

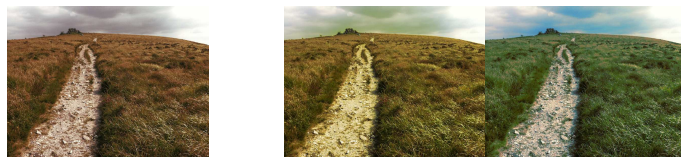
CES PAGES SONT DESTINÉES À FACILITER LA PRISE DE NOTES. ELLES SONT PRODUITES AUTOMATIQUEMENT À PARTIR DU SOURCE L^AT_EX/BEAMER DU DIAPORAMA SERVANT DE SUPPORT DE COURS. LA PRÉSENTATION ET LA MISE EN PAGE SONT PAR CONSÉQUENT APPROXIMATIVES.

Partie C — thème 3

Traitements chromatiques

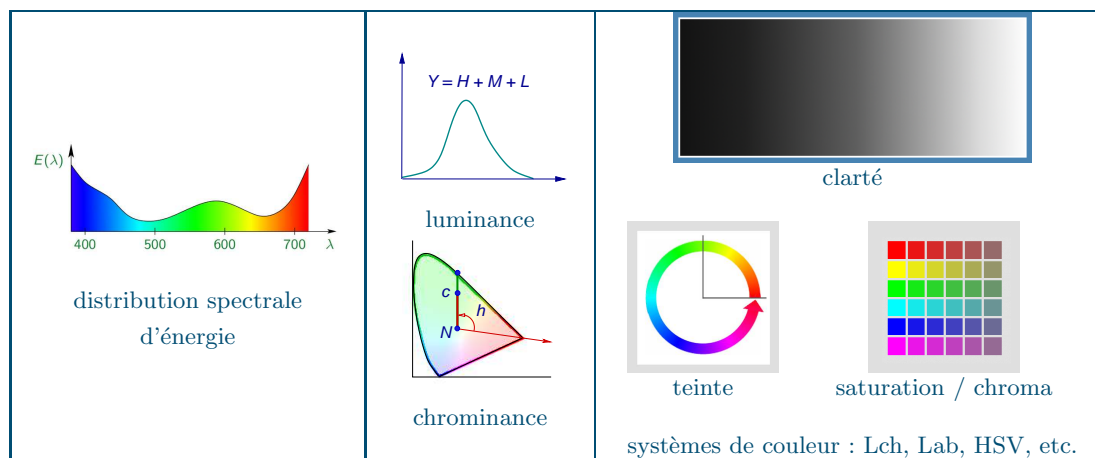
Caractéristiques psychovisuelles de chrominance : teinte, saturation

- critères d'appréciation du résultat principalement subjectifs
- dépendent de l'objectif recherché

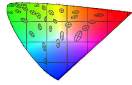
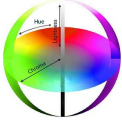
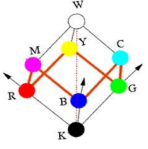
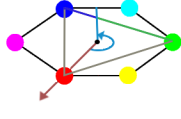


1 Expression des caractéristiques chromatiques (rappel A.3)

— séparation luminance / chrominance



— caractéristiques chromatiques : approche colorimétrique *vs* approche empirique

			teinte	saturation / chroma	
Lab			$\text{atan2}(b, a)$	$\sqrt{a^2+b^2}$	Lch
RGB			approximation par la corde	$\frac{\max(r,g,b) - \min(r,g,b)}{\max(r,g,b)}$	HSV HSL

2 Désaturation d'une image couleur

— projection de $[0..M] \times [0..M] \times [0..M]$ dans $[0..M]$

$$c = (r, g, b) \longrightarrow (n_c, n_c, n_c) \text{ avec } n_c = n(r, g, b)$$

— différentes possibilités pour choisir $n(r, g, b)$:

1. modèle **perceptuel empirique** : canal V de HSV ou L de HLS

$$\text{valeur} : n(r, g, b) = \max(r, g, b)$$

$$\text{luminosité} : n(r, g, b) = \frac{\min(r, g, b) + \max(r, g, b)}{2}$$

2. **moyenne arithmétique**

$$n(r, g, b) = \frac{r + g + b}{3}$$

3. **luminance** (moyenne colorimétrique) : Y de $CIE - XYZ$:

$$n(r, g, b) = Y_R r + Y_G g + Y_B b$$

— généralement REC 709/D65 :

$$\{Y_R, Y_G, Y_B\} \simeq \{0.213, 0.715, 0.072\}$$



1 : V 2 : L 3 : *moyenne* 4 : Y

— pas de méthode idéale

— la méthode 4 est la plus proche de la perception visuelle

— mais des **teintes distinctes** de même luminosité peuvent devenir **indistingables**

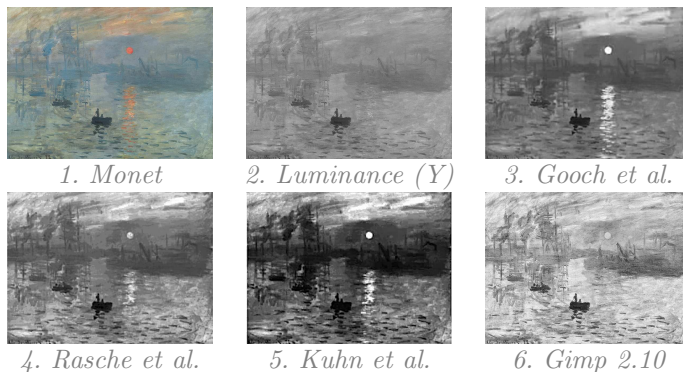
Exemple



– canal V du modèle HSV – canal L du modèle HLS – moyenne des coordonnées RGB – canal Y du modèle $CIEXYZ$

— différentes stratégies pour essayer de préserver les différences de teintes

- optimisation d'un objectif (maximiser la distance visuelle perçue) [Gooch, Olsen, Tumblin. 2005], [Rasche, Geist, Westall. 2005]
- équilibrage d'un système de particules (masse/ressort) [Kuhn, Oliveira, Fernandes. 2008]
- calcul d'une luminosité relative sur un voisinage [Gimp 2.10]



3 Modification des caractéristiques chromatiques

3.1 Modification de la teinte

Rotation de la teinte

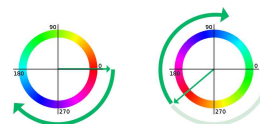
— empirique : HSV

$$(r, g, b) \rightarrow (h, s, v) \rightarrow (h', s, v) \rightarrow (r', g', b')$$

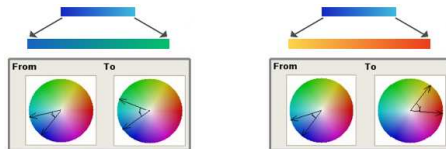
— colorimétrique : CIE-Lch

$$(r, g, b) \rightarrow (l, c, h) \rightarrow (l, c, h') \rightarrow (r', g', b')$$

— exemple : $h' = h - \frac{3\pi}{4} \pmod{2\pi}$



— préservation de l'antialiasing sur les frontières

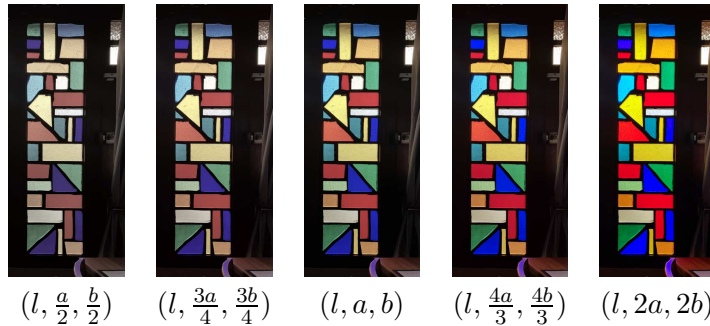


3.2 Modification de la saturation

- utilisation d'un modèle avec composante de saturation
 - HLS (ou HSV) : $(r, g, b) \rightarrow (h, l, s) \rightarrow (h, l, \alpha \times s) \rightarrow (r', g', b')$
 - CIE-Lch : $(r, g, b) \rightarrow (l, c, h) \rightarrow (l, \alpha \times c, h) \rightarrow (r', g', b')$

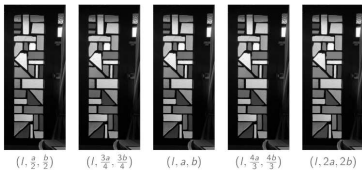
- utilisation du modèle Lab :

$$(L, a, b) \rightarrow (L, k \times a, k \times b)$$



► utilisation du modèle Lab :

$$(L, a, b) \rightarrow (L, k \times a, k \times b)$$



<> 2/32

- modification de la saturation dans l'espace RGB
 - saturation / désaturation d'une couleur : $c = (r, g, b)$
 - conversion de c en niveau de gris : $c_n = (n, n, n)$

$$n = Y_R r + Y_G g + Y_B b$$

- interpolation entre c et c_n

$$c' = k \times c + (1 - k) \times c_n$$

- par exemple pour le canal r :

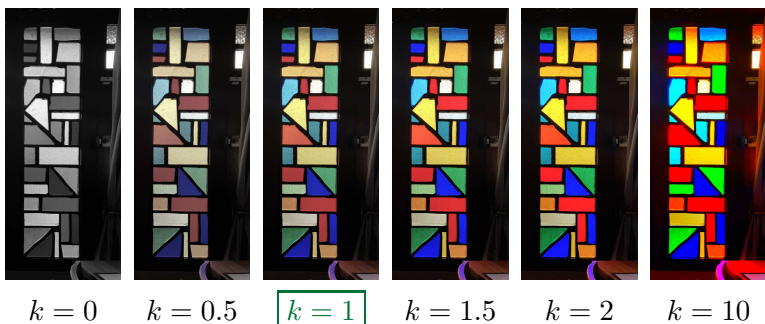
$$\begin{aligned} r' &= kr + (1 - k)(Y_R r + Y_G g + Y_B b) \\ &= \left((1 - k)Y_R + k \right) r + (1 - k)Y_G g + (1 - k)Y_B b \end{aligned}$$

$$\begin{pmatrix} (1 - k)Y_R + k & (1 - k)Y_G & (1 - k)Y_B \\ (1 - k)Y_R & (1 - k)Y_G + k & (1 - k)Y_B \\ (1 - k)Y_R & (1 - k)Y_G & (1 - k)Y_B + k \end{pmatrix} \begin{pmatrix} r \\ g \\ b \end{pmatrix}$$

- comportement de la transformation selon les valeurs de k :
 - $k = 0$: désaturation complète ($c' = c_n$)
 - $0 < k < 1$: désaturation progressive
 - $k = 1$: couleur inchangée ($c' = c$)

— $k > 1$: saturation (troncature si dépassement)

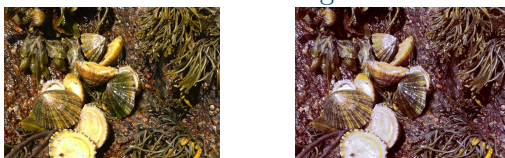
— exemples :



4 Équilibrage des canaux R, G et B

4.1 Problématique

— modification des poids respectifs des canaux d'une image RGB



— modification de la couleur dominante

— correction de la source lumineuse (« balance des blancs »)

— ...

4.2 Équilibrage par sélection d'un point neutre

— sélection d'un pixel \bar{p} de couleur $(\bar{r}, \bar{g}, \bar{b})$
comme **pixel neutre** :

$$(\bar{r}, \bar{g}, \bar{b}) \rightarrow (\bar{n}, \bar{n}, \bar{n})$$

avec

$$\bar{n} = Y_R \bar{r} + Y_G \bar{g} + Y_B \bar{b}$$

— détermination des valeurs γ_r , γ_g et γ_b qui neutralisent \bar{p}

$$\bar{r}^{\frac{1}{\gamma_r}} = \bar{g}^{\frac{1}{\gamma_g}} = \bar{b}^{\frac{1}{\gamma_b}} = \bar{n}$$

— application d'une fonction puissance avec le paramètre calculé sur chaque canal



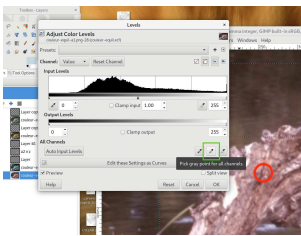
$$(r, g, b) \rightarrow (r^{\frac{1}{\gamma_r}}, g^{\frac{1}{\gamma_g}}, b^{\frac{1}{\gamma_b}})$$

- trouver y tel que $x^y = n$
- rappel : $x^y = e^{y \log x}$

$$\begin{aligned}
 e^{y \log x} = n &\Leftrightarrow \log(e^{y \log x}) = \log n \\
 &\Leftrightarrow y \log x = \log n \\
 &\Leftrightarrow \gamma = \frac{1}{y} = \frac{\log x}{\log n}
 \end{aligned}$$

- algorithme d'équilibrage par rapport à un pixel \bar{p} :
 - soit $(\bar{r}, \bar{g}, \bar{b})$ la couleur du pixel \bar{p}
 - $n = Y_R \bar{r} + Y_G \bar{g} + Y_B \bar{b}$
 - appliquer à toute l'image les fonctions corrections en loi de puissance :

$$\left\{ \begin{array}{l} r' = r^{\frac{1}{\gamma_r}} \\ g' = r^{\frac{1}{\gamma_g}} \\ b' = r^{\frac{1}{\gamma_b}} \end{array} \right. \quad \text{avec} \quad \begin{array}{l} \boxed{\gamma_r = \frac{\log \bar{r}}{\log n}} \\ \boxed{\gamma_g = \frac{\log \bar{g}}{\log n}} \\ \boxed{\gamma_b = \frac{\log \bar{b}}{\log n}} \end{array}$$



5 Rehaussement de contraste d'une image couleur

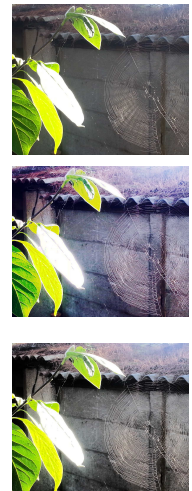
5.1 Extension de l'égalisation d'histogramme monochrome

- mise en œuvre **marginale** RGB de l'égalisation d'histogramme : pour chaque canal
 - construction de l'histogramme cumulé normalisé
 - application de la transformation

$$(r, g, b) \mapsto (EH_I^R(r), EH_I^G(g), EH_I^B(b))$$

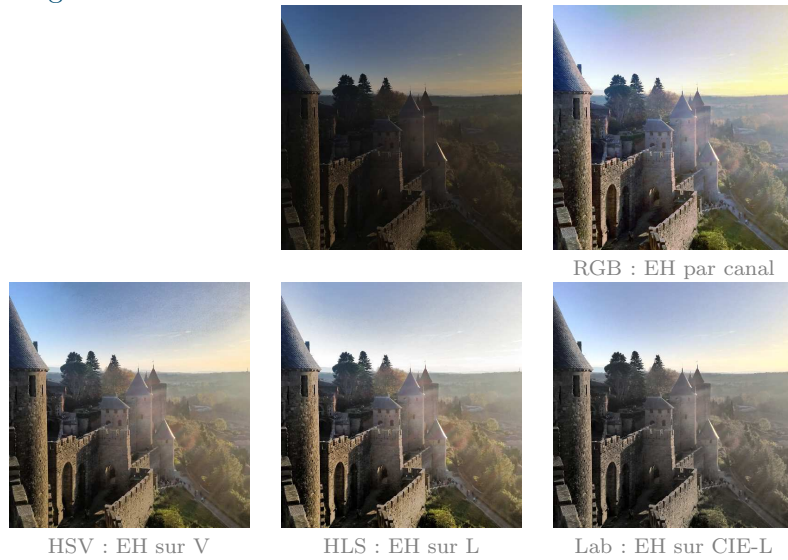
- modifie l'équilibre des canaux
- *alternative* : mise en œuvre dans sur un canal achromatique, par exemple H de HSV
 - respecte mieux l'équilibre des canaux

$$(r, g, b) \mapsto (h, s, v) \mapsto (h, s, EH_I^V(v)) \mapsto (r', g', b',)$$

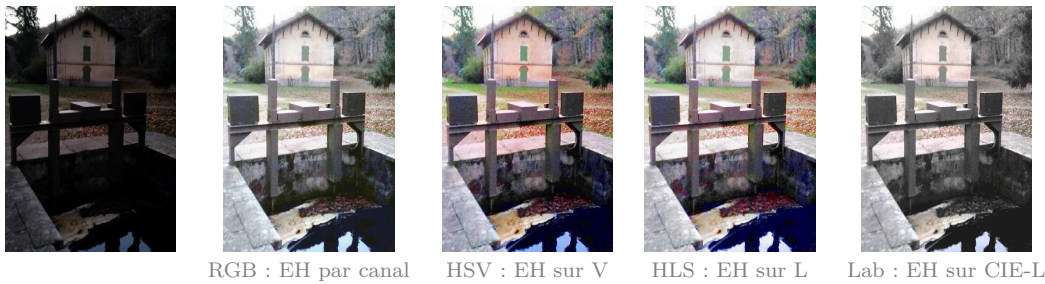


Résultats instables

- dépendants de l'espace de couleurs utilisé
- dépendants des caractéristiques de chaque image



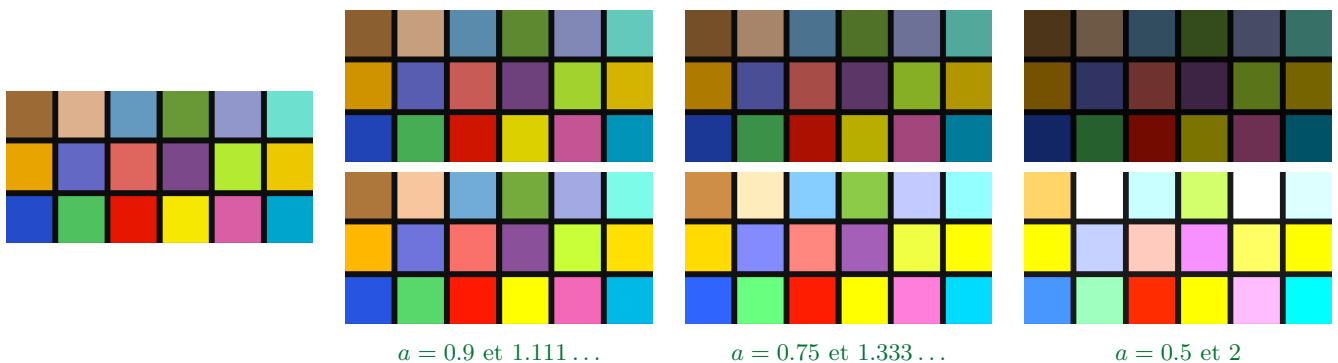
- autre exemple
 - effets de saturation ou désaturation
 - distorsions globales ou locales



5.2 Recherche d'une solution vectorielle

- propriété préservant la corrélation entre les canaux
- solution simple, multiplier par un même facteur
- aux troncatures près (valeurs sortant de l'intervalle $[0..I_{max}]$), l'équilibre chromatique est préservé

$$\forall p, \begin{pmatrix} r'_p \\ g'_p \\ b'_p \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a_p \times r_p \\ a_p \times g_p \\ a_p \times b_p \end{pmatrix}$$



- couleurs modifiées selon une valeur de a en progression croissante pour chaque bande verticale



— application à l'égalisation d'histogramme :

1. désaturation de l'image à rehausser : $I \longrightarrow I_N$

2. construction de EH_{I_N} , l'égalisation d'histogramme de I_N

$$(I'_N = EH_{I_N}(I_N))$$

3. pour tout point p on note k_p le coefficient t.q. $I'_N(p) = k_p \times I_N(p)$

$$\forall p, k_p = \frac{EH(I_N(p))}{I_N(p)}$$

4. pour chaque point p de couleur (r_p, g_p, b_p) on applique k_p sur chaque canal :

— $n_p = I_n(p)$ et $n'_p = EH_{I_N}(n_p)$

— $k_p = \frac{n'_p}{n_p}$

— $m_p = \max(r_p, g_p, b_p)$ (gestion des débordements)

— si $(k_p m_p > 255)$ alors $k_p = \frac{255}{m_p}$

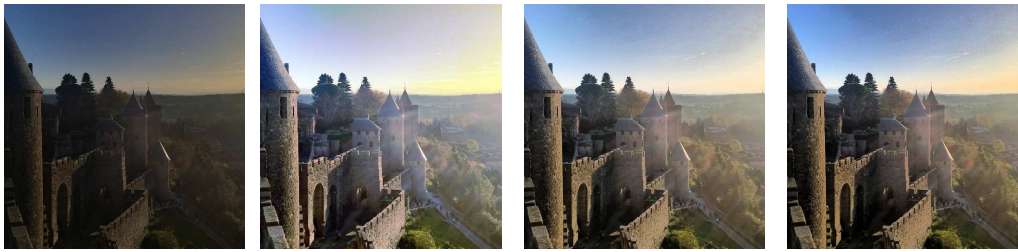
— $p' = (k_p r_p, k_p g_p, k_p b_p)$

— exemples



— exemples





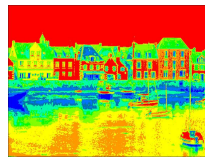
EH marginale RGB *EH marginale V (HSV)* *EH vectorielle*



6 Colorisation

6.1 Problématique

- pseudo-couleurs : $[0, M] \rightarrow [0, M]^3$
- fausses couleurs : $[0, M] \times \dots \times [0, M] \rightarrow [0, M]^3$

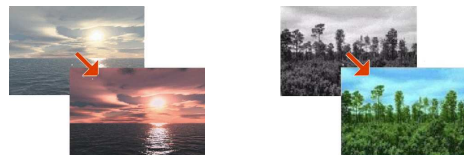


pseudo-couleurs



fausses couleurs

- transfert de couleurs



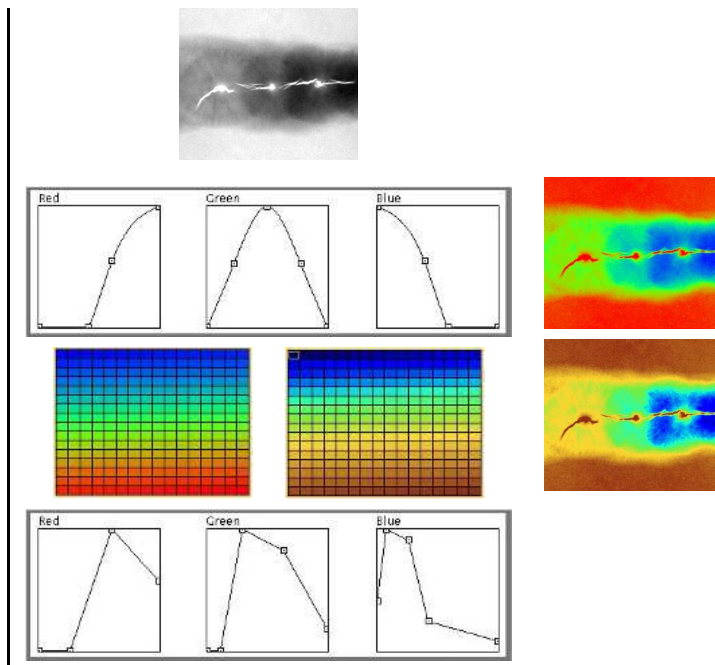
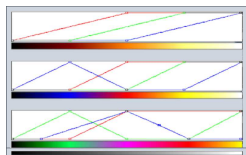
6.2 Visualisation en pseudo-couleur d'image monochrome

- niveau de gris \rightarrow couleur : $[0, M] \rightarrow [0, M] \times [0, M] \times [0, M]$



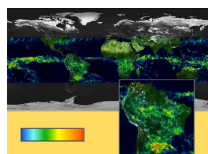
- la vision humaine distingue dans une image
 - une trentaine de niveaux de gris
 - plusieurs centaines de couleurs
- accentuation du contraste inter-régions au détriment du *gestalt*
- transformations ponctuelles définies par canal

exemples de transformations utiles :



— palette dédiée : table d'indirection de couleur (LUT)

0	: c_0
1	: c_1
2	: c_2
⋮	
$N - 2$: c_{N-2}
$N - 1$: c_{N-1}



(données pluviométriques)

6.3 Visualisation en fausses couleurs d'images multispectrales

- acquisition sur différentes bandes du spectre électromagnétique
- combinaison RGB de bandes spectrales

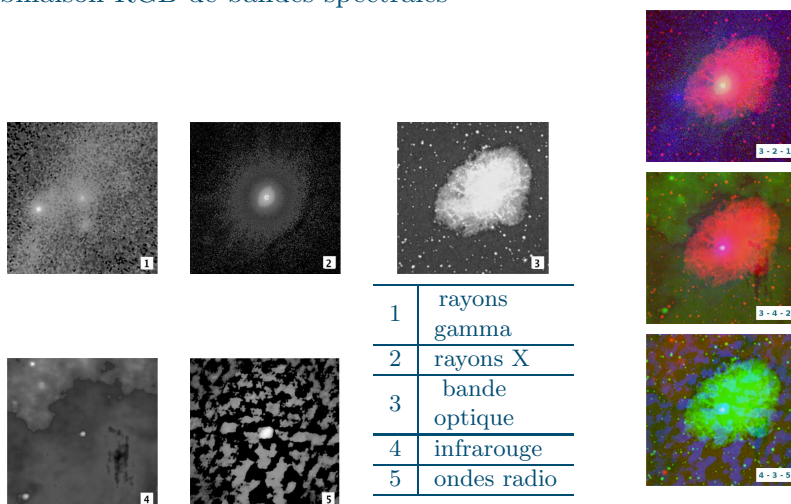
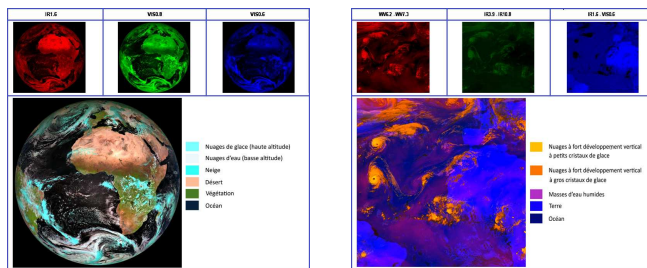


Image du Pulsar du Crabe – Gonzalez & Wood, DIP 4^{ed} © NASA

Utilisation de palettes dédiées

- capteur Seviri du satellite géostationnaire Météosat MSG (ESA)

- images de l'hémisphère terrestre toutes les trente minutes (météorologie)
- 12 bandes spectrales du visible à l'infrarouge thermique
- palettes dédiées à l'interprétation des processus atmosphériques



— télescope spatial Hubble (observation spatiale)

- palette Hubble : filtres sélectionnant des bandes correspondant aux émissions des principaux éléments chimiques de nébuleuses
- exemple : caméra ACS (2007) –spectre UV / proche infrarouge (image panoramique 29566×14321)

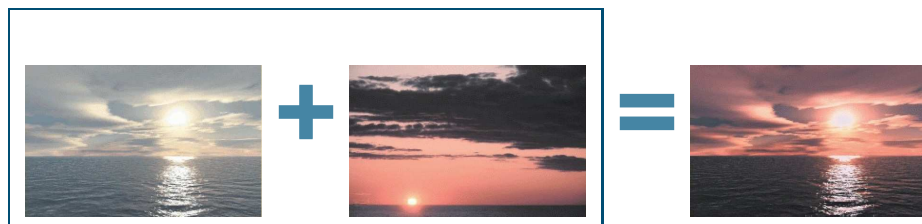


Nébuleuse de la Carène ©NASA/ESA/UCB/HHT (www.flashespace.com/icones/avril07/carina.jpg)

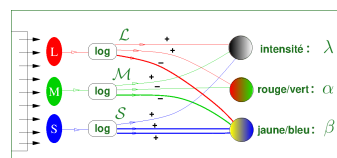


6.4 Transfert de couleurs entre deux images couleurs

- transfert des couleurs d'une image de référence I_{ref} sur une image I



- utilisation d'un espace de couleur noté $\lambda\alpha\beta$ reproduisant les caractéristiques du SVH
 - courbes de sensibilité de la rétine
 - correction logarithmique
 - traitement des cellules ganglionnaires
- transport sur I' des paramètres statistiques des axes λ , α et β de I_{ref}



- étape 1 : changement d'espace de couleurs

— espace (R, G, B) de référence \rightarrow espace (L, M, S) des **cônes**

$$\begin{pmatrix} L \\ M \\ S \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0.3811 & 0.5783 & 0.0402 \\ 0.1967 & 0.7244 & 0.0782 \\ 0.0241 & 0.1288 & 0.8444 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} R \\ G \\ B \end{pmatrix}$$

— transformation **logarithmique** : $(L, M, S) \rightarrow (\mathcal{L}, \mathcal{M}, \mathcal{S})$

$$\begin{aligned} \mathcal{L} &= \log L \\ \mathcal{M} &= \log M \\ \mathcal{S} &= \log S \end{aligned}$$

— **décorrélation** (axes achromatique, opposition jaune/bleu, opposition rouge/vert)

$$\begin{pmatrix} \lambda \\ \alpha \\ \beta \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{1}{\sqrt{3}} & \frac{1}{\sqrt{3}} & \frac{1}{\sqrt{3}} \\ \frac{1}{\sqrt{6}} & \frac{1}{\sqrt{6}} & -\frac{2}{\sqrt{6}} \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & -\frac{1}{\sqrt{2}} & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \mathcal{L} \\ \mathcal{M} \\ \mathcal{S} \end{pmatrix}$$

– étape 2 : transferts des couleurs de I_{ref}

— pour **chaque canal**, successivement λ , α et β

— calcul des paramètres statistiques de I_{ref}

$$\begin{aligned} \text{moyenne} & : \mu_{ref} \\ \text{écart type} & : \sigma_{ref} \end{aligned}$$

— calcul des paramètres statistiques de l

$$\begin{aligned} \text{moyenne} & : \mu \\ \text{écart type} & : \sigma \end{aligned}$$

— **centrage** et **normalisation** des valeurs du canal de I

$$(x - \mu) \frac{1}{\sigma}$$

— application des caractéristiques de I_{ref}

— **dénormalisation** (multiplication par σ_{ref})

— **décentrage** (ajout de μ_{ref})

$$x' = (x - \mu) \frac{\sigma_{ref}}{\sigma} + \mu_{ref}$$

– étape 3 : retour dans l'espace (R, G, B)

— $(\lambda, \alpha, \beta) \rightarrow (\mathcal{L}, \mathcal{M}, \mathcal{S})$

$$\begin{pmatrix} \mathcal{L} \\ \mathcal{M} \\ \mathcal{S} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{\sqrt{3}}{3} & \frac{\sqrt{6}}{6} & \frac{\sqrt{2}}{2} \\ \frac{\sqrt{3}}{3} & \frac{\sqrt{6}}{6} & -\frac{\sqrt{2}}{2} \\ \frac{\sqrt{3}}{3} & -2\frac{\sqrt{6}}{6} & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \lambda \\ \alpha \\ \beta \end{pmatrix}$$

— **relinéarisation** des données

$$\begin{aligned} L &= \exp(\mathcal{L}) \\ M &= \exp(\mathcal{M}) \\ S &= \exp(\mathcal{S}) \end{aligned}$$

— $(L, M, S) \rightarrow (R, G, B)$

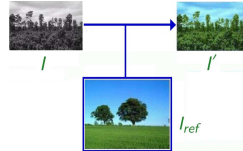
$$\begin{pmatrix} R \\ G \\ B \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 4.4679 & -3.5873 & 0.1193 \\ -1.2186 & 2.3809 & -0.1624 \\ 0.0497 & -0.2439 & 1.2045 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} L \\ M \\ S \end{pmatrix}$$



Reinhard, Ashikhmin, Gooch and Shirley, 2001

6.5 Colorisation d'images monochromes

- application du modèle de transfert
 - I : image **monochrome** à coloriser
 - I_{ref} : image **couleur** de référence



- utilisation de l'espace $\lambda\alpha\beta$
- recherche de similarités entre l'image monochrome I et le canal λ de I_{ref}
- transport des composantes chromatiques (α et β) sur les points similaires

- fonction de **similarité** : écart de luminance et de contraste

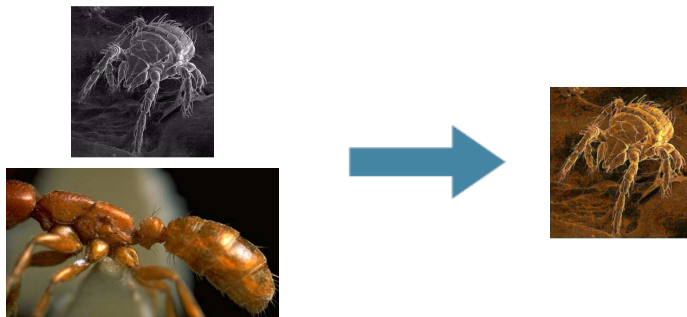
$$E(p_1, p_2) = |\Lambda(p_1) - \Lambda(p_2)| + |\sigma(p_1) - \sigma(p_2)|$$

- luminance $\Lambda(p)$: canal λ de I_{ref} et canal (**monochrome**) de I
- contraste $\sigma(p)$: **écart type de luminance** calculé sur un voisinage de p (par exemple 5×5)
- pour tout pixel p de I
 - chercher p_0 de I_{ref} minimisant $E(p, p_0)$
 - affecter à p la **chrominance** de p_0

$$\begin{aligned} \alpha_p &= \alpha_0 \\ \beta_p &= \beta_0 \end{aligned}$$

Remarque : pour accélérer l'algorithme :

- sélectionner aléatoirement un **échantillonnage** de pixels de référence
- **précalculer** les critères statistiques



ANNEXE A

Colorisation d'images monochromes par appariement de régions

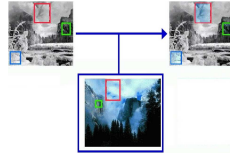
Colorisation d'images monochromes par appariement de régions

- sélection manuelle de paires de régions $r_i, r_{ref,i}$:

$$r_i \subset I$$

$$r_{ref,i} \subset I_{ref}$$

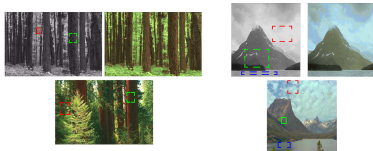
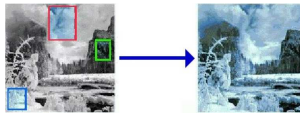
- colorisation de chaque région r_i par référence à $r_{ref,i}$



- construction d'un échantillonnage des points colorisés de I
- colorisation des points restants par référence aux échantillons
- similarité basé sur un écart de luminosité moyen entre points à coloriser et points de l'échantillonnage de référence (calculé sur un voisinage des pixels)

$$E(p, p_{ref}) = \sum_{\vec{q} \in V} \left(\Lambda(p + \vec{q}) - \Lambda(p_{ref} + \vec{q}) \right)^2$$

- V : voisinage défini par un ensemble de translations \vec{q} autour d'un point p

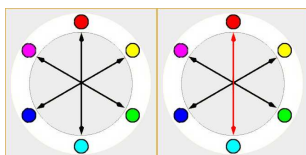
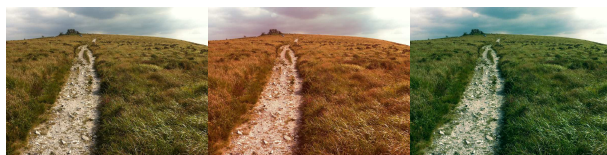


ANNEXE B

Rééquilibrage des canaux de couleur au moyen des axes d'opposition
RGB/CMY

Utilisation des axes d'opposition RGB/CMY

- axes d'opposition couleurs primaires / couleurs complémentaires
- décalage des couleurs selon chaque axes
 - cyan / rouge
 - magenta / vert
 - jaune / bleu

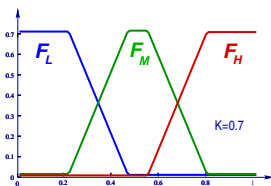


- méthode implémentée dans Gimp (version ≥ 2.0)
pour chaque canal $c = r, g, b$ (normalisés sur $[0, 1]$), un triplet de coefficients $\alpha_L^c, \alpha_M^c, \alpha_H^c$ (variant sur $[-1, 1]$) paramètre le **décalage** entre c et sa complémentaire, en **fonction de la luminosité** l_c de c (faible, moyenne ou élevée).

$$c' = \tau_{0,1} \left(c + \alpha_L^c * F_L(l_c) + \alpha_M^c * F_M(l_c) + \alpha_H^c * F_H(l_c) \right)$$

$$\forall x \in [0, 1], \quad F_L(x) + F_M(x) + F_H(x) = K$$

- fonctions de pondération par la luminosité :



$$F_L(x) = K \times \tau_{0,1} \left(-4 \left(x - \frac{1}{3} \right) + \frac{1}{2} \right)$$

$$F_H(x) = K \times \tau_{0,1} \left(4 \left(x - \frac{2}{3} \right) + \frac{1}{2} \right)$$

$$F_M(x) = K \times \tau_{0,1} \left(4 \left(x - \frac{1}{3} \right) + \frac{1}{2} \right) \times \tau_{0,1} \left(-4 \left(x - \frac{2}{3} \right) + \frac{1}{2} \right)$$

Exemples :

