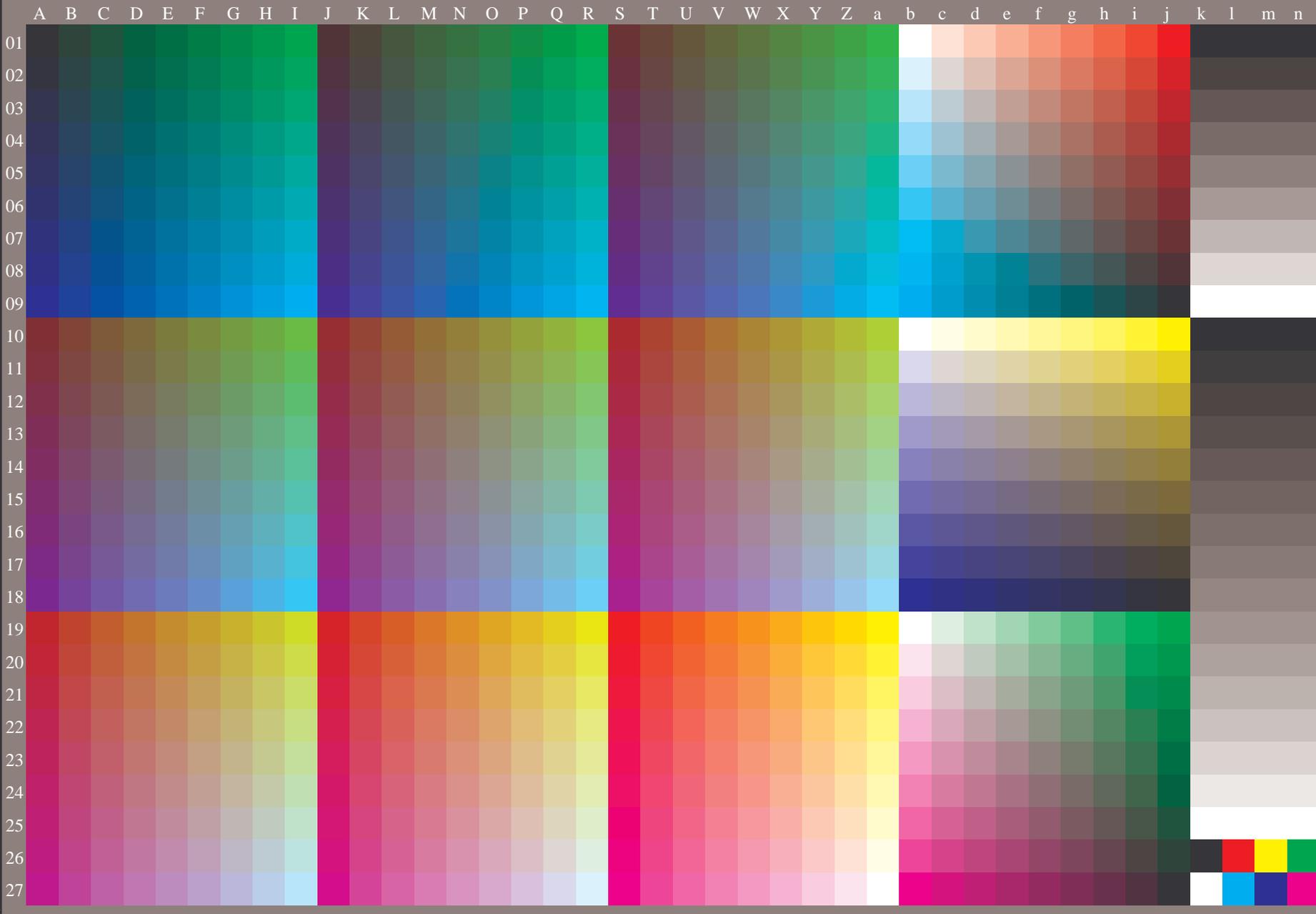
Test chart G with 1080 colours; 9 or 16 step colour scales; data in column (A-n): **rgb** (A\_j+k26\_n27), **000n** (k), **w** (l), **nnn0** (m), **www** (n) + **cmY0(all)**

graphique TUB-PF46; échantillon pour le test  
1080 couleur de norme; image informatique

entrée : **rgb/cmyk** -> **rgb/cmyk**  
sortie : aucun changement

voir fichiers similaires: <http://130.149.60.45/~farbmetrik/PF46/PF46.HTM>  
Informations techniques: <http://www.ps.bam.de> ou <http://130.149.60.45/~farbmetrik>

TUB enregistrement: 20130201-PF46/PF46L0NP.PDF /.PS  
application pour la mesure des sorties sur offset, séparation cmy0 (CMY0)  
TUB matériel: code=thad4a



3-003131-L0

PF460-70

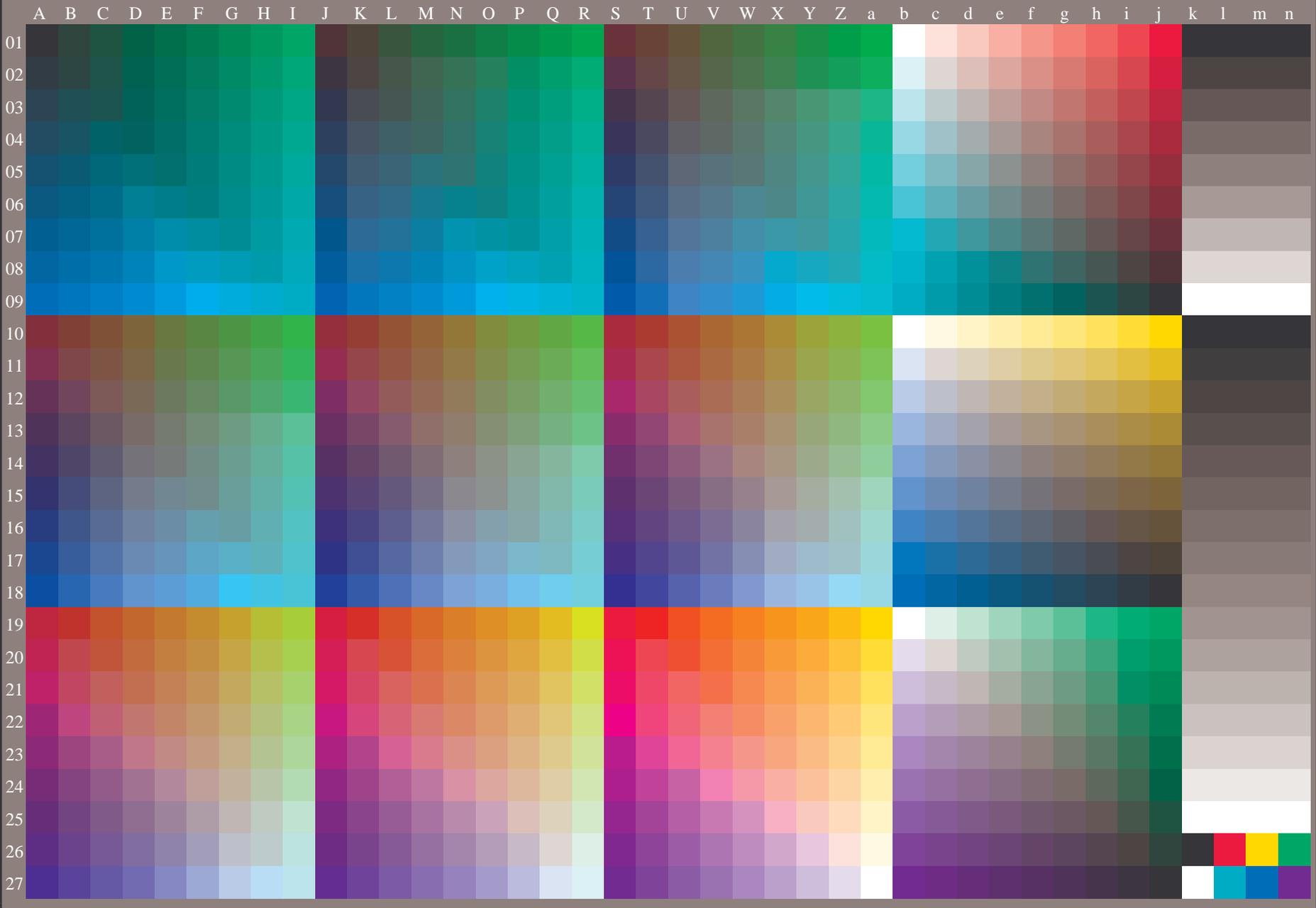
graphique TUB-PF46; échantillon pour le test  
1080 couleur de norme, 3D=0, de=0, cmy0

entrée : *rgb/cmyk* -> *rgb<sub>d</sub>*  
sortie : transférer à *cmy0<sub>d</sub>*

3-003131-F0

voir fichiers similaires: <http://130.149.60.45/~farbmetrik/PF46/PF46.HTM>  
Informations techniques: <http://www.ps.bam.de> ou <http://130.149.60.45/~farbmetrik>

TUB enregistrement: 20130201-PF46/PF46L0NP.PDF /.PS  
application pour la mesure des sorties sur offset, séparation cmy0 (CMY0)  
TUB matériel: code=thad4ta



3-013131-L0

PF460-71

graphique TUB-PF46; échantillon pour le test  
1080 couleur de norme, 3D=0, de=1, cmy0

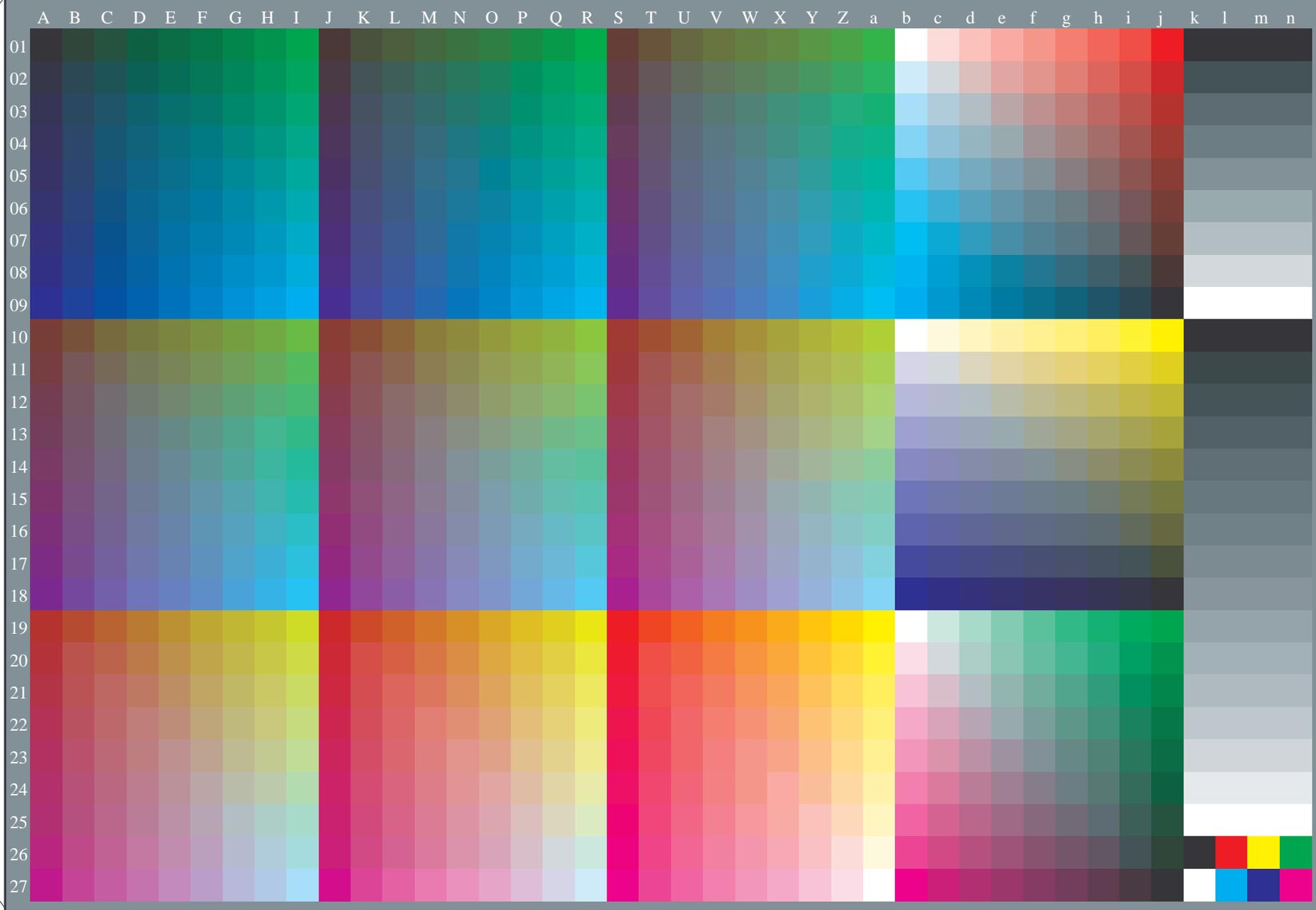
entrée : *rgb/cmyk* -> *rgb<sub>e</sub>*  
sortie : transférer à *cmy0<sub>e</sub>*

3-013131-F0



voir fichiers similaires: <http://130.149.60.45/~farbmetrik/PF46/PF46.PDF>  
Informations techniques: <http://www.ps.bam.de> ou <http://130.149.60.45/~farbmetrik>

TUB enregistrement: 20130201-PF46/PF46L0FP.PDF /.PS TUB matériel: code=th44ta  
application pour la mesure des sorties sur offset, séparation cmy0\* (CMY0)



3-103131-L0

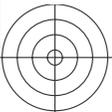
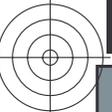
PF460-72

graphique TUB-PF46; échantillon pour le test  
1080 couleur de norme, 3D=1, de=0, cmy0\*

entrée : *rgb/cmyk* -> *rgb<sub>dd</sub>*  
sortie : linéarisation 3D selon *cmy0\*<sub>dd</sub>*

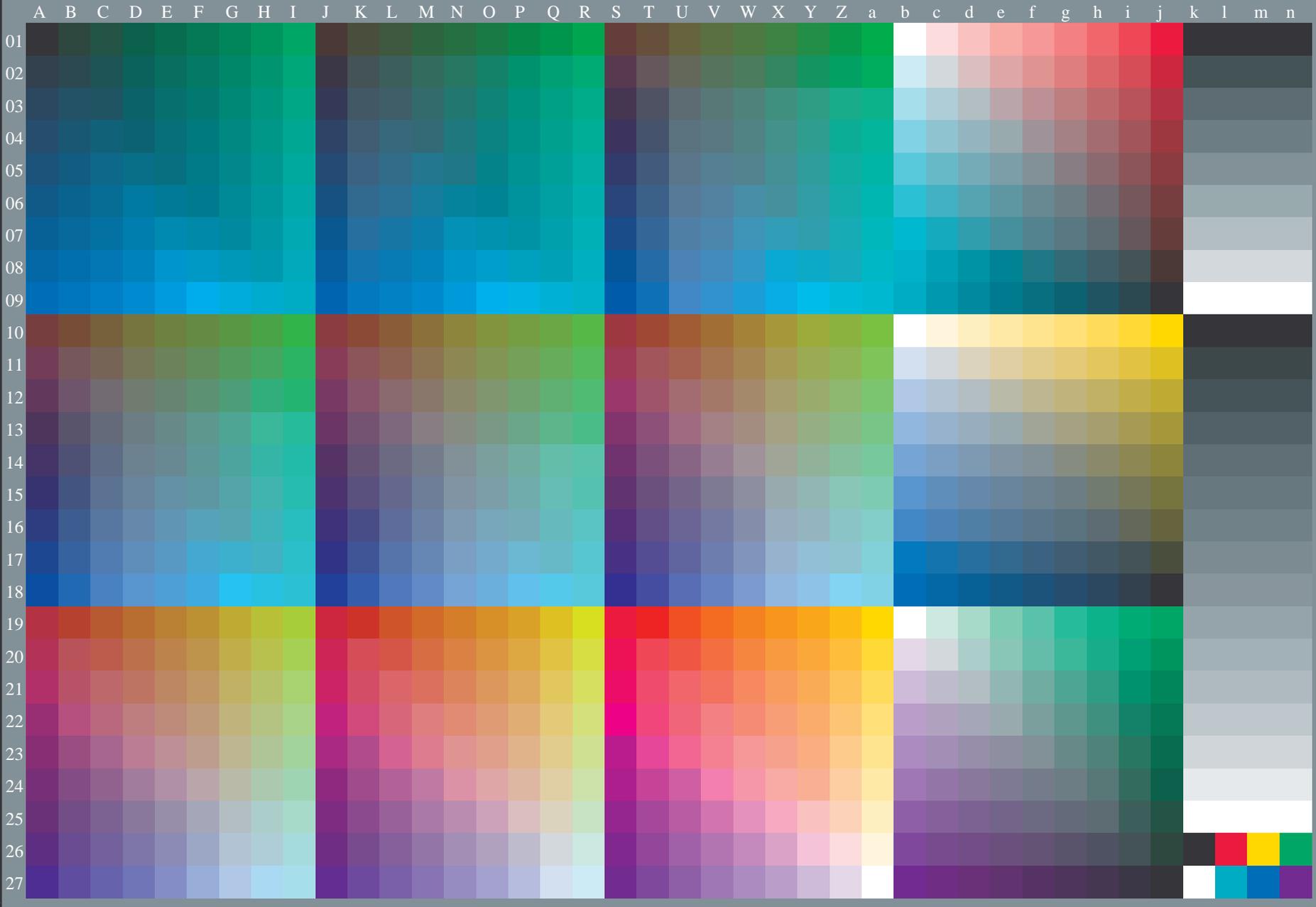
3-103131-F0

C M Y O L V



voir fichiers similaires: <http://130.149.60.45/~farbmetrik/PF46/PF46.HTM>  
Informations techniques: <http://www.ps.bam.de> ou <http://130.149.60.45/~farbmetrik>

TUB enregistrement: 20130201-PF46/PF46L0FP.PDF /.PS TUB matériel: code=thad4ta  
application pour la mesure des sorties sur offset, séparation cmy0\* (CMY0)



3-113131-L0

PF460-73

graphique TUB-PF46; échantillon pour le test  
1080 couleur de norme, 3D=1, de=1, cmy0\*

entrée : *rgb/cmyk* -> *rgb<sub>de</sub>*  
sortie : linéarisation 3D selon *cmy0\*<sub>de</sub>*

3-113131-F0

test no 2 pour un rendu de couleurs – couleurs métamères pour D65 et D50; impression offset (CMYK); rgb->rgb<sub>de</sub>

voir fichiers similaires: <http://130.149.60.45/~farbmetrik/PF23/PF23L0FP.PDF /.PS>;  
Informations techniques: <http://www.ps.bam.de> ou <http://130.149.60.45/~farbmetrik>

TUB enregistrement: 20130201-PF23/PF23L0FP.PDF /.PS TUB matériel: code=thad4ta  
application pour la mesure des sorties sur offset, séparation cmyk\* (CMYK)

series :  
métamère  
m  
D65

central  
Z  
D65/D50

métamère  
m  
D50

métamère  
m  
D65

gris  
g  
D65/D50

métamère  
m  
D50

Lab\*N0=17.7, 0.6, 0.6  
Lab\*W0=95.4, 1.3, -4.9  
Lab\*N=24.3, -5.6, -6.8  
Lab\*W=95.6, 1.4, -5.0

Lab\*N0=17.7, 0.6, 0.6  
Lab\*W0=95.4, 1.3, -4.9  
Lab\*N=17.7, 0.8, 0.6  
Lab\*W1=95.4, 0.8, -4.9

Lab\*N1=17.7, 0.8, 0.6  
Lab\*W1=95.4, 0.8, -4.9  
Lab\*N=24.0, -5.6, -7.3  
Lab\*W=95.5, 0.9, -5.0



3-113130-L0 PF230-73

test no 3 pour un rendu de couleurs – couleurs métamères pour A et P4000; impression offset (CMYK); *rgb*→*rgb*<sub>de</sub>

voir fichiers similaires: <http://130.149.60.45/~farbmetrik/PF33/PF33L0FP.PDF /.PS>  
Informations techniques: <http://www.ps.bam.de> ou <http://130.149.60.45/~farbmetrik>

TUB enregistrement: 20130201-PF33/PF33L0FP.PDF /.PS  
application pour la mesure des sorties sur offset, séparation *cmyn6\** (CMYK)  
TUB matériel: code=thad4ta

series :  
métamère  
m  
A

central  
z  
A/P4000

métamère  
m  
P4000

métamère  
m  
A

gris  
g  
A/P4000

métamère  
m  
P4000

*Lab*\*N0=17.8, 1.3, 0.7  
*Lab*\*W0=95.3, 0.3, -4.9  
*Lab*\*N=23.1, -3.5, -9.1  
*Lab*\*W=95.4, 0.3, -5.0

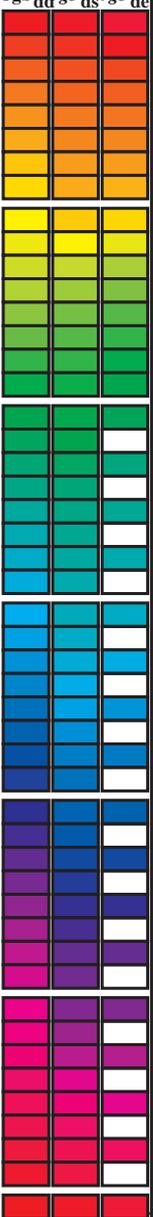
*Lab*\*N0=17.8, 1.3, 0.7  
*Lab*\*W0=95.3, 0.3, -4.9  
*Lab*\*N1=17.7, 1.0, 0.7  
*Lab*\*W1=95.3, 0.6, -5.0  
*Lab*\*N=23.7, -5.0, -8.0  
*Lab*\*W=95.5, 0.6, -5.1



3-113130-L0 PF330-73

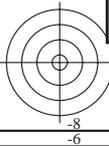
Couleur maximale dans le système colorimétrique : Offset standard print; separation cmyn6\*, D65 pour l'entrée et sortie; Six angles de teinte à 60 degrés couleurs standard RYGCMBs; hab,ds = 30.0, 90.0, 150.0, 210.0, 270.0, 330.0; Six angles de teinte des couleurs périphériques RYGCMBd: hab,d = 32.8, 97.2, 157.8, 236.2, 296.4, 353.3; Six angles de teinte des couleurs élémentaires RYGCMBc: hab,e = 25.5, 92.3, 162.2, 217.0, 271.7, 328.6

Table with 12 columns of colorimetric data (h,a,b,d, h,a,b,e, r,g,b\*, d,dx64M, LAB\*, ddx361M, r,g,b\*, ddx361M, LAB\*, ddx361M, r,g,b\*, dsx361M, LAB\*, dsx361M, r,g,b\*, dex361M, LAB\*, dex361M) and 12 rows of color patches (32.8, 40.4, 50.0, 61.1, 71.4, 81.7, 88.5, 93.6, 97.1, 100.3, 103.3, 108.3, 115.3, 122.4, 134.9, 144.6, 157.7, 163.7, 170.9, 181.0, 193.5, 205.9, 218.4, 227.3, 236.1, 240.3, 245.8, 252.5, 262.3, 271.7, 281.6, 290.3, 296.4, 306.7, 312.7, 326.7, 333.9, 339.6, 347.2, 350.2, 353.3, 356.5, 360.3, 365.8, 371.6, 378.2, 383.9, 388.6, 392.8).



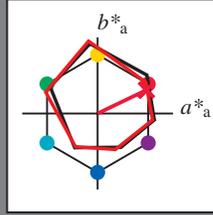
voir fichiers similaires: http://130.149.60.45/~farbmetrik/PF94/PF94.HTM informations techniques: http://www.ps.bam.de ou http://130.149.60.45/~farbmetrik

TUB enregistrement: 20130201 -PF94/PF94L0NP.PDF /.PS application pour la mesure des sorties sur offset, separation cmyn6 (CMYK) TUB matériel: code=rha4ra



Entrée et sortie: Système Offset Reflective ORS18a pour la teinte CIELAB relative  $h_{ab,a,rel} = h_{ab}/360 = 25/360 = 0.07$

Données de couleurs périphériques (d) ou élémentaires (e):  
 $HIC^*_e$   
code de teinte pour les couleurs de cette page:  
 $H^*_e = R00Y_e$   
triangle de luminosité  $T^*$



ORS20a; données CIELAB (a) adaptées

nom	$L^*=L^*_a$	$a^*_a$	$b^*_a$	$C^*_{ab,a}$	$h^*_{ab,a}$
$R_{e, Ma}$	47.6	64.9	30.9	71.9	25
$Y_{e, Ma}$	82.9	-3.5	87.8	87.9	92
$G_{e, Ma}$	52.4	-67.1	21.5	70.5	162
$C_{e, Ma}$	56.6	-39.7	-29.9	49.8	216
$B_{e, Ma}$	37.9	1.3	-45.4	45.4	271
$M_{e, Ma}$	34.8	49.2	-30.0	57.7	328
$N_{e, Ma}$	17.7	0.0	0.0	0.0	0
$W_{e, Ma}$	95.4	0.0	0.0	0.0	0
$R_{e, CIE}$	39.9	58.7	27.9	65.0	25
$Y_{e, CIE}$	81.2	-2.8	71.5	71.6	92
$G_{e, CIE}$	52.2	-42.4	13.6	44.5	162
$B_{e, CIE}$	30.5	1.4	-46.4	46.4	271

Les données de couleur maximale (Ma):

$LabCh^*_{e, Ma}: 47 \ 64 \ 30 \ 71 \ 25$

$HIC^*_{e, Ma}: R00Y_{100_{100}_e}$

$rgbic^*_{e, Ma}$ :

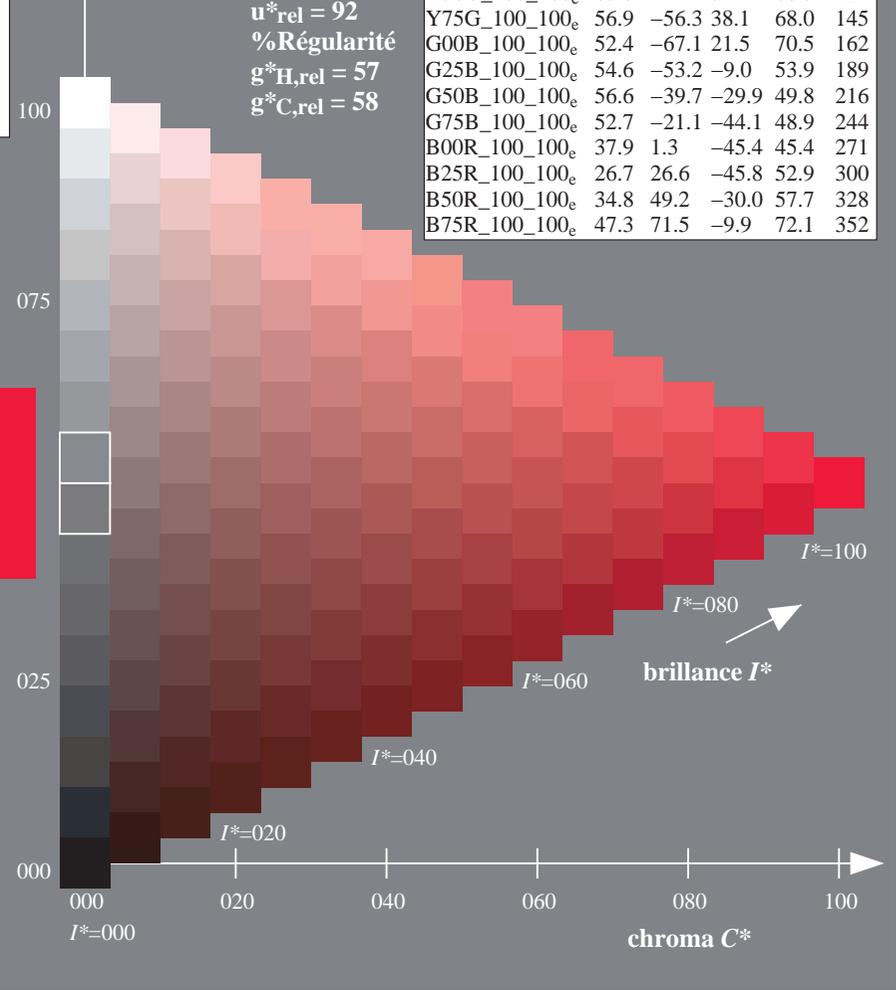
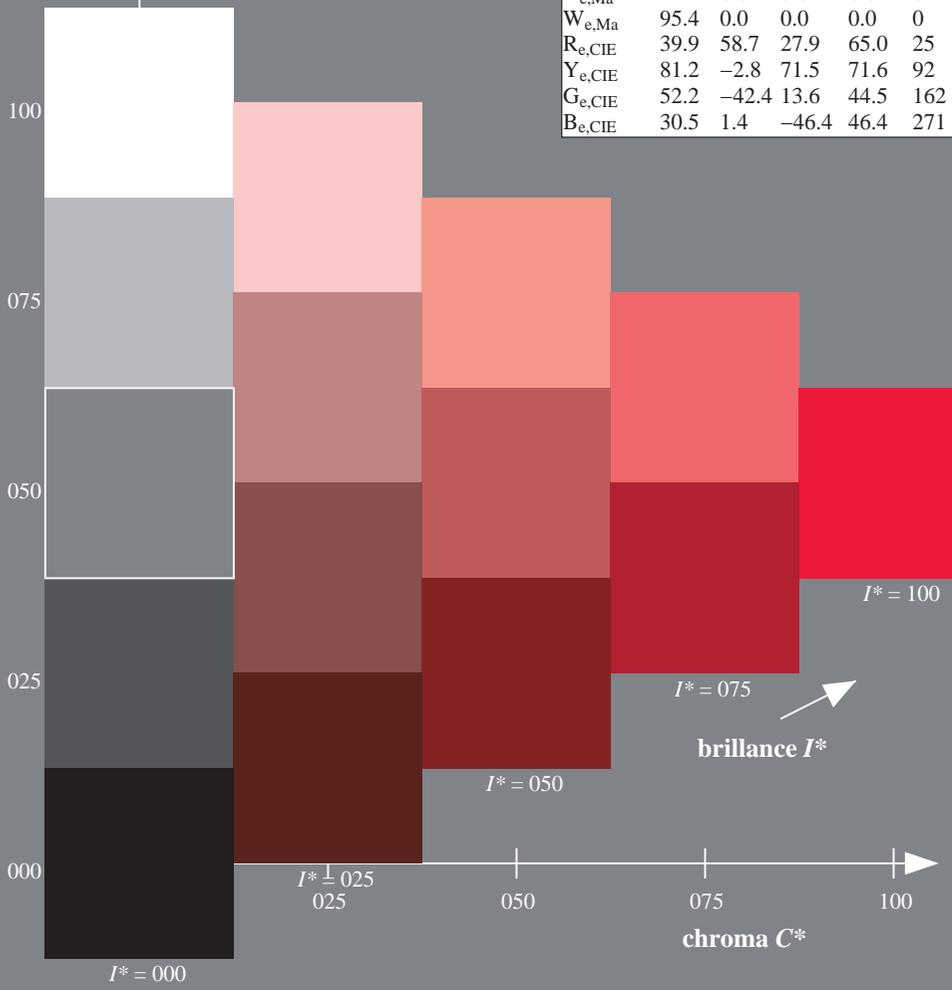
1.0 0.0 0.2 1.0 1.0

triangle de luminosité  $T^*$

%Gamme  
 $u^*_{rel} = 92$   
%Régularité  
 $g^*_{H, rel} = 57$   
 $g^*_{C, rel} = 58$

ORS20a; données CIELAB (a) adaptées

$H^*_e$	$L^*=L^*_a$	$a^*_a$	$b^*_a$	$C^*_{ab,a}$	$h^*_{ab,a}$
$R00Y_{100_{100}_e}$	47.6	64.9	30.9	71.9	25
$R25Y_{100_{100}_e}$	51.5	54.2	47.2	71.9	41
$R50Y_{100_{100}_e}$	60.3	35.6	59.0	68.9	58
$R75Y_{100_{100}_e}$	70.4	17.0	72.2	74.1	76
$Y00G_{100_{100}_e}$	82.9	-3.5	87.8	87.9	92
$Y25G_{100_{100}_e}$	76.9	-25.5	75.9	80.1	108
$Y50G_{100_{100}_e}$	65.8	-41.4	54.4	68.3	127
$Y75G_{100_{100}_e}$	56.9	-56.3	38.1	68.0	145
$G00B_{100_{100}_e}$	52.4	-67.1	21.5	70.5	162
$G25B_{100_{100}_e}$	54.6	-53.2	-9.0	53.9	189
$G50B_{100_{100}_e}$	56.6	-39.7	-29.9	49.8	216
$G75B_{100_{100}_e}$	52.7	-21.1	-44.1	48.9	244
$B00R_{100_{100}_e}$	37.9	1.3	-45.4	45.4	271
$B25R_{100_{100}_e}$	26.7	26.6	-45.8	52.9	300
$B50R_{100_{100}_e}$	34.8	49.2	-30.0	57.7	328
$B75R_{100_{100}_e}$	47.3	71.5	-9.9	72.1	352



voir fichiers similaires: <http://130.149.60.45/~farbmetrik/PF93/PF93L0FP.PDF> / .PS  
Informations techniques: <http://www.ps.bam.de> ou <http://130.149.60.45/~farbmetrik>

TUB enregistrement: 20130201-PF93/PF93L0FP.PDF /.PS  
application pour la mesure des sorties sur offset, séparation cmy $n_6^*$  (CMYK)  
TUB matériel: code=thadta