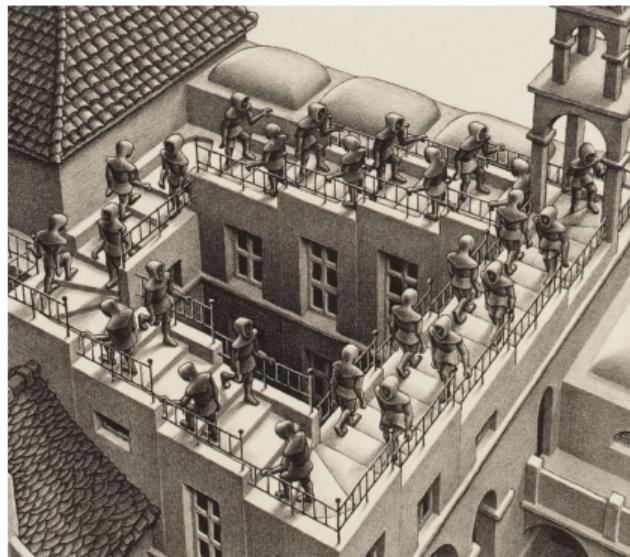


Partie C — thème 5

Traitements basés sur la perception

- ▶ rôle du cortex visuel
- ▶ adaptation chromatique et constance de couleur
- ▶ modèle et filtrage retinex

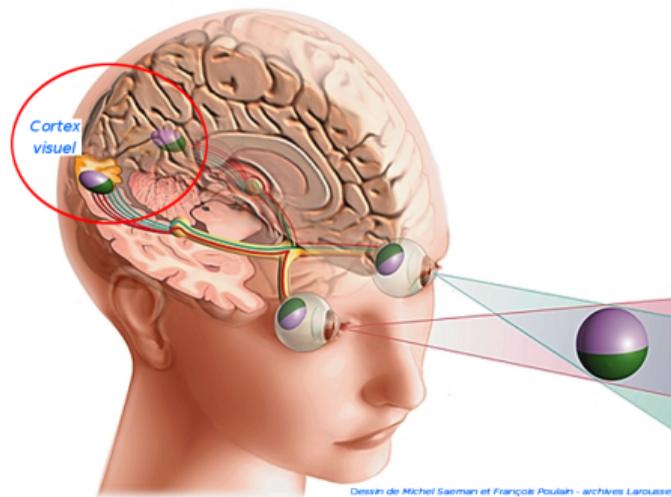


Escher (1960), d'après l'Escalier de Penrose (1958)

1. Traitement cérébral de l'information visuelle

1.1. Le rôle du cortex visuel

- ▶ **rétine** : mesure/codage du flux d'**information lumineuse**



- cônes :

$$E(\lambda) \longrightarrow \{S, M, L\}$$

- cellules ganglionnaires (modèle de Hering) :

$$\{S, M, L\} \longrightarrow \{BW, GR, BY\}$$

- cortex :

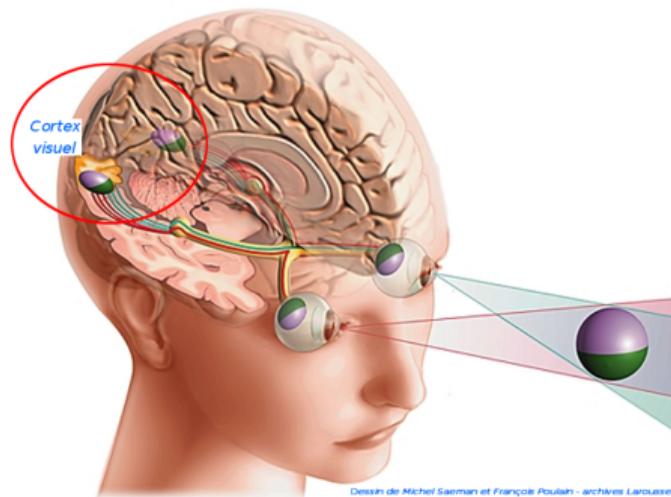
$$\{BW, GR, BY\} \longrightarrow \dots$$

- ▶ **cortex visuel** : traitement de l'**information visuelle**
 - ▶ système cérébral le plus imposant ($\simeq 5$ milliards de neurones)
 - ▶ traitement et analyse de l'information visuelle (*correction de couleur, détection de formes, perception du mouvement, etc.*)
 - ▶ effets difficiles à appréhender (*psychovisuels*)
- ▶ **illusions d'optique** : mise en évidence du rôle du cortex visuel

1. Traitement cérébral de l'information visuelle

1.1. Le rôle du cortex visuel

- ▶ **rétine** : mesure/codage du flux d'**information lumineuse**



- cônes :

$$E(\lambda) \longrightarrow \{S, M, L\}$$

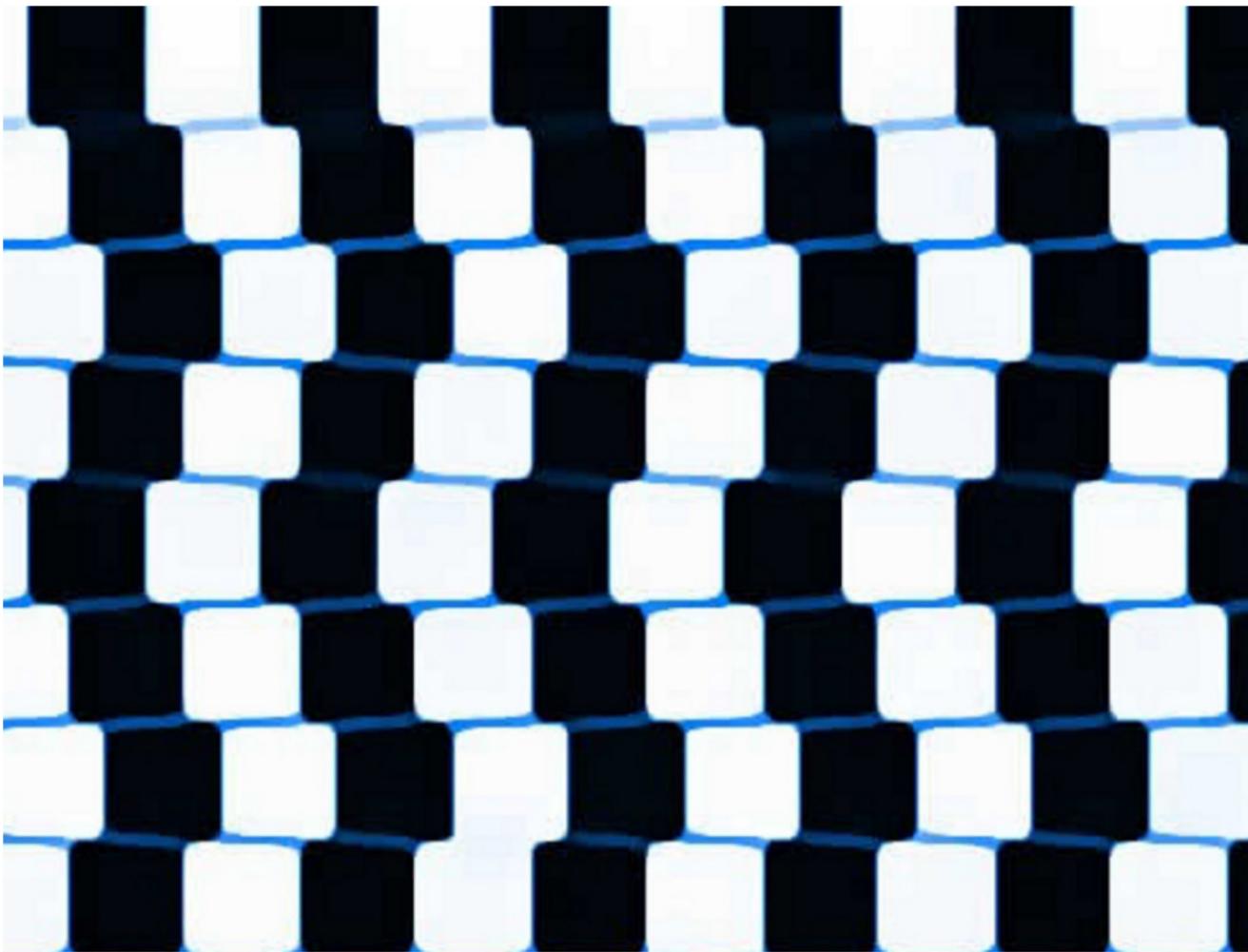
- cellules ganglionnaires (modèle de Hering) :

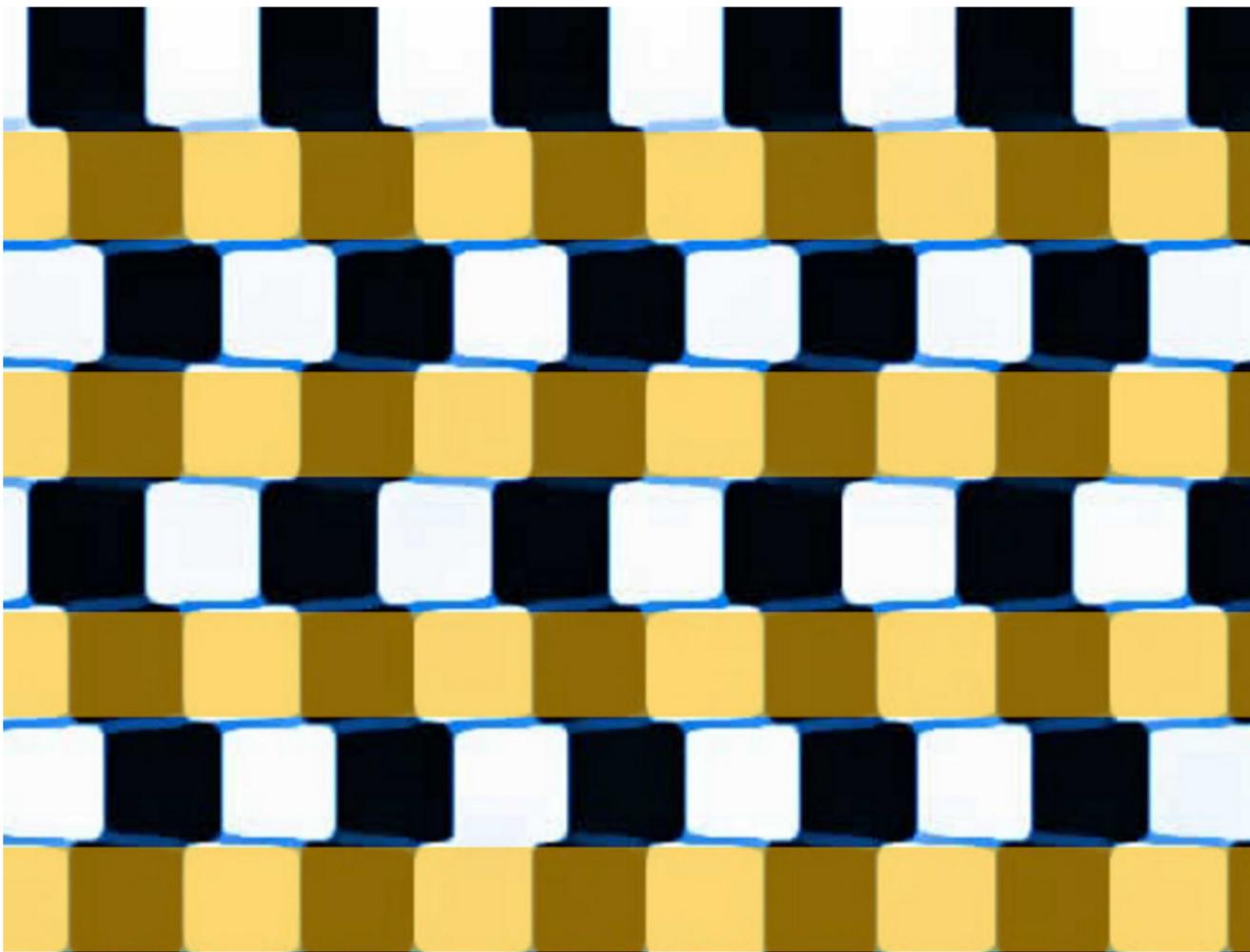
$$\{S, M, L\} \longrightarrow \{BW, GR, BY\}$$

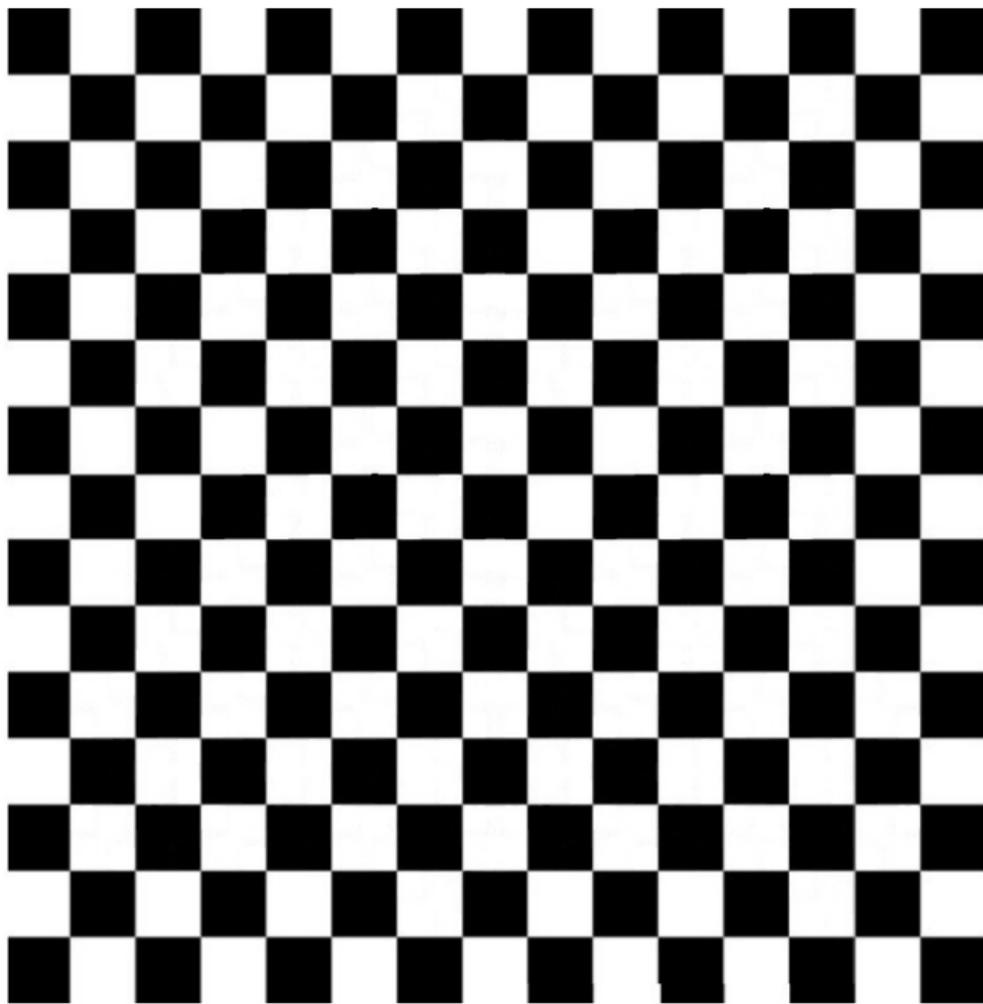
- cortex :

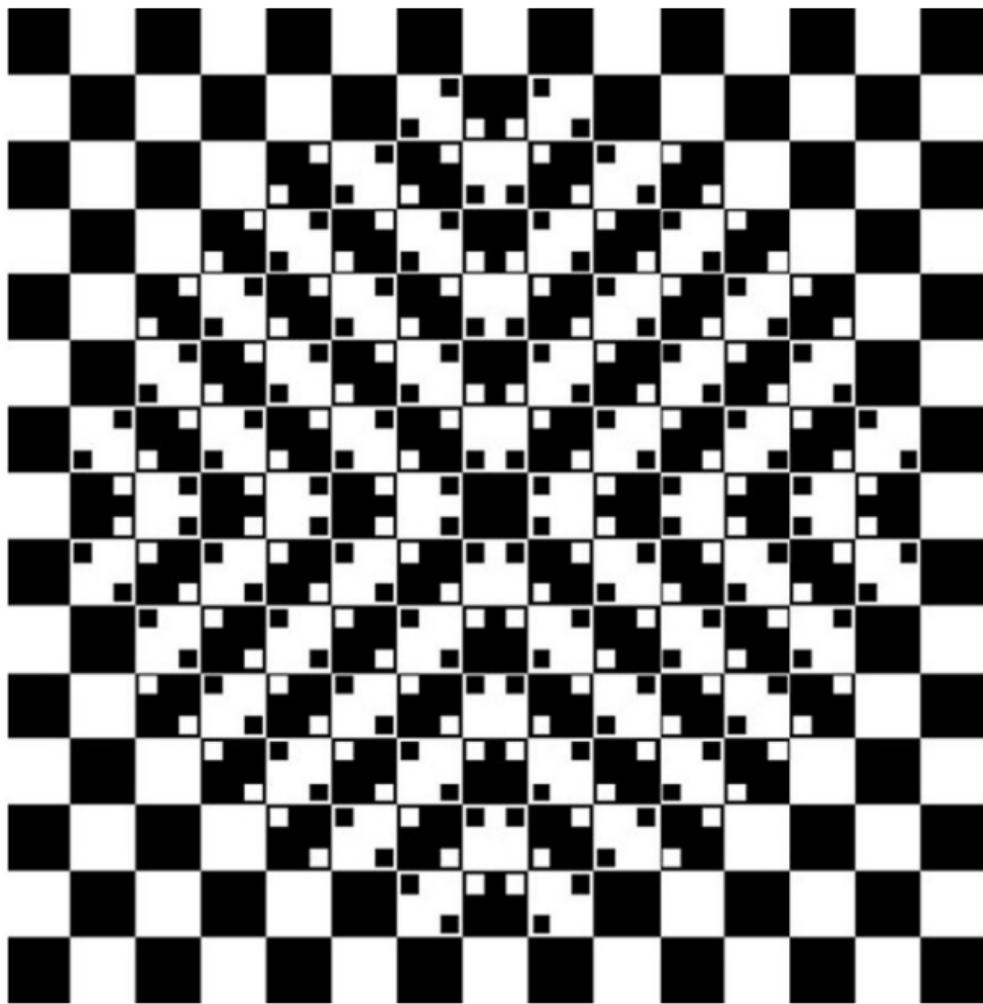
$$\{BW, GR, BY\} \longrightarrow \dots$$

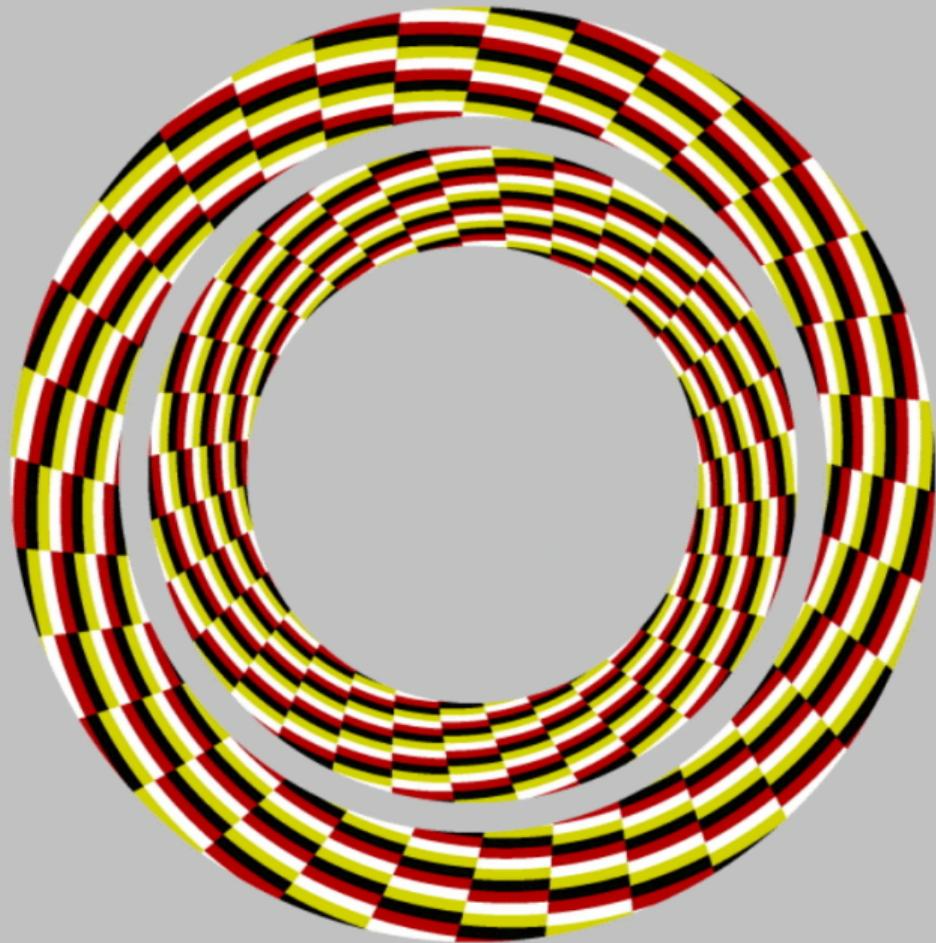
- ▶ **cortex visuel** : traitement de l'**information visuelle**
 - ▶ système cérébral le plus imposant ($\simeq 5$ milliards de neurones)
 - ▶ traitement et analyse de l'information visuelle (*correction de couleur, détection de formes, perception du mouvement, etc.*)
 - ▶ effets difficiles à appréhender (*psychovisuels*)
- ▶ **illusions d'optique** : mise en évidence du rôle du cortex visuel

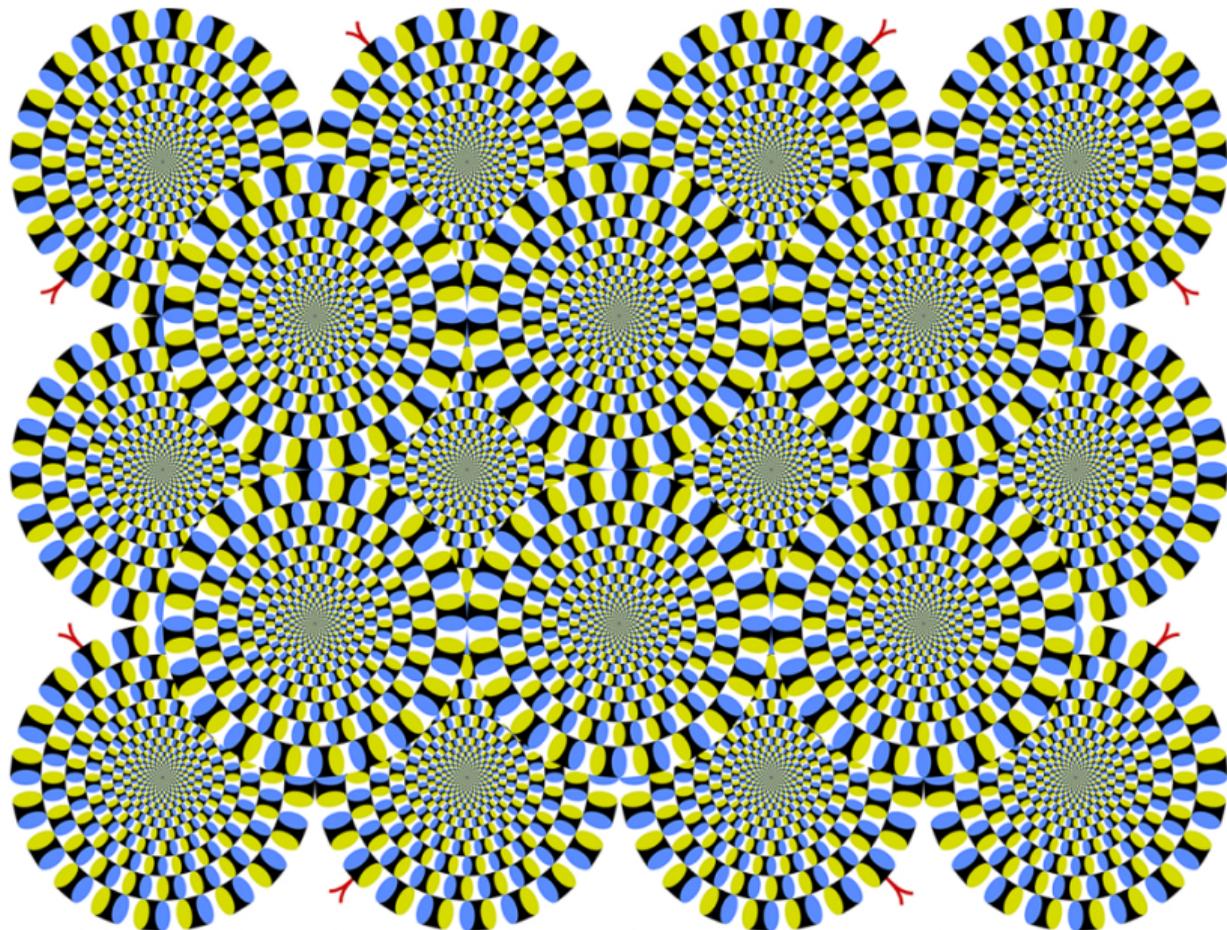








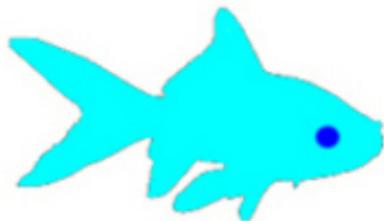




“Rotating snakes”, produced by Akiyoshi Kitaoka in 2003 as an artwork of the 'optimized' Fraser-Wilcox illusion

○ **Rétine ou cortex ?**

- ▶ le cas de la rémanence visuelle : explication historique (Palmer, 1786) : fatigue rétinienne



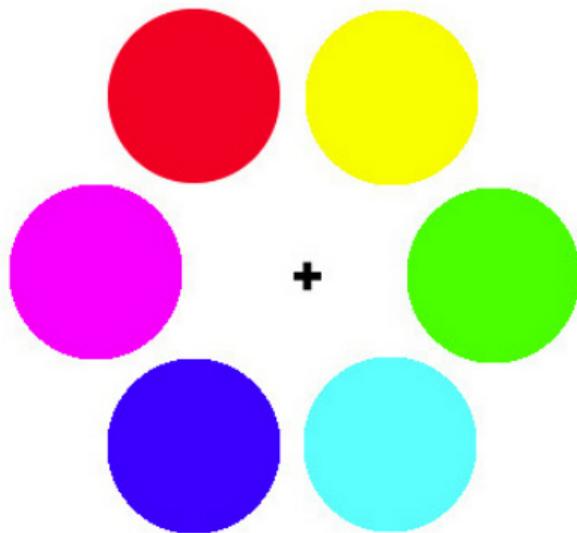
○ **Rétine ou cortex ?**

- ▶ le cas de la rémanence visuelle : explication historique (Palmer, 1786) : fatigue rétinienne



○ **Rétine ou cortex ?**

- ▶ le cas de la rémanence visuelle : explication historique (Palmer, 1786) : fatigue rétinienne



- ▶ phénomène plus complexe lié aux facultés d'adaptation du SVH
 - ▶ reconfiguration dynamique des processus de vision
 - ▶ adaptation du SVH aux variations des conditions de formation des images

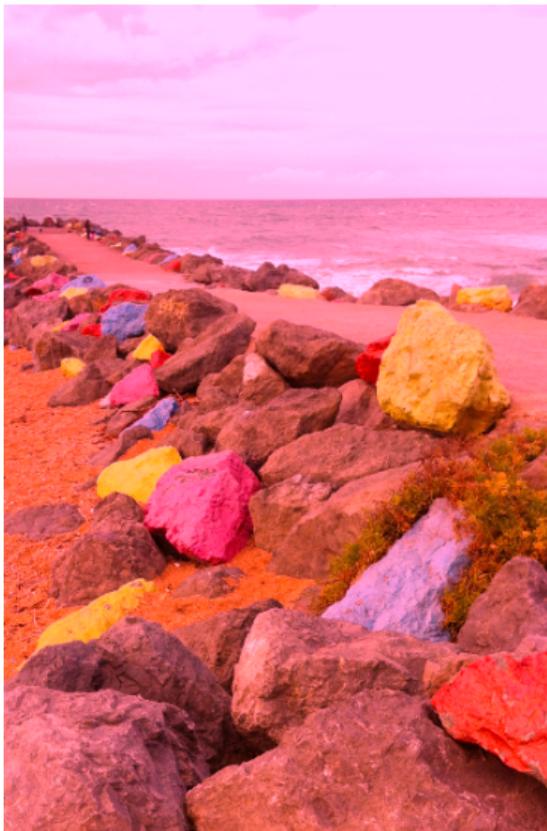
- **Rétine ou cortex ?**

- ▶ le cas de la rémanence visuelle : explication historique (Palmer, 1786) : fatigue rétinienne



- ▶ phénomène plus complexe lié aux facultés d'adaptation du SVH
 - ▶ reconfiguration dynamique des processus de vision
 - ▶ adaptation du SVH aux variations des conditions de formation des images

► adaptation chromatique



▶ adaptation chromatique



► adaptation au niveau de détail



► adaptation au niveau de détail



★ Contraste simultané



I

J

K

Sur quelle(s) image(s) les couleurs des pixels des deux feuilles de papier posées au sol sont-elle identiques ?



sur I, sur J et sur K



seulement sur I et sur K



seulement sur J



sur aucune des trois images

1.2. La perception de la clarté et des teintes est relative

- ▶ **décalage** de la clarté (ou luminosité) **perçue** d'une région
 - ▶ vers le clair ou le sombre
 - ▶ en fonction de celle du fond



1.2. La perception de la clarté et des teintes est relative

- ▶ **décalage** de la clarté (ou luminosité) **perçue** d'une région
 - ▶ vers le clair ou le sombre
 - ▶ en fonction de celle du fond



1.2. La perception de la clarté et des teintes est relative

- ▶ **décalage** de la clarté (ou luminosité) **perçue** d'une région
 - ▶ vers le clair ou le sombre
 - ▶ en fonction de celle du fond



1.2. La perception de la clarté et des teintes est relative

- ▶ **décalage** de la clarté (ou luminosité) **perçue** d'une région
 - ▶ vers le clair ou le sombre
 - ▶ en fonction de celle du fond

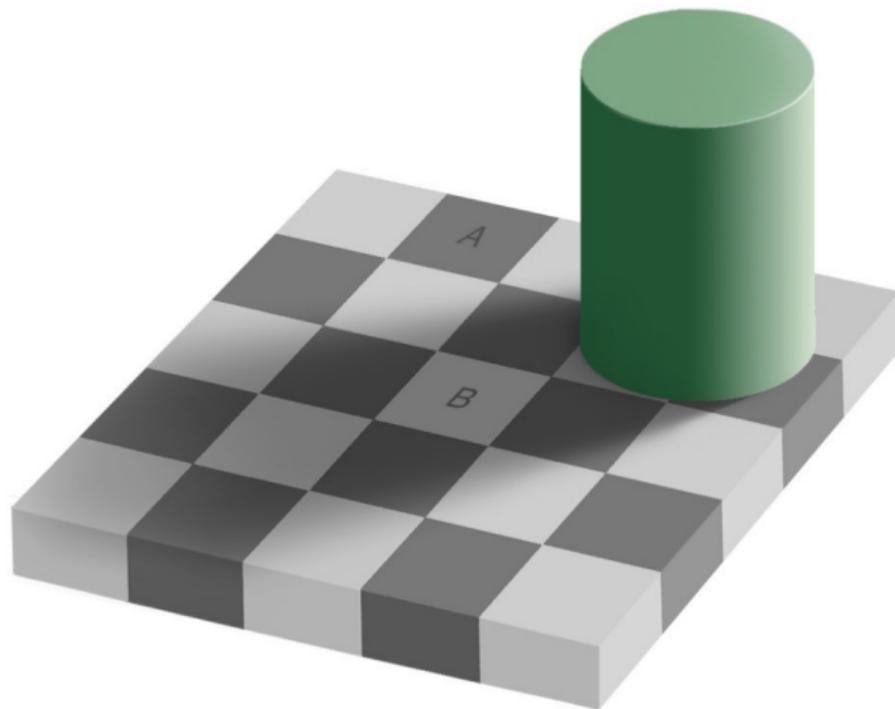


1.2. La perception de la clarté et des teintes est relative

- ▶ **décalage** de la clarté (ou luminosité) **perçue** d'une région
 - ▶ vers le clair ou le sombre
 - ▶ en fonction de celle du fond



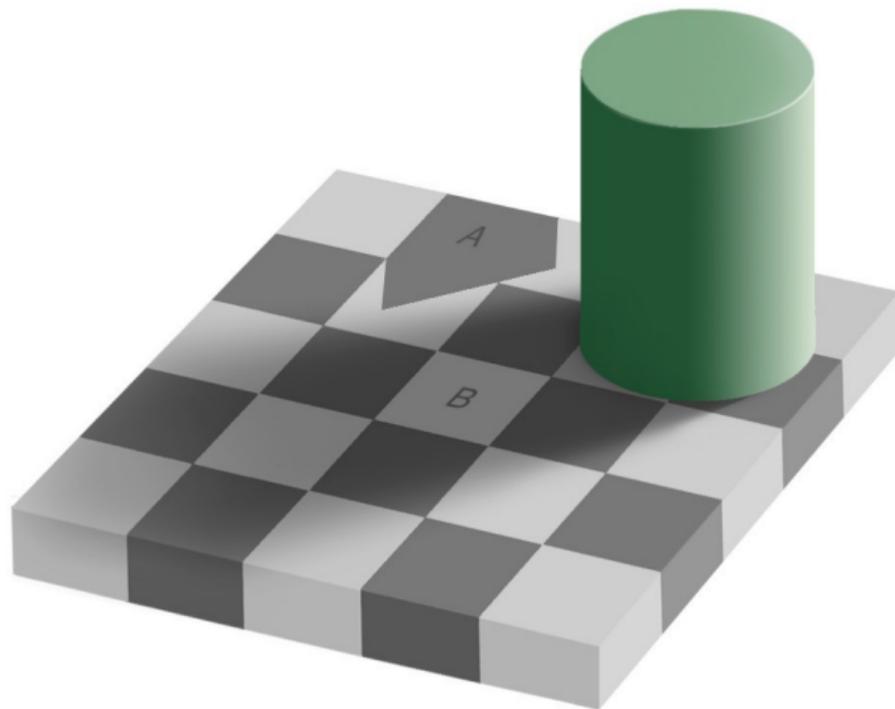
► échiquier d'Adelson : les cases A et B sont de même niveau de gris



1. Est-ce que vous le croyez ?

2.

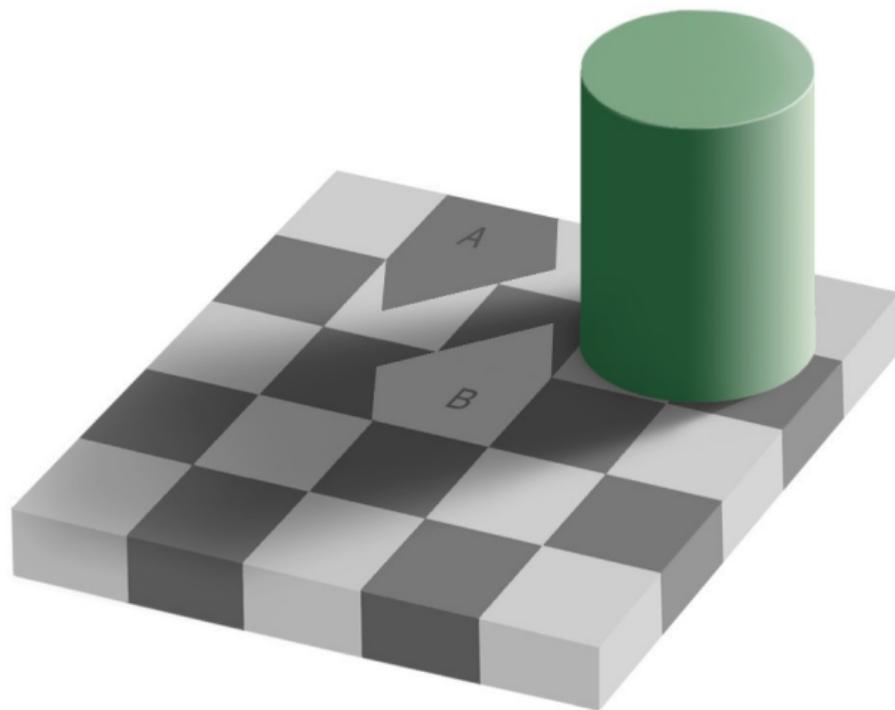
► échiquier d'Adelson : les cases A et B sont de même niveau de gris



1. Est-ce que vous le croyez ?

2.

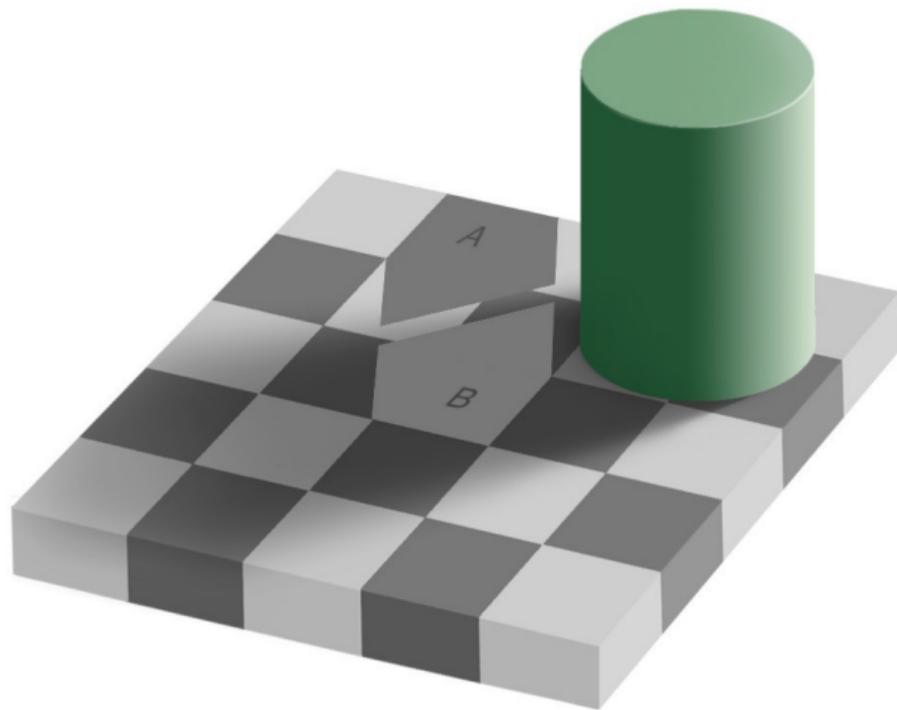
► échiquier d'Adelson : les cases A et B sont de même niveau de gris



1. Est-ce que vous le croyez ?

2.

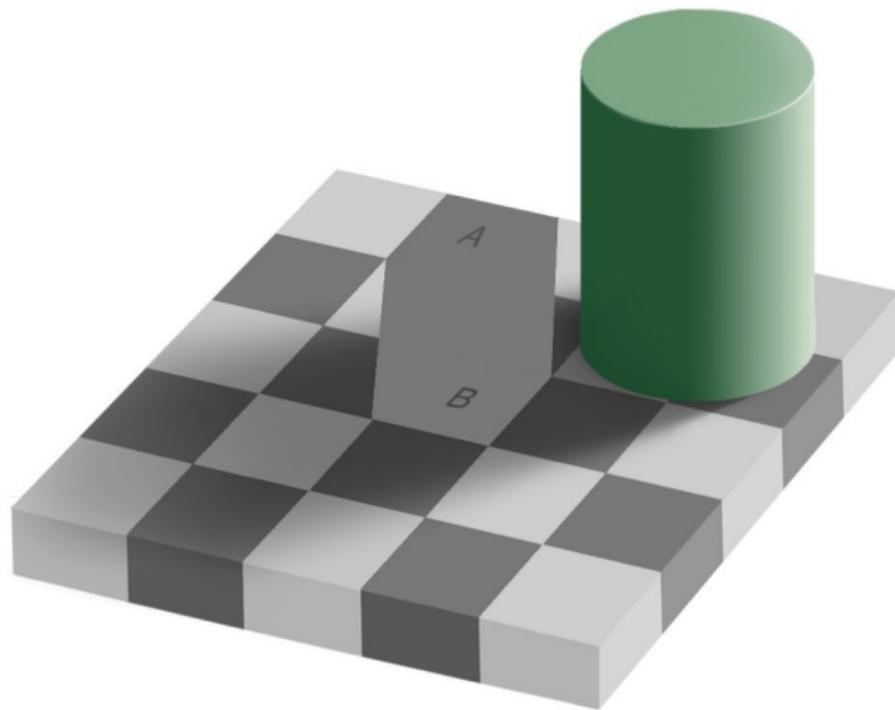
► échiquier d'Adelson : les cases A et B sont de même niveau de gris



1. Est-ce que vous le croyez ?

2.

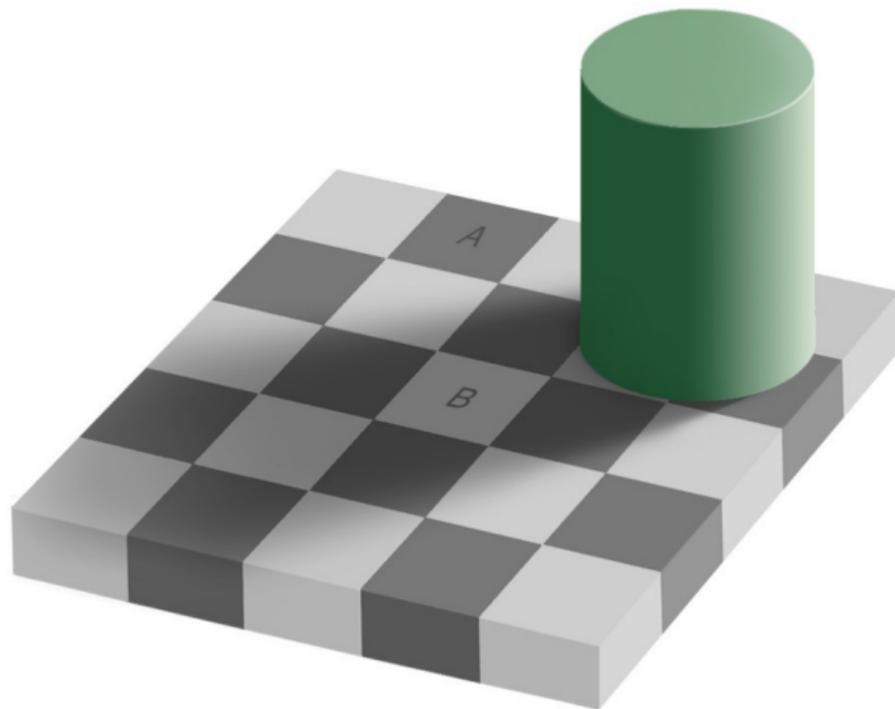
► échiquier d'Adelson : les cases A et B sont de même niveau de gris



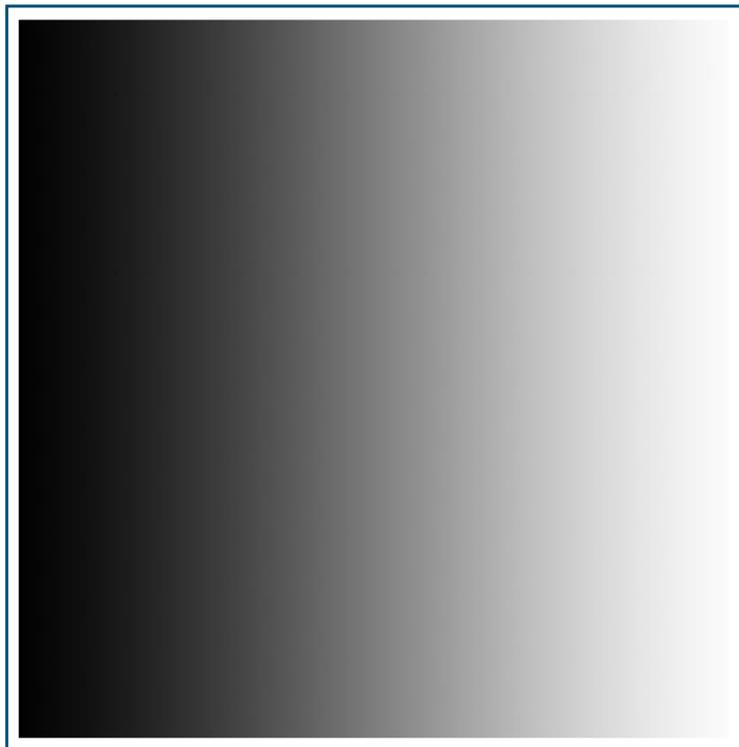
1. Est-ce que vous le croyez ?

2.

► échiquier d'Adelson : les cases A et B sont de même niveau de gris

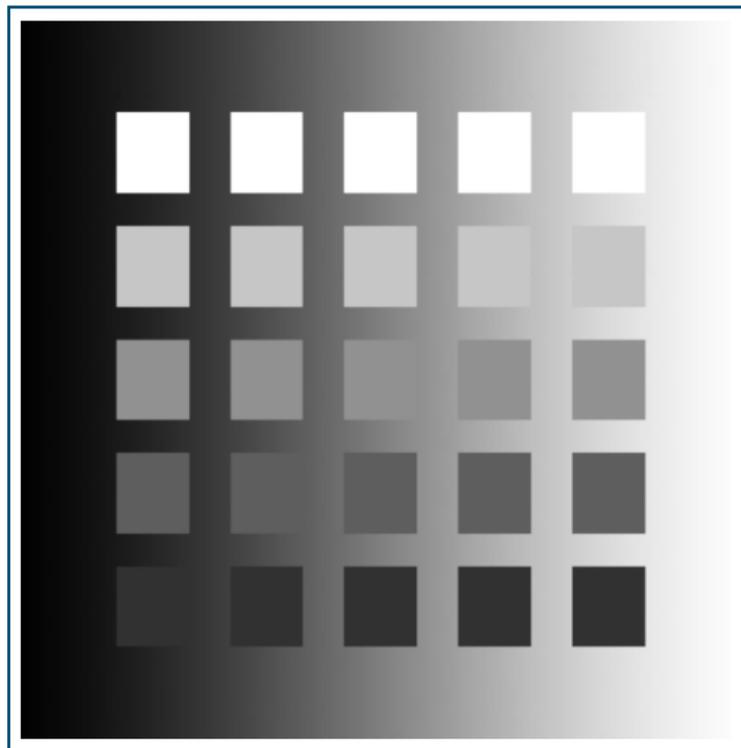


1. Est-ce que vous le croyez ?
2. Est-ce que vous parvenez à les voir identiques ?



On superpose des carrés de différents niveaux de gris sur un dégradé horizontal du noir au blanc.

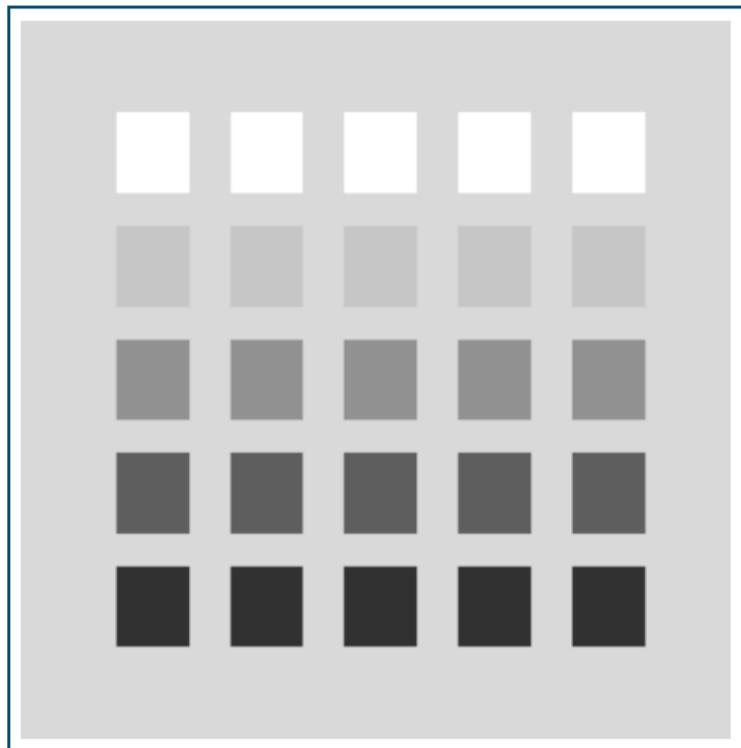
★ Effet de Bartleson-Breneman



On superpose des carrés de différents niveaux de gris sur un dégradé horizontal du noir au blanc.

A	tous les carrés de chaque ligne sont identiques
B	les carrés sont identiques seulement sur certaines lignes
C	tous les carrés de chaque colonne sont identiques
D	les carrés sont identiques seulement sur certaines colonnes

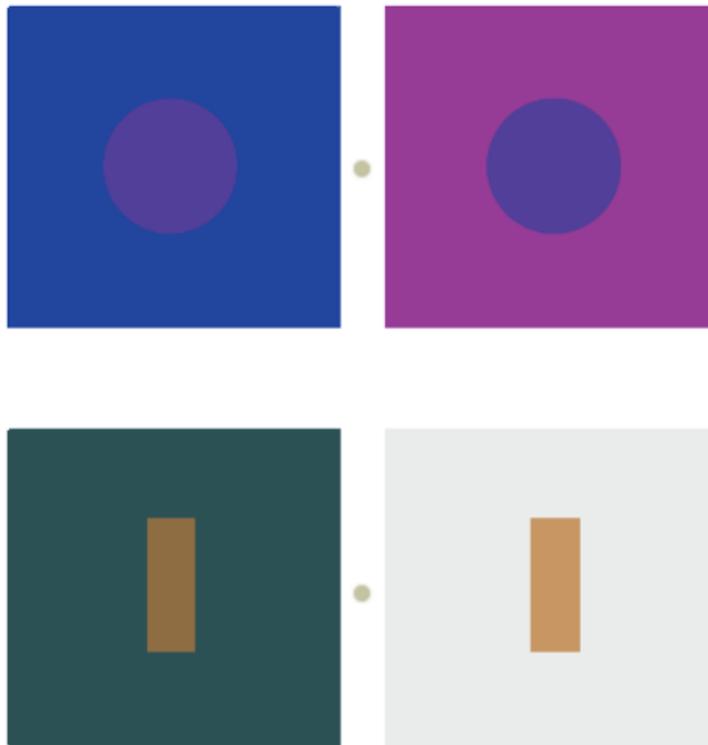
★ Effet de Bartleson-Breneman



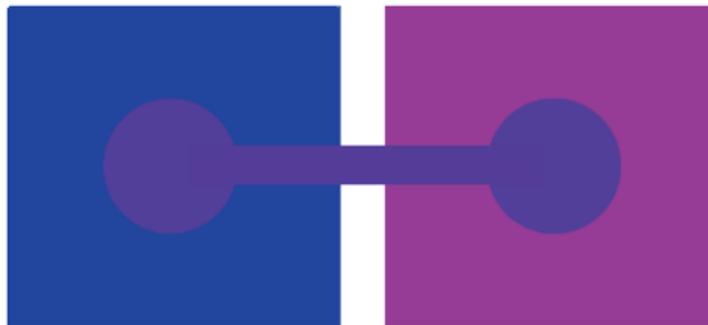
On superpose des carrés de différents niveaux de gris sur un dégradé horizontal du noir au blanc.

A	tous les carrés de chaque ligne sont identiques
B	les carrés sont identiques seulement sur certaines lignes
C	tous les carrés de chaque colonne sont identiques
D	les carrés sont identiques seulement sur certaines colonnes

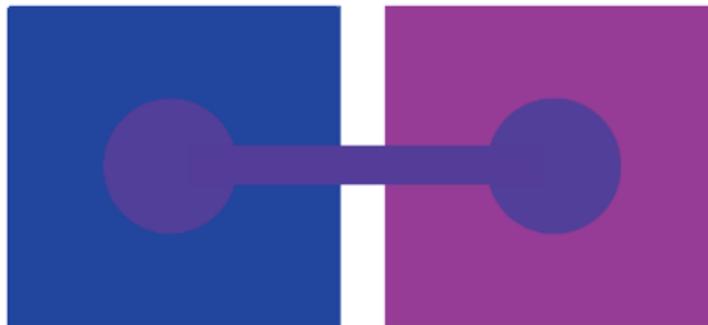
► décalage de la teinte perçue en fonction de celle du fond



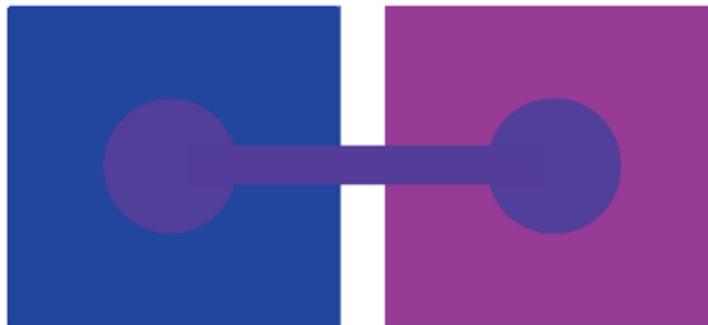
► décalage de la teinte perçue en fonction de celle du fond



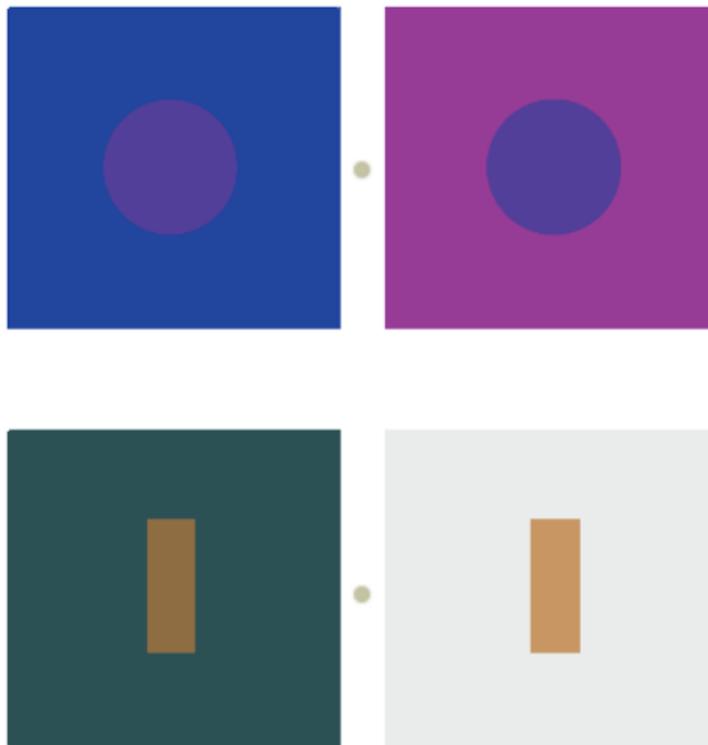
- ▶ décalage de la teinte perçue en fonction de celle du fond



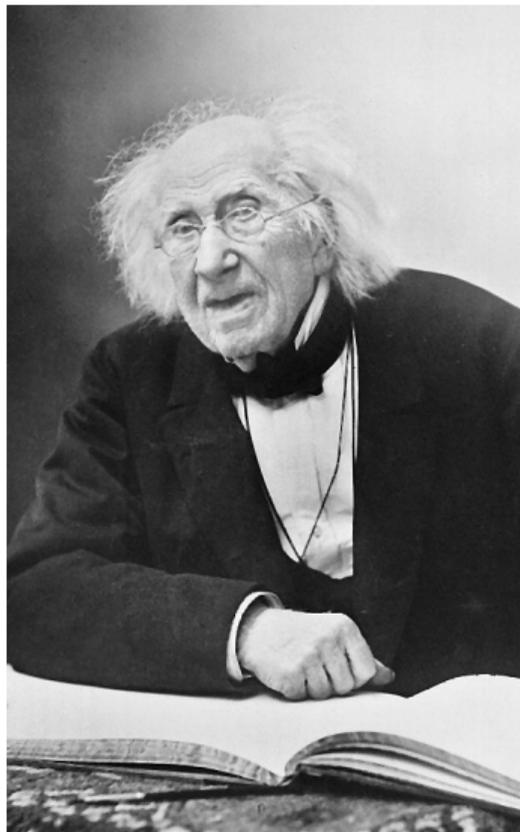
- ▶ **décalage** de la **teinte perçue** en fonction de celle du fond



► décalage de la teinte perçue en fonction de celle du fond

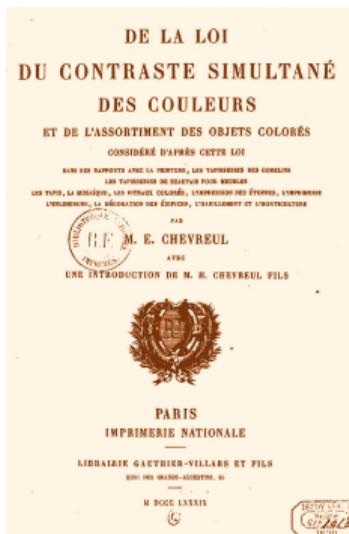


1.3. Loi du contraste simultané



- ▶ travaux du chimiste Eugène Chevreul (1786–1889)
- ▶ vers 1830, alors directeur de la manufacture des Gobelins, il cherche à améliorer la qualité de teintes de tapisseries
 - ▶ *plaintes de teinturiers : certaines teintures ne produisent pas les couleurs attendues*
 - ▶ *cause physico-chimique : défaut de stabilité à la lumière*
 - ▶ *cause psychovisuelle : interaction entre couleurs voisines*

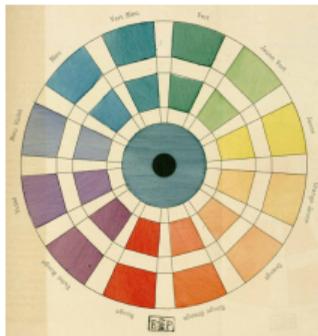
- ▶ 1839, publie l'un des livres les plus importants sur la couleur



« Lorsque l'œil perçoit en même temps deux couleurs avoisinantes, elles paraissent **aussi dissemblables que possible**, tant du point de vue de la composition optique que de leur valeur tonale. »

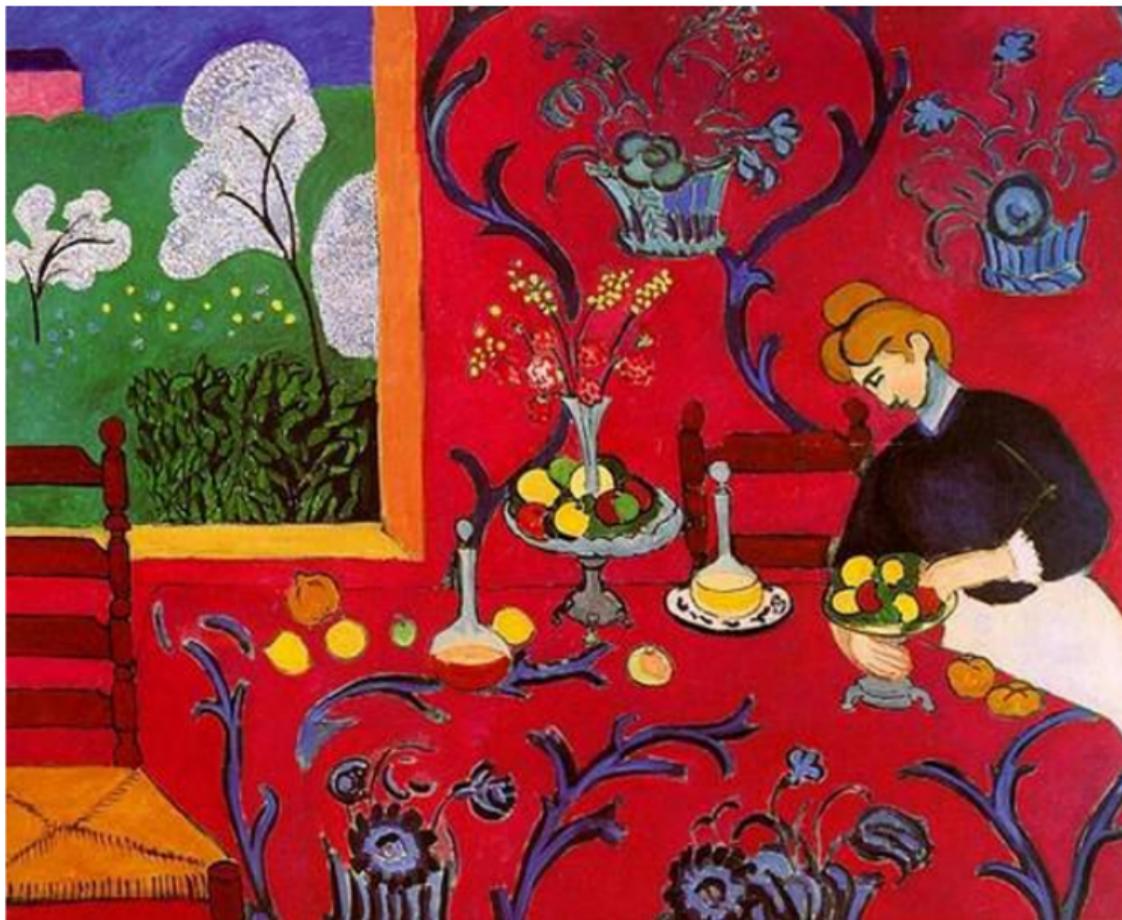
« C'est une modification qui se passe en nous »

- ▶ travaux qui influenceront de nombreux artistes peintres : impressionnistes (Delacroix, Seurat, Signac, Van Gogh), Albers, Matisse, Delaunay, Lohse, Klee...

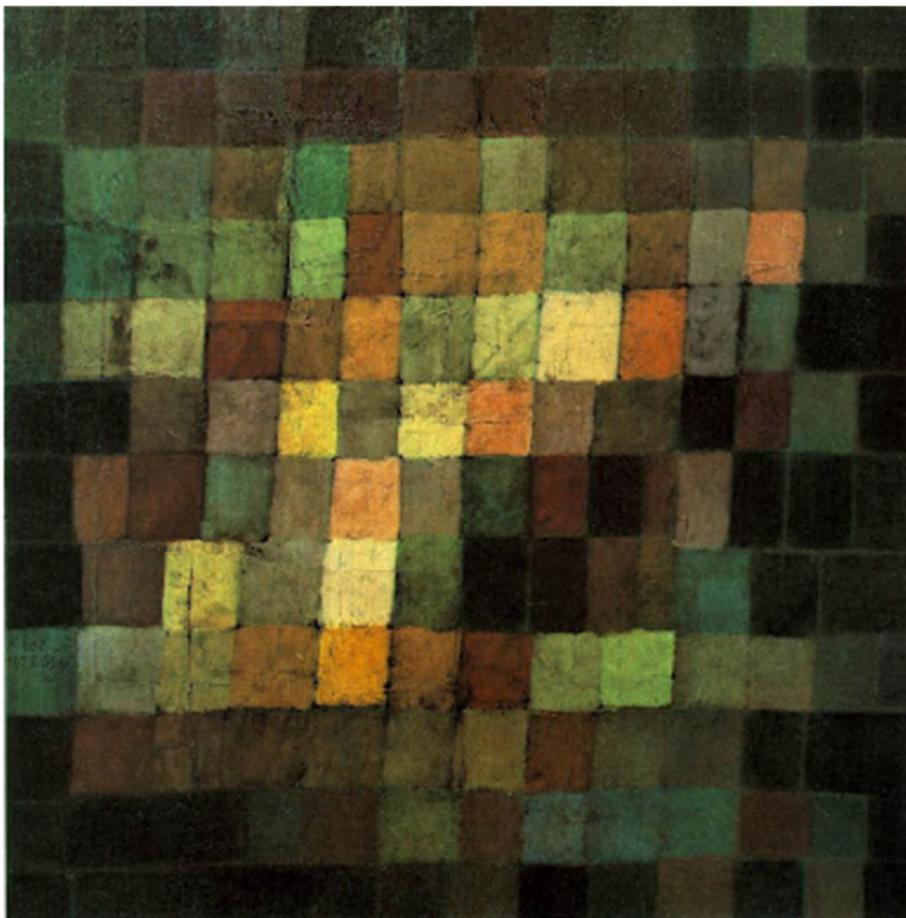




Paul
Signac



Henry
Matisse



Paul
Klee



Robert
Delaunay

★ Contraste simultané



I

J

K

Sur quelle(s) image(s) les couleurs des pixels des deux feuilles de papier posées au sol sont-elle identiques ?



sur I, sur J et sur K



seulement sur I et sur K

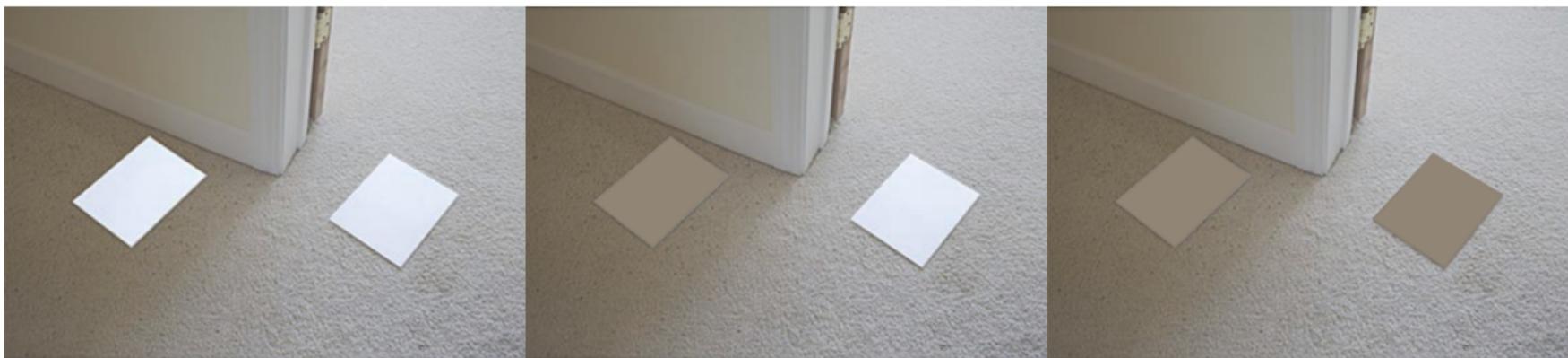


seulement sur J



sur aucune des trois images

★ Contraste simultané



I

J

K

Sur quelle(s) image(s) les couleurs des pixels des deux feuilles de papier posées au sol sont-elle identiques ?



sur I, sur J et sur K



seulement sur I et sur K

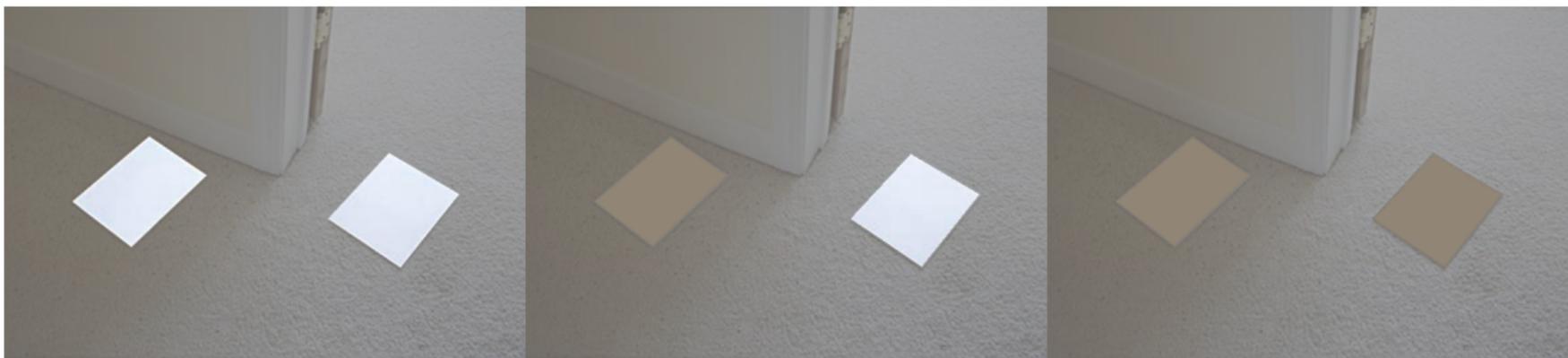


seulement sur J



sur aucune des trois images

★ Contraste simultané



I

J

K

Sur quelle(s) image(s) les couleurs des pixels des deux feuilles de papier posées au sol sont-elle identiques ?



sur I, sur J et sur K



seulement sur I et sur K



seulement sur J



sur aucune des trois images

★ Contraste simultané



I

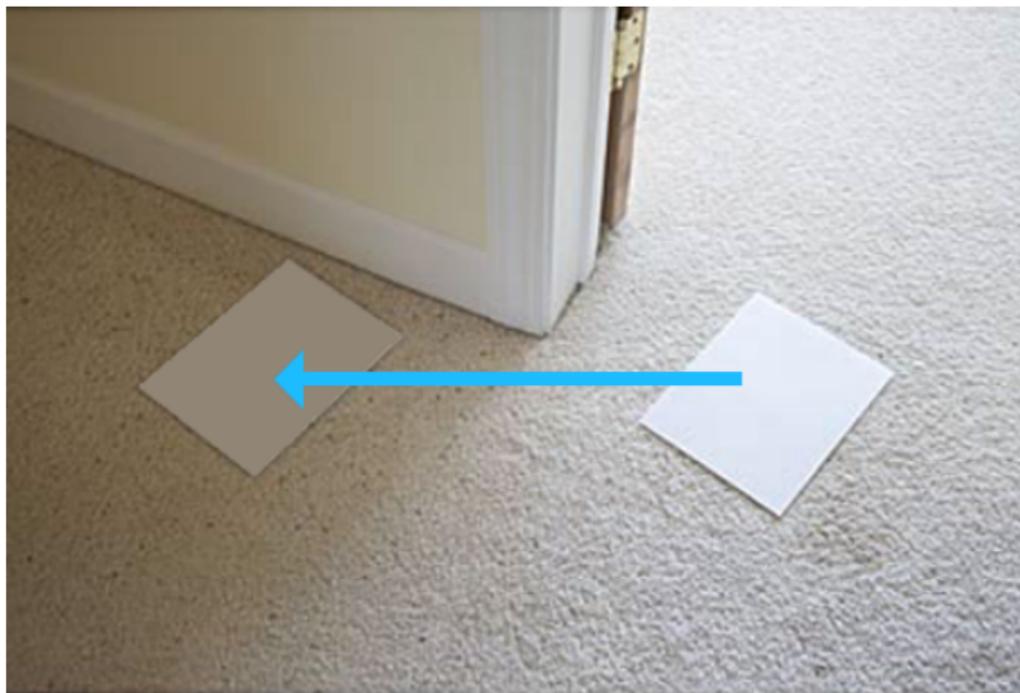
J

K

Sur quelle(s) image(s) les couleurs des pixels des deux feuilles de papier posées au sol sont-elle identiques ?

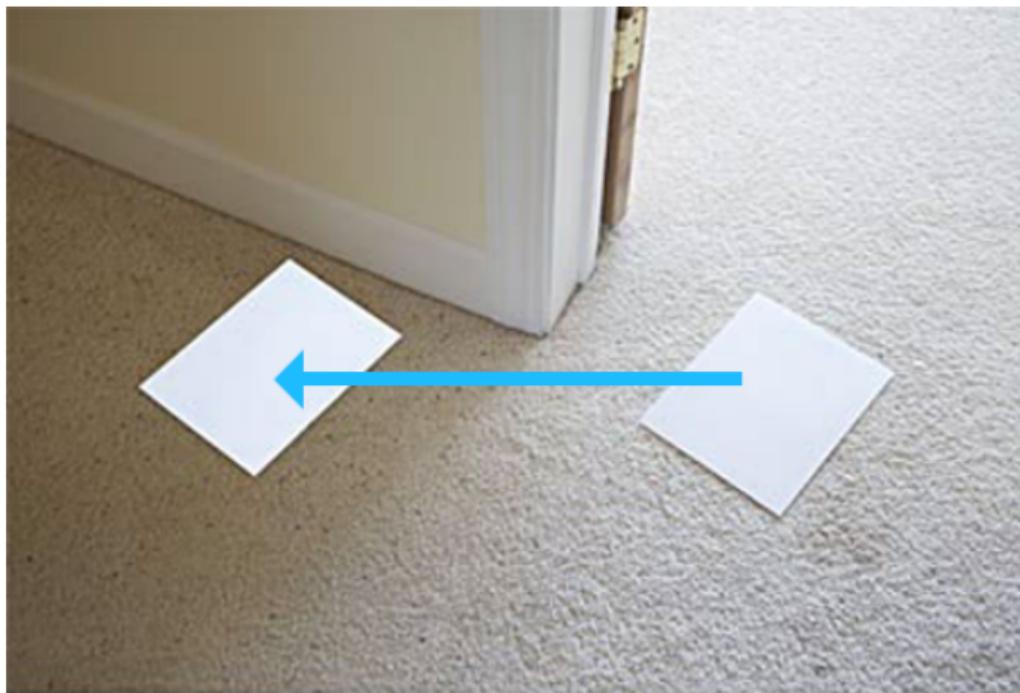
- A** sur I, sur J et sur K
- B** seulement sur I et sur K
- C** seulement sur J
- D** sur aucune des trois images

★ Contraste simultané

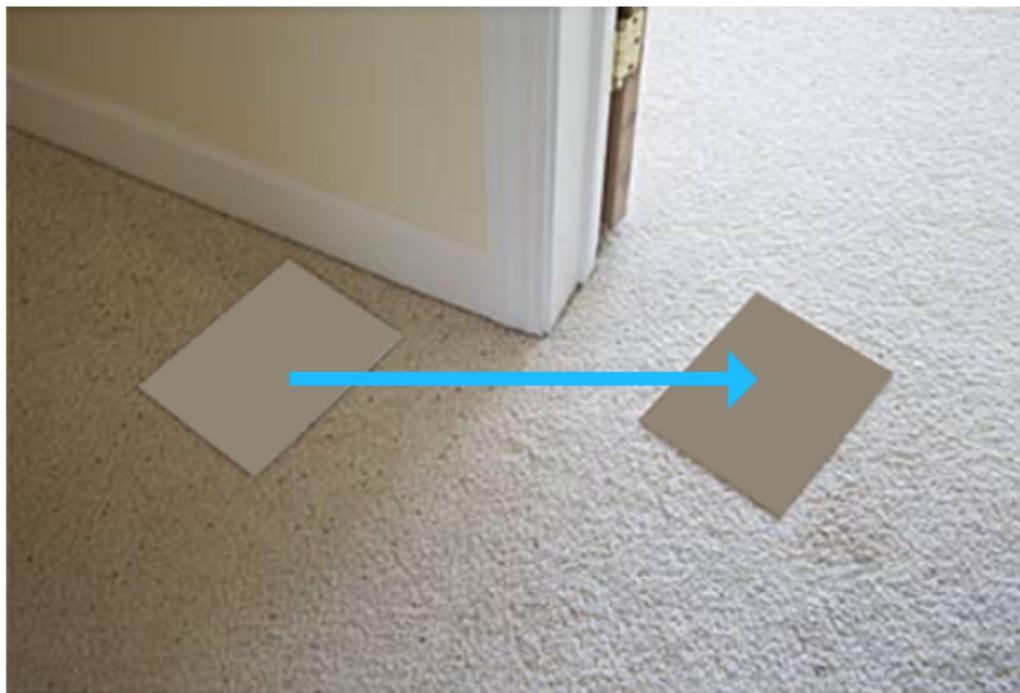


J

★ Contraste simultané



★ Contraste simultané



K

★ Contraste simultané



I

J

K

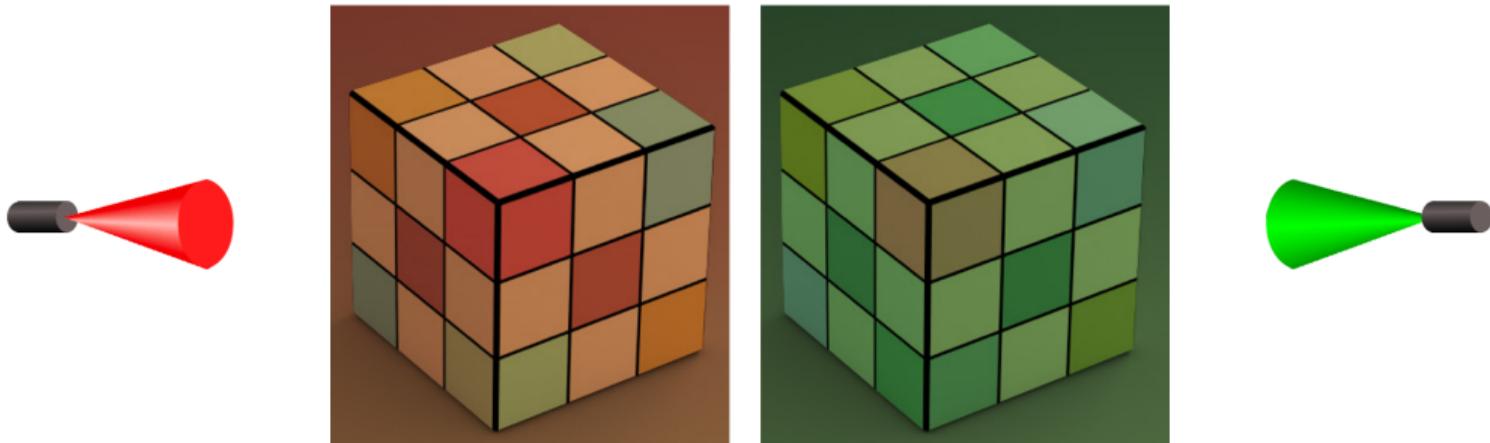
Sur quelle(s) image(s) les couleurs des pixels des deux feuilles de papier posées au sol sont-elle identiques ?

- A** sur I, sur J et sur K
- B** seulement sur I et sur K
- C** seulement sur J
- D** sur aucune des trois images

2. Constance de couleur

2.1. Adaptation chromatique

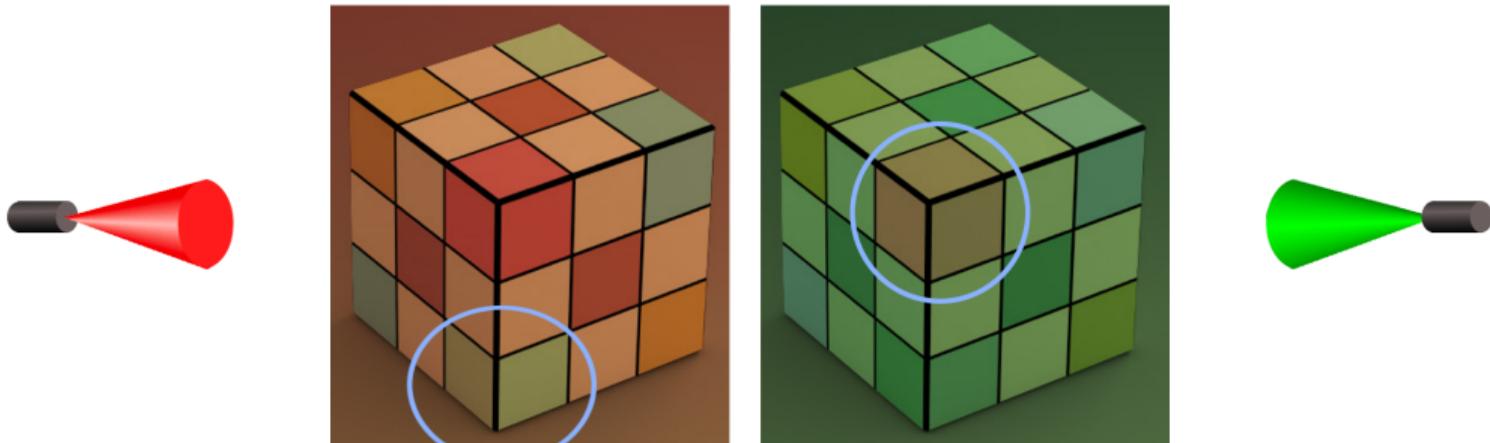
- ▶ propriété de **contraste simultané** du SVH : manifestation de sa capacité à la **constance des couleurs**
- ▶ capacité du SVH à atténuer les variations d'éclairage : perception de chaque couleur **relativement à son environnement spatial**



2. Constance de couleur

2.1. Adaptation chromatique

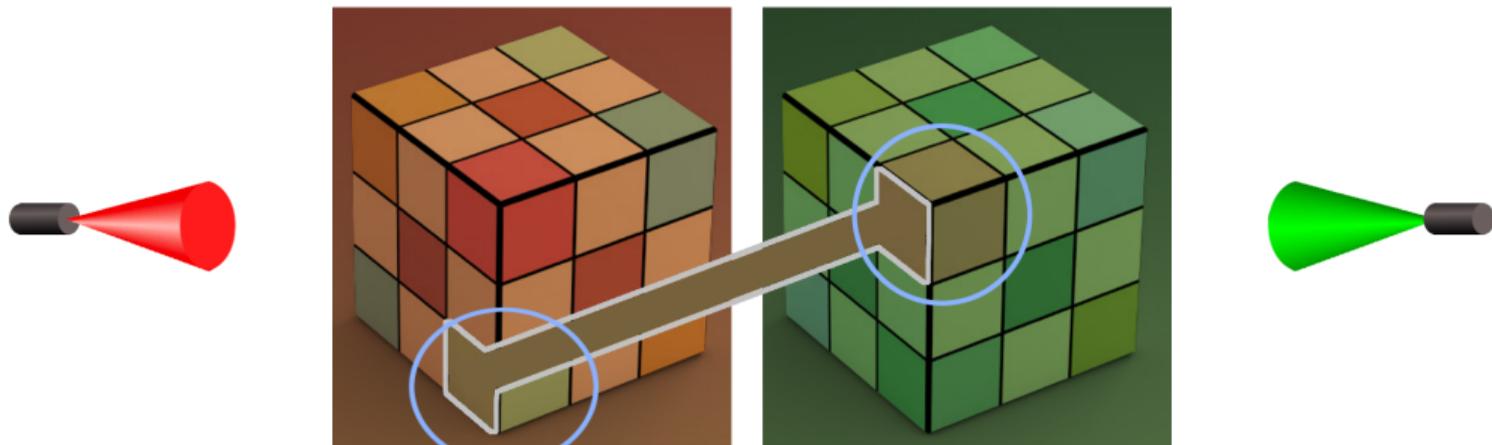
- ▶ propriété de **contraste simultané** du SVH : manifestation de sa capacité à la **constance des couleurs**
- ▶ capacité du SVH à atténuer les variations d'éclairage : perception de chaque couleur **relativement à son environnement spatial**



2. Constance de couleur

2.1. Adaptation chromatique

- ▶ propriété de **contraste simultané** du SVH : manifestation de sa capacité à la **constance des couleurs**
- ▶ capacité du SVH à atténuer les variations d'éclairage : perception de chaque couleur **relativement à son environnement spatial**

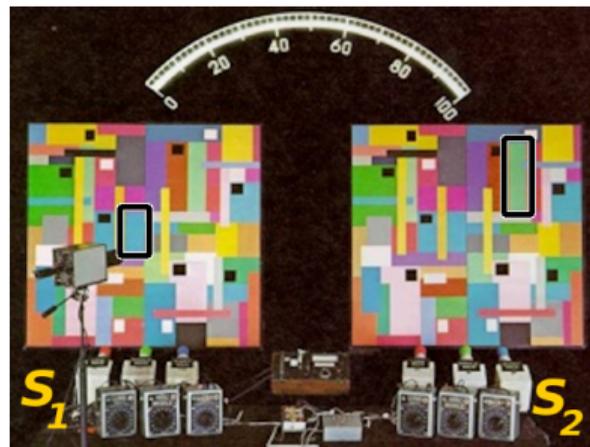


2.2. Expérience des « Mondrians » (1950)

- ▶ phénomène œil/cerveau mis en évidence par Land
- ▶ description de l'expérience
 - ▶ rectangle **bleu** de réflectance $R_b(\lambda)$ éclairé par S_1
→ $S_1(\lambda) \times R_b(\lambda)$
 - ▶ rectangle **vert** de réflectance $R_g(\lambda)$ éclairé par S_2
→ $S_2(\lambda) \times R_g(\lambda)$
 - ▶ S_1 et S_2 : sources de lumière « blanche »
→ rectangle vert et rectangle bleu



- ▶ on ajuste S_1 de telle sorte que $S_1(\lambda) \times R_b(\lambda) = S_2(\lambda) \times R_g(\lambda)$
observés **isolément**, les **deux rectangles** sont perçus **verts**
- ▶ **dans son contexte**, le rectangle de **gauche** est toujours perçu **bleu**
- ▶ cette expérience conduira au modèle **retinex**



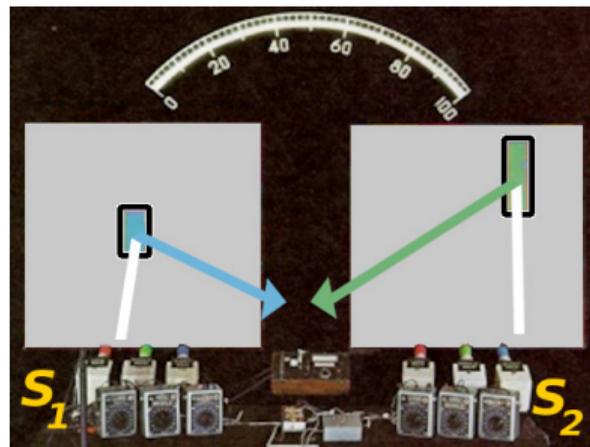
Edwin Land, *The Retinex Theory of Color Vision*, Scientific American 236(6), 108-128, Dec. 1977

2.2. Expérience des « Mondrians » (1950)

- ▶ phénomène œil/cerveau mis en évidence par Land
- ▶ description de l'expérience
 - ▶ rectangle **bleu** de réflectance $R_b(\lambda)$ éclairé par S_1
→ $S_1(\lambda) \times R_b(\lambda)$
 - ▶ rectangle **vert** de réflectance $R_g(\lambda)$ éclairé par S_2
→ $S_2(\lambda) \times R_g(\lambda)$
 - ▶ S_1 et S_2 : sources de lumière « blanche »
→ rectangle vert et rectangle bleu



- ▶ on ajuste S_1 de telle sorte que $S_1(\lambda) \times R_b(\lambda) = S_2(\lambda) \times R_g(\lambda)$
observés isolément, les deux rectangles sont perçus **verts**
- ▶ dans son contexte, le rectangle de gauche est toujours perçu **bleu**
- ▶ cette expérience conduira au modèle **retinex**



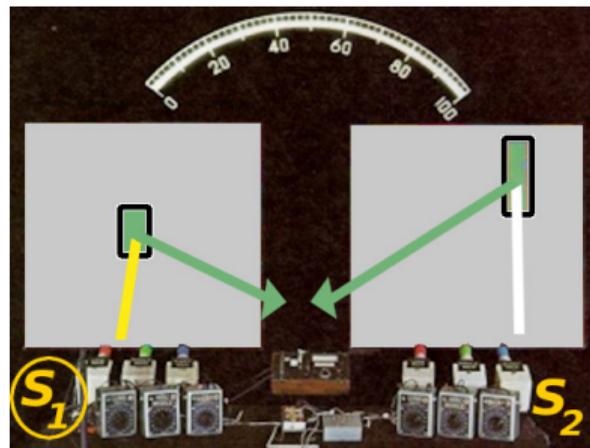
Edwin Land, *The Retinex Theory of Color Vision*, Scientific American 236(6), 108-128, Dec. 1977

2.2. Expérience des « Mondrians » (1950)

- ▶ phénomène œil/cerveau mis en évidence par Land
- ▶ description de l'expérience
 - ▶ rectangle **bleu** de réflectance $R_b(\lambda)$ éclairé par S_1
→ $S_1(\lambda) \times R_b(\lambda)$
 - ▶ rectangle **vert** de réflectance $R_g(\lambda)$ éclairé par S_2
→ $S_2(\lambda) \times R_g(\lambda)$
 - ▶ S_1 et S_2 : sources de lumière « blanche »
→ rectangle vert et rectangle bleu



- ▶ on ajuste S_1 de telle sorte que $S_1(\lambda) \times R_b(\lambda) = S_2(\lambda) \times R_g(\lambda)$
observés **isolément**, les deux rectangles sont perçus **verts**
- ▶ dans son **contexte**, le rectangle de **gauche** est toujours perçu **bleu**
- ▶ cette expérience conduira au modèle **retinex**

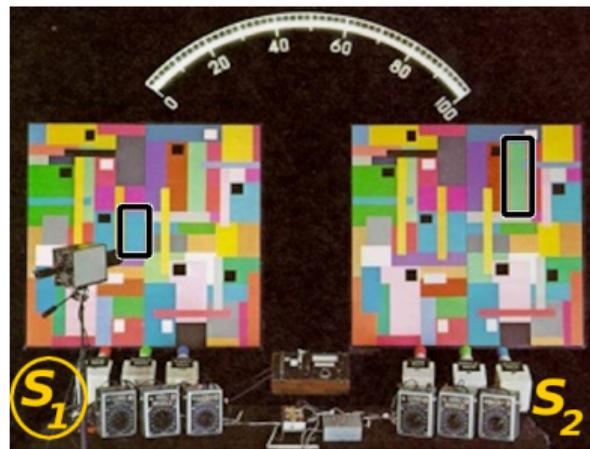


2.2. Expérience des « Mondrians » (1950)

- ▶ phénomène œil/cerveau mis en évidence par Land
- ▶ description de l'expérience
 - ▶ rectangle **bleu** de réflectance $R_b(\lambda)$ éclairé par S_1
→ $S_1(\lambda) \times R_b(\lambda)$
 - ▶ rectangle **vert** de réflectance $R_g(\lambda)$ éclairé par S_2
→ $S_2(\lambda) \times R_g(\lambda)$
 - ▶ S_1 et S_2 : sources de lumière « blanche »
→ rectangle vert et rectangle bleu



- ▶ on ajuste S_1 de telle sorte que $S_1(\lambda) \times R_b(\lambda) = S_2(\lambda) \times R_g(\lambda)$
observés **isolément**, les deux rectangles sont perçus **verts**
- ▶ **dans son contexte**, le rectangle de **gauche** est toujours perçu **bleu**
- ▶ cette expérience conduira au modèle **retinex**

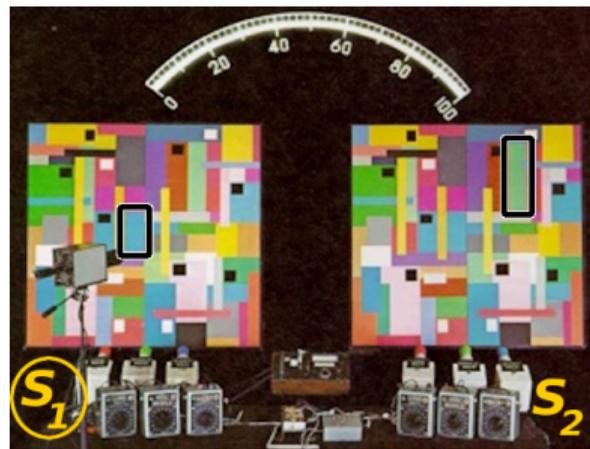


2.2. Expérience des « Mondrians » (1950)

- ▶ phénomène œil/cerveau mis en évidence par Land
- ▶ description de l'expérience
 - ▶ rectangle **bleu** de réflectance $R_b(\lambda)$ éclairé par S_1
→ $S_1(\lambda) \times R_b(\lambda)$
 - ▶ rectangle **vert** de réflectance $R_g(\lambda)$ éclairé par S_2
→ $S_2(\lambda) \times R_g(\lambda)$
 - ▶ S_1 et S_2 : sources de lumière « blanche »
→ rectangle vert et rectangle bleu



- ▶ on ajuste S_1 de telle sorte que $S_1(\lambda) \times R_b(\lambda) = S_2(\lambda) \times R_g(\lambda)$
observés **isolément**, les deux rectangles sont perçus **verts**
- ▶ **dans son contexte**, le rectangle de **gauche** est toujours perçu **bleu**
- ▶ cette expérience conduira au modèle **retinex**



Edwin Land, *The Retinex Theory of Color Vision*, Scientific American 236(6), 108-128, Dec. 1977

2.3. Constance de couleurs : phénomène adaptatif complexe

- ▶ pas spécifique aux êtres humains (singes, poissons...)
- ▶ phénomène encore mal connu, probablement multiple
 - ▶ *adaptation des photorécepteurs*
 - ▶ *retinex (contraste spatial)*
 - ▶ *mémoire des couleurs (banane = jaune)*



- ▶ mécanisme imparfait : les variations d'éclairage demeurent perceptibles par le SVH
- ▶ très difficile à inhiber volontairement (CF exemples précédents)
 - « contre-exemple » : Monet et la série des cathédrales de Rouen

2.3. Constance de couleurs : phénomène adaptatif complexe

- ▶ pas spécifique aux êtres humains (singes, poissons...)
- ▶ phénomène encore mal connu, probablement multiple
 - ▶ *adaptation des photorécepteurs*
 - ▶ *retinex (contraste spatial)*
 - ▶ *mémoire des couleurs (banane = jaune)*



- ▶ mécanisme imparfait : les variations d'éclairage demeurent perceptibles par le SVH
- ▶ très difficile à inhiber volontairement (CF exemples précédents)
 - « contre-exemple » : Monet et la série des cathédrales de Rouen

2.3. Constance de couleurs : phénomène adaptatif complexe

- ▶ pas spécifique aux êtres humains (singes, poissons...)
- ▶ phénomène encore mal connu, probablement multiple
 - ▶ *adaptation des photorécepteurs*
 - ▶ *retinex (contraste spatial)*
 - ▶ *mémoire des couleurs (banane = jaune)*



- ▶ mécanisme imparfait : les variations d'éclairage demeurent perceptibles par le SVH
- ▶ très difficile à inhiber volontairement (CF exemples précédents)

« contre-exemple » : Monet et la série des cathédrales de Rouen

2.3. Constance de couleurs : phénomène adaptatif complexe

- ▶ pas spécifique aux êtres humains (singes, poissons...)
- ▶ phénomène encore mal connu, probablement multiple
 - ▶ *adaptation des photorécepteurs*
 - ▶ *retinex (contraste spatial)*
 - ▶ *mémoire des couleurs (banane = jaune)*



- ▶ mécanisme imparfait : les variations d'éclairage demeurent perceptibles par le SVH
- ▶ très difficile à inhiber volontairement (CF exemples précédents)
 - « contre-exemple » : Monet et la série des cathédrales de Rouen

2.3. Constance de couleurs : phénomène adaptatif complexe

- ▶ pas spécifique aux êtres humains (singes, poissons...)
- ▶ phénomène encore mal connu, probablement multiple
 - ▶ *adaptation des photorécepteurs*
 - ▶ *retinex (contraste spatial)*
 - ▶ *mémoire des couleurs (banane = jaune)*



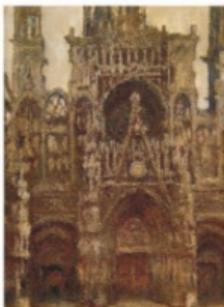
- ▶ mécanisme imparfait : les variations d'éclairage demeurent perceptibles par le SVH
- ▶ très difficile à inhiber volontairement (CF exemples précédents)
 - « contre-exemple » : Monet et la série des cathédrales de Rouen

2.3. Constance de couleurs : phénomène adaptatif complexe

- ▶ pas spécifique aux êtres humains (singes, poissons...)
- ▶ phénomène encore mal connu, probablement multiple
 - ▶ *adaptation des photorécepteurs*
 - ▶ *retinex (contraste spatial)*
 - ▶ *mémoire des couleurs (banane = jaune)*



- ▶ mécanisme imparfait : les variations d'éclairage demeurent perceptibles par le SVH
- ▶ très difficile à inhiber volontairement (CF exemples précédents)
 - « contre-exemple » : Monet et la série des cathédrales de Rouen



○ Problématique de la constance de couleur



- ▶ à la différence du SVH, les capteurs (argentiques, numériques) enregistrent l'information **telle qu'elle est**
- ▶ reconstruire une image de la scène **telle que la percevrait** le SVH
- ▶ approche physique
 - ▶ retrouver les caractéristiques de la source
 - ▶ reconstituer un éclairage neutre (par exemple 6500K)
- ▶ approche psychovisuelle
 - ▶ tirer partie des caractéristiques du SVH
 - ▶ reproduire les mécanismes d'adaptation chromatique

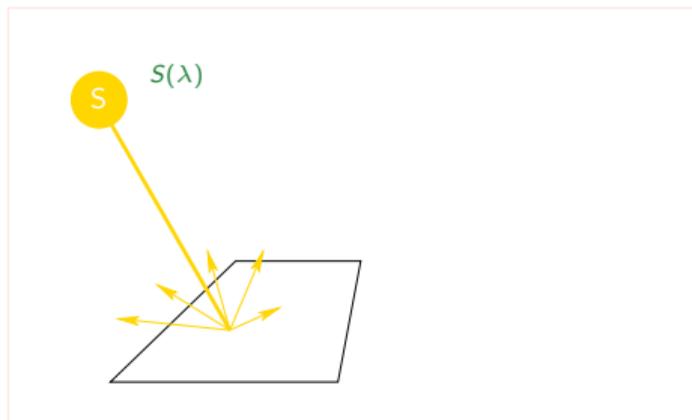
○ Problématique de la constance de couleur



- ▶ à la différence du SVH, les capteurs (argentiques, numériques) enregistrent l'information **telle qu'elle est**
- ▶ reconstruire une image de la scène **telle que la percevrait** le SVH
- ▶ approche physique
 - ▶ retrouver les caractéristiques de la source
 - ▶ reconstituer un éclairage neutre (par exemple 6500K)
- ▶ approche psychovisuelle
 - ▶ tirer partie des caractéristiques du SVH
 - ▶ reproduire les mécanismes d'adaptation chromatique

2.4. Le modèle diagonal (von Kries – 1905)

○ Estimation statistique de la source lumineuse



- ▶ surface blanche (lambertienne) éclairée par une source $S(\lambda)$
- ▶ capteur de caractéristiques $r(\lambda)$, $g(\lambda)$ et $b(\lambda)$
- ▶ (s_r, s_g, s_b) est la couleur de la source

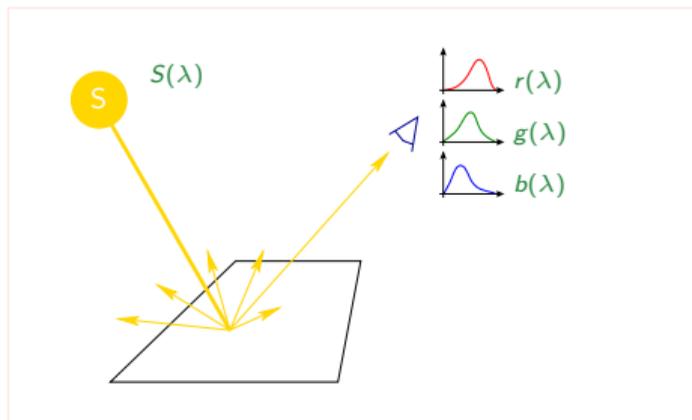
$$s_r = \int_{\lambda_{min}}^{\lambda_{max}} S(\lambda)r(\lambda)d\lambda$$

$$s_g = \int_{\lambda_{min}}^{\lambda_{max}} S(\lambda)g(\lambda)d\lambda$$

$$s_b = \int_{\lambda_{min}}^{\lambda_{max}} S(\lambda)b(\lambda)d\lambda$$

2.4. Le modèle diagonal (von Kries – 1905)

○ Estimation statistique de la source lumineuse

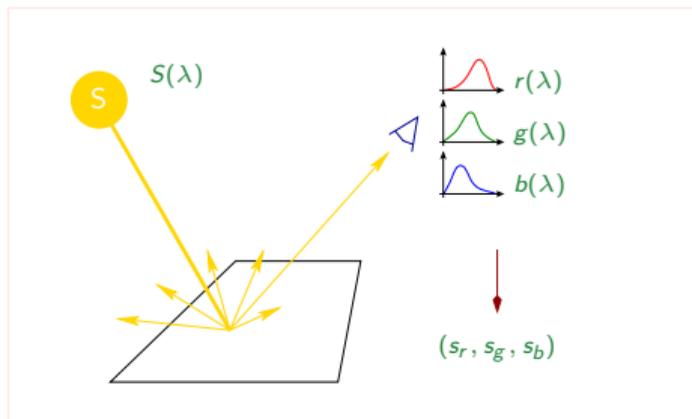


- ▶ surface blanche (lambertienne) éclairée par une source $S(\lambda)$
- ▶ capteur de caractéristiques $r(\lambda)$, $g(\lambda)$ et $b(\lambda)$
- ▶ (s_r, s_g, s_b) est la couleur de la source

$$\begin{aligned} s_r &= \int_{\lambda_{\min}}^{\lambda_{\max}} S(\lambda)r(\lambda)d\lambda \\ s_g &= \int_{\lambda_{\min}}^{\lambda_{\max}} S(\lambda)g(\lambda)d\lambda \\ s_b &= \int_{\lambda_{\min}}^{\lambda_{\max}} S(\lambda)b(\lambda)d\lambda \end{aligned}$$

2.4. Le modèle diagonal (von Kries – 1905)

○ Estimation statistique de la source lumineuse



- ▶ surface blanche (lambertienne) éclairée par une source $S(\lambda)$
- ▶ capteur de caractéristiques $r(\lambda)$, $g(\lambda)$ et $b(\lambda)$
- ▶ (s_r, s_g, s_b) est la couleur de la source

$$\begin{aligned} s_r &= \int_{\lambda_{\min}}^{\lambda_{\max}} S(\lambda)r(\lambda)d\lambda \\ s_g &= \int_{\lambda_{\min}}^{\lambda_{\max}} S(\lambda)g(\lambda)d\lambda \\ s_b &= \int_{\lambda_{\min}}^{\lambda_{\max}} S(\lambda)b(\lambda)d\lambda \end{aligned}$$

- ▶ on veut retrouver les couleurs qu'aurait l'image avec une **source neutre** (par exemple D_{65})

→ couleur de la surface blanche : (n_r, n_g, n_b)

- ▶ corriger la couleur de la source se ramène à lui appliquer une transformation

$$(s_r, s_g, s_b) \longrightarrow (n_r, n_g, n_b)$$

- ▶ proposition de transformation : **multiplier** par

$$\frac{n_r}{s_r}, \frac{n_g}{s_g}, \frac{n_b}{s_b}$$

- ▶ **modèle diagonal** : on répercute cette correction à toutes les couleurs de l'image

$$\begin{pmatrix} r' \\ g' \\ b' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{n_r}{s_r} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{n_g}{s_g} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{n_b}{s_b} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} r \\ g \\ b \end{pmatrix}$$

- ▶ comment estimer (s_r, s_g, s_b) ?

- ▶ on veut retrouver les couleurs qu'aurait l'image avec une **source neutre** (par exemple D_{65})

→ couleur de la surface blanche : (n_r, n_g, n_b)

- ▶ corriger la couleur de la source se ramène à lui appliquer une transformation

$$(s_r, s_g, s_b) \longrightarrow (n_r, n_g, n_b)$$

- ▶ proposition de transformation : **multiplier** par

$$\frac{n_r}{s_r}, \frac{n_g}{s_g}, \frac{n_b}{s_b}$$

- ▶ **modèle diagonal** : on répercute cette correction à toutes les couleurs de l'image

$$\begin{pmatrix} r' \\ g' \\ b' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{n_r}{s_r} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{n_g}{s_g} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{n_b}{s_b} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} r \\ g \\ b \end{pmatrix}$$

- ▶ comment estimer (s_r, s_g, s_b) ?

- ▶ on veut retrouver les couleurs qu'aurait l'image avec une **source neutre** (par exemple D_{65})

→ couleur de la surface blanche : (n_r, n_g, n_b)

- ▶ corriger la couleur de la source se ramène à lui appliquer une transformation

$$(s_r, s_g, s_b) \longrightarrow (n_r, n_g, n_b)$$

- ▶ proposition de transformation : **multiplier** par

$$\frac{n_r}{s_r}, \frac{n_g}{s_g}, \frac{n_b}{s_b}$$

- ▶ **modèle diagonal** : on répercute cette correction à toutes les couleurs de l'image

$$\begin{pmatrix} r' \\ g' \\ b' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{n_r}{s_r} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{n_g}{s_g} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{n_b}{s_b} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} r \\ g \\ b \end{pmatrix}$$

- ▶ comment estimer (s_r, s_g, s_b) ?

○ L'hypothèse du monde gris

- ▶ avec une source neutre, la réflectance **moyenne** d'une scène est **supposée achromatique** pour le SVH
- ▶ approximation de la source par la **moyenne des pixels** de l'image

$$\mu_r = \frac{\sum_{i,j} I_r(i,j)}{N}$$

$$\mu_g = \frac{\sum_{i,j} I_g(i,j)}{N}$$

$$\mu_b = \frac{\sum_{i,j} I_b(i,j)}{N}$$

I_r, I_g et I_b : canaux R,G et B

N : nombre de pixels

- ▶ transformation diagonale associée :
$$\begin{pmatrix} \frac{G_r}{\mu_r} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{G_g}{\mu_g} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{G_b}{\mu_b} \end{pmatrix}$$

où (G_r, G_g, G_b) est le gris moyen : $(0.5, 0.5, 0.5)$

○ L'hypothèse du monde gris

- ▶ avec une source neutre, la réflectance **moyenne** d'une scène est **supposée achromatique** pour le SVH
- ▶ approximation de la source par la **moyenne des pixels** de l'image

$$\mu_r = \frac{\sum_{i,j} I_r(i,j)}{N}$$

$$\mu_g = \frac{\sum_{i,j} I_g(i,j)}{N}$$

$$\mu_b = \frac{\sum_{i,j} I_b(i,j)}{N}$$

I_r, I_g et I_b : canaux R,G et B

N : nombre de pixels

- ▶ transformation diagonale associée :
$$\begin{pmatrix} \frac{G_r}{\mu_r} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{G_g}{\mu_g} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{G_b}{\mu_b} \end{pmatrix}$$

où (G_r, G_g, G_b) est le gris moyen : $(0.5, 0.5, 0.5)$

○ L'hypothèse du max

- ▶ caractérisation de la source par le **maximum** de chaque canal
- ▶ associé au blanc de référence (W_r, W_g, W_b) – en principe $(1, 1, 1)$
- ▶ transformation diagonale :

$$\begin{pmatrix} \frac{W_r}{r_{max}} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{W_g}{g_{max}} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{W_b}{b_{max}} \end{pmatrix}$$

- ▶ peu efficace s'il y a des points de l'image proches du blanc
 - ▶ *calculer le maximum de la moyenne sur un voisinage autour de chaque pixel*
 - ▶ *possibilité de prétraiter l'image par un lissage gaussien*

○ L'hypothèse du max

- ▶ caractérisation de la source par le **maximum** de chaque canal
- ▶ associé au blanc de référence (W_r, W_g, W_b) – en principe $(1, 1, 1)$
- ▶ transformation diagonale :

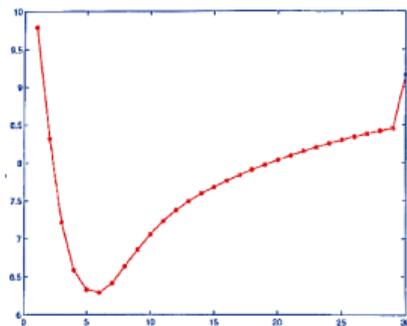
$$\begin{pmatrix} \frac{W_r}{r_{max}} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{W_g}{g_{max}} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{W_b}{b_{max}} \end{pmatrix}$$

- ▶ peu efficace s'il y a des points de l'image proches du blanc
 - ▶ *calculer le maximum de la moyenne sur un voisinage autour de chaque pixel*
 - ▶ *possibilité de prétraiter l'image par un lissage gaussien*

○ Utilisation de la norme de Minkowski

$$\mu_x = \left(\frac{\sum_{i,j} I_x(i,j)^p}{N} \right)^{\frac{1}{p}}$$

- ▶ $p = 1$: hypothèse du monde gris de base (moyenne usuelle)
- ▶ $p = \infty$: hypothèse du maximum
- ▶ expérimentalement : erreur minimale pour p proche de 6



Finlayson and Trezzi, 2004

- ▶ erreur angulaire entre deux couleurs c_1 et c_2 :

$$\arg \cos \left(\frac{\vec{c}_1 \cdot \vec{c}_2}{\|c_1\| \times \|c_2\|} \right)$$

- ▶ erreur angulaire médiane



monde gris



maximum



monde gris - Minkowski $n = 6$



auto level RGB



monde gris



maximum $\sigma = 4$



monde gris - Minkowski $n = 6$



auto level RGB



monde gris



maximum $\sigma = 12$



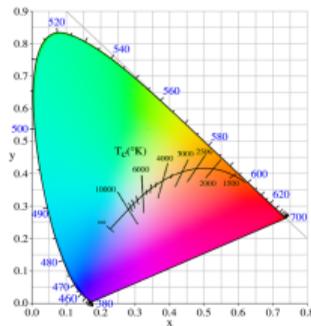
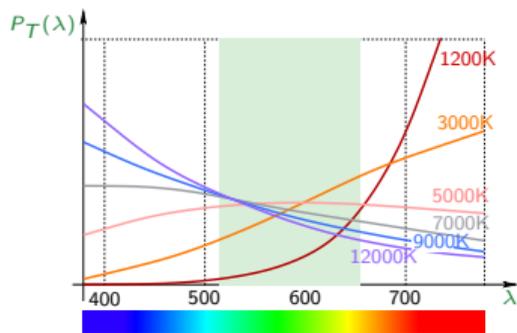
monde gris - Minkowski $n = 6$



auto level RGB

○ **Stratégie de préservation du canal vert**

- ▶ ces transformations sont définies à une normalisation d'intensité près
- ▶ préservation du canal vert



- ▶ normalisation de la transformation diagonale par rapport au vert
— exemple pour GW :

$$\frac{\mu_r G}{G_g} \times \begin{pmatrix} \frac{G_r}{\mu_r} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{G_g}{\mu_g} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{G_b}{\mu_b} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{\mu_g}{\mu_r} & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{\mu_g}{\mu_b} \end{pmatrix} \quad \text{si } G_r = G_g = G_b = 0.5$$

alors $\frac{G_r}{G_g} = \frac{G_b}{G_g} = 1$



- ▶ *ligne du haut : équilibrage des trois canaux*
- ▶ *ligne du bas : préservation du canal vert*

monde gris

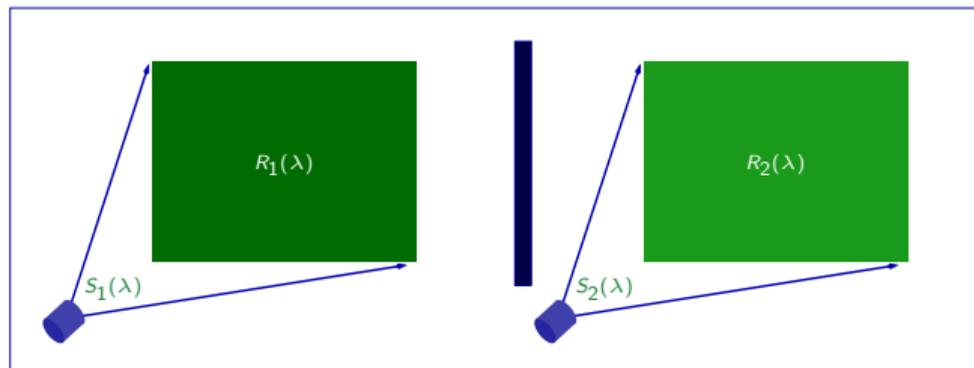


Minkowski, $p = 6$



★ Perception des couleurs

On éclaire une surface de réflectance $R_1(\lambda)$ (resp. $R_2(\lambda)$) au moyen d'une source lumineuse de DSP $S_1(\lambda)$ (resp. $S_2(\lambda)$).



Les surfaces sont placées sur un fond neutre. Est-ce qu'un observateur moyen peut différencier visuellement les deux couleurs perçues ?

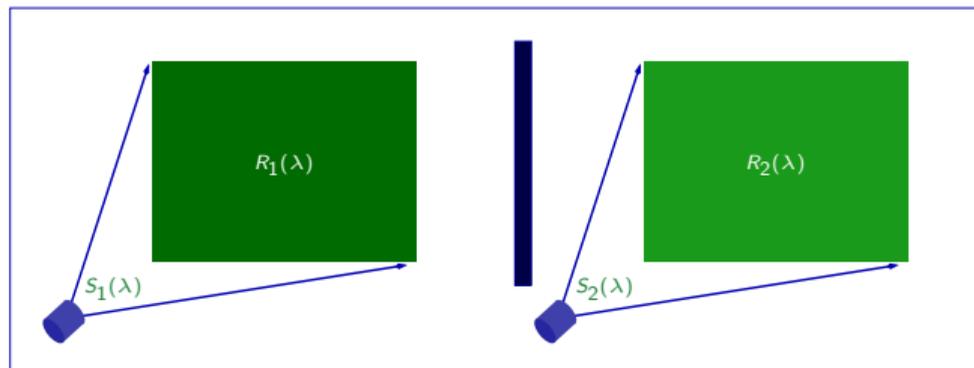


$S_1(\lambda) = S_2(\lambda)$ et $R_1(\lambda) = R_2(\lambda)$	jamais	parfois
---	--------	---------

$S_1(\lambda) \neq S_2(\lambda)$ et $R_1(\lambda) \neq R_2(\lambda)$	toujours	pas toujours
---	----------	--------------

★ Perception des couleurs

On éclaire une surface de réflectance $R_1(\lambda)$ (resp. $R_2(\lambda)$) au moyen d'une source lumineuse de DSP $S_1(\lambda)$ (resp. $S_2(\lambda)$).



Les surfaces sont placées sur un fond neutre. Est-ce qu'un observateur moyen peut différencier visuellement les deux couleurs perçues ?

A

B

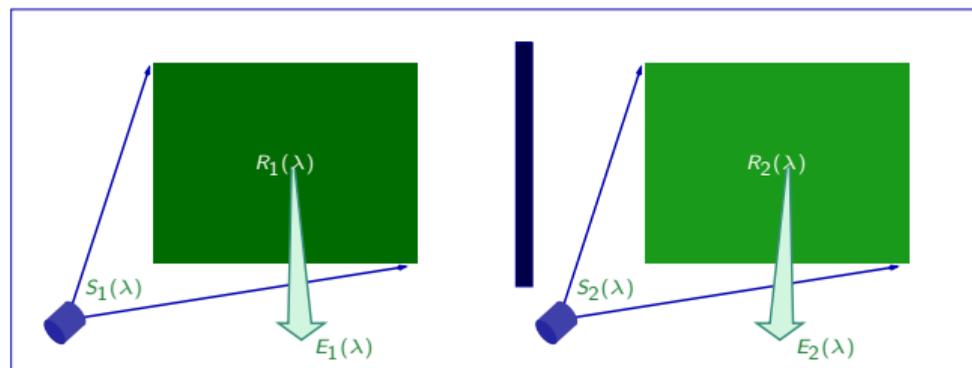
C

D

$S_1(\lambda) = S_2(\lambda)$ et $R_1(\lambda) = R_2(\lambda)$	jamais	parfois
---	--------	---------

$S_1(\lambda) \neq S_2(\lambda)$ et $R_1(\lambda) \neq R_2(\lambda)$	toujours	pas toujours
---	----------	--------------

★ Perception des couleurs – explication réponse D



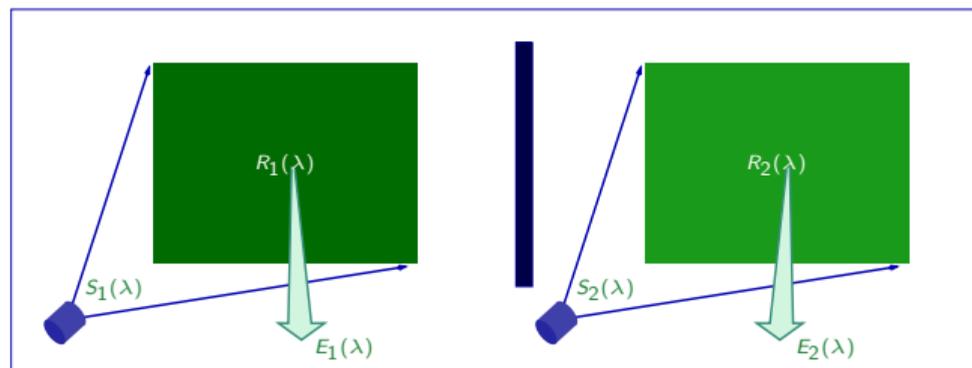
► soient $E_1(\lambda) = S_1(\lambda)R_1(\lambda)$ et $E_2(\lambda) = S_2(\lambda)R_2(\lambda)$

(1) ou bien (expérience des Mondrians) $E_1(\lambda) = E_2(\lambda)$

(2) ou bien (couleurs métamères) $E_1(\lambda) \neq E_2(\lambda)$ et

$$\begin{cases} \int \bar{x}(\lambda)E_1(\lambda)d\lambda = \int \bar{x}(\lambda)E_2(\lambda)d\lambda \\ \int \bar{y}(\lambda)E_1(\lambda)d\lambda = \int \bar{y}(\lambda)E_2(\lambda)d\lambda \\ \int \bar{z}(\lambda)E_1(\lambda)d\lambda = \int \bar{z}(\lambda)E_2(\lambda)d\lambda \end{cases}$$

★ Perception des couleurs – explication réponse D



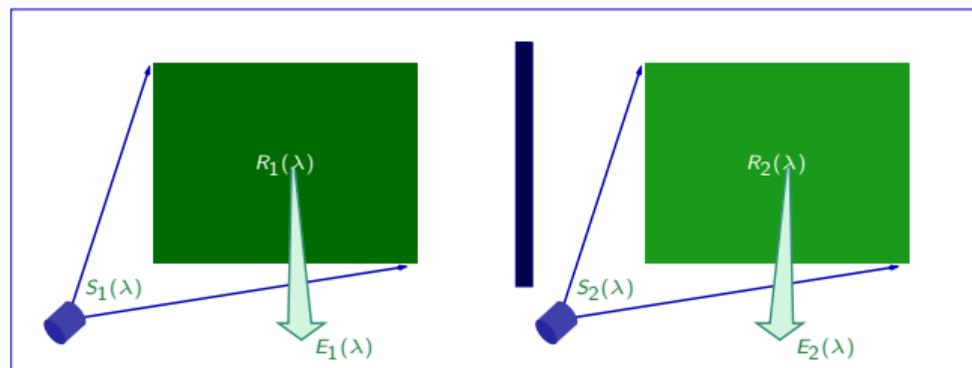
► soient $E_1(\lambda) = S_1(\lambda)R_1(\lambda)$ et $E_2(\lambda) = S_2(\lambda)R_2(\lambda)$

(1) ou bien (expérience des Mondrians) $E_1(\lambda) = E_2(\lambda)$

(2) ou bien (couleurs métamères) $E_1(\lambda) \neq E_2(\lambda)$ et

$$\begin{cases} \int \bar{x}(\lambda)E_1(\lambda)d\lambda = \int \bar{x}(\lambda)E_2(\lambda)d\lambda \\ \int \bar{y}(\lambda)E_1(\lambda)d\lambda = \int \bar{y}(\lambda)E_2(\lambda)d\lambda \\ \int \bar{z}(\lambda)E_1(\lambda)d\lambda = \int \bar{z}(\lambda)E_2(\lambda)d\lambda \end{cases}$$

★ Perception des couleurs – explication réponse D



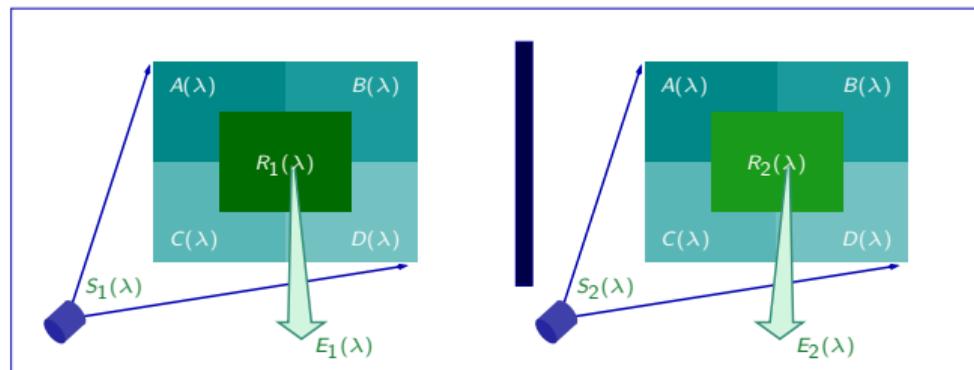
► soient $E_1(\lambda) = S_1(\lambda)R_1(\lambda)$ et $E_2(\lambda) = S_2(\lambda)R_2(\lambda)$

(1) ou bien (expérience des Mondrians) $E_1(\lambda) = E_2(\lambda)$

(2) ou bien (couleurs métamères) $E_1(\lambda) \neq E_2(\lambda)$ et

$$\begin{cases} \int \bar{x}(\lambda)E_1(\lambda)d\lambda = \int \bar{x}(\lambda)E_2(\lambda)d\lambda \\ \int \bar{y}(\lambda)E_1(\lambda)d\lambda = \int \bar{y}(\lambda)E_2(\lambda)d\lambda \\ \int \bar{z}(\lambda)E_1(\lambda)d\lambda = \int \bar{z}(\lambda)E_2(\lambda)d\lambda \end{cases}$$

★ Perception des couleurs



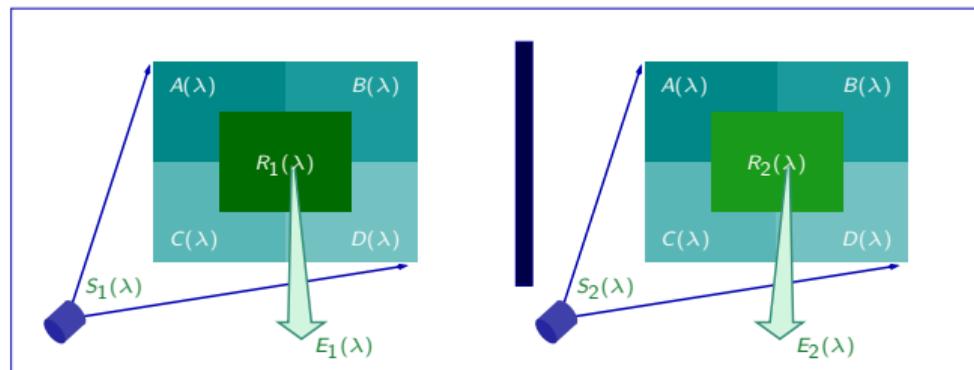
Les deux surfaces sont maintenant disposées parmi d'autres surfaces de différentes réflectances. On se place dans le cas D(1) :

$$E_1(\lambda) = E_2(\lambda), S_1(\lambda) \neq S_2(\lambda) \text{ et } R_1(\lambda) \neq R_2(\lambda)$$

Est-ce qu'un observateur moyen peut différencier visuellement les deux couleurs perçues ?

A	oui, cela peut se produire
B	non, c'est impossible

★ Perception des couleurs



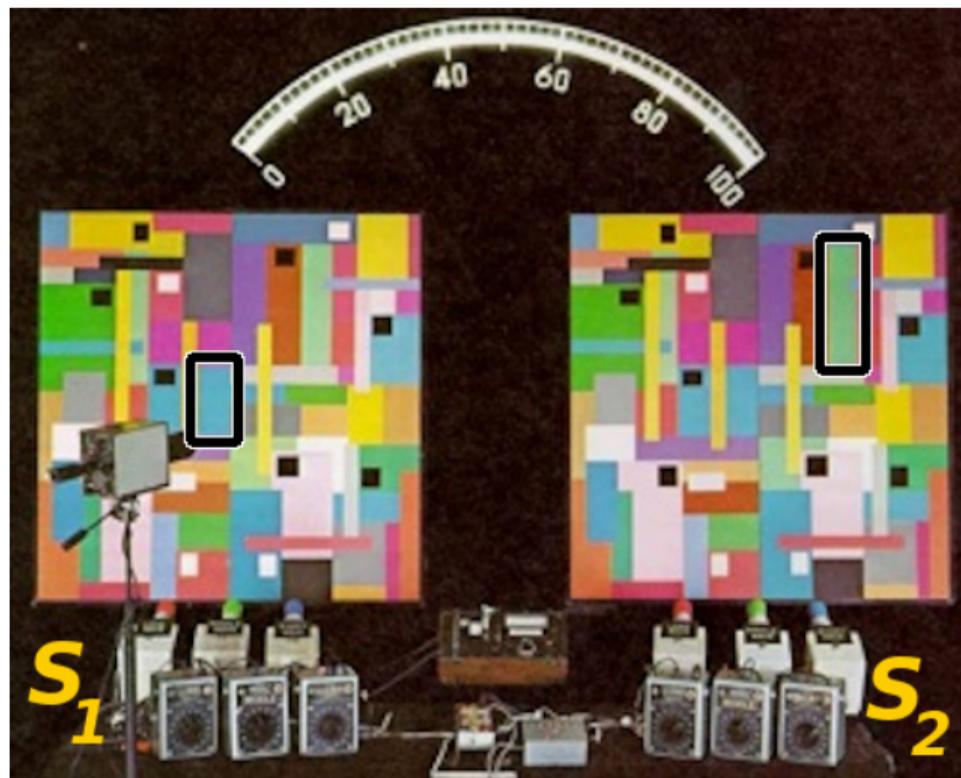
Les deux surfaces sont maintenant disposées parmi d'autres surfaces de différentes réflectances. On se place dans le cas D(1) :

$$E_1(\lambda) = E_2(\lambda), S_1(\lambda) \neq S_2(\lambda) \text{ et } R_1(\lambda) \neq R_2(\lambda)$$

Est-ce qu'un observateur moyen peut différencier visuellement les deux couleurs perçues ?

A	oui, cela peut se produire
B	non, c'est impossible

★ Perception des couleurs



3. Le modèle retinex

3.1. Historique

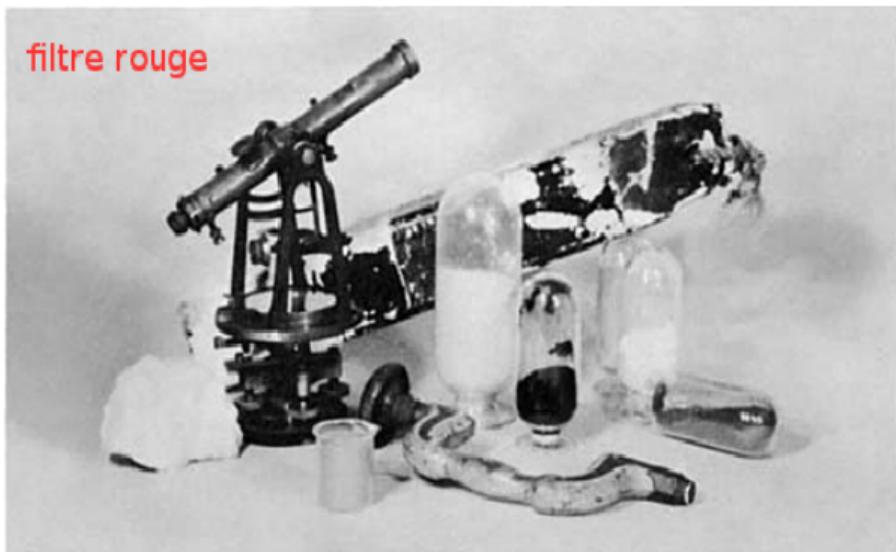
- ▶ 1958 (*Symposium of National Academy of Sciences*) : Edwin Herbert Land présente une expérience montrant que le SVH est capable de reconstituer des couleurs en l'absence de sources trichromatiques
- ▶ rouge + noir = couleurs



3. Le modèle retinex

3.1. Historique

- ▶ 1958 (*Symposium of National Acadademy of Sciences*) : Edwin Herbert Land présente une expérience montrant que le SVH est capable de reconstituer des couleurs en l'absence de sources trichromatiques
- ▶ rouge + noir = couleurs



3. Le modèle retinex

3.1. Historique

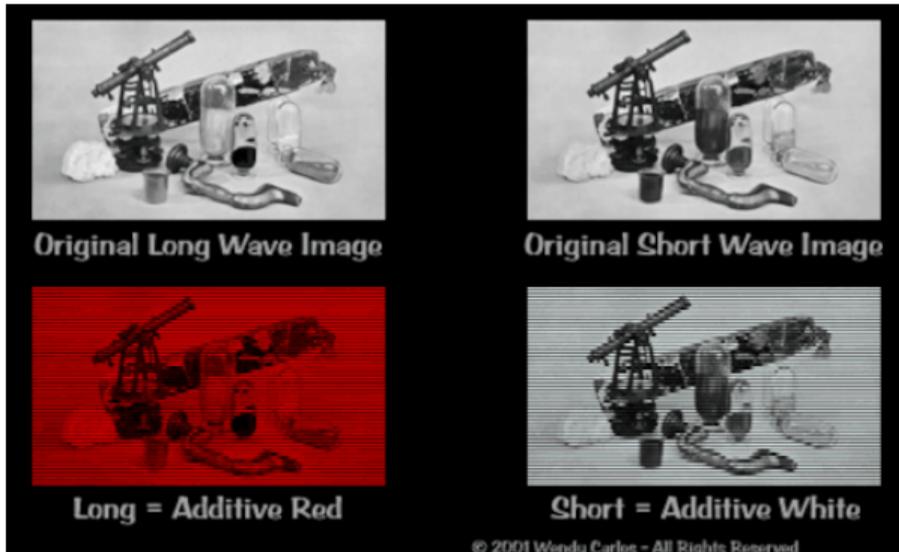
- ▶ 1958 (*Symposium of National Acadademy of Sciences*) : Edwin Herbert Land présente une expérience montrant que le SVH est capable de reconstituer des couleurs en l'absence de sources trichromatiques
- ▶ rouge + noir = couleurs

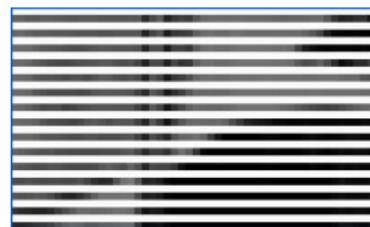
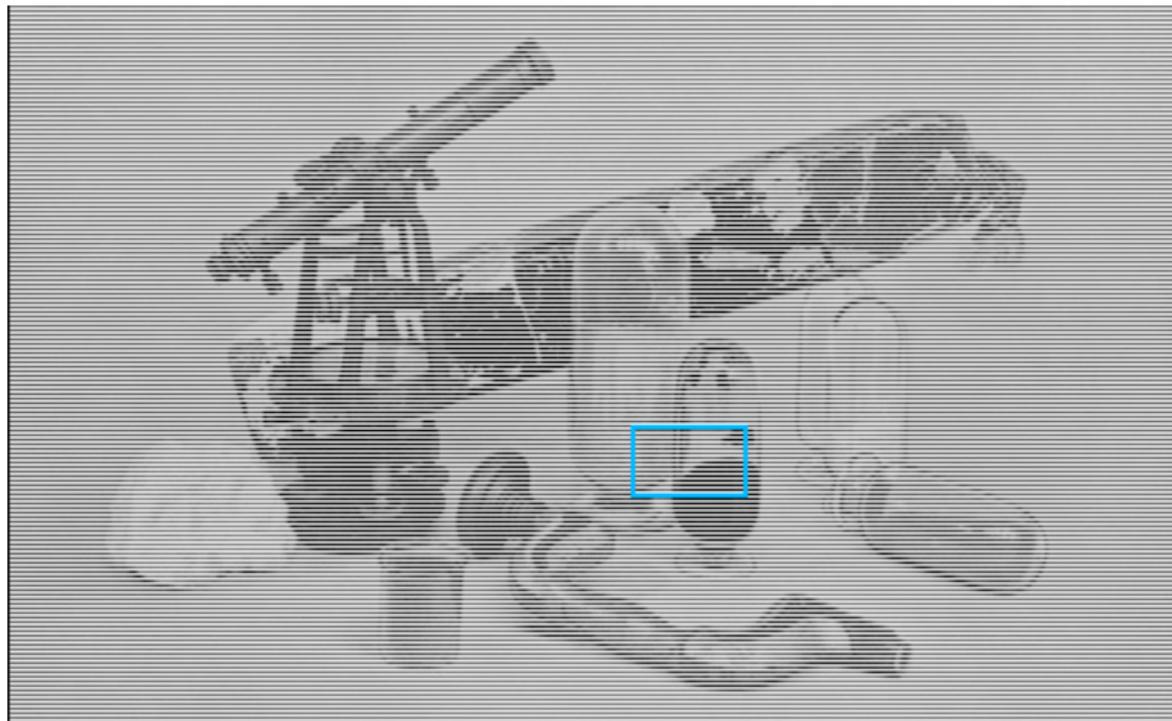


3. Le modèle retinex

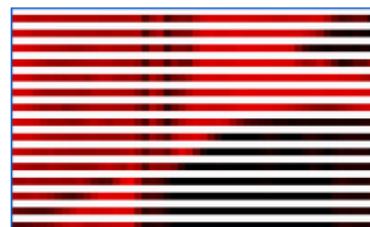
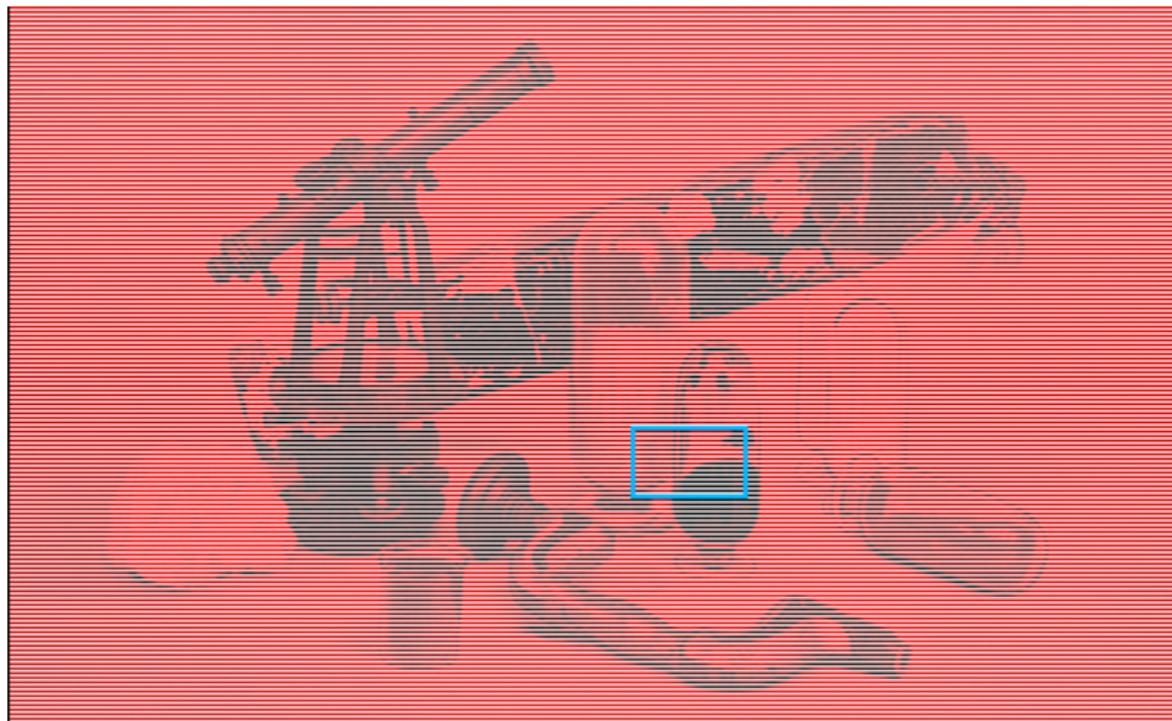
3.1. Historique

- ▶ 1958 (*Symposium of National Acadademy of Sciences*) : Edwin Herbert Land présente une expérience montrant que le SVH est capable de reconstituer des couleurs en l'absence de sources trichromatiques
- ▶ rouge + noir = couleurs

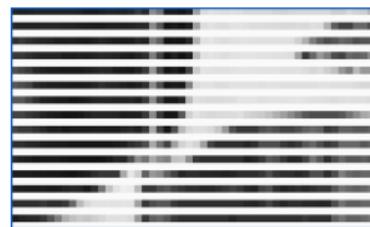
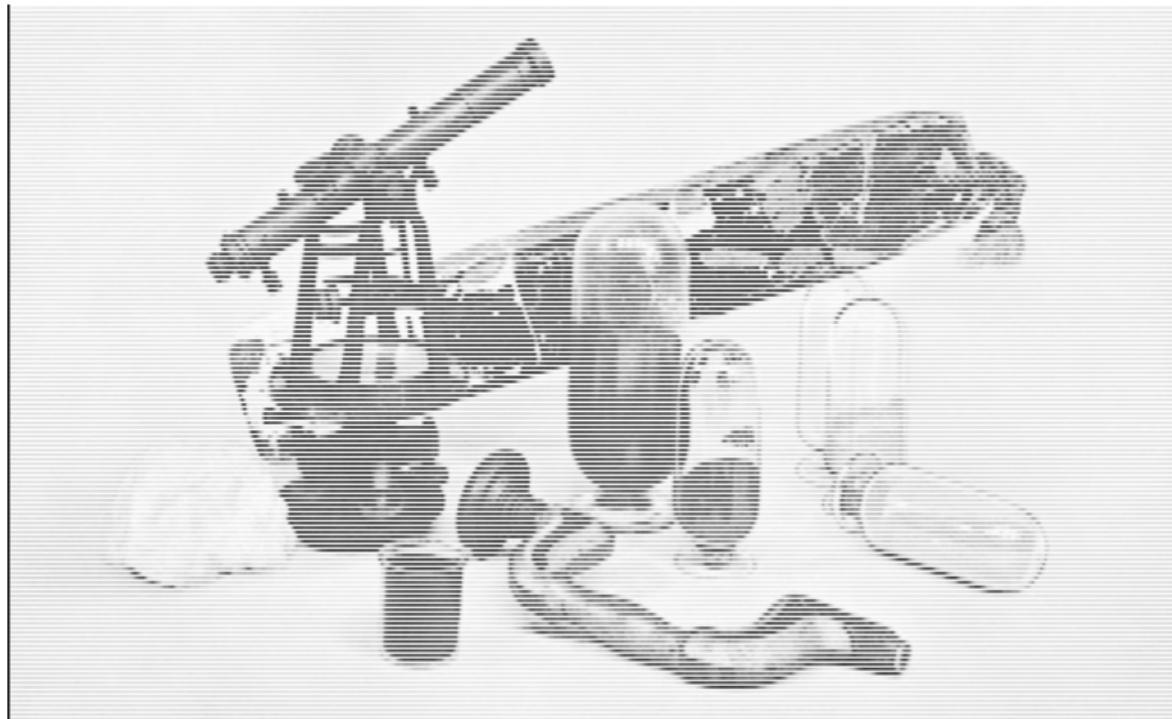




I_1 : Image + filtre rouge / une ligne sur deux (par ex. impaires)



I_1 : Image + filtre rouge / une ligne sur deux (par ex. impaires) \rightarrow canal rouge (RGB)



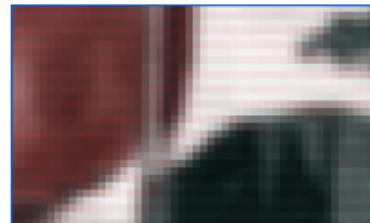
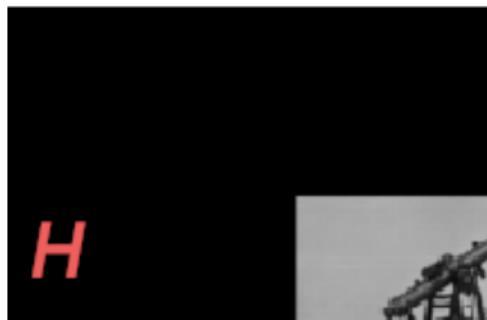
I_2 : Image + filtre vert / une ligne sur deux (par ex. paires) \rightarrow canaux R, G et B



Combinaison l_1 et l_2



lissage gaussien + rehaussement de contraste (auto-level)



lissage gaussien + rehaussement de contraste (auto-level)

- ▶ Durant les années 50 à 80, Land développe un modèle baptisé retinex (retina + cortex) pour expliquer le traitement des couleurs par le SVH
 - ▶ *Land-1964 "The Retinex" Am. Sci. 52(2) : 247-64.*
 - ▶ *Land-1977, "The Retinex Theory of Color Vision", Sci. Am. 237 :108-28.*
 - ▶ *Land-1983, "Recent advances in retinex theory and some implications for cortical computations : Color vision and the natural images", Proc. Natl. Acad. Sci. U. S. A. 80 :5136-69.*
 - ▶ *Land-1986, "An alternative technique for the computation of the designator in the retinex theory of color vision," Proc. Nat. Acad. Sci., vol. 83, pp. 3078–3080.*

3.2. Le modèle de Land

Physics: Land

Proc. Natl. Acad. Sci. USA 80 (1983) 5167

The **relative reflectance** of **i** to **j**:

$$R^{\Lambda}(i;j) = \sum_k \delta \log \frac{I_{k+1}}{I_k}$$

$$\delta \log \frac{I_{k+1}}{I_k} = \begin{cases} \log \frac{I_{k+1}}{I_k} & \text{if } \left| \log \frac{I_{k+1}}{I_k} \right| > \text{threshold} \\ 0 & \text{if } \left| \log \frac{I_{k+1}}{I_k} \right| < \text{threshold} \end{cases}$$

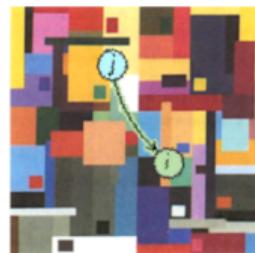
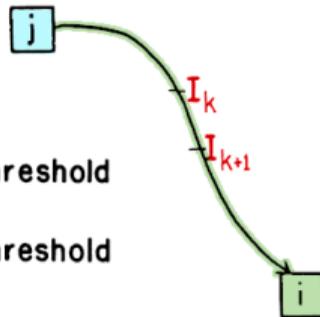


FIG. 4. Computation of average relative reflectance (designator).

3.2. Le modèle de Land

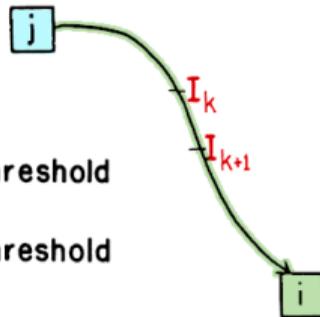
Physics: Land

Proc. Natl. Acad. Sci. USA 80 (1983) 5167

The **relative reflectance** of **i** to **j**:

$$R^{\Lambda}(i;j) = \sum_k \delta \log \frac{I_{k+1}}{I_k}$$

$$\delta \log \frac{I_{k+1}}{I_k} = \begin{cases} \log \frac{I_{k+1}}{I_k} & \text{if } \left| \log \frac{I_{k+1}}{I_k} \right| > \text{threshold} \\ 0 & \text{if } \left| \log \frac{I_{k+1}}{I_k} \right| < \text{threshold} \end{cases}$$



Average Relative Reflectance at area **i**:

$$\bar{R}^{\Lambda}(i) = \frac{\sum_{j=1}^N R^{\Lambda}(i;j)}{N}$$

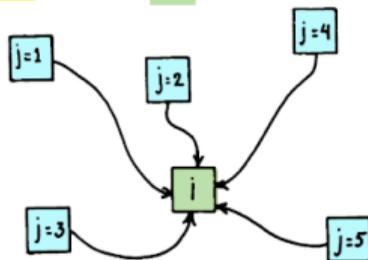


FIG. 4. Computation of average relative reflectance (designator).

▶ modélisation de plusieurs mécanismes du SVH

▶ rehaussement de détails

masque de flou

▶ constance des couleurs

hypothèse du max

▶ rehaussement de contraste local (compression de dynamique)

filtre homomorphique

▶ approximation par le modèle center-surround retinex

- ▶ *Z. Rahman, D. J. Jobson, and G. A. Woodell : Multiscale Retinex for Color Image Enhancement, 1996*

▶ mise œuvre du « modèle des chemins »

- ▶ *Alessandro Rizzi, Carlo Gatta, Daniele Marini, 2002*

3.3. Le modèle « center surround retinex »

○ Transformation de base

- ▶ transformation marginale : pour chaque canal $c \in \{R, G, B\}$

$$R_c(I(P)) = \log \left(\frac{I_c(P)}{I_c(\bar{P})} \right) = \log(I_c(P)) - \log(I_c(\bar{P}))$$

\bar{I}_c obtenue par lissage gaussien

$$\bar{I}_c = G_\sigma * I_c$$

- ▶ par conséquent

$$R_c(I) = \log(I_c(P)) - \log((G_\sigma * I_c)(P))$$

- ▶ le résultat doit être renormalisé ($\longrightarrow [0..255]$)

3.3. Le modèle « center surround retinex »

○ Transformation de base

- ▶ transformation marginale : pour chaque canal $c \in \{R, G, B\}$

$$R_c(I(P)) = \log \left(\frac{I_c(P)}{I_c(\bar{P})} \right) = \log \left(I_c(P) \right) - \log \left(I_c(\bar{P}) \right)$$

\bar{I}_c obtenue par lissage gaussien

$$\bar{I}_c = G_\sigma * I_c$$

- ▶ par conséquent

$$R_c(I) = \log \left(I_c(P) \right) - \log \left((G_\sigma * I_c)(P) \right)$$

- ▶ le résultat doit être renormalisé ($\longrightarrow [0..255]$)







○ Transformation multiéchelle

- ▶ sur les images couleur, l'effet obtenu varie avec la **taille du noyau** de lissage
 - ▶ pour des **petites valeurs** de σ :
 - + *détails et dynamique*
 - *rendu des couleurs*
 - ▶ pour des **grandes valeurs** de σ : résultat inverse.
- ▶ **moyenne pondérée** de n transformations à différentes échelles

$$MSR_c = \sum_{k=1}^n w_k R_{c,k}$$

où $R_{c,k}$ est la transformation de base pour $\sigma = \sigma_k$

et w_k un coefficient **arbitraire** de pondération de l'échelle k

- ▶ paramétrage empirique :

$$n = 3, \quad w_1 = w_2 = w_3 = \frac{1}{3} \quad \text{et} \quad \begin{cases} \sigma_1 = 15 \\ \sigma_2 = 80 \\ \sigma_3 = 250 \end{cases}$$

○ Transformation multiéchelle

- ▶ sur les images couleur, l'effet obtenu varie avec la **taille du noyau** de lissage
 - ▶ pour des **petites valeurs** de σ :
 - + *détails et dynamique*
 - *rendu des couleurs*
 - ▶ pour des **grandes valeurs** de σ : résultat inverse.
- ▶ **moyenne pondérée** de n transformations à différentes échelles

$$MSR_c = \sum_{k=1}^n w_k R_{c,k}$$

où $R_{c,k}$ est la transformation de base pour $\sigma = \sigma_k$

et w_k un coefficient **arbitraire** de pondération de l'échelle k

- ▶ paramétrage empirique :

$$n = 3, \quad w_1 = w_2 = w_3 = \frac{1}{3} \quad \text{et} \quad \begin{cases} \sigma_1 = 15 \\ \sigma_2 = 80 \\ \sigma_3 = 250 \end{cases}$$

○ Transformation multiéchelle

- ▶ sur les images couleur, l'effet obtenu varie avec la **taille du noyau** de lissage
 - ▶ pour des **petites valeurs** de σ :
 - + *détails et dynamique*
 - *rendu des couleurs*
 - ▶ pour des **grandes valeurs** de σ : résultat inverse.
- ▶ **moyenne pondérée** de n transformations à différentes échelles

$$MSR_c = \sum_{k=1}^n w_k R_{c,k}$$

où $R_{c,k}$ est la transformation de base pour $\sigma = \sigma_k$

et w_k un coefficient **arbitraire** de pondération de l'échelle k

- ▶ paramétrage empirique :

$$n = 3, \quad w_1 = w_2 = w_3 = \frac{1}{3} \quad \text{et} \quad \begin{cases} \sigma_1 = 15 \\ \sigma_2 = 80 \\ \sigma_3 = 250 \end{cases}$$



multiscale
retinex



$\sigma = 15$



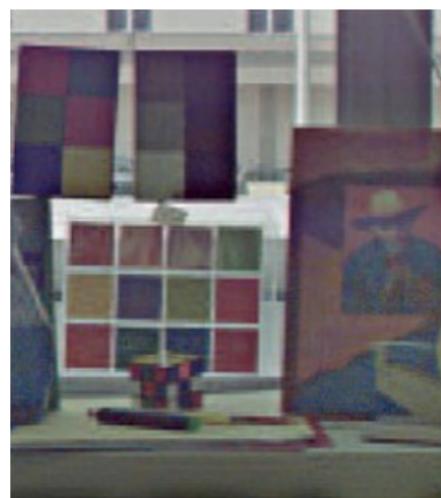
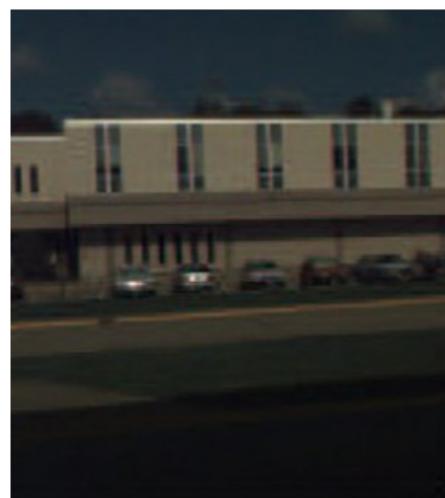
$\sigma = 80$



$\sigma = 250$



multiscale retinex

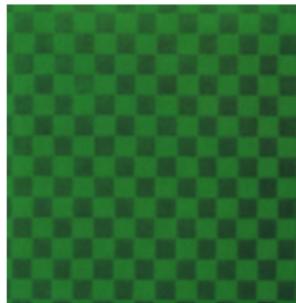


multiscale retinex

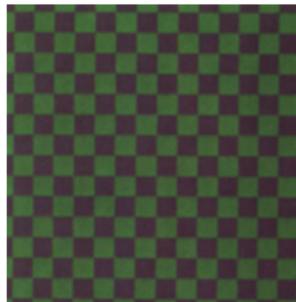
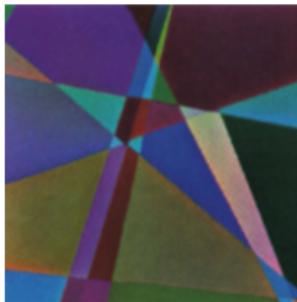
○ Transformation multiéchelle avec restitution de couleur

- ▶ transformation multiéchelle : tendance à griser les plages uniformes

I



MSR(I)



- ▶ ajout d'un paramètre de **correction de couleur** calculé en chaque point P et pour chaque canal c :

$$\alpha_c(P) = \log \left(\frac{I_c(P)}{I_R(P) + I_G(P) + I_B(P)} \right)$$

- ▶ *multiscale retinex with color restoration* : $I'_c = MSRCR_c(I)$

$$I'_c(P) = \alpha_c(P) \sum_k w_k \left(\log [I_c(P)] - \log [(G_k * I_c)(P)] \right)$$

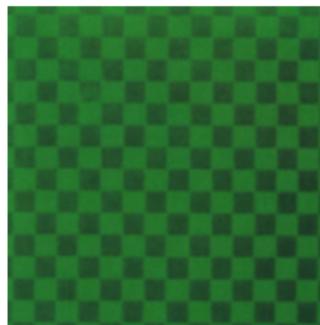
- ▶ ajout d'un paramètre de **correction de couleur** calculé en chaque point P et pour chaque canal c :

$$\alpha_c(P) = \log \left(\frac{I_c(P)}{I_R(P) + I_G(P) + I_B(P)} \right)$$

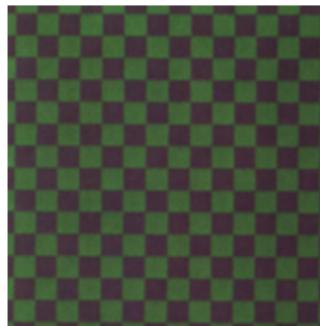
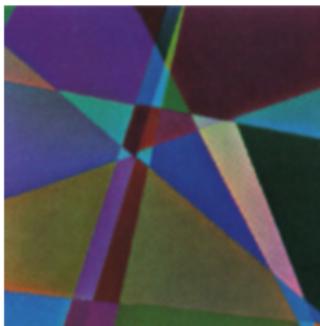
- ▶ *multiscale retinex with color restoration* : $I'_c = MSRCR_c(I)$

$$I'_c(P) = \alpha_c(P) \sum_k w_k \left(\log [I_c(P)] - \log [(G_k * I_c)(P)] \right)$$

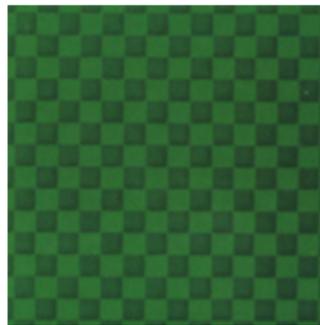
I



MSR(I)

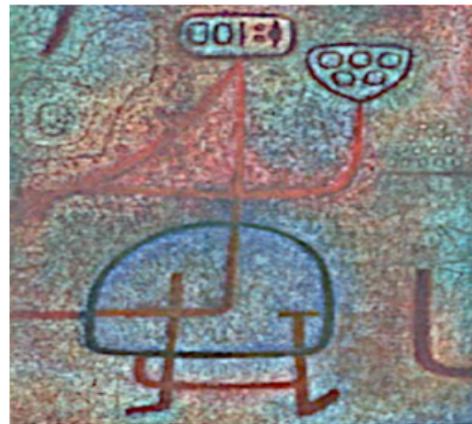
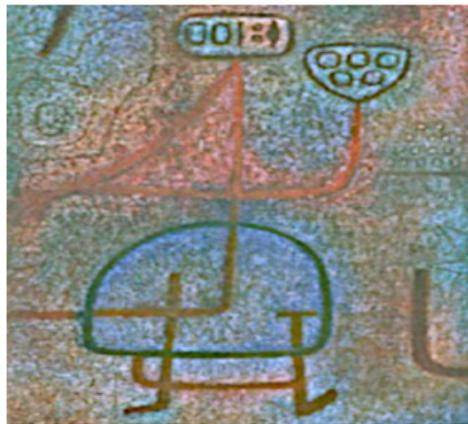
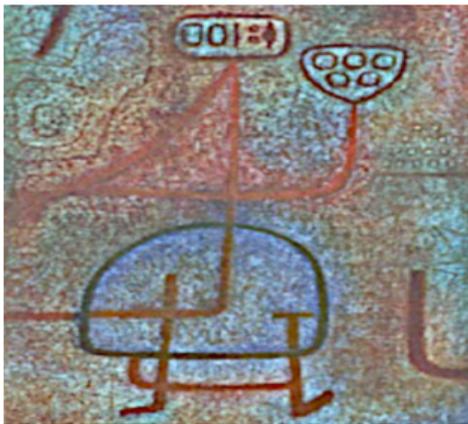
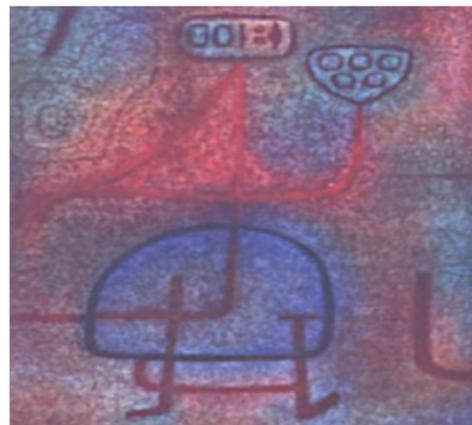
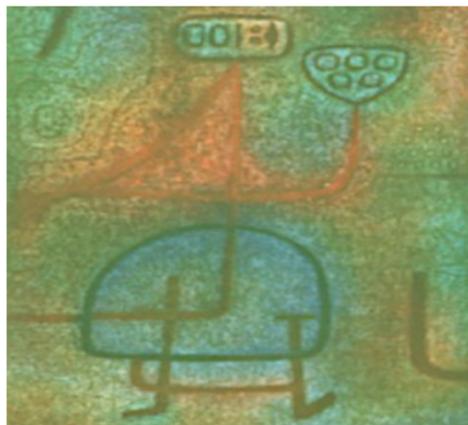
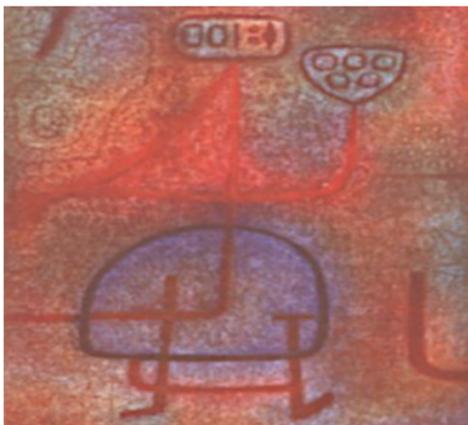


MSRCR(I)



► Exemple MSRRCR : restauration de couleur

I



MSRRCR(I)

► Exemple MSRCR : correction de dynamique



► exemple obtenu avec le traitement MSRCR implémenté sous Gimp



- ▶ exemple obtenu avec le traitement MSRCR implémenté sous Gimp



- ▶ exemple obtenu avec le traitement MSRCR implémenté sous Gimp

