

# OPTIQUE

( LENTILLES, ŒIL, PHOTOGRAPHIE,  
COULEURS, ... )



## TABLE DES MATIÈRES

1. Optique Géométrique
  - 1.1. L'Indice de Réfraction
  - 1.2. La Loi de la Réflexion
  - 1.3. La Loi de la Réfraction
  - 1.4. La Réflexion Totale
  - 1.5. La Loi des Lentilles Minces
  - 1.6. L'Image d'un Objet par une Lentille
    - 1.6.1. Lentilles Convergentes
    - 1.6.2. Lentilles Divergentes
    - 1.6.3. Convention des Signes
    - 1.6.4. Le Grandissement
  - 1.7. L'Image d'un Objet par Deux Lentilles Accolées
  - 1.8. L'Image d'un Objet par Deux Lentilles Non Accolées
  - 1.9. Lentille Sphérique Mince
  - 1.10. L'Arc-En-Ciel
    - 1.10.1. L'Arc-en-Ciel Primaire
    - 1.10.2. Arcs-en-Ciel Primaire et Secondaire
    - 1.10.3. Les Arcs-en-Ciel Secondaire, Tertiaire, etc
    - 1.10.4. Polarisation de l'arc-en-ciel et intensité des arcs
      - 1.10.4.1. Coefficient de Fesnel et polarisation de l'arc-en-ciel primaire
      - 1.10.4.2. Coefficient de Fesnel et polarisation de l'arc-en-ciel secondaire
      - 1.10.4.3. Coefficient de Fesnel et polarisation de l'arc-en-ciel du  $p^e$  ordre
      - 1.10.4.4. Déviation maximale de la lumière
      - 1.10.4.5. Les Arcs-en-Ciel Surnuméraires
      - 1.10.4.6. Effet de la Diffraction sur l'Arc-en-Ciel
2. L'œil
  - 2.1. Description Physiologique
  - 2.2. Pouvoir Séparateur
  - 2.3. Les Limites de la Vision Distincte
  - 2.4. La Myopie
  - 2.5. L'Hypermétropie
  - 2.6. La Persistance Rétinienne
    - 2.6.1. La persistance rétinienne positive
    - 2.6.2. La persistance rétinienne négative
  - 2.7. L'œil est la Technologie
    - 2.7.1. L'Appareil Photographique Réflex
    - 2.7.2. Les Écrans et le Pouvoir Séparateur de l'œil
    - 2.7.3. Les Pixels et la Colorimétrie
3. Instruments d'Optique
  - 3.1. Le Grossissement
  - 3.2. L'œil
  - 3.3. La Loupe
  - 3.4. Le Microscope
  - 3.5. La Lunette Astronomique
  - 3.6. Le Télescope de Newton
  - 3.7. La Pupille

4. Optique Appliquée à la Photographie
  - 4.1. Un Peu d'Histoire...
    - 4.1.1. La Chambre Noire (*Camera Obscura*) et le Sténopé
    - 4.1.2. Le Procédé Argentique et la Première Photographie
    - 4.1.3. Le Daguerriotype
    - 4.1.4. Le Premier Appareil Photo Numérique
  - 4.2. La Distance Focale
    - 4.2.1. Approximation de la Lentille Mince
    - 4.2.2. Système Épais
    - 4.2.3. Angle de Champ
  - 4.3. Ouverture et Profondeur de Champ
    - 4.3.1. Diaphragme et nombre d'ouverture
    - 4.3.2. Cercle de confusion
    - 4.3.3. Profondeur focale
    - 4.3.4. Profondeur de champ
    - 4.3.5. Distance hyperfocale
    - 4.3.6. Synthèse des résultats
  - 4.4. Aberrations
    - 4.4.1. Aberrations sphériques
    - 4.4.2. Astigmatisme
    - 4.4.3. Coma
    - 4.4.4. Courbure de Champ
    - 4.4.5. Distorsion
    - 4.4.6. Aberrations Chromatiques
  - 4.5. Autres Limitations Optiques
    - 4.5.1. La Diffraction sur un Trou
    - 4.5.2. La Diffraction et l'œil Humain
    - 4.5.3. La Diffraction sur une Fente – L'Effet du Diaphragme
    - 4.5.4. Vignettage
    - 4.5.5. Le Bokeh – Rendre le Flou Esthétique
  - 4.6. Objectif à bascule et décentrement (ou *tilt-shift*)
    - 4.6.1. Objectif à décentrement (« *shift* »)
    - 4.6.2. Objectif à bascule (« *tilt* »)
5. La Photographie
  - 5.1. Les Trois Types de Flou
    - 5.1.1. Le Flou de Mise au Point
    - 5.1.2. Le Flou de Bougé du Sujet
    - 5.1.3. Le Flou de Mise du Photographe
  - 5.2. Fonctionnement d'un Appareil
    - 5.2.1. Le Temps de Pose
    - 5.2.2. L'Ouverture
    - 5.2.3. La Sensibilité
    - 5.2.4. La Mise au Point
    - 5.2.5. Sur un Appareil Photo
  - 5.3. Règles de Composition
    - 5.3.1. La Règle des Tiers
    - 5.3.2. Les Lignes de Fuite
    - 5.3.3. Les Différents Plans
    - 5.3.4. Le Regard
    - 5.3.5. Le Mouvement
    - 5.3.6. L'Horizon Fuyant
    - 5.3.7. Les Couleurs
    - 5.3.8. Les Éléments Parasites

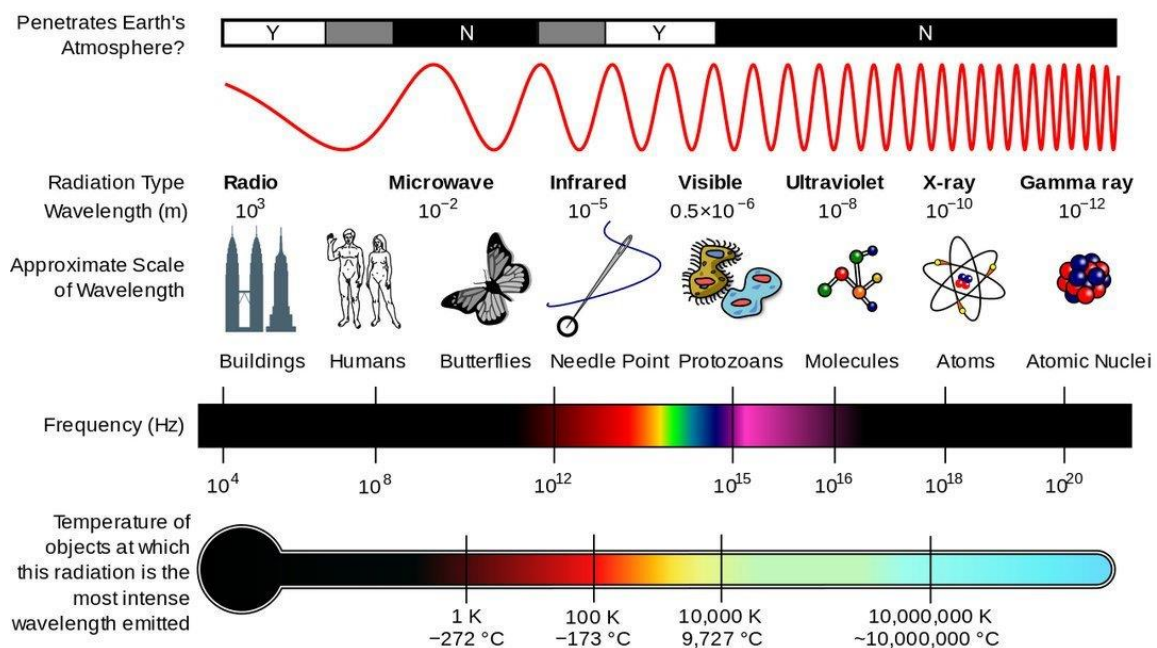
6. Les Couleurs
  - 6.1. Les Systèmes Colorimétriques
    - 6.1.1. Le Système Additif
    - 6.1.2. Le Système Soustractif
    - 6.1.3. Les Deux Systèmes
  - 6.2. L'œil et les Couleurs
    - 6.2.1. Vision Photopique (Diurne)
    - 6.2.2. Vision Scotopique (Nocturne)
    - 6.2.3. Niveaux d'Éclairement
    - 6.2.4. L'Effet Purkinje
  - 6.3. « Classement » des Couleurs
  - 6.4. Notions de Photométrie et de Colorimétrie
  - 6.5. Les Espaces Colorimétriques de la CIE
    - 6.5.1. L'Espace RVB (RGB)
    - 6.5.2. L'Espace CIE XYZ
    - 6.5.3. L'Espace CIE xyY
    - 6.5.4. L'Espace CIE  $L^*u^*v^*$
    - 6.5.5. L'Espace CIE  $L^*a^*b^*$
    - 6.5.6. L'Espace CIE  $L^*C^*h^*$
    - 6.5.7. L'Espace TSL (HSL ou HSV ou HSB)
    - 6.5.8. L'Espace CMJN
    - 6.5.9. Autres Espaces RVB
    - 6.5.10. Distance Chromatique – Distance entre Deux Couleurs
    - 6.5.11. Intérêt d'Avoir Différents Espaces Colorimétriques
    - 6.5.12. Autres Couleurs « Dépendants »
    - 6.5.13. Espaces Couleurs « Indépendants »
    - 6.5.14. Couleurs Reproductibles
    - 6.5.15. Changements d'Espaces Colorimétriques
  - 6.6. La Température de Couleur
    - 6.6.1. La Loi de Planck
    - 6.6.2. Métamérisme
  - 6.7. Le Diagramme Trichromatique
7. La Photographie Numérique
  - 7.1. Les capteurs – Principe de Fonctionnement
    - 7.1.1. Fonctionnement d'un Capteur à Capacité MOS
    - 7.1.2. Fonctionnement d'un Capteur CCD
    - 7.1.3. Fonctionnement d'un Capteur CMOS
    - 7.1.4. Performance des Capteurs
    - 7.1.5. Norme ISO
  - 7.2. La Gestion des Couleurs
    - 7.2.1. Bref Historique
    - 7.2.2. Couleur  $L^*a^*b^*$
  - 7.3. La Couleur en Informatique
  - 7.4. Capture des Couleurs en Photographie Numérique : Le Dématriçage
    - 7.4.1. Structure du Capteur
    - 7.4.2. Image Matricée
    - 7.4.3. Le Dématriçage
    - 7.4.4. La Sensibilité « ISO »
    - 7.4.5. Le Moiré
  - 7.5. Le Gamme
  - 7.6. Les Profils ICC
  - 7.7. Gamut d'un Profil ICC

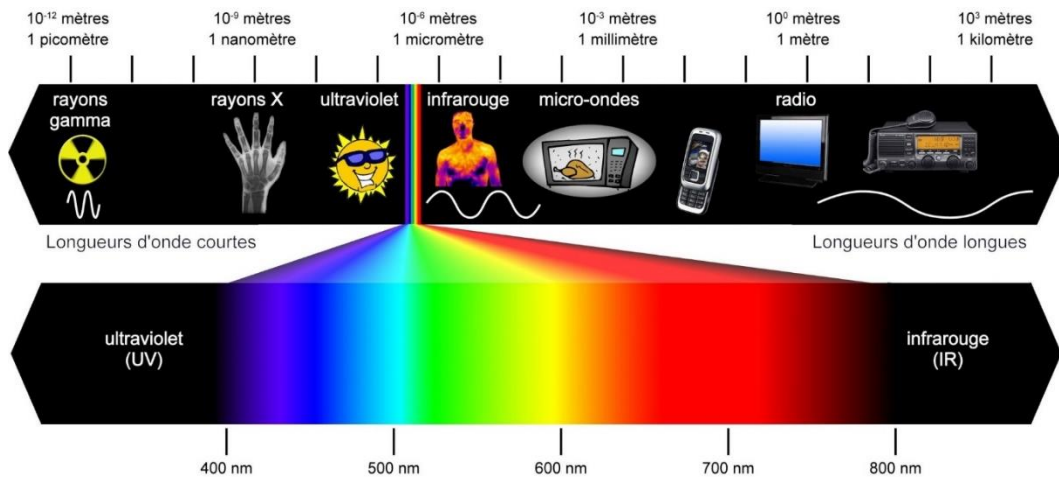
# OPTIQUE

L'optique décrit le comportement de la lumière et des ondes électromagnétiques. Ce chapitre décrit la lumière comme des rayons lumineux se déplaçant en ligne droite : c'est l'optique géométrique. Les couleurs et le fonctionnement de l'œil seront abordés, ainsi que diverses applications comme la photographie, la télévision, les capteurs, les lasers, les CD/DVD/Blu-ray....

La particularité de la lumière est qu'elle peut être abordée de deux manières différentes : comme une onde (elle suit alors les « lois physiques » liées aux ondes) ou comme une particule (elle suit alors les « lois physique » liées aux particules). Aucune n'est plus juste ou fausse que l'autre. Mais une approche est souvent meilleure que l'autre, en fonction de la situation et du contexte.

Ainsi, si on considère la lumière comme une particule, on appelle cette dernière un « *photon* ». Alors que si on la considère comme une onde, on l'appelle alors une « *onde électromagnétique* », puisqu'elle provient du couplage d'un champ électrique et d'un champ magnétique. La lumière n'est qu'une petite part du *spectre des ondes électromagnétiques*, composées de toute la gamme de fréquences et longueurs d'onde existantes. Ce spectre va donc des rayons cosmiques aux ondes radio, en passant par les fameux ultra-violets et infrarouges, entre autres. La lumière visible, et donc les couleurs de l'arc-en-ciel, font partie de ce spectre.





Dans le vide, la lumière se déplace alors toujours à la même vitesse constante, notée  $c$ . Dans l'air, elle se déplace (presque) à la même vitesse. Dans tout autre milieu (eau, plastique, diamant, etc), elle se déplacera plus lentement. Il existe un lien entre longueur d'onde  $\lambda$  et fréquence  $f$  :

$$c = \lambda \cdot f$$

L'unité de  $\lambda$  est le mètre (m) et celle de  $f$  est le hertz ( $\text{Hz} = \text{s}^{-1}$ ).

Ainsi, si la longueur d'onde augmente, la fréquence diminue, et réciproquement. Une onde ayant une grande fréquence aura également une grande énergie, et réciproquement. En effet, à travers la *loi de Planck-Einstein*, l'énergie  $E$  portée par un photon peut varier, bien que sa vitesse soit constante, ne dépendant alors que de la fréquence du photon :

$$E = h \cdot f$$

où  $h$  est la *constante de Planck* et vaut  $6.626 \cdot 10^{-34} \text{J}\cdot\text{s}$ . Cette énergie est alors indépendante de la vitesse du photon considéré (ce qui peut surprendre en termes de mécanique).

En optique géométrique telle que nous allons l'aborder, on considérera toujours un *photon* qui se comporte comme un rayon lumineux se déplaçant toujours en ligne droite.

## 1. OPTIQUE GÉOMÉTRIQUE

La lumière fait l'équivalent de 7 fois le tour de la Terre en une seconde. Dans le vide (et l'air), la lumière se déplace à la vitesse  $c = 299'792'458 \text{m}/\text{s}$ . Cette valeur est exacte et finie ;  $c$ 'est elle qui définit le mètre (enfin, presque) ! On suppose alors que la lumière se déplace en ligne droite. Mais sa vitesse peut changer dans ailleurs que dans la vide.

## 1.1. L'INDICE DE RÉFRACTION

La lumière ne se comporte pas de manière homogène par rapport au milieu dans lequel elle se trouve. Par exemple, elle se déplace plus lentement dans l'eau que dans l'air. Il est alors possible de définir des caractéristiques optiques d'un milieu par rapport à la vitesse de la lumière dans ce milieu.

On définit alors une valeur relative, appelée *indice de réfraction*, noté  $n$ , défini par

$$n_{\text{milieu}} = \frac{c}{v_{\text{milieu}}}$$

où  $c$  est la vitesse de la lumière dans le vide (ou dans l'air, puisque ces valeurs sont quasiment identiques), soit environ  $3 \cdot 10^8 \text{ m/s}$ , et  $v$  la vitesse de la lumière dans le milieu considéré. Étant donné que la lumière ne peut se déplacer plus vite que dans le vide, ce nombre  $n$  est forcément supérieur ou égale à 1.

Par exemple,  $n_{\text{eau}} = 1.333$ ;  $n_{\text{verre}} = 1.5$ ;  $n_{\text{diamant}} = 2.417$  et  $n_{\text{vide}} = n_{\text{air}} = 1$ . Cet indice est alors une caractéristique propre à un matériau.

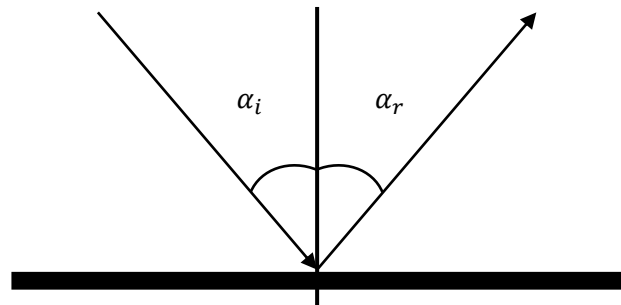
## 1.2. LA LOI DE LA RÉFLEXION

Un rayon lumineux arrivant sur un miroir plan sera réfléchi avec le même angle de réflexion que son angle d'incidence (comme une balle contre un mur). Ces angles se mesurent toujours par rapport à la normale au plan. On parle alors de « rayons incidents » et « rayons réfléchis ».

Loi de la réflexion s'écrit alors:

$$\alpha_i = \alpha_r$$

où  $\alpha_i$  : angle incident et  $\alpha_r$  : angle réfléchi

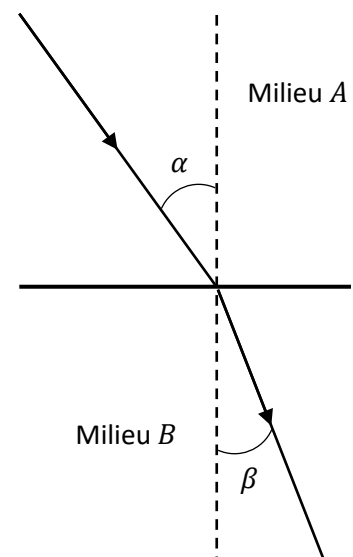


## 1.3. LA LOI DE LA RÉFRACTION

Un rayon lumineux arrivant d'un milieu  $A$  avec un angle d'incidence  $\alpha$  ressort dans un milieu  $B$  avec un angle de réfraction  $\beta$  tel que:

$$n_A \cdot \sin(\alpha) = n_B \cdot \sin(\beta)$$

où  $n_A$  et  $n_B$  sont les indices de réfractifs des milieux  $A$  et  $B$  et  $\alpha$  et  $\beta$  les angles des rayons par rapport à la perpendiculaire à l'interface dans chacun de ces milieux.



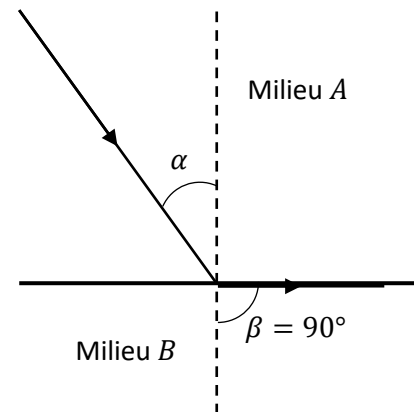
On parle alors de « rayons incidents » et « rayons réfractés ». **Attention : Les angles se mesurent par rapport à la droite perpendiculaire à l'interface !!!**

Il va alors de soi que si le rayon incident arrive perpendiculairement à la surface, donc  $\alpha = 0$ , il en ressort également perpendiculairement puisque l'angle de sortie devra aussi être nul. Dans ce cas précis, le rayon ne sera donc pas dévié !

#### 1.4. LA RÉFLEXION TOTALE

Lorsqu'un rayon lumineux passe d'un milieu à un autre, les deux « phénomènes » de réflexion et de réfraction ont lieu. Très souvent, l'un domine et on néglige l'autre. Par exemple pour un miroir, il y a réflexion et on néglige la réfraction. A l'inverse, pour une loupe, il y a réfraction et on néglige la réflexion.

Le phénomène de « réflexion totale » peut se rencontrer lorsqu'un rayon lumineux arrive d'un milieu *A* d'indice de réfraction « élevé » dans un milieu *B* d'indice de réfraction plus faible. La réfraction peut devenir impossible et le rayon est uniquement réfléchi ; on parle alors de « réflexion totale », puisque la réfraction disparaît.



Le cas limite se détermine avec un angle limite du rayon réfracté de  $90^\circ$ , autrement dit s'il ressort parallèlement à l'interface. Donc :

$$n_A \cdot \sin(\alpha) = n_B \cdot \sin(90^\circ) = n_B$$

Ceci peut se produire uniquement si  $n_A > n_B$ , puisque  $\sin(\alpha) < 1$ .

#### 1.5. LA LOI DES LENTILLES MINCES

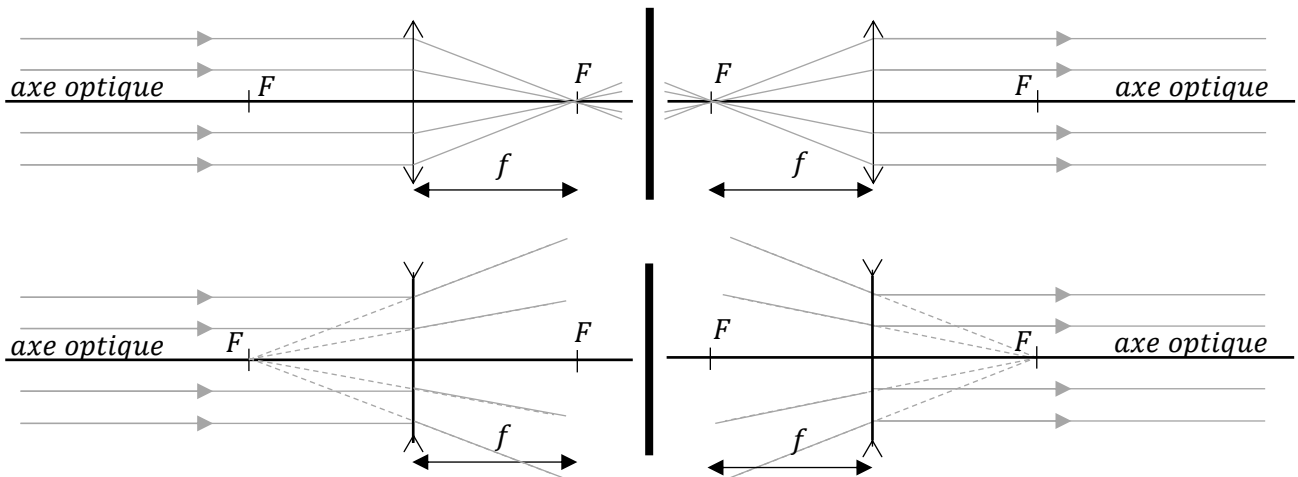
Avec la loi de la réfraction, on peut construire un élément optique bien connu : une *lentille*. Une lentille permet de dévier les rayons lumineux de façon précise en fonction du but recherché (microscope, jumelle, télescope, lunettes, ...) et de les diriger tous dans une direction précise.

Il existe deux types de lentilles : les *lentilles convergentes* et les *lentilles divergentes*. Une lentille convergente a la propriété que tous ses rayons qui arrivent parallèlement vont tous converger en un point, alors que dans le cas d'une lentille divergente, les rayons qui arrivent parallèlement vont tous diverger comme s'ils partaient d'un point.



Une lentille est caractérisée par sa distance focale, notée  $f$  (**à ne pas confondre avec la fréquence !!!**). Cette distance correspond à la distance entre la lentille et son foyer, noté  $F$ .

La double flèche  $\bowtie$  représente les lentilles convergentes alors que la double flèche  $\times$  représente les lentilles divergentes. Dans la figure ci-dessous, on peut comprendre le comportement de ces lentilles lorsque des rayons parallèles arrivent perpendiculairement sur elles. Cela permet également la définition de la *distance focale* (ou la *focale*).



Le foyer est le point où tous les rayons lumineux qui viennent perpendiculairement à la lentille se focalisent/convergent ou le point d'où viennent les rayons pour qu'ils ressortent tous perpendiculaires à la lentille. D'ailleurs, ne dit-on pas que l'on peut allumer un feu avec une loupe ?

On définit aussi l'inverse de la focale, appelée la *puissance* ou la *vergence*, notée  $C$ , couramment utilisée chez les opticiens (c'est le nombre que l'on vous donne si vous portez des lunettes ou des lentilles de contact). On a alors  $C = \frac{1}{f}$ . L'unité de la vergence est la *dioptrie*, égale à des  $m^{-1}$ .

On peut alors montrer que la distance d'un sujet et la distance de l'image formée sont liées à la distance focale de la lentille. Donc la distance entre l'objectif d'une caméra et le capteur, la distance du sujet filmé à l'objectif et la distance focale de l'objectif sont liés. La distance de quelque chose que l'on regarde, la distance entre l'avant de l'œil et la rétine et la distance focale de l'œil sont liés. Ce lien se traduit par la loi des lentilles :

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{p} + \frac{1}{p'}$$

où  $p$  est la distance entre l'objet et la lentille et  $p'$  la distance entre la lentille et l'image.

## 1.6. L'IMAGE D'UN OBJET PAR UNE LENTILLE

En plus des calculs, il est possible de dessiner l'image formée par une lentille. Par convention, les rayons vont de gauche à droite (comme la lecture !). Donc l'objet se trouve à gauche de la lentille et l'image

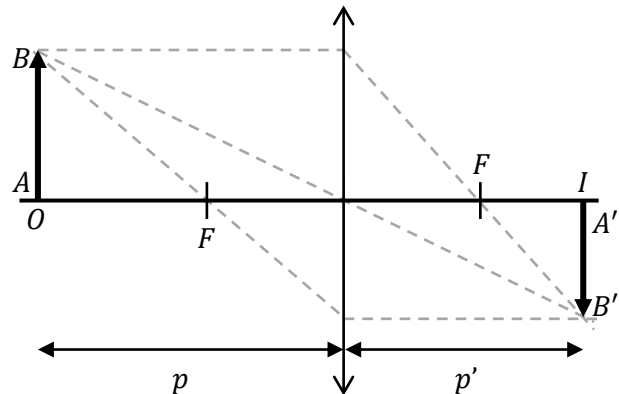
formée se trouve à droite.

On verra donc que, sur un système simple, l'image obtenue est inversée ! Ce qui est en effet le cas dans l'œil ou dans un appareil photo.

### 1.6.1. Lentilles Convergentes

Le schéma ci-contre montre les rayons lumineux qui traversent une lentille convergente. Une infinité de chemins sont possibles ; mais certains chemins sont bien définis et permettent de déterminer l'image formée :

1. Un rayon qui arrive perpendiculairement à la lentille converge sur son foyer à droite.
2. Un rayon qui passe par le centre de la lentille continue son chemin sans être dévié.
3. Un rayon qui arrive sur la lentille passant avant par son foyer de gauche en « ressort » perpendiculairement.



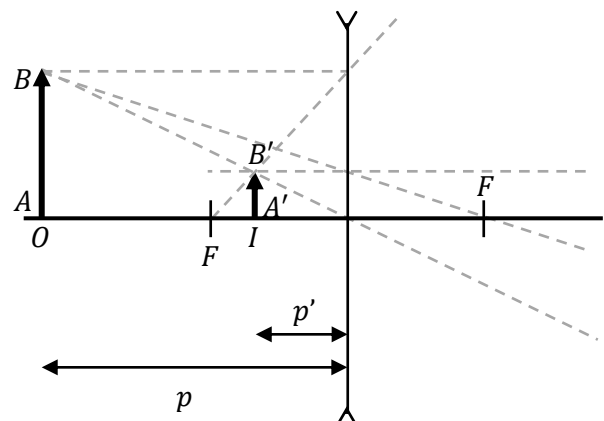
On trouve alors une image formée à droite de la lentille. On parle ici d'**objet réel**, car il se trouve à gauche de la lentille, et d'**image réelle**, car elle se trouve à droite de la lentille.

La distance focale  $f$  est positive dans le cas d'une lentille convergente (par convention). De plus,  $p$  est positif s'il s'agit d'un objet réel, donc à gauche de la lentille, et  $p'$  est positif s'il s'agit d'une image réelle, donc à droite de la lentille. Donc,  $p$  et  $p'$  seraient négatifs s'ils se trouvaient « de l'autre côté » que dans le cas présenté ici ; ils seraient alors « virtuels » et non « réels ».

### 1.6.2. Lentilles Divergentes

Le schéma ci-contre montre les rayons lumineux qui traversent une lentille divergente. Une infinité de chemins sont possibles ; mais certains chemins sont bien définis et permettent de déterminer l'image formée :

1. Un rayon qui arrive perpendiculairement à la lentille diverge comme s'il provenait de son foyer à gauche.
2. Un rayon qui passe par le centre de la lentille continue son chemin sans être dévié (ce dernier n'est pas dessiné ici).



3. Un rayon qui arrive sur la lentille comme s'il allait sur son foyer de droite en « ressort » perpendiculairement.

Dans ce cas,  $f$  est négative (par convention pour les lentilles divergentes). Le signe de  $p$  et  $p'$  se détermine de la même façon que dans le cas des lentilles convergentes. Donc, dans ce cas, l'objet à gauche et est donc réel,  $p$  est donc positif ; l'image se trouve à gauche de la lentille et est donc virtuelle,  $p'$  est donc négatif.

### 1.6.3. Convention des Signes

Le tableau ci-dessous résume l'interprétation possible liée au signe de  $f$ ,  $p$  et  $p'$ .

$f < 0$	Lentille divergente	$f > 0$	Lentille convergente
$p < 0$	Objet virtuel, à droite	$p > 0$	Objet réel, à gauche
$p' < 0$	Image virtuelle, à gauche	$p' > 0$	Image réelle, à droite

### 1.6.4. Le Grandissement

On définit le *grandissement* d'un système optique, noté par la lettre  $\gamma$ , le rapport

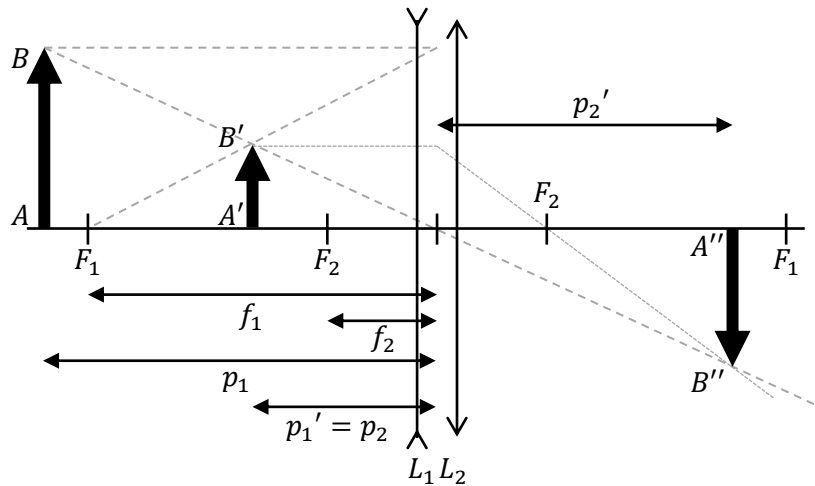
$$\gamma = -\frac{A'B'}{AB} = \frac{p'}{p}$$

où  $A'B'$  est la taille de l'image et  $AB$  la taille de l'objet.

## 1.7. L'IMAGE D'UN OBJET PAR PLUSIEURS LENTILLES ACCOLÉES

Une fois ces éléments précisés, on peut se demander ce qu'il se passe si on met plusieurs lentilles ensemble. Comment aborder le problème ? La réponse devrait être finalement assez simple. En effet, si on place une seconde lentille à la droite d'une première lentille, que « verra » cette seconde lentille ? Si elle voit le même objet que la première lentille, c'est que cette dernière ne sert à rien ! Donc, la seconde lentille « voit », comme objet, l'image de la première lentille.

Ainsi, on considère une lentille  $L_1$  avec une distance focale  $f_1$  et une lentille  $L_2$  avec une distance focale  $f_2$ . On place  $L_2$  à droite de  $L_1$ . On suppose que ces deux lentilles sont « accolées », c'est-à-dire qu'elles sont suffisamment minces pour pouvoir supposer qu'elles se trouvent au même endroit. On peut imaginer la situation comme un verre de contact sur la cornée de l'œil. Le cas ci-dessous illustre une première lentille divergente et une seconde convergente ; on a ici le cas d'un myope qui porte des verres de contact. On peut alors se demander ce que vaudra la distance focale équivalente du système (donc la distance focale du système verre de contact – œil) ?



On place un objet à une distance  $p_1$ . L'image de cette objet va donc se former à une distance  $p_1'$ , déterminable par la loi des lentilles  $\frac{1}{f_1} = \frac{1}{p_1} + \frac{1}{p_1'}$ . Donc,  $\frac{1}{p_1'} = \frac{1}{f_1} - \frac{1}{p_1}$ ; on verra qu'il est ici inutile de calculer la valeur de  $p_1'$ . On voit que l'objet est à gauche des lentilles, il est donc réel et  $p_1 > 0$ . L'image obtenue est aussi à gauche, elle est donc virtuelle et  $p_1' < 0$ .

Cette image va alors servir d'objet pour la seconde lentille. Comme cette image est virtuelle (à gauche), elle devient un objet réel (car il est toujours à gauche). Donc, on doit avoir  $p_2 > 0$ . On en déduit que  $p_2 = -p_1'$  (la distance en valeur absolue est la même !).

L'image de cette deuxième lentille peut alors être calculée par la loi des lentilles  $\frac{1}{f_2} = \frac{1}{p_2} + \frac{1}{p_2'}$ , donc  $\frac{1}{p_2'} = \frac{1}{f_2} - \frac{1}{p_2}$ , sachant que  $\frac{1}{p_2} = -\frac{1}{p_1'}$ . Grâce à cette dernière relation, on peut mettre ensemble les deux lois des lentilles. On trouve alors :  $\frac{1}{p_2'} = \frac{1}{f_2} - \frac{1}{p_2} = \frac{1}{f_2} + \frac{1}{p_1'} = \frac{1}{f_2} + \frac{1}{f_1} - \frac{1}{p_1}$ .

On en déduit alors :

$$\frac{1}{p_1} + \frac{1}{p_2'} = \frac{1}{f_1} + \frac{1}{f_2} = \frac{1}{f}$$

où  $f$  serait la focale équivalente du système. On voit donc (et surtout !) que :

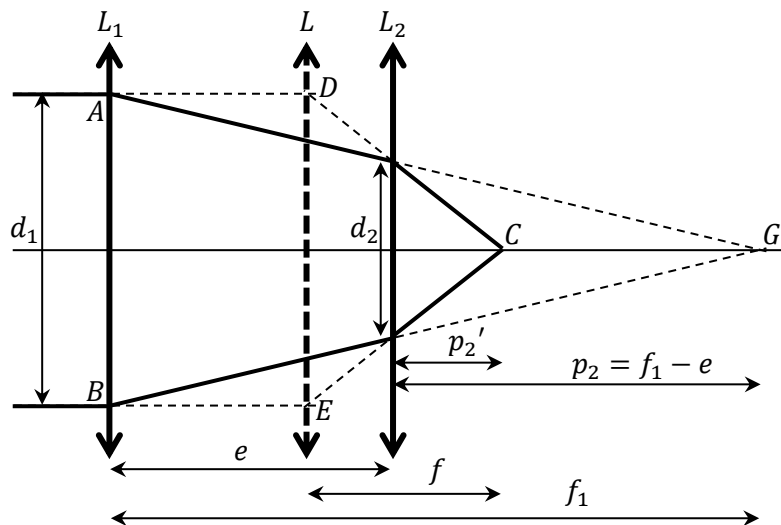
$$\frac{1}{f} = \frac{1}{f_1} + \frac{1}{f_2}$$

Il est donc possible de calculer la focale équivalente à une composition de lentilles accolées, qui est indépendante de la position de l'objet et de l'image.

Si maintenant on plaçait une troisième lentille, l'objet de cette troisième lentille serait l'image de la seconde lentille, et ainsi de suite. Cette dernière loi serait donc généralisable à une somme !

## 1.8. L'IMAGE D'UN OBJET PAR DEUX LENTILLES NON ACCOLÉES

Lorsque deux lentilles ne sont pas accolées, le calcul est légèrement plus compliqué. Il est néanmoins possible d'obtenir une relation au final accessible, la *formule de Gullstrand*.



On considère des rayons qui proviennent « de l'infini », donc tous parallèles. Ces derniers vont être déviés par la première lentille ( $L_1$ ) et se retrouver en un point, virtuel sur le schéma ci-dessus,  $G$ . Ces rayons vont alors traverser la deuxième lentille ( $L_2$ ), qui se trouve à une distance  $e$ , pour se focaliser au point  $C$ . On peut alors se demander ce que vaut la distance focale  $f$  d'une lentille équivalente  $L$ .

On considère donc un « objet » qui se trouve à l'infini, donc  $p_1 = \infty$ . L'image se forme alors au point  $G$  à une distance  $p'_1 = f_1$ . Cette image est l'objet de la lentille  $L_2$ , donc  $p_2 = -(p'_1 - e) = -(f_1 - e)$ . On applique alors (encore) la loi des lentilles à la seconde lentille pour écrire :

$$\frac{1}{f_2} = \frac{1}{p_2} + \frac{1}{p'_2} = \frac{1}{-(f_1 - e)} + \frac{1}{p'_2} \quad \Rightarrow \quad \frac{1}{p'_2} = \frac{1}{f_2} + \frac{1}{f_1 - e}$$

En observant le triangle  $DEC$ , on peut écrire :

$$\frac{d_1}{d_2} = \frac{f}{p'_2} = f \cdot \left( \frac{1}{f_2} + \frac{1}{f_1 - e} \right)$$

De même, en regardant le triangle  $ABG$ , on peut écrire :

$$\frac{d_1}{d_2} = \frac{f_1}{p_2} = \frac{f_1}{f_1 - e}$$

On peut alors poser l'égalité entre ces deux relations :

$$\frac{d_1}{d_2} = f \cdot \left( \frac{1}{f_2} + \frac{1}{f_1 - e} \right) = \frac{f_1}{f_1 - e}$$

On écrit alors :

$$\frac{1}{f} = \left( \frac{1}{f_2} + \frac{1}{f_1 - e} \right) \cdot \frac{f_1 - e}{f_1} = \frac{f_1 - e}{f_1 \cdot f_2} + \frac{1}{f_1}$$

On trouve finalement la relation de Gullstrand :

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{f_1} + \frac{1}{f_2} - \frac{e}{f_1 \cdot f_2}$$

On remarque que pour un écart entre les lentilles nul, donc pour  $e = 0$ , donc pour des lentilles accolées, on retrouve :

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{f_1} + \frac{1}{f_2}$$

### Application :

Soit un myope ayant un défaut de vue de  $-2$  et un œil de 18mm de profondeur. On veut donc que  $f = 18\text{mm}$  sachant que sa lentille accolée a une distance focale de  $f_1 = -50\text{cm}$ . On en déduit la distance focale de son œil  $f_2 = 17.37\text{mm}$ . Quelle correction faudrait-il mettre à un verre de lunette qui se trouve à  $e = 15\text{mm}$  ? Il faut donc chercher la nouvelle valeur de  $f_1$  avec la relation de Gullstrand. On trouve donc que :

$$\frac{1}{f} - \frac{1}{f_2} = \frac{1}{f_1} - \frac{e}{f_1 \cdot f_2} \quad \Rightarrow \quad f_1 = \frac{1 - \frac{e}{f_2}}{\frac{1}{f} - \frac{1}{f_2}} = \frac{f_2 - e}{f_2 - f} \cdot f$$

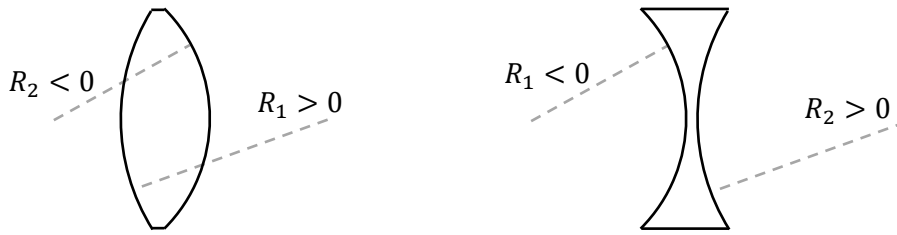
On trouve donc que  $f_1 = -67.5\text{cm}$ . Autrement dit, le verre doit avoir -1.5 de dioptrie.

## 1.9. LENTILLE SPHÉRIQUE MINCE

En réalité, les lentilles ne sont pas infiniment mince et il faut tenir compte de leur *courbure*. D'après la loi de la réfraction, on peut alors déterminer la distance focale de ces lentilles, si on connaît les courbures des lentilles. Notons  $R_1$  le rayon de courbure de la face gauche de la lentille et  $R_2$  le rayon de courbure de la face droite de la lentille. On peut alors montrer que :

$$\frac{1}{f} = \left( \frac{n_2}{n_1} - 1 \right) \cdot \left( \frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2} \right)$$

où  $n_1$  est l'indice de réfraction du milieu dans lequel la lentille se trouve (généralement de l'air) et  $n_2$  est l'indice de réfraction du matériau utilisé (généralement du verre). Les valeurs  $R_1$  et  $R_2$  représentent les *rayons de courbure* de la face de gauche et de droite, respectivement. Elles peuvent prendre différents signes, en fonction de la convexité ou concavité de la lentille : par convention, le signe est positif si le *centre du rayon de courbure* est à droite de la lentille.



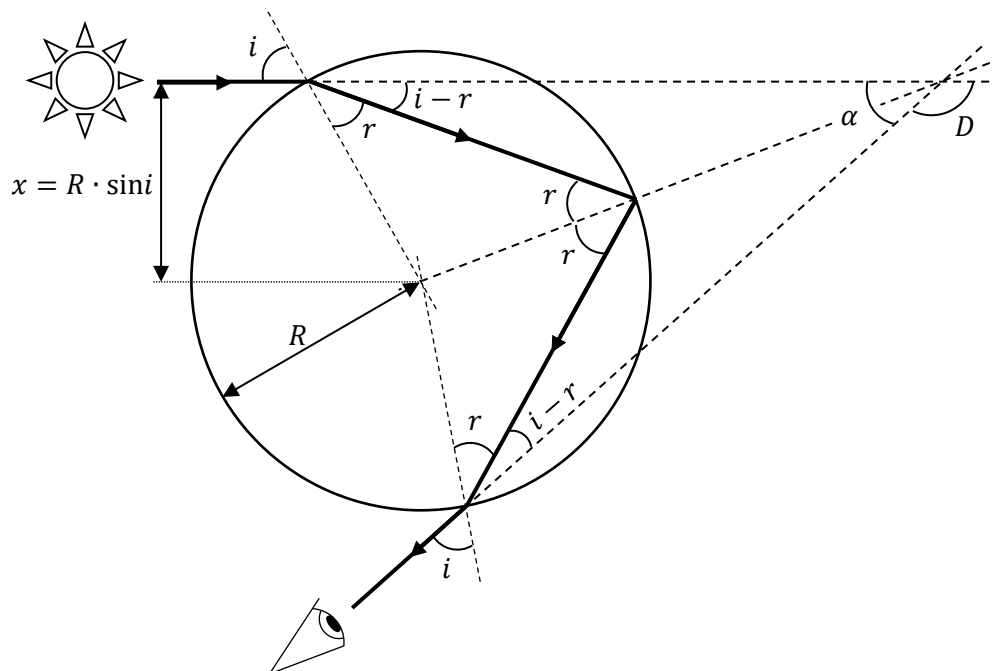
Si une face est plane, son rayon de courbure est alors infini. En d'autres termes, cette face de joue aucun rôle optiquement dans la déviation de la lumière.

## 1.10. L'ARC-EN-CIEL

Lorsqu'un rayon lumineux arrive dans une goutte d'eau, l'angle d'incidence du rayon, noté ici  $i$ , peut être quelconque. Le rayon va subir une première réfraction pour entrer dans la goutte, puis une réflexion partielle (donc une part de la lumière ressort directement par réfraction) pour pouvoir ensuite ressortir après une réfraction. Bien sûr, le rayon pourrait subir une deuxième réflexion au lieu et une réfraction ensuite : cela forme l' « arc-en-ciel secondaire » (celui d'avant était l' « arc-en-ciel primaire »). Le rayon pourrait, théoriquement, faire une troisième réflexion, une quatrième réflexion, etc, avant de ressortir ; on parle alors d'arc-en-ciel tertiaire, quaternaire.

### 1.10.1. L'Arc-en-Ciel Primaire

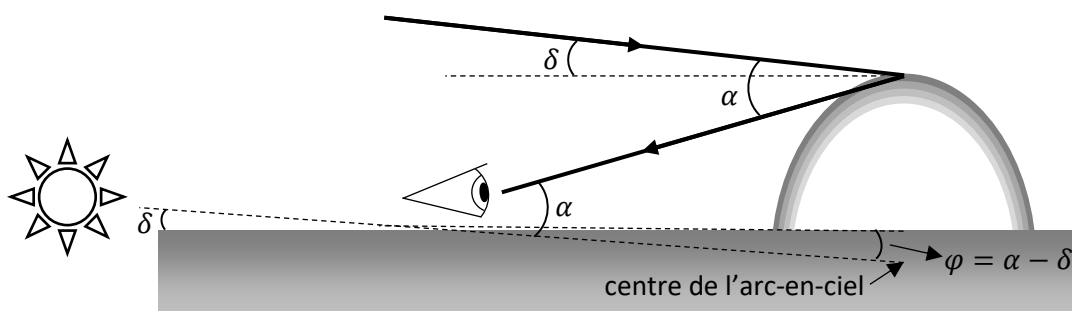
On se rend vite compte que, par symétrie de la goutte supposée sphérique (supposition indispensable pour ce calcul), il n'y a que deux angles en jeu ici : l'angle d'incidence initial  $i$  et le premier angle réfracté.



Après réfraction, le rayon arrive sur la paroi « arrière » de la goutte avec un angle identique à  $r$  ; une part de ce rayon ressorts par réfraction (et on ne s'en occupe plus) et une part réfléchi avec le même angle  $r$ . Puis le rayon arrive de nouveau avec un angle d'incidence « intérieur » égal à  $r$  et sera donc réfracté en ressortant avec un angle  $i$ .

C'est ce rayon de sortie que l'on perçoit quand on voit un arc-en-ciel ; le rayon incident initial provient du soleil et l'angle apparent de l'arc-en-ciel est l'angle  $\alpha$  sur le schéma ci-dessus. C'est pourquoi tous les arcs-en-ciel ont la même taille : cet angle est constant !

Pour mieux visualiser la situation, le schéma suivant représente ce qu'il se passe pour un observateur. Il faut déjà voir l'arc-en-ciel comme un cône formé par l'arc lui-même et dont le sommet est l'observateur. On suppose alors que tous les rayons incidents arrivent parallèlement à cause de la distance élevée du Soleil. L'axe formé par la ligne Soleil-Observateur forme alors l'axe du cône d'angle  $\alpha$ . L'arc-en-ciel a donc toujours la même dimension apparente dans le ciel ! Un arc-en-ciel n'est donc pas observable tout le temps : si le soleil se trouve à un angle  $\delta$  plus élevé que  $\alpha$ , l'angle « restant »  $\varphi$ , qui n'est autre que la différence entre l'angle d'ouverture du cône  $\alpha$  et la hauteur angulaire du Soleil sur l'horizon  $\delta$ , devient inférieur à zéro et l'arc-en-ciel devrait se former « sous terre » ; il ne peut donc pas exister !



Pour déterminer cet angle  $\alpha$ , il faut commencer par calculer l'angle de déviation  $D$  du rayon incident. On voit que lors de la première réfraction le rayon est dévié d'un angle  $i - r$ . Lors de la réflexion l'angle est dévié d'un angle égal à  $180 - 2r$ . Puis lors de la deuxième réfraction, lorsque le rayon ressort, l'angle est dévié d'un angle  $i - r$ .

Au total, on a donc :

$$D = 180 + 2 \cdot i - 4 \cdot r$$

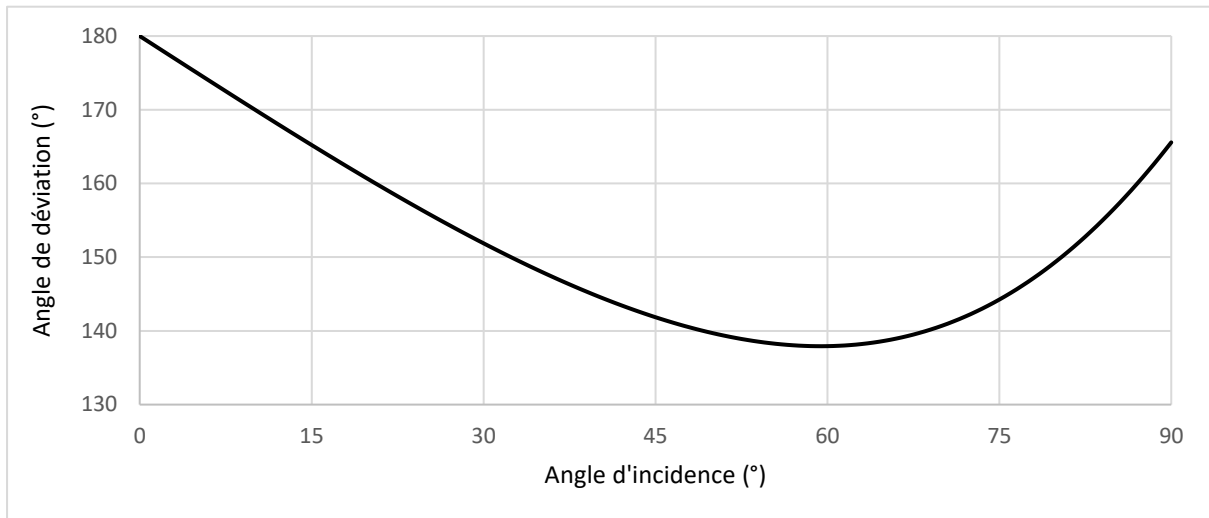
sachant que  $\sin(i) = n_{eau} \cdot \sin(r) \Leftrightarrow r = \arcsin\left(\frac{\sin(i)}{n_{eau}}\right)$

On suppose donc  $n_{air} = 1$  et on sait que  $n_{eau} = 1.333$ . Par la suite, pour simplifier, on écrira que  $n_{eau} = n$ . L'angle de déviation se reformule alors :

$$D = 180 + 2 \cdot i - 4 \cdot \arcsin\left(\frac{\sin(i)}{n}\right)$$



avec l'angle  $i$  qui peut varier de  $0^\circ$  à  $90^\circ$  (en fait de  $-90^\circ$  à  $90^\circ$  mais par symétrie, on peut se limiter à un angle de  $0^\circ$  à  $90^\circ$ ). Graphiquement, on obtient alors :



On observe alors une déviation minimale ; autrement dit, la lumière pourrait revenir sur l'observateur parallèlement aux rayons incidents ou avec un angle légèrement différent, mais il existe un angle  $\alpha$ , complémentaire de  $D$ , maximum. Cet angle se trouve vers  $i = 60^\circ$  avec un angle de déviation d'un point moins de  $D = 140^\circ$ , donc un angle  $\alpha$  légèrement supérieur à  $40^\circ$ .

Pour déterminer cet extremum, on annule la dérivée de l'angle de déviation  $D$  :

$$\frac{dD}{di} = \frac{d}{di} \left[ 2 \cdot i - 4 \cdot \arcsin \left( \frac{\sin(i)}{n} \right) \right] = 2 - 4 \cdot \frac{1}{\sqrt{1 - \left( \frac{\sin(i)}{n} \right)^2}} \cdot \frac{\cos(i)}{n} = 0$$

On trouve donc l'angle d'incidence  $i_m$  qui donne ce minimum de déviation :

$$i_m = \arccos \left( \sqrt{\frac{n^2 - 1}{3}} \right) \cong 59.4^\circ$$

On détermine l'angle apparent sous lequel l'arc-en-ciel est perçu. Cet angle est l'angle complémentaire de l'angle de déviation ; donc :

$$\alpha = 180 - D = 4 \cdot \arcsin \left[ \frac{1}{n} \cdot \sin \left( \arccos \left( \sqrt{\frac{n^2 - 1}{3}} \right) \right) \right] - 2 \cdot \arccos \left( \sqrt{\frac{n^2 - 1}{3}} \right)$$

Sachant que  $\sin(\arccos(x)) = \sqrt{1 - x^2}$ , on trouve :

$$\alpha = 4 \cdot \arcsin \left( \frac{\sqrt{4 - n^2}}{\sqrt{3} \cdot n} \right) - 2 \cdot \arccos \left( \sqrt{\frac{n^2 - 1}{3}} \right) \cong 42.1^\circ$$

Ainsi, au-delà de cet angle (donc pour un angle plus grand), la lumière ne peut pas « revenir » vers l'observateur après une réflexion dans la goutte d'eau. Il y aura donc moins de lumière à l'extérieur de l'arc qu'à l'intérieur de l'arc !

Mais on sait que l'indice de réfraction dépend de la couleur, donc de la longueur d'onde. On peut ainsi recalculer cet angle pour les couleurs extrêmes du spectre visible, soient le rouge ( $\lambda_r = 700\text{nm}$ ) et le bleu ( $\lambda_b = 400\text{nm}$ ). Pour ces valeurs, les indices de réfraction sont  $n_r = 1.33$  et  $n_b = 1.342$ . On trouve alors :

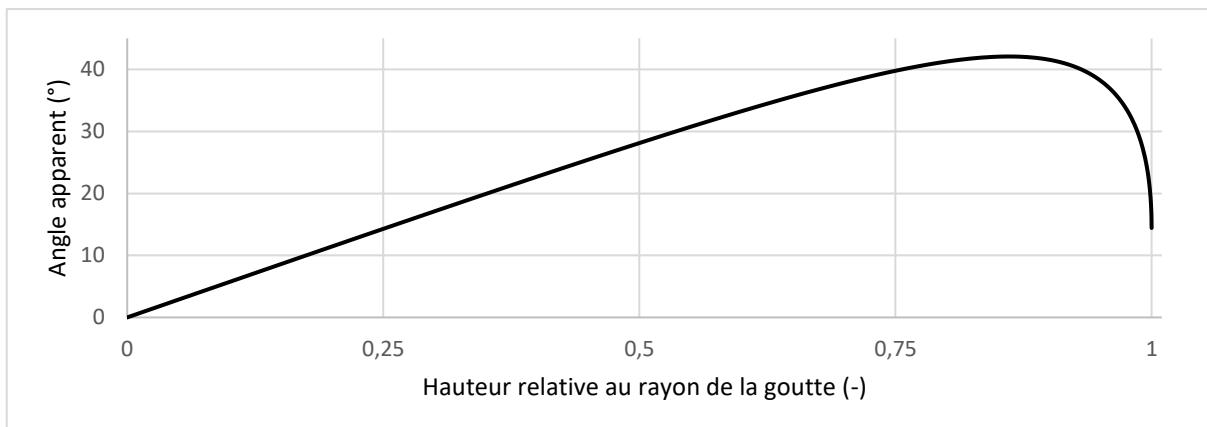
$$\alpha_r = 42.5^\circ \quad ; \quad \alpha_b = 40.8^\circ$$

On en déduit alors que, dans un arc-en-ciel, on a la couleur rouge « à l'extérieur » et la couleur bleue « à l'intérieur », puisque l'angle apparent de l'arc-en-ciel est plus grand pour le rouge que pour le bleu. La largeur apparente de l'arc-en-ciel est d'environ  $1.7^\circ$ , soit environ trois diamètres solaires.

On peut aussi suivre le chemin par où un rayon lumineux entre dans la goutte pour créer un arc-en-ciel. Autrement dit, on détermine le rayon incident donnant l'angle d'incidence  $i_m$  voulu. On considère alors la hauteur  $x$  comme sur le schéma précédent. Si  $x = 0$  le rayon passe par le centre, si  $x = R$  le rayon rase la goutte par son sommet (ou sa base). On définit donc :

$$i = \arcsin\left(\frac{x}{R}\right)$$

On peut alors représenter l'angle apparent  $\alpha$  en fonction de la hauteur  $x$  :

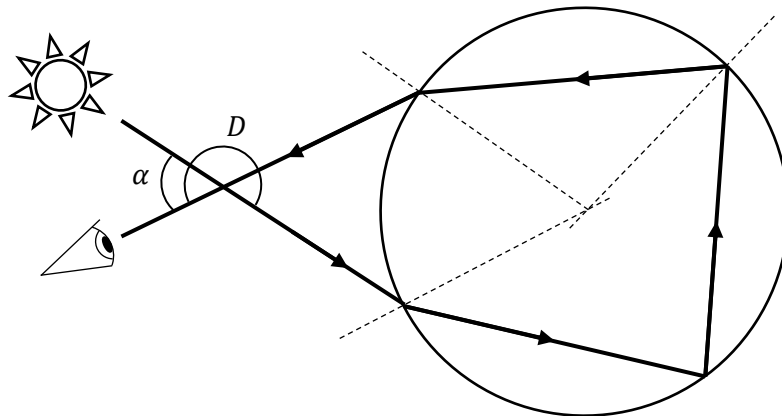


On retrouve donc l'angle apparent maximal de l'arc-en-ciel ainsi que le fait que ce maxima a lieu pour un rayon incident qui se trouve à une hauteur d'environ  $x = 0.85 \cdot R$  d'après le graphique ci-dessus ; résultat en fait déjà vu puisque  $\sin(59.4^\circ) = \frac{x}{R} = 0.86$ .

### 1.10.2. Arcs-en-Ciel Primaire et Secondaire

Tout le monde a déjà regardé un arc-en-ciel ; et presque tout le monde a aussi déjà vu un deuxième arc-en-ciel. En observant ces arcs, on peut aussi remarquer une bande sombre entre eux. Ces phénomènes s'expliquent sans grande difficulté avec l'optique géométrique.

Pour décrire le deuxième arc-en-ciel, on reprend le schéma vu pour le premier arc, à la différence qu'une fois que le rayon a effectué sa première réflexion, il ne ressort pas mais effectue une seconde réflexion dans la goutte avant de ressortir. On obtient alors le deuxième arc-en-ciel.



On peut bien sûr deviner que ce raisonnement peut se répéter à plus que deux réflexions dans la goutte ; cela sera traité dans le paragraphe suivant. Donc, avec deux réflexions, on a un chemin du rayon lumineux qui correspond au schéma suivant.

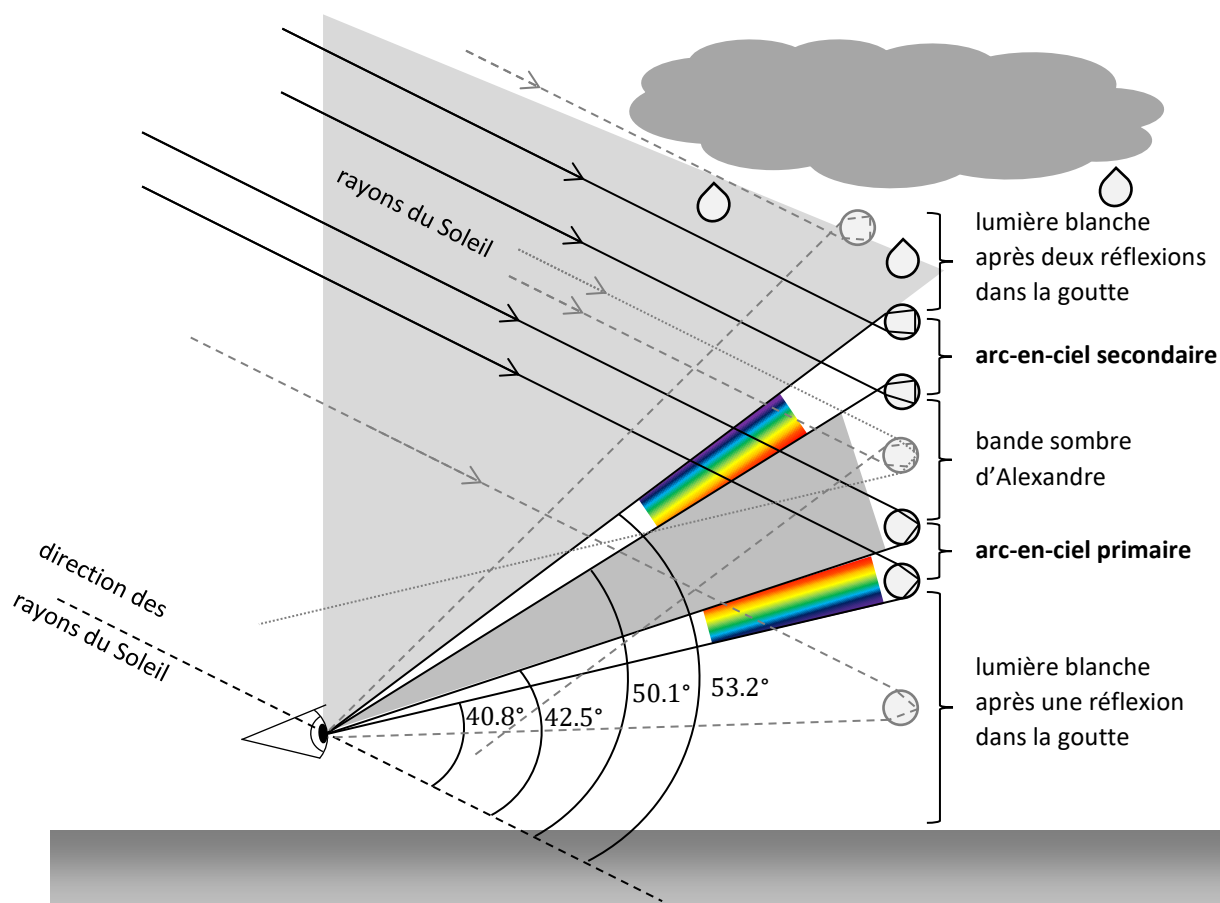
Dans ce cas, on va montrer que l'angle  $\alpha$  est d'environ  $50$  à  $53^\circ$ . Comme un miroir inverse l'image, une réflexion inverse l'ordre des rayons lumineux ; ainsi, l'arc-en-ciel secondaire sera inversé en termes de couleurs. En effet, on l'a vu, l'arc primaire a la couleur bleue à l'intérieur et la couleur rouge à l'extérieur, alors que l'arc secondaire a la couleur bleue à l'extérieur et la couleur rouge à l'intérieur. Ainsi, si la lumière ne peut pas revenir vers l'observateur pour un angle supérieur à environ  $41^\circ$  après une réflexion, de la même manière, la lumière ne peut pas revenir à l'observateur pour un angle inférieur (à cause de l'inversion) à environ  $51^\circ$  après deux réflexions. On comprend ainsi que la région entre les deux arcs renvoie moins de lumière à l'observateur, elle paraît donc sombre : c'est la « *bande (sombre) d'Alexandre* ». Le schéma ci-dessous résume tout cela.

Dans la figure précédente, on voit en bas la zone « sous » l'arc-en-ciel primaire où les gouttes de pluie renvoient la lumière après une seule réflexion. Toutes les couleurs peuvent être reflétées, raison pour laquelle cette zone du ciel paraît « normale », pour ne pas dire « claire », lorsqu'on observe l'arc-en-ciel primaire. Vient ensuite l'angle  $\alpha$  limite où se trouve l'arc primaire. Comme cet angle dépend de la longueur d'onde, donc de la couleur, il n'est pas exactement le même pour le bleu, à l'intérieur de l'arc, que pour le rouge, à l'extérieur. Ces couleurs, dites pures ou *monochromatiques*, sont les couleurs extrêmes de l'arc-en-ciel. On retrouve au milieu toute la palette de couleurs pures, comme le vert, le jaune, l'orange, etc.

Au-delà de ces angles limites, donc avec des angles plus grands, la lumière ne peut pas atteindre l'observateur avec une seule réflexion dans la goutte.

Plus haut, donc pour des angles plus encore grands, apparaît l'arc-en-ciel secondaire. On l'a vu, il apparaît après deux réflexions dans la goutte ; un effet miroir se crée puisqu'il y a une réflexion de plus dans l'arc secondaire par rapport à l'arc primaire. Les couleurs sont alors inversées, donc le rouge est à l'intérieur et le bleu à l'extérieur, et l'angle limite s'interprète à l'envers, donc l'angle limite désigne un angle minimal au-dessous duquel la lumière ne peut pas atteindre l'observateur avec deux réflexions dans la goutte. Il faut noter qu'à chaque réflexion, une part de la lumière est transmise (donc ressort) par réfraction. La conséquence est que la lumière de l'arc secondaire est moins intense que celle du premier arc.

Ainsi, entre ces deux arcs, aucune lumière ne peut revenir à l'observateur ni avec une réflexion, ni avec deux réflexions. Cette zone est plus sombre que les autres régions du ciel, c'est la « *bande (sombre)* »



*d'Alexandre* », en hommage à *Alexandre d'Aphrodise*, philosophe grec né vers l'an 150, qui semble être le premier décrire ce phénomène.

On comprend encore que la lumière au centre de l'arc primaire revient à l'observateur après une réflexion alors que la lumière à l'extérieur de l'arc secondaire revient après deux réflexions, donc moins intense. On comprend alors que le centre de l'arc primaire est la zone la plus claire ou lumineuse du ciel à ce moment-là alors que l'extérieur de l'arc secondaire est plus sombre (mais plus claire que la bande d'Alexandre !).

On comprend donc que chaque goutte, en fonction de sa localisation et de sa taille, contribue à l'apparition des arcs-en-ciel ; et que les gouttes qui créent l'arc primaire ne sont pas les mêmes que celles qui créent l'arc secondaire. De même, une goutte qui crée « un » rouge de la « partie gauche »

de l'arc-en-ciel (primaire ou secondaire) n'est pas la même que celle qui crée le bleu ou que celle qui crée le rouge de la partie droite. Il en va de même à l'intérieur de l'arc, une goutte renvoie un bleu à l'observateur, une autre un jaune, une autre un rouge et l'observateur perçoit donc le cumul de toutes ces couleurs : il observe de la lumière blanche.

### 1.10.3. Les Arcs-en-Ciel Secondaire, Tertiaire, etc

Comme on l'a laissé entendre avant, on peut donc avoir bien sûr 2, mais aussi 3, 4, ou  $p$  réflexions dans la goutte, avant que le rayon ne ressorte ! On peut donc avoir 3, 4, ou  $p$  arcs-en-ciel. L'arc sera bien évidemment de moins en moins intense, puisqu'à chaque réflexion, le rayon « perd » une grande partie de son intensité. En reprenant le raisonnement déjà fait plus haut, il n'est alors pas trop difficile d'écrire que, si le rayon lumineux subit  $p$  réflexions, l'angle de déviation  $D_p$  s'écrit :

$$D_p = 2 \cdot i - 2 \cdot r + p \cdot (180 - 2 \cdot r) = p \cdot 180 + 2 \cdot i - 2 \cdot (p + 1) \cdot r$$

On trouve alors que l'angle de l'arc-en-ciel tel qu'on l'observe est la *valeur absolue de l'angle aigu équivalent* à l'angle de déviation ; autrement dit :

$$\alpha_p = |2 \cdot (p + 1) \cdot r - 2 \cdot i - k \cdot 180|$$

où  $k = \frac{p+1}{2}$  si  $p$  est impair et  $k = \frac{p}{2}$  si  $p$  est pair.

On cherche à nouveau le minimum de  $D_p$  :

$$\frac{dD_p}{di} = 2 - 2 \cdot (p + 1) \cdot \frac{dr}{di} = 2 - 2 \cdot (p + 1) \cdot \frac{1}{\sqrt{1 - \left(\frac{\sin(i)}{n}\right)^2}} \cdot \frac{\cos(i)}{n} = 0$$

ce qui donne :

$$i_m = \arccos\left(\sqrt{\frac{n^2 - 1}{p^2 + 2 \cdot p}}\right) \quad \text{et} \quad r_m = \arcsin\left(\frac{\sin(i)}{n}\right)$$

On obtient alors pour l'angle de déviation  $D_p$  :

$$D_p = 2 \cdot \arccos\left(\sqrt{\frac{n^2 - 1}{p^2 + 2 \cdot p}}\right) - 2 \cdot (p + 1) \cdot \arcsin\left[\frac{1}{n} \cdot \sin\left(\arccos\left(\sqrt{\frac{n^2 - 1}{p^2 + 2 \cdot p}}\right)\right)\right]$$

donc, puisque  $\sin(\arccos(x)) = \sqrt{1-x^2}$  :

$$D_p = 2 \cdot \arccos\left(\sqrt{\frac{n^2 - 1}{p^2 + 2 \cdot p}}\right) - 2 \cdot (p + 1) \cdot \arcsin\left(\frac{\sqrt{(p + 1)^2 - n^2}}{n \cdot \sqrt{p^2 + 2 \cdot p}}\right)$$

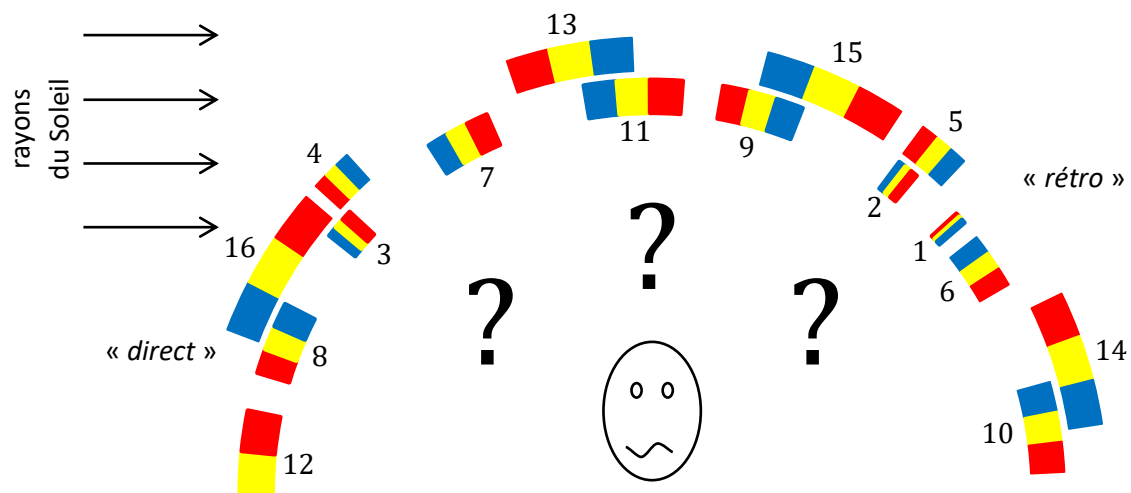
Pour  $p = 1$ , on retrouve bien le même résultat qu'avant. On peut alors calculer les angles de déviations des différents ordres d'arcs-en-ciel pour leurs couleurs extrêmes :

Ordre	$D_{rouge}$	$D_{bleu}$	$D_{moyen}$	Largeur
1	137.5°	139.2°	138°	1.7°
2	230.1°	233.2°	231°	3.1°
3	317.2°	321.5°	318°	4.4°
4	402.3°	407.9°	404°	5.6°
5	486.5°	193.3°	488°	6.8°
6	570.2°	578.2°	572°	9.2°
...	...	...	...	...

On peut reformuler ce tableau affichant plutôt l'angle apparent  $\alpha$  de l'arc-en-ciel. Pour trouver cet angle, on soustrait un multiple entier de 180° à l'angle de déviation de manière à obtenir un angle entre -90° et 90°. On trouve alors que donc  $\alpha = |k \cdot 180 - D|$ . Si le multiple  $k$  est pair, l'arc est en « diffusion directe », on dit qu'il est « direct » et s'observe face au Soleil alors que si  $k$  est impair, l'arc est en « rétrodiffusion », on dit qu'il est « rétro » et s'observe donc dos au Soleil. De plus, si le résultat de «  $k \cdot 180 - D$  » est positif, donc s'il est compris entre 0° et 90°, la couleur rouge se trouve à l'extérieur de l'arc alors que si le résultat est négatif, donc s'il est compris entre -90° et 0°, la couleur rouge se trouve à l'intérieur de l'arc. On trouve ainsi pour les premiers arcs :

Ordre	$\alpha_{rouge}$	$\alpha_{bleu}$	$\alpha_{moyen}$	Diffusion
1	42.5°	40.8°	42°	rétro
2	50.1°	53.2°	51°	rétro
3	42.8°	38.5°	42°	directe
4	42.3°	47.9°	44°	directe
5	53.5°	46.7°	52°	rétro
6	30.2°	38.2°	32°	rétro
...	...	...	...	...

Ainsi, les arcs-en-ciel tertiaire et quaternaire se superposent légèrement puisque leurs angles sont partiellement identiques. De manière visuelle, ces résultats peuvent se schématiser comme suit :



Ces arcs, bien que physiquement réels, sont bien sûr très difficiles, voire impossible, à observer. Sans parler de l'intensité décroissante quand on monte en ordre d'arcs, les arcs *directs* sont par définition « à côté » du Soleil. Le contraste élevé les rend alors quasiment invisible ; c'est comme distinguer une bougie allumée à côté des grands phares d'une voiture par exemple. Malgré tout, des arcs tertiaire et quaternaire auraient été observés, et photographiés, en 2011 pour la première fois.



Les arcs tertiaire et quaternaire (Crédit : Michael Theusner/Applied Optics).

#### 1.10.4. Polarisation de l'arc-en-ciel et intensité des arcs

La lumière qui arrive du soleil n'est pas polarisée ; c'est-à-dire que son champ électromagnétique oscille « dans toutes les directions » de manière équivalente. Une onde polarisée aurait une direction d'oscillation, de vibration, privilégiée. Mais la réflexion va agir de manière différente sur différentes polarisations. Ainsi, on considère les polarisations parallèle et perpendiculaire au plan contenant le rayon incident et le rayon réfracté (donc transmis). Au-delà d'un certain angle d'incidence, les rayons

sont totalement réfléchis ; on parle de « réflexion totale » (on ne parlera pas ici d' « onde évanescente »).

Le comportement de ces deux polarisations, appelées mode *TE* et *TM*, se décrit par les « coefficients de Fresnel » (démonstrables avec les équations de Maxwell). Ces coefficients s'expriment comme :

	<i>TE</i> (« transverse électrique », perpendiculaire au plan d'incidence)	<i>TM</i> (« transverse magnétique », dans le plan d'incidence)
Coefficient de réflexion	$r_{TE} = -\frac{\sin(i - r)}{\sin(i + r)}$	$r_{TM} = \frac{\tan(i - r)}{\tan(i + r)}$
Coefficient de transmission	$t_{TE} = -\frac{2 \cdot \cos(i) \cdot \sin(r)}{\sin(i + r)}$	$t_{TM} = -\frac{2 \cdot \cos(i) \cdot \sin(r)}{\cos(i - r) \cdot \sin(i + r)}$

Ces coefficients décrivent l'amplitude des ondes transmises ou réfléchies. L'approche faite ici étant principalement de l'optique géométrique, on ne s'intéresse qu'à l'intensité, et donc l'énergie, de l'onde. Cela implique que seules les valeurs quadratiques de ces coefficients nous intéressent :

	<i>TE</i> (« transverse électrique », perpendiculaire au plan d'incidence)	<i>TM</i> (« transverse magnétique », dans le plan d'incidence)
Coefficient de réflexion	$R_{TE} = r_{TE}^2$	$R_{TM} = r_{TM}^2$
Coefficient de transmission	$T_{TE} = t_{TE}^2$	$T_{TM} = t_{TM}^2$

On peut ainsi calculer précisément la part de chaque polarisation ayant lieu dans un arc-en-ciel. Il faut pour cela évaluer ces coefficients pour les angles d'incidence des arcs considérés.

#### 1.10.4.1. Coefficients de Fresnel et polarisation de l'arc-en-ciel primaire

Pour l'arc primaire, on a :

$$\cos(i) = \sqrt{\frac{n^2-1}{3}} \quad ; \quad \sin(i) = \sqrt{\frac{4-n^2}{3}} \quad ; \quad \cos(r) = \frac{2}{n} \sqrt{\frac{n^2-1}{3}} \quad ; \quad \sin(r) = \frac{1}{n} \sqrt{\frac{4-n^2}{3}}$$

On trouve alors pour chaque polarisation, la transmission pour l'entrée dans la goutte :

$$T_{TE} = \left( \frac{2 \cdot \cos(i) \cdot \sin(r)}{\sin(i + r)} \right)^2 = \left( \frac{2 \cdot \cos(i) \cdot \sin(r)}{\sin(i) \cdot \cos(r) + \cos(i) \cdot \sin(r)} \right)^2 = \frac{4}{9}$$



$$T_{TM} = \left( \frac{2 \cdot \cos(i) \cdot \sin(r)}{\cos(i-r) \cdot \sin(i+r)} \right)^2 = \left( \frac{2 \cdot \cos(i) \cdot \sin(r)}{\sin(i) \cdot \cos(i) + \sin(r) \cdot \cos(r)} \right)^2 = \left( \frac{2n}{n^2 + 2} \right)^2$$

suivi de la réflexion dans la goutte :

$$R_{TE} = \left( \frac{\sin(i-r)}{\sin(i+r)} \right)^2 = \left( \frac{\sin(i) \cdot \cos(r) - \cos(i) \cdot \sin(r)}{\sin(i) \cdot \cos(r) + \cos(i) \cdot \sin(r)} \right)^2 = \frac{1}{9}$$

$$\begin{aligned} R_{TM} &= \left( \frac{\tan(i-r)}{\tan(i+r)} \right)^2 = \left( \frac{\sin(i-r) \cdot \cos(i+r)}{\sin(i+r) \cdot \cos(i-r)} \right)^2 = \\ &= \left( \frac{\sin(i-r) \cdot \cos(i) \cdot \cos(r) - \sin(i) \cdot \sin(r)}{\sin(i+r) \cdot \cos(i) \cdot \cos(r) + \sin(i) \cdot \sin(r)} \right)^2 = \left( \frac{n^2 - 2}{n^2 + 2} \right)^2 \end{aligned}$$

puis d'une transmission pour en ressortir :

$$T'_{TE} = \left( \frac{2 \cdot \cos(r) \cdot \sin(i)}{\sin(i+r)} \right)^2 = \left( \frac{2 \cdot \cos(r) \cdot \sin(i)}{\sin(i) \cdot \cos(r) + \cos(i) \cdot \sin(r)} \right)^2 = \frac{16}{9}$$

$$T'_{TM} = \left( \frac{2 \cdot \cos(i) \cdot \sin(r)}{\cos(i-r) \cdot \sin(i+r)} \right)^2 = \left( \frac{2 \cdot \cos(r) \cdot \sin(i)}{\sin(i) \cdot \cos(i) + \sin(r) \cdot \cos(r)} \right)^2 = \left( \frac{4n}{n^2 + 2} \right)^2$$

On trouve les coefficients de transmission pour chaque polarisation ( $n = 1.333$ ), notés  $TE_1$  et  $TM_1$  :

$$TE_1 = \frac{4}{9} \cdot \frac{1}{9} \cdot \frac{16}{9} = \frac{64}{729} = 8.78\%$$

$$TM_1 = \left( \frac{2n}{n^2 + 2} \right)^2 \cdot \left( \frac{n^2 - 2}{n^2 + 2} \right)^2 \cdot \left( \frac{4n}{n^2 + 2} \right)^2 = \frac{64 \cdot n^4 \cdot (n^2 - 2)^2}{(n^2 + 2)^6} = 0.35\%$$

Si on considère une lumière incidente non polarisée, on peut considérer que ces contributions seront donc de moitié. On en conclut donc que l'arc-en-ciel primaire renvoie 4.6% de l'intensité lumineuse reçue. Mais surtout, 96.2% de la lumière de l'arc-en-ciel est polarisée perpendiculairement ( $TE$ ).

#### 1.10.4.2. Coefficients de Fresnel et polarisation de l'arc-en-ciel secondaire

Pour l'arc primaire, on a :

$$\cos(i) = \sqrt{\frac{n^2 - 1}{8}} \quad ; \quad \sin(i) = \sqrt{\frac{9 - n^2}{8}} \quad ; \quad \cos(r) = \frac{3}{n} \sqrt{\frac{n^2 - 1}{8}} \quad ; \quad \sin(r) = \frac{1}{n} \sqrt{\frac{9 - n^2}{8}}$$

On trouve alors pour chaque polarisation, la transmission pour l'entrée dans la goutte :

$$T_{TE} = \left( \frac{2 \cdot \cos(i) \cdot \sin(r)}{\sin(i+r)} \right)^2 = \left( \frac{2 \cdot \cos(i) \cdot \sin(r)}{\sin(i) \cdot \cos(r) + \cos(i) \cdot \sin(r)} \right)^2 = \frac{1}{4}$$

$$T_{TM} = \left( \frac{2 \cdot \cos(i) \cdot \sin(r)}{\cos(i-r) \cdot \sin(i+r)} \right)^2 = \left( \frac{2 \cdot \cos(i) \cdot \sin(r)}{\sin(i) \cdot \cos(i) + \sin(r) \cdot \cos(r)} \right)^2 = \left( \frac{2n}{n^2+3} \right)^2$$

suivi des réflexions dans la goutte :

$$R_{TE} = \left( \frac{\sin(i-r)}{\sin(i+r)} \right)^2 = \left( \frac{\sin(i) \cdot \cos(r) - \cos(i) \cdot \sin(r)}{\sin(i) \cdot \cos(r) + \cos(i) \cdot \sin(r)} \right)^2 = \frac{1}{4}$$

$$\begin{aligned} R_{TM} &= \left( \frac{\tan(i-r)}{\tan(i+r)} \right)^2 = \left( \frac{\sin(i-r) \cdot \cos(i+r)}{\sin(i+r) \cdot \cos(i-r)} \right)^2 = \\ &= \left( \frac{\sin(i-r) \cdot \cos(i) \cdot \cos(r) - \sin(i) \cdot \sin(r)}{\sin(i+r) \cdot \cos(i) \cdot \cos(r) + \sin(i) \cdot \sin(r)} \right)^2 = \left( \frac{n^2-3}{n^2+3} \right)^2 \end{aligned}$$

puis d'une transmission pour en ressortir :

$$T'_{TE} = \left( \frac{2 \cdot \cos(r) \cdot \sin(i)}{\sin(i+r)} \right)^2 = \left( \frac{2 \cdot \cos(r) \cdot \sin(i)}{\sin(i) \cdot \cos(r) + \cos(i) \cdot \sin(r)} \right)^2 = \frac{9}{4}$$

$$T'_{TM} = \left( \frac{2 \cdot \cos(i) \cdot \sin(r)}{\cos(i-r) \cdot \sin(i+r)} \right)^2 = \left( \frac{2 \cdot \cos(r) \cdot \sin(i)}{\sin(i) \cdot \cos(i) + \sin(r) \cdot \cos(r)} \right)^2 = \left( \frac{6n}{n^2+3} \right)^2$$

On trouve les coefficients de transmission pour chaque polarisation, notés  $TE_2$  et  $TM_2$  :

$$TE_2 = \frac{1}{4} \cdot \frac{1}{4} \cdot \frac{1}{4} \cdot \frac{9}{4} = \frac{9}{256} = 3.52\%$$

$$TM_2 = \left( \frac{2n}{n^2+3} \right)^2 \cdot \left( \frac{n^2-3}{n^2+3} \right)^2 \cdot \left( \frac{n^2-3}{n^2+3} \right)^2 \cdot \left( \frac{6n}{n^2+3} \right)^2 = \frac{144 \cdot n^4 \cdot (n^2-3)^4}{(n^2+3)^8} = 0.376\%$$

L'arc-en-ciel secondaire renvoie 1.8% de l'intensité lumineuse reçue. Cette valeur représente environ 42.7% de l'intensité lumineuse de l'arc primaire ; mais cette intensité « s'étale » sur un angle apparent quasiment deux fois plus grand, puisque la largeur de l'arc secondaire est de 3.1° contre 1.7° pour le primaire. L'arc secondaire est bien sûr toujours polarisé perpendiculairement ( $TE$ ) à environ 90.4%, un peu moins que le primaire.

Ainsi, en supposant une lumière qui arrive du Soleil avec un éclairement de 10'000lux (l'éblouissement de l'œil se situe autour des 100'000lux), l'arc-en-ciel primaire aura un éclairement d'environ 450lux alors que l'arc secondaire aura un éclairement de 100lux (puisqu'il s'étale sur une surface apparente plus grande). A titre de comparaison, un éclairement de « confort » se trouve en gros entre 100 et 1000lux, un éclairement de bureau plutôt à 1000lux alors qu'un éclairement « d'ambiance » sera plutôt autour des 100lux. Il faut encore relever que l'œil a une réponse logarithmique à la lumière,

tout comme l'oreille au son : cela veut dire qu'une lumière deux fois plus intense ne sera quasiment pas perçue par un œil non attentif.

Il faut relever que tous ces calculs supposent une situation idéale où les rayons ne subissent aucune interaction et où les gouttes sont homogènes, tout comme leur répartition (ou leur densité).

### 1.10.4.3. Coefficients de Fresnel et polarisation de l'arc-en-ciel du $p^e$ ordre

Pour l'arc primaire, on a :

$$\cos(i) = \sqrt{\frac{n^2-1}{(p+1)^2-1}} \quad ; \quad \sin(i) = \sqrt{\frac{(p+1)^2-n^2}{(p+1)^2-1}} \quad ; \quad \cos(r) = \frac{2}{n} \sqrt{\frac{(p+1)^2 \cdot (n^2-1)}{(p+1)^2-1}} \quad ; \quad \sin(r) = \frac{1}{n} \sqrt{\frac{(p+1)^2-n^2}{(p+1)^2-1}}$$

On trouve alors pour chaque polarisation, la transmission pour l'entrée dans la goutte :

$$T_{TE} = \left(\frac{2}{p+2}\right)^2 \quad ; \quad T_{TM} = \left(\frac{2n}{n^2 + (p+1)}\right)^2$$

suivi des réflexions dans la goutte :

$$R_{TE} = \left(\frac{p}{p+2}\right)^2 \quad ; \quad R_{TM} = \left(\frac{n^2 - (p+1)}{n^2 + (p+1)}\right)^2$$

puis d'une transmission pour en ressortir :

$$T'_{TE} = \left(\frac{2(p+1)}{p+2}\right)^2 \quad ; \quad T'_{TM} = \left(\frac{2n \cdot (p+1)}{n^2 + (p+1)}\right)^2$$

On trouve les coefficients de transmission pour chaque polarisation, notés  $TE_p$  et  $TM_p$  :

$$TE_p = \left(\frac{2}{p+2}\right)^2 \cdot \left(\frac{p}{p+2}\right)^{2p} \cdot \left(\frac{2(p+1)}{p+2}\right)^2$$

$$TM_p = \left(\frac{2n}{n^2 + (p+1)}\right)^2 \cdot \left(\frac{n^2 - (p+1)}{n^2 + (p+1)}\right)^{2p} \cdot \left(\frac{2n \cdot (p+1)}{n^2 + (p+1)}\right)^2$$

On remarque que ces coefficients sont fonctions de  $\frac{1}{p^2}$ , ainsi ces termes tendent vers 0 lorsque  $p$  tend vers l'infini. Afin de pouvoir évaluer la limite et donc de regarder le taux de polarisation pour un ordre  $p$  plus grand, on regarde alors la limite de  $p^2 \cdot TE_p$  et  $p^2 \cdot TM_p$  lorsque  $p$  tend vers l'infini. Pour effectuer ce calcul, il faut juste rappeler que

$$\lim_{x \rightarrow \infty} \left(1 + \frac{a}{x}\right)^x = e^a$$

On a donc pour  $p^2 \cdot TE_p$  :

$$\begin{aligned} p^2 \cdot TE_p &= \lim_{p \rightarrow \infty} \left[ 16 \cdot \left( \frac{p}{p+2} \right)^2 \cdot \left( \frac{p}{p+2} \right)^{2p} \cdot \left( \frac{p+1}{p+2} \right)^2 \right] = 16 \cdot 1 \cdot \lim_{p \rightarrow \infty} \left[ \left( \frac{p+2}{p} \right)^{-2p} \right] \cdot 1 \\ &= 16 \cdot \lim_{p \rightarrow \infty} \left[ \left( \left( 1 + \frac{2}{p} \right)^p \right)^{-2} \right] = 16 \cdot (e^2)^{-2} = 16 \cdot e^{-4} \end{aligned}$$

Et pour  $p^2 \cdot TM_p$  :

$$\begin{aligned} p^2 \cdot TM_p &= \lim_{p \rightarrow \infty} \left[ 16n^4 \cdot \left( \frac{p}{n^2 + (p+1)} \right)^2 \cdot \left( \frac{n^2 - (p+1)}{n^2 + (p+1)} \right)^{2p} \cdot \left( \frac{p+1}{n^2 + (p+1)} \right)^2 \right] \\ &= \lim_{p \rightarrow \infty} \left[ 16n^4 \cdot 1 \cdot \left( -1 + \frac{2n^2}{n^2 + p + 1} \right)^{2p} \cdot 1 \right] = \lim_{p \rightarrow \infty} \left[ 16n^4 \cdot \left( 1 - \frac{2n^2}{n^2 + p + 1} \right)^{2p} \right] \\ &= \lim_{p \rightarrow \infty} \left[ 16n^4 \cdot \left( 1 - \frac{4n^2}{2n^2 + 2p + 2} \right)^{2p+2n^2+2} \cdot \left( 1 - \frac{4n^2}{2n^2 + 2p + 2} \right)^{-2n^2-2} \right] \\ &= \lim_{p \rightarrow \infty} \left[ 16n^4 \cdot \left( 1 - \frac{4n^2}{2n^2 + 2p + 2} \right)^{2p+2n^2+2} \cdot 1 \right] = 16n^4 \cdot e^{-4n^2} \end{aligned}$$

Avec ces calculs de limites, on trouve alors comme taux de polarisation « limite » :

$$\lim_{p \rightarrow \infty} \left[ \frac{TE_p}{TE_p + TM_p} \right] = \frac{16 \cdot e^{-4}}{16 \cdot e^{-4} + 16n^4 \cdot e^{-4n^2}} = \frac{1}{1 + n^4 \cdot e^{4-4n^2}} = \frac{1}{1 + (n \cdot e^{1-n^2})^4} \cong 87.63\%$$

La polarisation des arcs-en-ciel tend donc vers une valeur minimale limite d'environ 87.6% lorsque l'ordre arcs-en-ciel grandit. Un arc sera donc toujours très polarisé perpendiculairement !

#### 1.10.4.4. Déviation maximale de la lumière

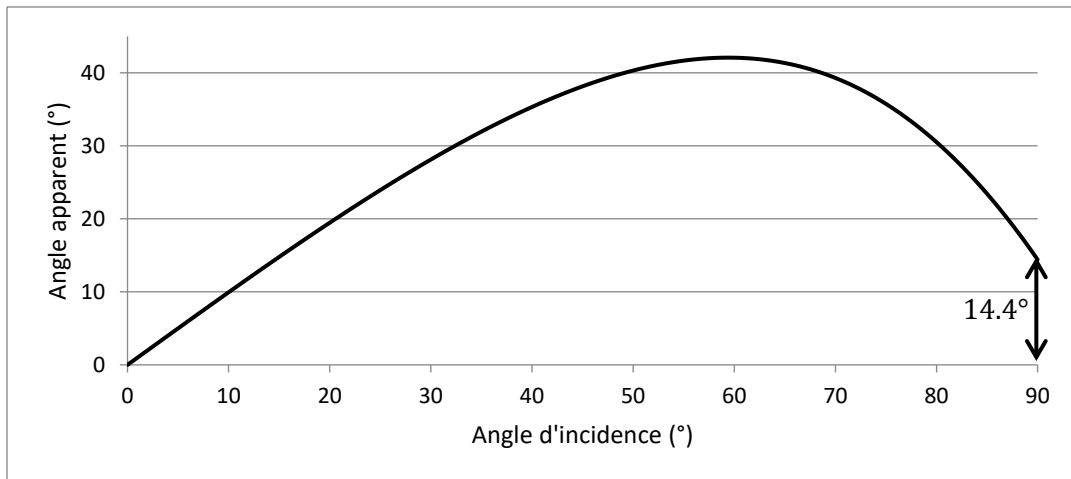
Jusque-là, on supposait qu'un rayon lumineux peut revenir parallèlement au rayon incident après une réflexion dans la goutte. Sans entrer dans les détails de phénomènes de dispersion, on remarque déjà avec les coefficients de Fresnel que la part de lumière qui peut « rebondir » sur la goutte avec un angle d'incidence proche de  $i = 0^\circ$  est quasiment nulle. La dispersion de la lumière rend ce phénomène quasiment inexistant.

Dès lors, il faudrait imaginer un rayon arrivant à l'autre extrême de la goutte avec un angle  $i = 90^\circ$ .

Dans ce cas, si on calcule la déviation du rayon, on trouve :

$$D = 180 + 2 \cdot i - 4 \cdot \arcsin\left(\frac{\sin(i)}{n}\right) = 165.6^\circ$$

Autrement dit, la lumière ne pourra pas revenir pour un angle inférieur à  $14.4^\circ$  vers l'observateur. Cette limite avait déjà été vue graphiquement.



Ce résultat devrait créer une « zone sombre » au centre de l'arc-en-ciel. Mais son observation est rendue très difficile (jamais observé à la connaissance de l'auteur) par le fait que le centre de l'arc est souvent « sous terre » alors que lors de l'observation de cercle-en-ciel le centre est souvent « perturbé » par le paysage au sol qui s'y trouve derrière, rendant une différence de contraste difficilement observable.

#### 1.10.4.5. Les Arcs-en-Ciel Surnuméraires

On ne s'intéresse ici qu'à l'arc-en-ciel primaire pour la description de ces arcs surnuméraires. On s'intéresse dans un premier temps à évaluer l'angle de déviation  $D$  pour un angle incident  $i$  proche de l'angle minimum  $i_m$ . On se rappelle que :

$$D = 180 + 2i - 4r = 180 + 2 \cdot \arcsin(x) - 4 \cdot \arcsin\left(\frac{x}{n}\right)$$

où  $x = \sin(i)$ . On cherche alors dans un premier temps la dérivée en fonction de  $x$  et on trouve :

$$D'(x) = \frac{dD(x)}{dx} = \frac{2}{\sqrt{1-x^2}} - \frac{4}{\sqrt{n^2-x^2}}$$

On retrouve ici que  $D'_m = D'(x_m) = 0$  pour  $x_m = \sin(i_m) = \sqrt{\frac{4-n^2}{3}}$ .

On calcule maintenant la deuxième dérivée de cette expression et on trouve :

$$D''(x) = \frac{d^2D(x)}{dx^2} = \frac{2 \cdot x}{(1-x^2)^{3/2}} - \frac{4 \cdot x}{(n^2-x^2)^{3/2}}$$

On peut ainsi déterminer la valeur de cette deuxième dérivée aux abords du minimum et on trouve :

$$D''_m = D''(x_m) = \sqrt{\frac{4-n^2}{3}} \cdot \left( \frac{2}{\left(1-\frac{4-n^2}{3}\right)^{3/2}} - \frac{4}{\left(n^2-\frac{4-n^2}{3}\right)^{3/2}} \right) = \frac{9}{2} \cdot \frac{\sqrt{4-n^2}}{(n^2-1)^{3/2}} > 0$$

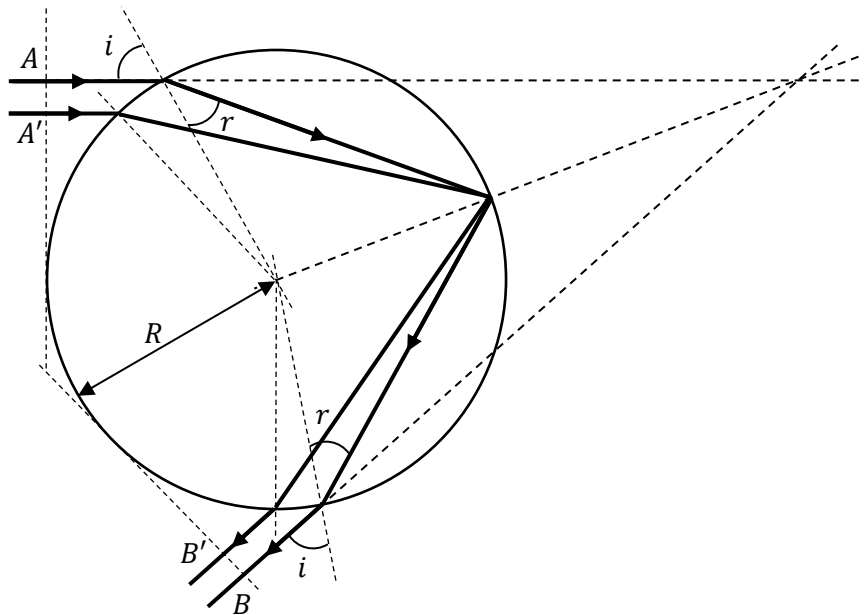
Cette valeur est strictement positive et on a donc bien un minimum de déviation. On peut alors approximer la déviation aux abords du minimum par un développement en série (de Taylor) :

$$D(x) = D(x_m) + \frac{1}{2} \cdot D''(x_m) \cdot \Delta x^2 + O(x^3)$$

pour  $x = x_m + \Delta x$  ou  $\Delta x = x - x_m \approx 0$ . On a donc  $x \cong x_m$ . On peut alors exprimer la différence de déviation proche du minimum :

$$\Delta D(x) = D(x) - D(x_m) = \frac{1}{2} \cdot D''(x_m) \cdot \Delta x^2 + O(x^3) \cong \frac{9}{4} \cdot \frac{\sqrt{4-n^2}}{(n^2-1)^{3/2}} \cdot \Delta x^2$$

Pour évaluer la position des différentes bandes d'interférence, donc des arcs surnuméraires, on considère deux rayons qui arrivent parallèlement (et en phase) vers une goutte sphérique. Les chemins que parcourent ces rayons dépendent du rayon de la goutte  $R$  ainsi que de l'angle d'incidence des rayons  $i$ . On cherchera alors la différence de chemin pour ces deux rayons, sachant qu'un va de  $A$  à  $B$  et l'autre de  $A'$  à  $B'$ .



Soit  $L$  le chemin d'un rayon en fonction de son angle d'incidence :

$$L = 2 \cdot R \cdot (1 - \cos i) + 4 \cdot n \cdot R \cdot \cos r$$

Le premier terme représente le chemin parcouru par le rayon en dehors de la goutte (avant et après) alors que le second terme représente le chemin à l'intérieur de la goutte. On reformule cette expression sous la forme :

$$L = 2 \cdot R \cdot \left(1 - \cos(\arcsin(x))\right) + 4 \cdot n \cdot R \cdot \cos\left(\arcsin\left(\frac{x}{n}\right)\right)$$

donc

$$L(x) = 2 \cdot R \cdot \left[\left(1 - \sqrt{1 - x^2}\right) + 2 \cdot \sqrt{n^2 - x^2}\right]$$

On fait ici encore un développement en série pour voir ce qui se passe proche de  $x_m$ . On dérive donc cette expression :

$$L'(x) = \frac{dL(x)}{dx} = 2 \cdot R \cdot \left[\frac{x}{\sqrt{1 - x^2}} - \frac{2 \cdot x}{\sqrt{n^2 - x^2}}\right]$$

### Variante 1 :

On remarque alors que cette expression ressemble fortement à l'expression précédente, puisque :

$$L'(x) = R \cdot x \cdot D'(x)$$

Autrement dit, cette valeur est nulle pour  $x = x_m$ . On dérive alors une seconde fois :

$$L''(x) = \frac{d^2L(x)}{dx^2} = 2 \cdot R \cdot \left[\frac{1}{(1 - x^2)^{3/2}} - \frac{2 \cdot n^2}{(n^2 - x^2)^{3/2}}\right]$$

On détermine alors la valeur pour  $x = x_m$  :

$$L''_m = L''(x_m) = 2 \cdot R \cdot \left[\frac{1}{\left(\frac{n^2 - 1}{3}\right)^{3/2}} - \frac{2 \cdot n^2}{\left(\frac{4n^2 - 4}{3}\right)^{3/2}}\right] = \frac{3 \cdot \sqrt{3}}{2} \cdot \frac{4 - n^2}{(n^2 - 1)^{3/2}} \cdot R$$

Le développement s'écrit alors :

$$L(x) = L(x_m) + \frac{1}{2} \cdot L''(x_m) \cdot \Delta x^2$$

d'où on peut exprimer la différence de chemin :

$$\Delta L(x) = L(x) - L(x_m) = \frac{3 \cdot \sqrt{3}}{4} \cdot \frac{4 - n^2}{(n^2 - 1)^{3/2}} \cdot R \cdot \Delta x^2$$

Des rayons arrivant avec une position de  $x_m \pm \Delta x$  auront une différence de chemin identique par rapport au chemin du minimum  $x_m$ . Afin d'estimer cette différence de chemin  $C$ , on intègre cette expression. Cette différence de chemin doit alors être un multiple (entier) de la longueur d'onde afin d'obtenir des interférences constructives. Donc :

$$C = \int_{-\Delta x}^{+\Delta x} \Delta L = \int_{-\Delta x}^{+\Delta x} \frac{3 \cdot \sqrt{3}}{4} \cdot \frac{4 - n^2}{(n^2 - 1)^{3/2}} \cdot R \cdot \Delta x^2 = k \cdot \lambda$$

où  $k$  est un nombre entier positif. On trouve alors :

$$C = \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot \frac{4 - n^2}{(n^2 - 1)^{3/2}} \cdot R \cdot \Delta x^3 = k \cdot \lambda$$

Ce résultat nous permet alors d'exprimer  $\Delta x$  :

$$\Delta x = \left( \frac{2 \cdot k \cdot \lambda}{\sqrt{3} \cdot R} \right)^{1/3} \cdot \frac{\sqrt{n^2 - 1}}{(4 - n^2)^{1/3}}$$

On peut maintenant utiliser ce résultat dans l'expression de la différence de déviation :

$$\Delta D(x) = \frac{9}{4} \cdot \frac{\sqrt{4 - n^2}}{(n^2 - 1)^{3/2}} \cdot \Delta x^2 = \frac{9}{4} \cdot \frac{\sqrt{4 - n^2}}{(n^2 - 1)^{3/2}} \cdot \left( \frac{2 \cdot k \cdot \lambda}{\sqrt{3} \cdot R} \right)^{2/3} \cdot \frac{n^2 - 1}{(4 - n^2)^{2/3}}$$

pour trouver obtenir :

$$\Delta D(x) = \left( \frac{27 \cdot k \cdot \lambda}{4 \cdot \sqrt{3} \cdot R} \right)^{2/3} \cdot (4 - n^2)^{-1/6} \cdot (n^2 - 1)^{-1/2} \cong 2.46 \cdot \left( \frac{k \cdot \lambda}{R} \right)^{2/3}$$

### **Variante 2 :**

On remarque alors que cette expression ressemble fortement à l'expression précédente, puisque :

$$L'(x) = R \cdot x \cdot D'(x)$$

Donc si  $x = x_m + \Delta x$ , on peut récrire la relation ci-dessus s'exprime comme :

$$L'(x) = R \cdot x_m \cdot D'(x) + R \cdot \Delta x \cdot D'(x)$$



Afin de retrouver le chemin optique, on intègre cette relation :

$$L(x) = L_0 + R \cdot x_m \cdot (D(x) - D(x_m)) + R \cdot \Delta x \cdot (D(x) - D(x_m))$$

Mais on a montré que  $D(x) = D(x_m) + \frac{1}{2} \cdot D''(x_m) \cdot \Delta x^2$ , donc :

$$L(x) = L_0 + R \cdot x_m \cdot \frac{1}{2} \cdot D''(x_m) \cdot \Delta x^2 + R \cdot \Delta x \cdot \frac{1}{2} \cdot D''(x_m) \cdot \Delta x^2$$

Si on regarde maintenant la différence de chemin  $\Delta L$  entre «  $+\Delta x$  » et «  $-\Delta x$  », on obtient :

$$\Delta L = 2 \cdot R \cdot \Delta x \cdot \frac{1}{2} \cdot D''(x_m) \cdot \Delta x^2 = R \cdot D''(x_m) \cdot \Delta x^3$$

Mais cette différence de chemin, pour obtenir des interférences constructives, doit être égale à :

$$\Delta L = k \cdot \lambda = R \cdot D''(x_m) \cdot \Delta x^3$$

On peut donc exprimer que :

$$\Delta x^3 = \frac{k \cdot \lambda}{R \cdot D''(x_m)} = \frac{k \cdot \lambda}{R \cdot \frac{9}{2} \cdot \frac{\sqrt{4-n^2}}{(n^2-1)^{3/2}}}$$

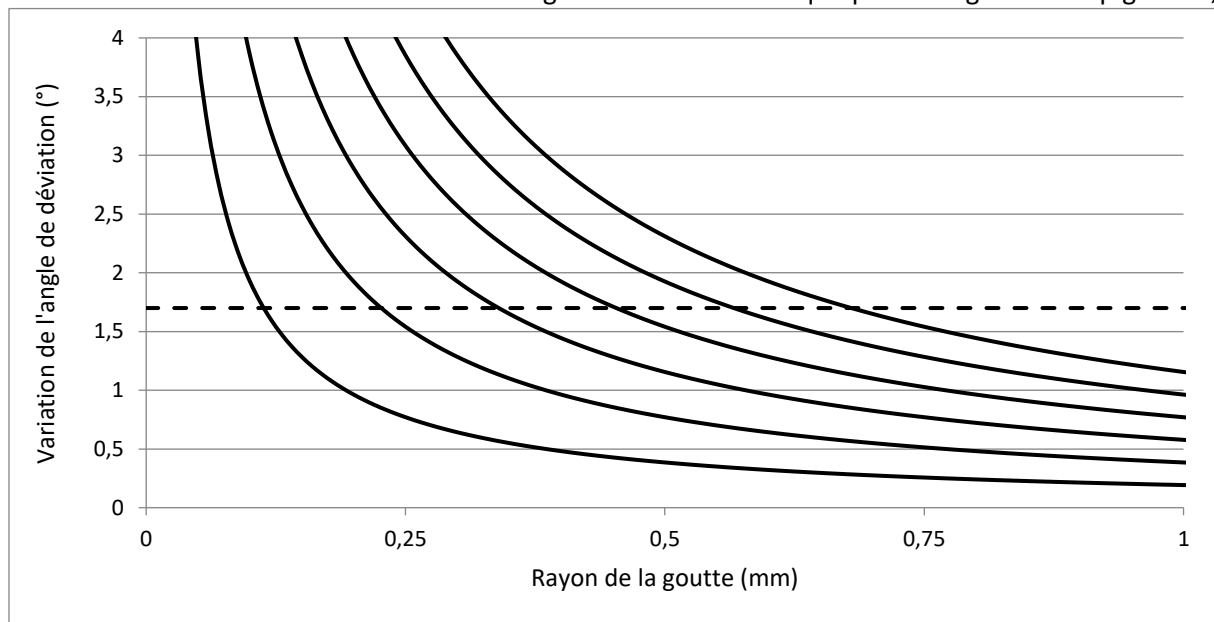
Comme on a trouvé avant que,  $\Delta D(x) = \frac{1}{2} \cdot D''(x_m) \cdot \Delta x^2$ , on obtient :

$$\Delta D = \frac{1}{2} \cdot \frac{9}{2} \cdot \frac{\sqrt{4-n^2}}{(n^2-1)^{3/2}} \cdot \left( \frac{k \cdot \lambda}{R \cdot \frac{9}{2} \cdot \frac{\sqrt{4-n^2}}{(n^2-1)^{3/2}}} \right)^{2/3} = \frac{1}{2} \cdot \left( \frac{k \cdot \lambda}{R} \right)^{2/3} \cdot \left( \frac{9}{2} \cdot \frac{\sqrt{4-n^2}}{(n^2-1)^{3/2}} \right)^{1/3}$$

donc :

$$\Delta D = \left( \frac{9}{16} \right)^{1/3} \cdot \frac{(4-n^2)^{1/6}}{(n^2-1)^{1/2}} \cdot \left( \frac{k \cdot \lambda}{R} \right)^{2/3} \cong 1.08 \cdot \left( \frac{k \cdot \lambda}{R} \right)^{2/3}$$

Dans le graphique ci-contre, on observe la variation de l'angle de déviation pour différents ordres d'interférences en fonction de la taille de la goutte. On voit alors que pour des gouttes trop grosses,



typiquement plus qu'un 1mm, l'angle de déviation est largement inférieur à la largeur de l'arc-en-ciel (ligne traitillée) ; les éventuelles franges d'interférence se mélangent alors à l'arc-en-ciel les rendant invisibles. En général, ces arcs surnuméraires s'étalent sur quelques degrés d'angle ; autrement dit, on voit que la taille des gouttes idéale pour avoir plusieurs arcs surnuméraires semble se trouver dans la fourchette entre 0.25 et 0.5mm.

On retrouve ici les angles observés pour les différents arcs surnuméraires

$$\Delta D = 1.2^\circ - 1.8^\circ - 2.2^\circ - 2.4^\circ$$

ainsi que les tailles de gouttes correspondantes, en millimètre, pour les différents multiples d'interférences. Sachant que la première ligne depuis le bas, soit l'angle de 1.2°, est généralement confondu avec l'arc-en-ciel primaire, on ne s'intéresse alors qu'aux angles supérieurs.

On pourrait aussi sortir de cette relation la taille  $R$  de la goutte en fonction de la distance angulaire des arcs surnuméraires  $\Delta D$  :

$$R = \frac{3 \cdot k \cdot \lambda}{4 \cdot \Delta D^{3/2}} \cdot \frac{(4 - n^2)^{1/4}}{(n^2 - 1)^{3/4}}$$

On trouve comme rayons de gouttes (en mettant les angles de déviations en radian bien sûr !) :

$R$ (mm)	$k = 1$	$k = 2$	$k = 3$
$\Delta D = 1.8^\circ$	0.11	0.21	0.43
$\Delta D = 2.2^\circ$	0.09	0.18	0.35
$\Delta D = 2.4^\circ$	0.08	0.16	0.32

On se rend ainsi compte que la taille (DIAMETRE) des gouttes semble être un des paramètres clés de la formation de ces arcs. Par exemple, des tailles de goutte dans les alentours de 0.3mm ou de 0.6 – 0.7mm pourraient donner deux arcs alors que des gouttes dans les 0.9 – 1mm pourraient en former trois en jouant sur les différents ordres d'interférence (donc les valeurs de  $k$ ).

#### 1.10.4.6. Effet de la Diffraction sur l'Arc-en-Ciel

En optique ondulatoire la lumière peut être déviée lorsqu'elle traverse des petits obstacles, comme des petites gouttes d'eau. Ainsi, une lumière qui traverse un trou de diamètre  $d$  formera une tache dont l'angle  $\theta$  s'exprime :

$$\theta = 1.22 \cdot \frac{\lambda}{d}$$

Cette relation est obtenue par la théorie de la *diffraction de Fraunhofer*. Cette tache est appelée « *tache d'Airy* » et cette relation est vraie pour des angles petits où  $\sin(\theta) \cong \theta$ .

Ainsi, si on considère une goutte de taille (diamètre) de 1mm, on obtient un angle de diffraction de  $0.035^\circ$  qui est bien négligeable par rapport à la taille de l'arc-en-ciel (environ  $1.7^\circ$ ). Mais pour une goutte plus petite, typiquement 0.1mm, cet angle passe à  $0.35^\circ$  et à  $0.7^\circ$  pour une goutte de 0.05mm. Il faut de plus remarquer que l'effet est plus marqué pour des grandes longueurs d'onde, typiquement le rouge ; ce qui explique pourquoi le violet (petite longueur d'onde) est la « dernière » couleur visible ! En effet, le facteur presque 2 en termes de longueurs d'onde donne un facteur de presque 2 aussi en angle de diffraction, donc en « mélange » des couleurs !

On peut ainsi caractériser « l'effet » que la taille des gouttes aura sur l'arc. Le diamètre maximal d'une goutte d'eau pour créer un arc-en-ciel est d'environ 3mm. Cette limite est « mécanique » car il s'agit de la taille limite pour laquelle on peut considérer la goutte comme étant suffisamment sphérique. Entre son poids, sa tension de surface et le frottement lié à sa vitesse de chute, une goutte plus grande sera plus déformée et l'arc ne pourra pas se créer. Entre 1 et 2mm, l'arc contient du rouge pur, un vert plutôt vif, un bleu très peu visible et un violet très intense. Pour une taille d'environ 0.5mm, le rouge devient plus pâle. Entre 0.2 et 0.3mm, le rouge disparaît et les autres couleurs forment un arc plus large. Pour des gouttes de 0.08 à 0.1mm, l'arc pâlit pour toutes les couleurs sauf le violet qui reste intense. Pour des gouttes d'environ 0.06mm, une bande blanche apparaît dans l'arc et en dessous de 0.05mm on obtient un arc-en-ciel blanc. On effectue, de la relation précédente on peut calculer la taille de goutte qui superposerait les couleurs sur la largeur d'un arc de  $1.7^\circ$ . On trouve alors un rayon de goutte d'environ 0.02mm en prenant un rayon  $0.85^\circ$  et une longueur d'onde de 500nm. L'arc blanc existe jusqu'à des gouttes d'environ 0.005mm ; des gouttes si petites n'existent plus sous forme de pluie, trop petite et donc légère pour tomber, mais dans des brouillards. En résumé, l'arc-en-ciel existe pour des gouttes allant de 0.1 – 0.2mm au minimum à 3mm au maximum environ.



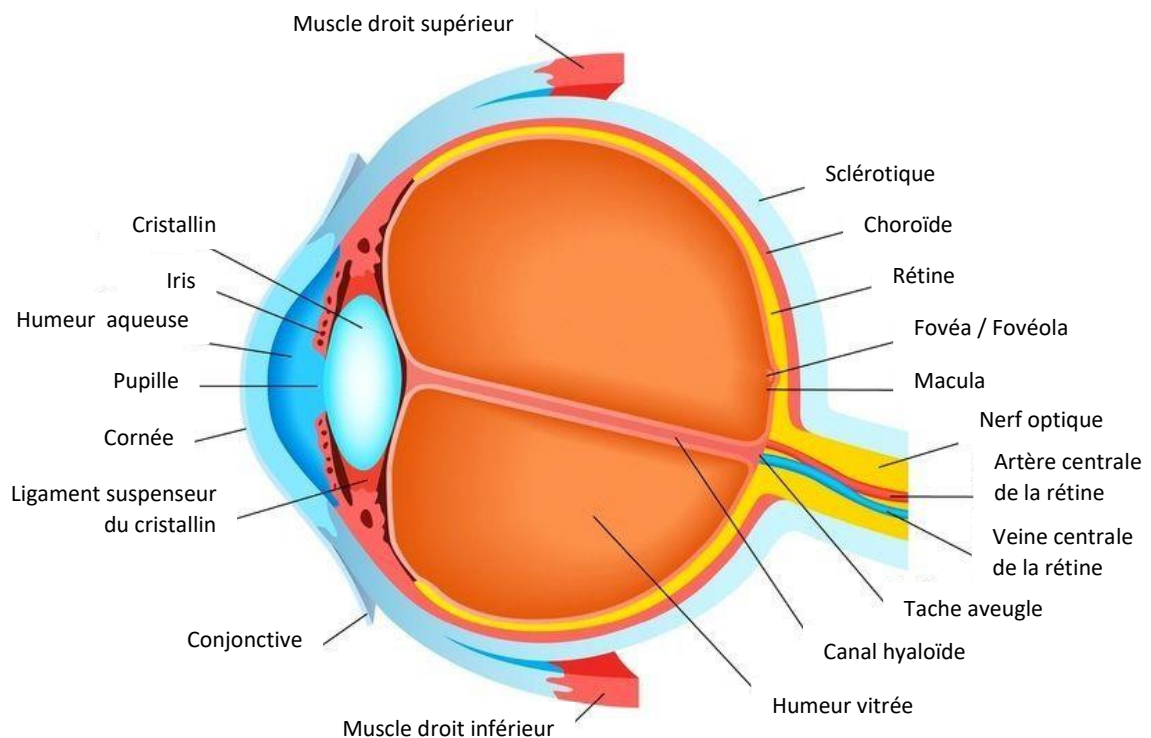
Crédit : Melvin Nicholson

## 2. L'ŒIL

Pour comprendre le fonctionnement des appareils optiques que l'on a « inventé », ou comprendre le fonctionnement de *système colorimétrique*, il faut comprendre le fonctionnement de l'œil, que l'homme a simplement copié. Le fonctionnement de l'œil permet également de décrire, comprendre, anticiper et corriger des troubles de visions, des défauts de la vue, des illusions d'optique, etc.

### 2.1. DESCRIPTION PHYSIOLOGIQUE

Le schéma ci-dessous décrit les différentes parties physiologiques d'un œil.



Sur ce schéma, on retrouve :

- **Muscle droit supérieur :**  
Ce muscle permet d'orienter le regard vers le haut.
- **Cristallin :**  
C'est une lentille convergente qui peut modifier sa courbure sous l'effet du *muscle ciliaire* afin de modifier sa distance focale pour que l'image se forme sur la *rétine* (c'est le phénomène d'*accommodation*). Son indice de réfraction varie entre le centre et les bords ; les cristallins artificiels ont des indices proches de 1.5.
- **Iris :**  
C'est une membrane circulaire qui constitue la partie colorée de l'œil. En son centre, un trou : la pupille.
- **Humeur aqueuse :**  
C'est un liquide transparent qui permet de maintenir la pression dans l'œil et donc de conserver la forme du globe oculaire. Son indice de réfraction est de 1.336.
- **Pupille :**  
C'est le trou au centre de l'*iris*. Ces deux parties ensemble sont comparables au *diaphragme* d'un appareil photo. Son diamètre varie entre 2mm (constriction maximale : *myosis*) et 8mm (constriction minimale : *mydriase*) ; cela correspond à un rapport 16 en termes de quantité de lumière pouvant entrer dans l'œil.
- **Cornée :**  
C'est une lentille convergente asphérique qui est le premier élément optique de l'œil. Il représente les  $\frac{2}{3}$  de sa puissance optique. Son indice de réfraction est de 1.377 et sa focale de 23.25mm. Elle a un diamètre vertical de 11.7mm et horizontal de 10.6mm. Son épaisseur varie de 0.5mm au centre à 1mm sur les bords. Ses rayons de courbures sont de 7.8mm pour la face antérieure et 6.8mm pour la face postérieure.
- **Ligament suspenseur du cristallin :**  
C'est le ligament qui maintient le cristallin en place.
- **Conjonctive :**  
C'est une membrane transparente qui recouvre l'intérieur des paupières. Cette membrane est composée de cellules (*caliciformes*) qui sécrètent un mucus entrant dans la composition du liquide lacrymal nécessaire à la lubrification de l'œil.
- **Muscle droit inférieur :**  
Ce muscle permet d'orienter le regard vers le bas.
- **Humeur vitrée (ou corps vitré ou corps hyalin) :**  
C'est un liquide transparent qui remplit l'œil derrière le cristallin. Son indice de réfraction est légèrement différent de l'*humeur aqueuse* et vaut 1.337.
- **Canal hyaloïde (ou canal de Cloquet) :**  
C'est un petit canal transparent qui traverse l'*humeur vitrée* depuis la tâche aveugle jusqu'à l'arrière du cristallin. Il s'agit d'un résidu embryonnaire de l'œil.
- **Tache aveugle :**  
C'est la partie de la rétine où s'insère le *nerf optique*. Cette partie est dépourvue de toute cellule photosensible et est donc totalement aveugle.

- **Veine centrale de la rétine / Artère centrale de la rétine :**

Ce sont les veine et artère qui permettent l'irrigation sanguine de la rétine. Elles irriguent aussi les muscles et ligaments de l'œil par les côtés arrière du globe oculaire.

- **Nerf optique :**

C'est le nerf qui transmet les influx produits dans la rétine au cerveau. Il transmet l'information de la vision.

- **Macula (ou tache jaune) :**

C'est la zone de la *rétine* caractérisée par une concentration élevée de *cônes*. Elle se situe au fond de l'œil et a une taille d'environ 5.5mm. Elle permet donc une vision détaillée en vision diurne.

- **Fovéa / Fovéola :**

La *fovéa* est une petite zone au centre de la macula d'environ 1.5mm de diamètre. Elle a une forme conique et représente un champ de vision d'environ 5°. Elle ne contient que des cônes.

La *fovéola* se trouve au fond de la fovéa et a

un diamètre d'environ 0.3mm. C'est là que l'image se forme lorsque l'on fixe quelque chose. Comme la *fovéa*, elle ne contient que des cônes.

- **Rétine :**

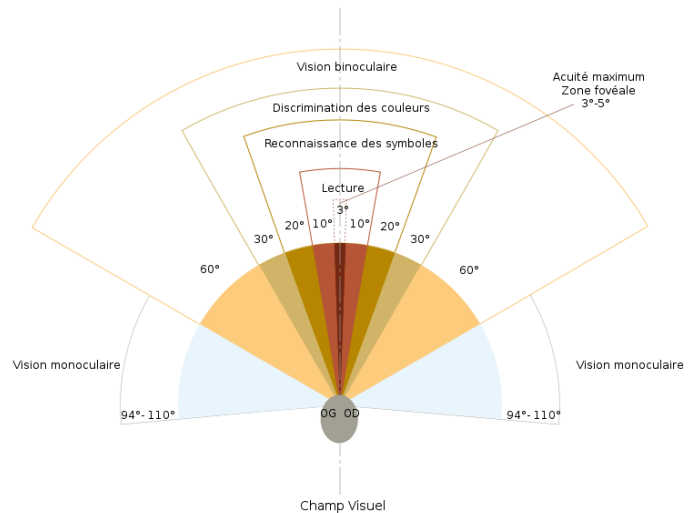
La rétine est l'organe de la vision. Elle est composée de deux types de cellules : les *cônes* et les *bâtonnets*. Les cônes sont sensibles à la couleur et sont de trois types : les cônes rouges, les verts et les bleus. Au total, un œil compte environ 5 à 6 millions de cônes. Les bâtonnets ne sont eux sensibles qu'à la luminosité mais sont beaucoup plus nombreux : on en compte entre 100 et 120 millions par œil. La rétine a une épaisseur d'environ 0.5mm et recouvre quasiment 75% de la surface intérieure de l'œil. La dimension des cônes et des bâtonnets est sujette à discussion, mais se trouve autour des 2µm (0.002mm), bien qu'il semble qu'elle soit inférieure à cette valeur dans la fovéa et la fovéola.

- **Choroïde :**

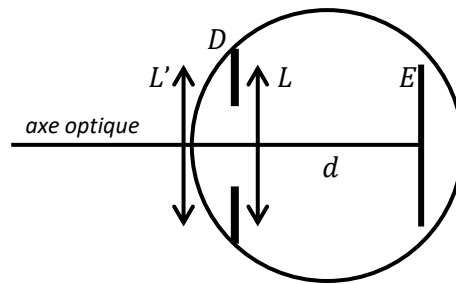
C'est la couche qui se trouve entre la *sclérotique* et le côté extérieur de la rétine. C'est une couche très irriguée qui amène tous les nutriments nécessaires aux différentes parties de l'œil : l'iris, les cônes et les bâtonnets, le ligament suspenseur, etc

- **Sclérotique (ou sclère) :**

C'est la membrane blanche extérieure de l'œil ayant une épaisseur de 1 à 2mm. Elle permet de maintenir la pression interne de l'œil et de le protéger contre des agressions « mécaniques ».



Optiquement et d'un point de vue simplifié, on peut donc schématiser l'œil :



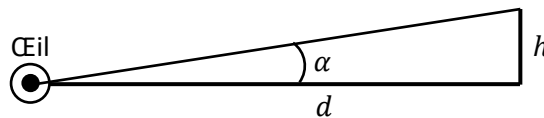
L'œil est donc formé de :

- un *diaphragme* (  $D$  ) correspondant à la *pupille*,
- deux *lentille convergente* ( ' et  $L$  ) correspondant à la *cornée* ( $L'$ ) et au *cristallin* ( $L$ )
- un *écran* (  $E$  ) correspondant à la *rétine*.

La distance  $d$  entre le cristallin et la rétine est constante et vaut environ 17mm.

## 2.2. POUVOIR SÉPARATEUR

Le pouvoir séparateur de l'œil est l'angle minimal qui permet de distinguer deux points. Lorsqu'on observe deux points éloignés, il est donc nécessaire que ceux-ci forment deux points distincts sur la rétine : donc deux cellules doivent être stimulées en étant séparée par une cellule non-stimulée.



Donc, la distance  $h$  doit correspondre à deux diamètres de cellules et la distance  $d$  à la distance focale de l'œil, soit environ 17mm en moyenne (œil *emmétrope*).

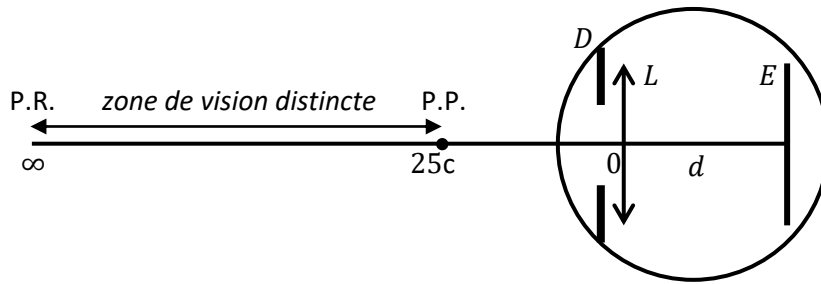
On peut alors écrire :

$$\tan(\alpha) = \frac{h}{d}$$

On trouve alors une valeur de  $1/60^\circ$ , soit  $0.167^\circ$ , soit  $3 \cdot 10^{-4}$ rad, valeur communément admise.

## 2.3. LES LIMITES DE LA VISION DISTINCTE

L'œil *normal* ou *sain* ou *emmétrope* peut voir distinctement des objets entre l'infini et une distance d'environ 25cm pour un adulte (env. 45ans); l'image doit toujours se former sur la partie sensible de la rétine. On simplifiera ici le schéma déjà vu en regroupant en une lentille  $L$  la cornée et le cristallin.



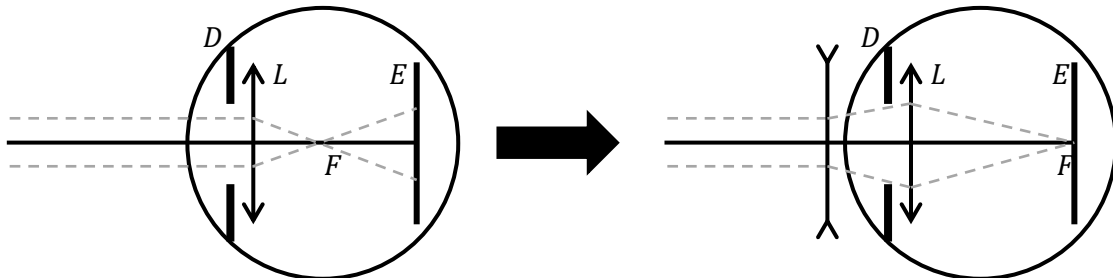
Le point le plus éloigné où l'on voit nette est à l'infini et s'appelle le *Punctum remotum*, alors que le point le plus proche où l'on voit net s'appelle le *Punctum proximum*. Au repos, l'œil emmétrope voit des objets nets situés à l'infini. L'image d'un objet à l'infini se forme sur la rétine. Pour voir des objets rapprochés, l'œil doit *accommoder*. C'est le muscle ciliaire qui permet cette accommodation. Comme tout muscle, l'accommodation se détériore avec l'âge :

<b>Âge (an)</b>	10	20	30	40	45	50	60	65	constant
<b>P.P. (cm)</b>	8	10	14	20	30	50	100	200	

C'est la presbytie : l'œil ne converge plus assez. On corrige cela avec une lentille convergente.

## 2.4. LA MYOPIE

L'œil myope au repos ne voit pas nettement les objets à l'infini; son foyer image  $F'$  se trouve en avant de la rétine. Il y a deux causes à ce défaut : soit le cristallin est trop convergent, soit l'œil est trop profond. Ce dernier est en général la principale cause.

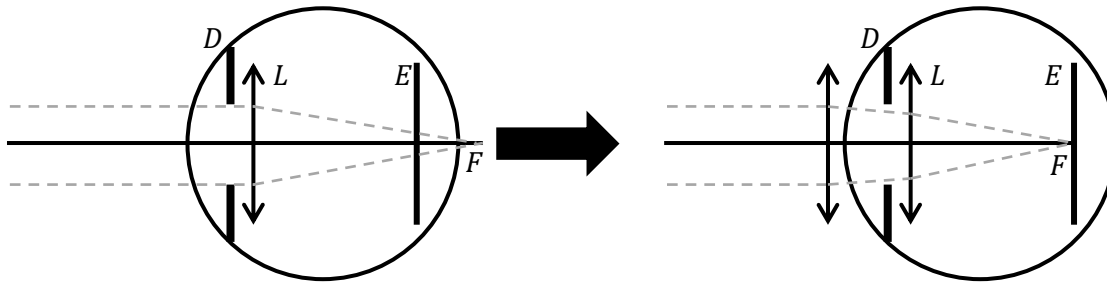


On le corrige avec des lentilles divergentes, qui auront pour effet de repousser l'image.

## 2.5. L'HYPERMÉTROPIE

L'œil hypermétrope au repos ne voit pas nettement les objets à l'infini; son foyer image  $F'$  se trouve en arrière de la rétine. Il y a deux causes à ce défaut : soit le cristallin n'est pas assez convergent, soit l'œil n'est pas assez profond. Ce dernier est en général la principale cause.





On le corrige avec des lentilles convergentes, qui auront comme effet de rapprocher l'image.

## 2.6. LA PERSISTANCE RÉTINIENNE

Un stylo bouge rapidement devant nos yeux. Il apparaît comme un éventail et on le voit surtout dans les positions extrêmes pour lesquels il ralentit. On regarde son téléphone la nuit et l'on voit des « taches » de blanches (ou de couleur) une fois la lumière éteinte. Ces deux « phénomènes », bien distincts dans leurs explications, sont communément appelés « persistance rétinienne ».

On distingue alors :

### 2.6.1. La persistance rétinienne positive

Elle dure peu de temps, environ 50ms. Elle s'explique par le fait que l'œil ne voit pas *en continu*, mais il voit environ 20 images (donc 20 photos !) par seconde. Si des images changent plus rapidement, l'œil ne verra théoriquement (c'est pas si simple en vrai !!!) pas le changement ! Dans le cinéma, à l'époque du film en pellicule, on avait d'ailleurs 24 ou 25 images par secondes ! Pourquoi 24 ou 25 ? Parce que c'est un peu plus que 20, donc on ne verra pas les images « arrêtées » et aussi (ou surtout) parce que le courant électrique était en 48 ou 50Hz, donc plus facile à réaliser ! D'ailleurs, au cinéma, pour éviter des sensations bizarres (du « scintillement »), on projette plusieurs fois la même image (typiquement 3x), pour « créer » artificiellement une dynamique, un changement (attention, pas un mouvement !). Mais ce n'est qu'une question de *sensation visuelle* !

### 2.6.2. La persistance rétinienne négative

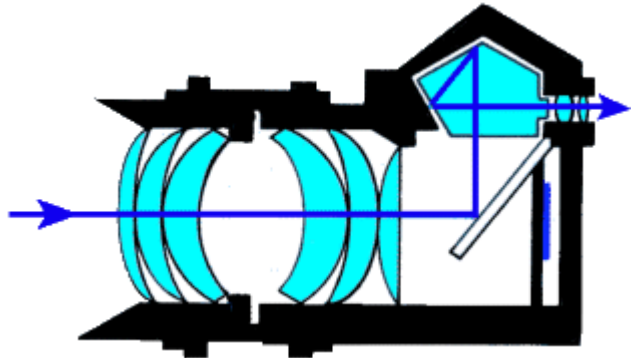
Elle dure plus de temps, typiquement quelques secondes. Elle est due à une exposition prolongée ou courte mais violente à une source de lumière (soleil, écran de téléphone, flash, etc). Les cellules de la rétine sensible à l'intensité de la lumière, appelées les *bâtonnets*, sont saturés en lumière. Un prétraitement de l'information visuelle se fait dans l'œil (pour économiser notre pauvre cerveau). Cette saturation est alors jugée anormale et un signal « diminué » est alors envoyé au cerveau. Une fois la stimulation terminée, le signal diminué est encore envoyé quelques secondes (le temps que le prétraitement s'arrête). Mais la stimulation de base n'est plus là ; il en résulte une impression de vision « inversée », ou « négative » (comme les négatifs sur des films argentiques, ou les clairs et les sombres étaient inversés par rapport à la réalité !)

## 2.7. L'ŒIL EST LA TECHNOLOGIE

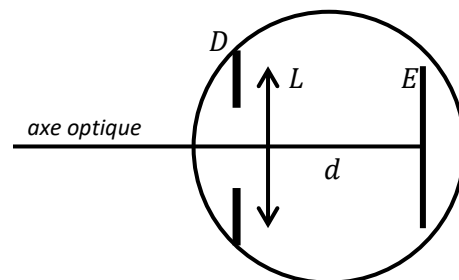
Au cours de l'histoire, l'homme a tenté d'imiter l'homme pour remplacer les aptitudes de l'être humain par des machines. On s'est donc basé sur le fonctionnement du corps humain pour imaginer ou pour « calibrer » les machines inventées.

### 2.7.1. L'Appareil Photographique Réflex

L'image ci-contre montre le schéma d'un appareil photo reflex : il y a le visueur où la lumière ressort, le pentaprisme qui redresse l'image, le verre dépoli où l'image se forme, le miroir qui envoie la lumière vers le viseur et cache le capteur (ou le film), l'objectif avec des jeux de lentilles qui permettent de zoomer et de corriger des défauts optiques.



On peut simplifier ce schéma pour retrouver le même que celui d'un œil :



L'appareil est alors formé de

- un *diaphragme (D)*,
- une *lentille convergente (L)* (de vergence variable) correspondant à l'*objectif*,
- un *écran (E)* correspondant au *capteur* (ou au film).

On voit donc qu'un appareil photo n'est qu'une copie de l'œil, avec des fonctionnements et des éléments parfaitement équivalents !

### 2.7.2. Les Écrans et le Pouvoir Séparateur de l'œil

On l'a vu, c'est le plus petit écart angulaire entre deux points objets que l'œil peut séparer.



On mesure la distance  $h$  entre un trait noir et un trait blanc. On effectue la mesure sur un grand nombre d'intervalles (100 lignes par exemple) puis on divise le résultat par ce nombre. On note la distance  $d$  à partir de laquelle la mire se fond en un gris uniforme.

À une distance de 3m, on pourra séparer deux traits s'ils sont distants d'au moins :

$$h = d \cdot \tan \alpha = 3000 \cdot \tan \left( \frac{1}{60} \right) \cong 0.87 \text{mm}$$

On peut dès lors définir la taille des écrans que nous allons utiliser. Les télévisions à *tube cathodique* avaient une résolution de 480 pixels par 360 pixels, ce qui donne une taille de téléviseur d'environ 42cm (pour le grand côté) ; avec un écran au format VGA (640 x 480 pixels), un écran de 56cm (toujours le grand côté) ; pour lire un DVD (720 x 576 pixels), un écran de 63cm ; pour un Blu-ray, donc du Full HD (1920 x 1080 pixels), un écran de 168cm ; pour du 8K (7680 x 4320 pixels), un écran de 670cm (6.7 mètres !). Il s'agit bien sûr de valeurs maximales pour être sûr de ne pas voir le pixel... à 3 mètres de distance ! C'est pourquoi les télévisions (et les pixels) sont en réalité bien plus petits.

### 2.7.3. Les Pixels et la Colorimétrie

La partie photosensible de l'œil est la rétine. Elle est composée de cellules photosensibles. Ces cellules sont de deux types : les *bâtonnets* et les *cônes*. Les premiers sont sensibles à l'intensité lumineuse alors que les seconds sont sensibles à certaines couleurs. Les bâtonnets sont plus sensibles que les cônes (ne dit-on pas que « la nuit tous les chats sont gris » ?). Les cônes sont donc sensibles à la couleur ; nous avons trois types de cônes : les rouges, les verts et les bleus.

A partir de là, nous avons créé des appareils qui fonctionnent « comme nous ». Les pixels d'un appareil photo numérique, d'un écran d'ordinateur, de téléphone ou de télévision sont TOUS rouge, vert et bleu. Les systèmes pour coder la couleur sont souvent le RVB (ou RGB en anglais), pour rouge-vert-bleu. D'autres systèmes, comme le  $L^*u^*v^*$  ou  $L^*a^*b^*$ , tentent de copier l'œil humain, puisque le « L » représente l'intensité lumineuse, donc le bâtonnet, alors que les deux autres termes déterminent la couleur. On en reparlera plus tard.

## 3. INSTRUMENTS D'OPTIQUE

On le sait déjà, la matière compte trois états : solide, liquide et gaz (on ne parlera pas ici d'un quatrième état appelé *plasma*). Dans certaines conditions, on peut changer la matière d'un état à un

Les définitions faites jusque-là nous permettent de décrire un peu plus précisément le fonctionnement de quelques instruments d'optique « usuels » ou, du moins, connus de tous.

Avant cela, une dernière définition est indispensable : le *grossissement*.

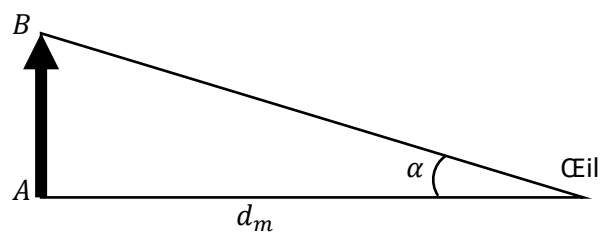
### 3.1. LE GROSSISSEMENT

Le grossissement  $G$  est défini par un rapport angulaire ; il ne doit pas être confondu avec le « grandissement » ! Il se calcule par le rapport entre l'angle  $\alpha'$  sous lequel on voit l'image « de sortie » de l'instrument considéré et l'angle  $\alpha$  sous lequel on voit ou verrait l'objet à la distance minimale de vision, soit  $d_m = 25\text{cm}$ .

$$G = \frac{\alpha'}{\alpha}$$

La définition du premier angle, l'angle  $\alpha'$ , dépend donc du système optique considéré.

Le second angle se définit aisément. Considérons un objet  $AB$ , le triangle rectangle ainsi formé avec l'œil permet de définir l'angle  $\alpha$ . Tout comme pour l'angle  $\alpha'$ , ces angles étant très petits, on peut considérer que l'angle (en radian) est égal à son *sinus* (ou sa *tangente*). Donc :



$$\alpha = \frac{AB}{d_m}$$

De manière pratique ou concrète, il est usuel de parler de « grossissement » lorsque la lentille donne une image virtuelle, alors qu'on parlera de « grandissement » lorsqu'elle donnera une image réelle.

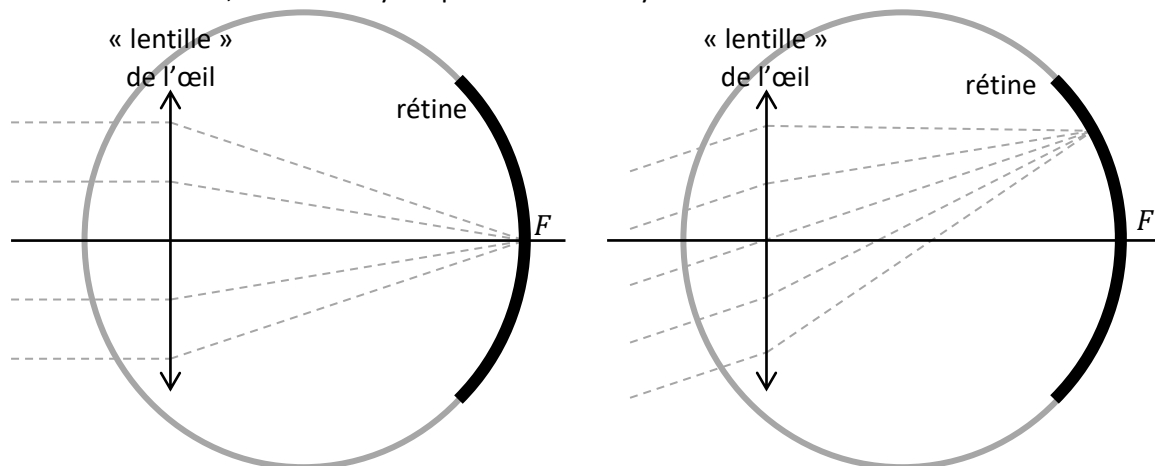
### 3.2. L'ŒIL

Commençons par celui grâce à qui nous pouvons voir dans les instruments d'optique : l'œil !

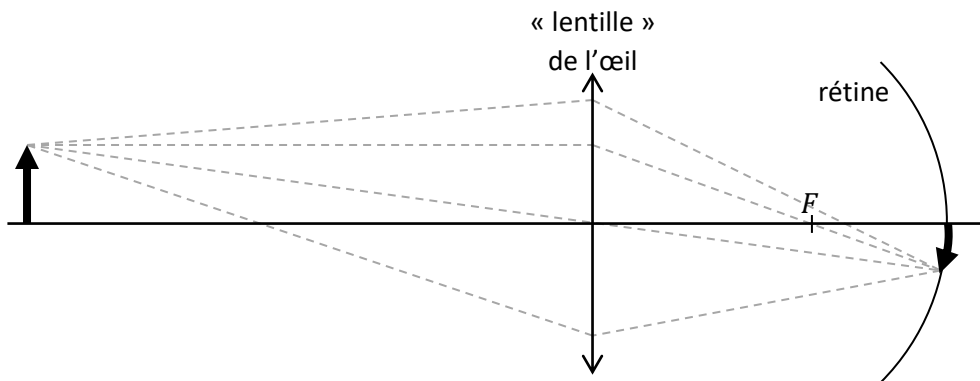
L'œil a pour but de récupérer des rayons, parallèles ou divergents issus d'une source ponctuelle et de les focaliser en un point bien précis sur la rétine.

Optiquement, on peut le voir comme une simple lentille convergente  $L$  (en fait, il y en a deux : la cornée qui fait le gros du travail et le cristallin qui permet d'accommoder, donc d'adapter la mise au point).

Ainsi, dans le cas de l'œil « au repos », la mise au point est faite de manière à voir nette des objets provenant de l'infini, donc des rayons parallèles. Les rayons se focalisent alors sur la rétine.



Dans le cas où on regarde quelque chose « de près », les rayons arrivent dans l'œil en divergeant, l'œil doit alors modifier sa distance focale pour que l'image se forme bien sur la rétine.



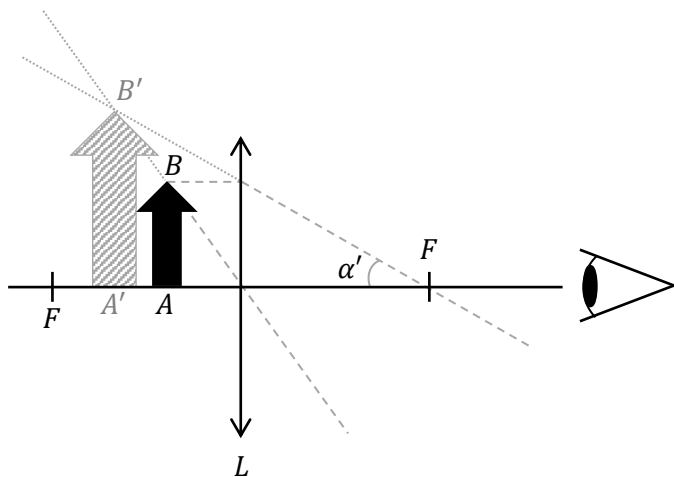
En résumé, lorsque l'on regarde quelque chose, notre œil « reçoit » des rayons qui sont soit parallèles, soit divergents.

### 3.3. LA LOUPE

L'instrument le plus simple et le plus connu de tous est bien sûr la loupe !

Optiquement, il s'agit d'une simple lentille convergente  $L$  (bien que certaines loupes puissent avoir 2 voire 3 lentilles). L'objet  $AB$  se place entre le foyer et la lentille, formant ainsi une image virtuelle  $A'B'$ . Le grossissement se calcule alors facilement, puisque :

$$\alpha' = \frac{AB}{f}$$



**Remarque :** Dans les schémas suivants, l'image virtuelle ne sera plus dessinée !

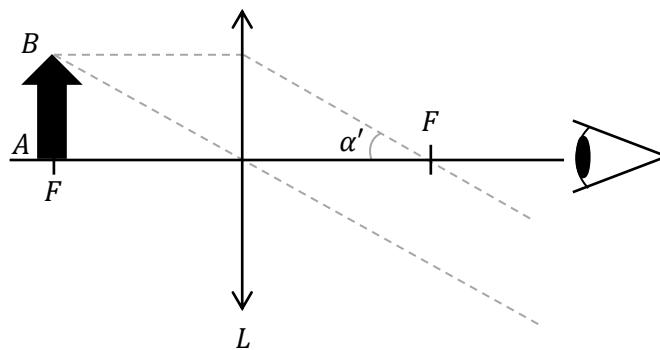
On trouve alors pour le grossissement :

$$G = \frac{\alpha'}{\alpha} = \frac{AB}{f} \cdot \frac{d_m}{AB} = \frac{d_m}{f}$$

Pour les opticiens, il est usuel de parler de *puissance* (ou de *vergence*), notée  $C$ , définie comme,  $C = \frac{1}{f}$  et mesurée en *dioptrie* (équivalente à  $\text{des m}^{-1}$ ). Commercialement, comme  $d_m = 25\text{cm} = \frac{1}{4}\text{m}$ , on indique facilement que le grossissement d'une loupe est :

$$G = \frac{d_m}{f} = \frac{1}{4f} = \frac{C}{4}$$

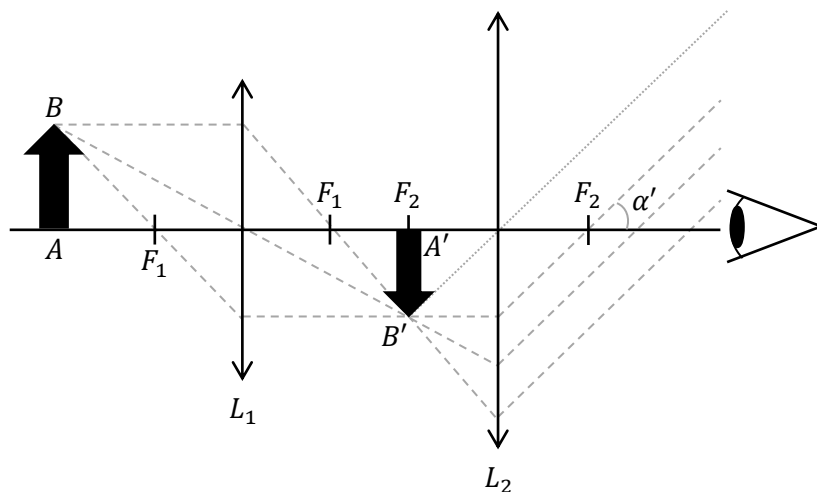
Pour regarder à travers une loupe, il est également possible de placer l'objet sur le foyer. Les rayons en ressortent alors tous parallèles et l'image virtuelle se trouverait alors « à l'infini ».



Il n'y a alors aucune différence par rapport au calcul précédent du grossissement, qui peut atteindre typiquement une valeur de 25 fois. Cela change juste « l'usage » de la loupe ; doit-on ou non accommoder pour voir l'image nette à travers !

### 3.4. LE MICROSCOPE

Le fonctionnement d'un microscope est au final assez simple. On dispose d'une première lentille convergente  $L_1$  de manière à obtenir une image réelle  $A'B'$  de l'objet  $AB$  étudié. Cette lentille est appelée « objectif ».



On dispose ensuite une seconde lentille convergente  $L_2$ , de manière à ce que son foyer  $F_2$  se trouve à l'endroit où se trouve l'image  $A'B'$  de l'objectif, qui devient objet pour cette deuxième lentille. Les rayons ressortent alors tous parallèlement, formant un angle  $\alpha'$  avec l'axe optique. Cette deuxième lentille est appelée « oculaire ».

On a bien sûr des distances focales associées aux lentilles :  $f_1$  pour  $L_1$  et  $f_2$  pour  $L_2$ . On définit encore l'« intervalle optique »  $\Delta$  comme la distance entre les foyers  $F_1$  et  $F_2$  se trouvant entre les lentilles. Pour un microscope, l'intervalle optique vaut typiquement  $\Delta = 170\text{mm}$  (valeur qui dépend du constructeur). Le grossissement d'un tel dispositif peut alors être facilement calculé. En effet,  $\alpha$  étant défini, il nous reste à déterminer  $\alpha'$ . Dans ce cas, on peut voir que :

$$\alpha' = \frac{A'B'}{f_2}$$

Le grossissement se calcule alors :

$$G = \frac{\alpha'}{\alpha} = \frac{A'B'}{f_2} \cdot \frac{d_m}{AB} = \gamma \cdot \frac{d_m}{f_2} = \gamma \cdot G_2$$

où  $\gamma = \left| \frac{A'B'}{AB} \right|$  est le *grandissement* de la lentille  $L_1$ . Les *valeurs absolues* sont là pour éviter ici de parler du signe du grandissement, bien que l'image soit inversée.

Comme l'image  $A'B'$  arrive sur le foyer de l'oculaire, l'image qui se formera ensuite sera une image virtuelle, qui se forme à l'infini. Tous les rayons ressortent parallèlement, formant un angle  $\alpha'$  avec l'axe optique. Ces rayons ne pourront pas être projetés sur un écran (image virtuelle !). Mais après avoir traversé les « lentilles » de l'œil (*cornée* et *cristallin*), ils pourront alors former une image au fond de l'œil (sur la *rétine*).

En termes de grossissement, on observe déjà que, plus  $f_2$  est petite, plus le grossissement sera grand. Ce résultat peut paraître illogique ou contre-intuitif si on pense à l'objectif d'un appareil photo par exemple. Mais en y réfléchissant un peu plus, sur le schéma ci-dessus par exemple, ce résultat est parfaitement logique. En effet, plus la distance focale  $f_2$  est petite, plus l'angle  $\alpha_2'$ , et donc l'image, devient grand, et réciproquement. Essayez (mentalement) de changer la distance focale  $f_2$  et d'imaginer comment les rayons seront déviés !

Pour aller plus loin, maintenant que l'on connaît le grossissement de notre microscope, quelle serait la limite de visibilité ? Quelle est la limite de détails visibles ? Il y a bien sûr la qualité optique des lentilles et les effets de la diffraction, mais ces points sont beaucoup plus difficiles à évaluer et ne seront pas discutés ici. Par contre, l'œil a une limite de résolution. Il n'est capable de discerner deux points que si l'angle formé entre ces points et l'œil est d'au moins une minute d'arc, soit  $1/60^\circ$ , soit  $3 \cdot 10^{-4}$  rad. Comme on a vu que  $\alpha' = \frac{A'B'}{f_2}$  et  $f_2 = \frac{d_m}{G_2}$ , donc il est facile de déterminer :

$$A'B' = \alpha' \cdot f_2 = \alpha' \cdot \frac{d_m}{G_2}$$

Mais quelle taille cela représente-t-il en vrai ? Car au final, c'est cela qui intéresse l'observateur ! Cette dernière question est certainement la plus simple de toute. En effet, le grandissement de l'objectif nous donne directement la réponse, puisque  $\gamma = \frac{A'B'}{AB}$ , on trouve :

$$AB = \frac{A'B'}{\gamma} = \alpha' \cdot \frac{d_m}{\gamma \cdot G_2} = \alpha' \cdot \frac{d_m}{G}$$

puisque  $d_m = 25\text{cm} = 0.25\text{m}$  (valeur usuellement admise). Le résultat est alors donné en mètre !

### Exemple :

On peut déjà se demander où placer l'objet, autrement dit, déterminer «  $p_1$  ». Le grandissement de la lentille nous permet de répondre à la question. En effet, on sait que  $\gamma = \left| \frac{A'B'}{AB} \right| = \left| \frac{p_1'}{p_1} \right|$ . Donc :

$$p_1 = \frac{p_1'}{\gamma} = \frac{f_1 + \Delta}{\gamma} = \frac{4 + 170}{40} = 4.35\text{mm}$$

Ce résultat est en fait indépendant de l'objet ou de son image ; le rapport étant fixe. Autrement dit, quelle que soit la taille de l'échantillon observé, il faudra le placer à la même position (donc distance) du microscope.

On considère un microscope composé d'un objectif « 40x » de 4mm de distance focale ( $f_1$ ). La valeur de « 40x » est généralement utilisée abusivement pour confondre le grossissement et le grandissement. L'oculaire utilisé est lui un « 10x » ; ici le terme est correct. En effet, l'oculaire produisant une image virtuelle, il s'agit bien d'un grossissement !

On trouve donc que :

$$G = \gamma \cdot G_2 = 40 \cdot 10 = 400$$

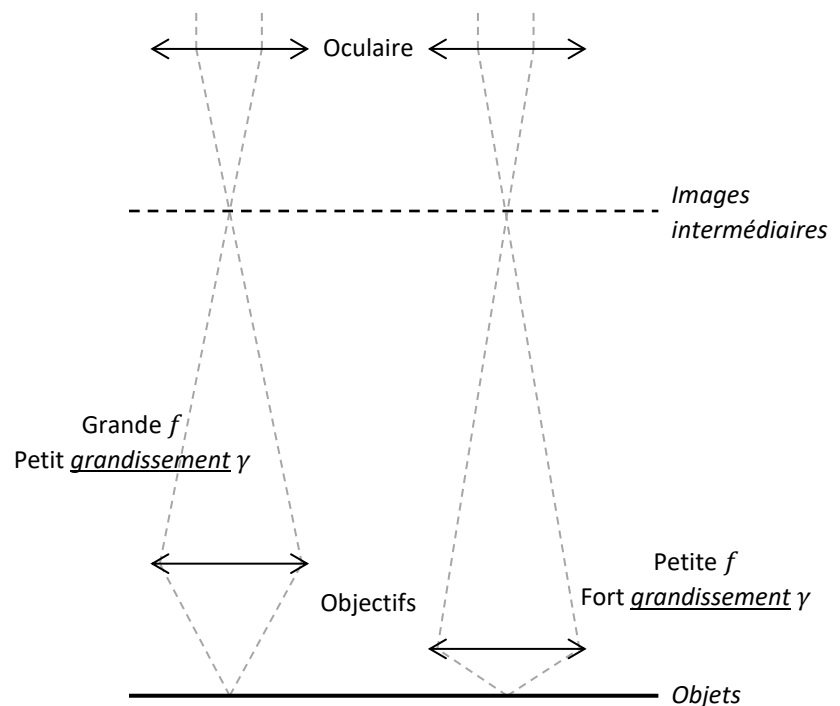
En termes de limite de visibilité, on sait donc que  $A'B' = \frac{\alpha'}{4G_2} = \frac{3 \cdot 10^{-4}}{4 \cdot 10} = 7.5 \mu\text{m}$ . L'œil ne verra des détails que si leur taille sur l'image intermédiaire observée dépasse cette valeur. Cette valeur sera toujours vraie sur un microscope équipé d'un oculaire 10x !

En vrai, la taille représente donc :

$$AB = \frac{A'B'}{\gamma} = \frac{7.5 \mu\text{m}}{40} = 187.5 \text{nm}$$

Ainsi, si on voulait percevoir des détails deux fois plus petits, donc distinguer des détails de moitié plus petit, donc d'environ 94nm, il faudrait soit remplacer l'objectif par un 80x (qui aurait alors une distance focale plus courte !), soit remplacer l'oculaire par un 20x (qui aurait aussi une distance focale plus courte !), en prenant soin à ce que le foyer de l'oculaire se trouve toujours sur l'image de l'objectif !

En général, on change les objectifs, qui sont conçus pour obtenir une image au même endroit, comme on peut le voir sur la figure ci-contre.





En réalité, la résolution est limitée par la diffraction. Sans entrer dans les détails de ce phénomène, la diffraction peut s'estimer par la relation (valable pour les petits angles) :

$$\theta \cong 1.22 \frac{\lambda}{d}$$

où  $\lambda$  est la longueur d'onde,  $d$  le diamètre de l'objectif et  $\theta$  l'angle de déviation des rayons.

Il est alors facile de montrer que cet angle vaut aussi :

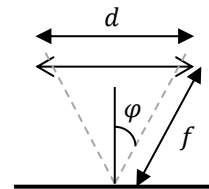
$$\theta = \frac{\rho}{f}$$

où  $\rho$  est la taille de la tache de diffraction (*tache d'Airy*) et  $f$  la distance focale du système. On peut dès lors déterminer la taille de la tache qui représente la limite de résolution du système. Comme

$$\theta = \frac{1.22 \cdot \lambda}{d} = \frac{\rho}{f}$$

On peut alors écrire :

$$\rho = \frac{1.22 \cdot \lambda \cdot f}{d} = \frac{1.22 \cdot \lambda}{2 \cdot \sin(\varphi)}$$



L'angle «  $\varphi$  » est représenté sur la figure ci-contre, symbolisant l'objectif du microscope. Son sinus est défini comme étant l'« *ouverture numérique* » notée  $NA$  (pour « *numerical aperture* » en anglais), donc  $NA = \sin(\varphi) = \frac{d}{2f}$ . Ce terme est spécifié sur tout microscope et vaut typiquement une valeur entre 0.3 et 1.2 (des valeurs supérieures à 1 ne sont possibles que si l'échantillon est immergé dans un milieu d'indice de réfraction supérieur à 1, la définition correcte l'ouverture numérique étant  $NA = n \cdot \sin(\varphi)$  où  $n$  est l'indice de réfraction). On obtient alors comme limite de résolution :

$$\rho = \frac{1.22 \cdot \lambda}{2 \cdot NA}$$

Ainsi, pour un microscope où  $NA = 0.6$  (ce qui équivaut à  $\varphi \cong 37^\circ$ ), on obtient que  $\rho \cong \lambda \approx 550\text{nm}$  environ pour de la lumière visible. On comprend alors aussi pourquoi certains microscopes utilisent des lampes ultraviolettes pour observer ; la longueur d'onde est nettement diminuée (typiquement  $\lambda \approx 250\text{nm}$ ) et la limite de résolution l'est donc aussi (cette couleur est par contre invisible à l'œil et nécessite donc une caméra spéciale).

Le grandissement et l'ouverture numérique sont bien sûr reliés. En effet, plus le grandissement est grand, plus la focale est petite, plus l'angle est grand et donc plus l'ouverture numérique est grande.

En termes de grandissement, cette limite correspond à un grandissement maximal d'environ 150 fois. Certains microscopes proposent malgré tout plus, jusqu'à typiquement 1200 fois. La raison en est simple : cela permet à l'œil de ne pas travailler à sa limite de perception, ce qui serait très fatigant pour la personne qui passe la journée les yeux sur son microscope. On préfère alors agrandir plus l'image, quitte à la détériorer un peu, pour permettre à l'œil de ne moins se fatiguer.

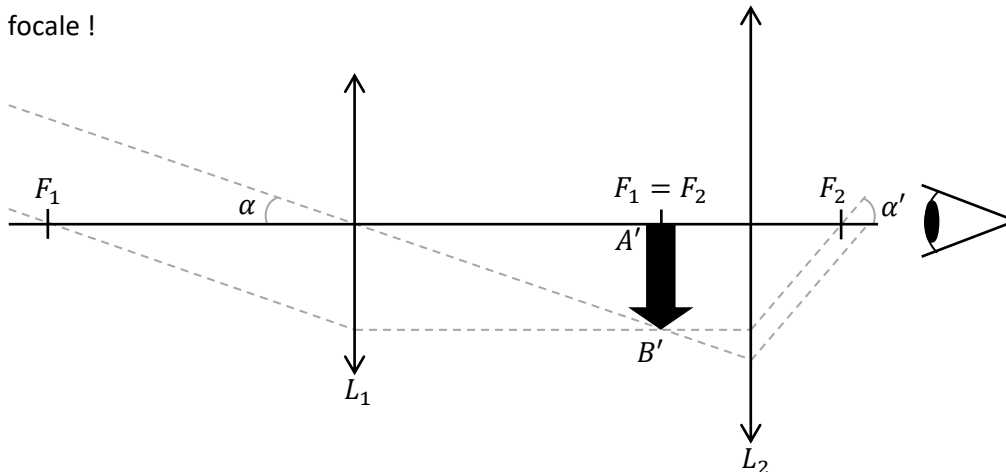
Mais pour observer « ponctuellement » des détails vraiment petits, il est alors préférable de diminuer le grandissement pour gagner en qualité !

Pour conclure, sur un objectif de microscope, on peut trouver diverses informations. Par exemple :

1. « 25x » : désigne le *grandissement*
2. « 0.6 » : désigne l'*ouverture numérique*
3. « 170 » : désigne l'*intervalle optique*  $\Delta$  (en mm)
4. «  $\infty$  » : désigne le fait que l'objectif focalise à l'infini ( $\Delta = \infty$ )  
une lentille focalise alors les rayons à l'intérieur du microscope
5. « - » ou « 0.17 » : désigne le fait d'utiliser ou non une lame pour couvrir l'échantillon (s'il y a une valeur, il s'agit de l'épaisseur donnée en mm)

### 3.5. LA LUNETTE ASTRONOMIQUE

Le fonctionnement d'une lunette ressemble passablement à celui du microscope. Aux (grandes) différences près que : les objets observés sont très éloignés et l'objectif a maintenant une longue distance focale !



Ainsi, les rayons arrivant sur la première lentille, toujours appelée l'objectif, arrivent parallèlement. Ils vont ainsi « transformer » des rayons provenant de l'infini qui sont donc parallèles en rayons partant à l'infini qui seront donc aussi parallèles. Ce genre de dispositif est un système dit « *afocal* ».

Ainsi, comme avant, l'image de l'objectif  $A'B'$  est réelle et devient objet de l'oculaire. La longueur de l'instrument, la lunette donc, est simplement la somme des deux distances focales, soit  $f_1 + f_2$ .

Le grossissement est alors défini comme avant, par un rapport d'angles. La différence est que l'angle  $\alpha$  n'est pas relié à l'œil cette fois, mais simplement l'angle d'incidence des rayons qui arrivent. Donc :

$$\alpha = \frac{A'B'}{f_1} \quad ; \quad \alpha' = \frac{A'B'}{f_2}$$

On calcule alors beaucoup plus facilement le grossissement, qui est alors un simple rapport de distances focales :

$$G = \frac{f_1}{f_2}$$

On voit, encore une fois, que plus la focale de l'objectif est grande, plus le grossissement l'est ; et que plus la focale de l'oculaire est faible, plus le grossissement est élevé ! De plus, l'image est ici toujours inversée !

### Exemple :

Une lunette astronomique est définie par ses deux distances focales :  $f_1 = 500\text{cm}$  et  $f_2 = 5\text{cm}$ .

De quelle taille est la lunette ? La réponse est simple, puisque sa longueur est celle de la focale principale plus l'oculaire, quasiment négligeable. Donc  $L = 505\text{cm}$ .

Quel sera alors le grossissement ? Là aussi, la réponse est très simple :  $G = \frac{f_1}{f_2} = \frac{500}{5} = 100$ .

Imaginons que l'on observe la Lune avec cette lunette. La lune se trouve à 384'000km de la Terre et a un diamètre de 3480km. Quelle taille de détail serait-on capable de distinguer sur la Lune ?

Le diamètre apparent avec lequel la Lune est perçue depuis la Terre est :

$$\alpha = \frac{AB}{d_{T-L}} = 9 \cdot 10^{-3}, \text{ soit } 30 \text{ fois la limite de vision de l'œil } (3 \cdot 10^{-4} \text{ rad}).$$

Le diamètre apparent vu à travers la lunette est de 0.9, soit 3000 fois la limite de vision de l'œil.

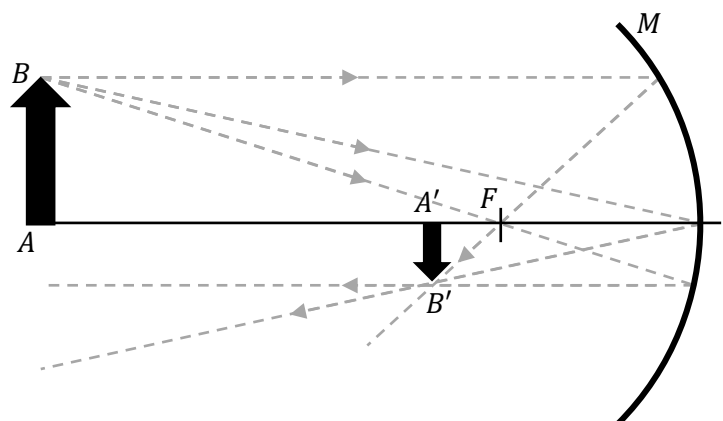
Le plus petit détail visible à travers la lunette a donc un diamètre de  $3 \cdot 10^{-6}$ . Ce diamètre apparent correspond donc à une distance « réelle » (sur la Lune) de  $3 \cdot 10^{-6} \cdot 384'000 = 1.15\text{km}$ .

Cet instrument a (ou avait) le défaut d'être encombrant si on les veut avec un grand pouvoir de grossissement. Heureusement, d'autres « techniques » optiques ont permis d'aussi bons résultats en réduisant la taille de l'instrument. Sinon, une lunette de 5000mm de focale devrait mesurer 5m...

Ce progrès a été rendu possible grâce à l'« invention » du *miroir* !

### 3.6. LE TÉLESCOPE DE NEWTON

Le principe de fonctionnement reste, au final, très semblable aux deux autres instruments. La seule vraie différence est la première lentille qui est remplacée par un miroir concave (idéalement parabolique, mais plus cher à usiner), qui aura exactement le même effet. Mais ce dernier permet de réduire d'un facteur environ deux la taille de l'instrument. Le rayon de courbure du miroir est de deux fois la focale.



Ces derniers se comportent alors exactement comme des lentilles : un rayon qui arrive parallèlement à l'axe optique est réfléchi sur le foyer du miroir et un rayon qui arrive *via* le foyer est réfléchi parallèlement à l'axe optique. Un rayon qui arrive par le centre est réfléchi avec le même angle.

Pour son utilisation, on place un second miroir, plan celui-là, là où les rayons convergent afin de dévier la lumière vers un oculaire. Le miroir  $M_2$  n'a donc aucun autre rôle que de dévier la lumière. Ainsi, les deux miroirs joueront le même rôle que la lentille d'un objectif. On peut donc « schématiser » une lunette et un télescope de Newton (quasiment) de la même manière.

Le grossissement se calcule donc de la même manière que pour la lunette, à la différence que l'objectif devient maintenant le miroir :

$$G = \frac{f_1}{f_2}$$

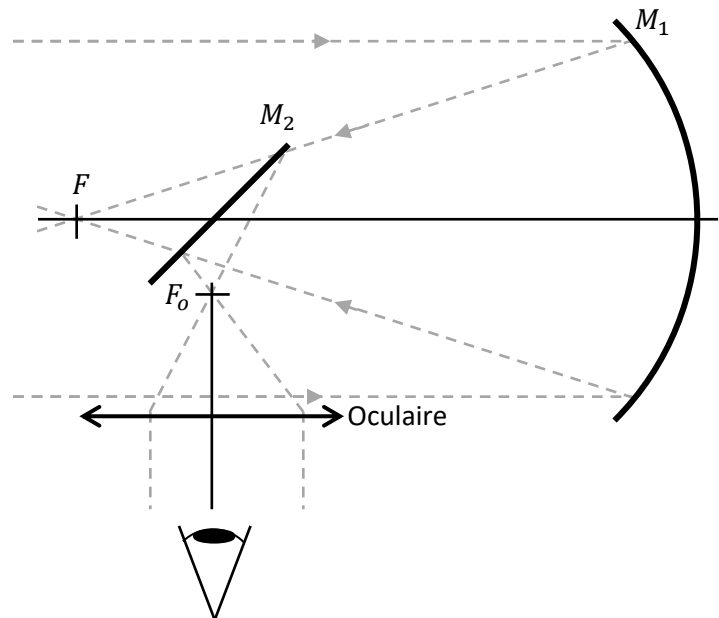
où  $f_1$  est la focale du miroir  $M_1$  et  $f_2$  la focale de l'oculaire.

**Exemple :**

Prenons un miroir de 50cm de focale et un oculaire ayant un grossissement de 10x. L'oculaire a donc une focale de 2.5cm ( $f_2 = \frac{d_m}{G_2}$ ). Le grossissement du télescope se calcule alors par le rapport des focales, comme dans le cas de la lunette. Donc :

$$G = \frac{f_1}{f_2} = 20$$

Il est bien sûr dès lors possible d'effectuer les calculs équivalents à ceux effectués pour la lunette, en termes de tailles apparentes.

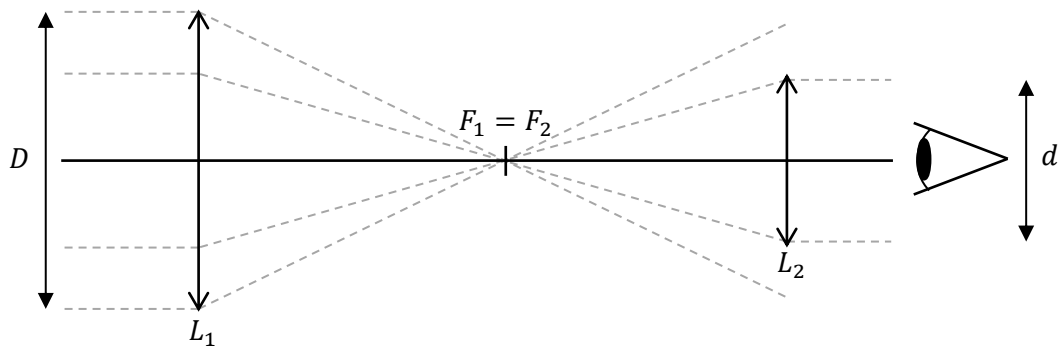


**Remarque :**

Il est habituel de caractériser les oculaires de *microscopes* par leur *grossissement* et ceux de *télescope* par leur *distance focale* !

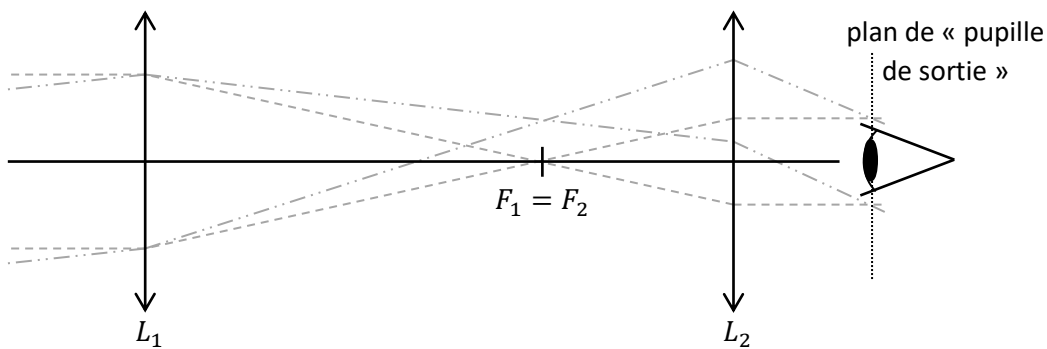
**3.7. LA PUPILLE**

Un instrument optique, tel que ceux présentés dans les paragraphes précédents, ne se caractérisent pas uniquement par leur grossissement ou leur focale.



Un autre aspect important est la surface que les rayons sortants traversent. Si cette surface est plus grande que la pupille de l'œil, cela signifie qu'une partie de la lumière sera « inutile ». Cela veut dire que les lentilles sont excessivement grandes, donc chères et lourdes, mais cela n'a aucune importance optique.

Il faut donc placer l'œil sur le plan « *pupille de sortie* » pour que tous les rayons convergent au même endroit ; sinon, un effet « trou de serrure » risque de se produire. La distance de ce plan est typiquement de 15mm, bien qu'il en existe des plus élevées pour les personnes porteuses de lunettes.



On l'a vu, le grossissement d'un tel système se détermine par  $G = \frac{f_1}{f_2}$ . Mais on a aussi vu que la taille de la pupille est  $d = \frac{D}{G}$ .

Autrement dit, on peut écrire que :

$$G = \frac{f_1}{f_2} = \frac{D}{d}$$

Comme la valeur de la pupille est limitée par la taille de la pupille de l'œil, il est inutile d'obtenir une valeur  $d$  trop importante. Ainsi, les valeurs usuellement admises sont une pupille oculaire de 3mm en plein jour et de 6mm en faible lumière.

Ainsi, lorsqu'on achète une paire de jumelles ou une lunette d'observation, on a typiquement des valeurs du style « 12 x 36 ». Ces chiffres signifient que le grossissement ( $G$  !) est de 12 fois et que le diamètre de l'objectif ( $D$  !) est de 36mm.

Il faut alors garder en tête ce rapport :

$$d = \frac{D}{G}$$

Dans ce cas,  $d$  vaut 3mm, ce qui est parfaitement raisonnable pour un œil en vision diurne.

D'autres sont annoncées à « 8 x 42 », ce qui donne un diamètre de pupille de 5.25mm, ce qui est beaucoup trop si on veut utiliser ces jumelles pour une utilisation diurne. Les grandes lentilles coûtent chers et sont lourdes, donc on payerait et porterait une lentille qui ne nous sert à rien !

La pupille est donc également un facteur important pour l'utilisation d'un instrument optique.

## 4. OPTIQUE APPLIQUÉE À LA PHOTOGRAPHIE

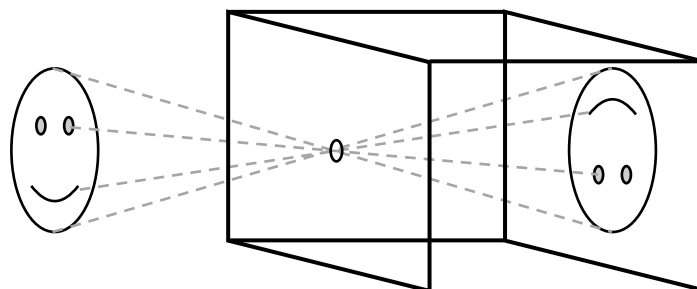
Pour bien comprendre les possibilités, les choix et les contraintes lorsque l'on pratique la photographie, une bonne compréhension des phénomènes qui créent ces contraintes et ces choix est indispensable ! Ce chapitre va donc (re)présenter les bases théoriques de l'optique appliquée à la photographie, en reprenant des notions présentées précédemment et en les développant un peu, ou en abordant de nouvelles notions permettant une compréhension « physique » de la photographie.

### 4.1. UN PEU D'HISTOIRE...

Avant de rentrer dans le vif du sujet, une brève présentation historique des éléments est intéressante. Voici donc un très succinct exposé de l'évolution de la photographie.

#### 4.1.1. La Chambre Noire (*Camera Obscura*) et le Sténopé

La chambre noire se constitue d'une boîte fermée, étanche à la lumière, dont une des faces est percée d'un tout petit trou, que l'on appelle le *sténopé*. La lumière pénètre dans la boîte par ce trou, et une image inversée de l'objet se forme sur la paroi opposée.



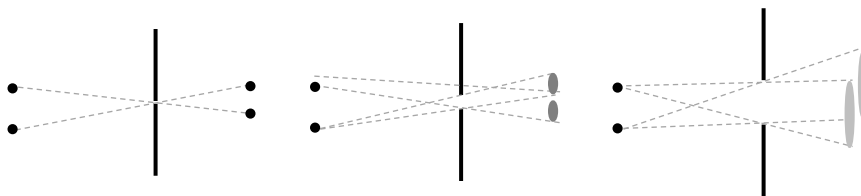
Comme Aristote et Léonard de Vinci connaissaient déjà la chambre noire, on peut la considérer comme l'ancêtre des appareils photographiques. Le physicien italien *Giambattista della Porta* (1535 - 1615) a été accusé de sorcellerie, en voulant divertir ses invités avec une «*camera obscura*», chambre noire en latin, où l'on voyait des personnages se déplacer la tête en bas. En effet, comme en optique

géométrique, l'image est inversée ; il projetait alors dans une pièce qui donnait sur la rue la projection des passants contre un mur.

Ce principe avait beau être compris, il ne permettait pas de figer, d'enregistrer, l'image obtenue. Au XVI<sup>e</sup> siècle, des systèmes portatifs ont été développés afin de pouvoir dessiner l'image obtenue ; ce dispositif était utilisé notamment pour des travaux topographiques. Un peu après, le cardinal viennois *Daniele Barbaro* (1514 - 1570) ajoute déjà des lentilles au système. Le *Père Scheiner* (1575 - 1650), astronome bavarois, ajoute même un diaphragme et un miroir à 45° – ce qui en fait le premier reflex de l'histoire – pour observer et dessiner les taches solaires. Mais il a fallu attendre le XIX<sup>e</sup> siècle pour arriver à le faire et obtenir ainsi le premier appareil photographique.

Pour revenir au sténopé, il faut bien comprendre que le trou doit également être extrêmement petit ; si tel n'est pas le cas, l'image sera floue, voir tellement flou qu'elle sera invisible !

Le schéma ci-dessous va tenter d'expliquer ce problème.



La figure de gauche représente les images de deux points à travers un sténopé de trou très petit, on voit que les rayons ne peuvent suivre « qu'un seul » chemin et l'image produite est nette. La figure du centre illustre ce qui se passe si on ouvre légèrement l'ouverture, les rayons peuvent alors suivre différents chemins et l'image formée est floue, bien qu'on distingue toujours les points d'origines. La figure de droite illustre le cas où le trou est vraiment grand, les images sont « tellement floues » qu'elles se mélangent, on n'est incapable de distinguer les points de départ (les taches grises à droite sont décalées pour la lisibilité de la figure, mais elles se superposent en réalité). Ce dernier cas est ce qui se passe lorsque vous regardez à travers une fenêtre par exemple, on ne voit pas contre le mur à l'intérieur de la maison la projection de soi-même ou du jardin qui se trouve derrière ; et heureusement !

Un sténopé est donc facile à fabriquer : il suffit de prendre une boîte, de noircir son intérieur, de faire un tout petit trou sur un côté de la boîte (typiquement 0.2 à 0.3 millimètre), de placer à l'intérieur de la boîte un papier photosensible (du papier pour l'agrandissement de tirages argentiques) et de laisser la boîte une dizaine de minutes en plein soleil. Pour tenter l'expérience, il faut bien sûr après pouvoir figer l'image sur le papier, ce qui nécessite d'utiliser des produits chimiques appropriés.

#### 4.1.2. Le Procédé Argentique et la Première Photographie

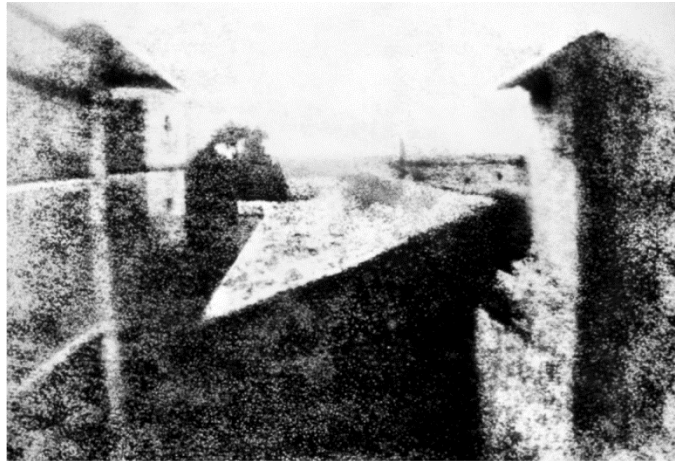
Le *chlorure d'argent* a deux propriétés essentielles : il est peu soluble dans l'eau et il se noircit lorsqu'il est soumis à de la lumière. On dit alors qu'il est *photosensible*. Ces propriétés étaient connues depuis la Moyen Âge. Mais l'application de ces propriétés mélangées à la chambre noire a tardé à venir ; elle a donné le premier appareil photo : la photographie *argentique* est née.

Au début du XIX<sup>e</sup> siècle, l'ingénieur français *Joseph Nicéphore Niépce* (1765 - 1833) réussit à obtenir et conserver une image créée par « l'action » de la lumière. Dès 1812, il parvint à obtenir en

lithographie des négatifs, grâce au chlorure d'argent, et des positifs, avec du bitume de Judée. Malheureusement, ces images ne sont pas encore stables : le sel d'argent utilisé et placé au fond de la chambre noire continue de noircir après l'exposition.

En 1819, l'astronome britannique *John Herschel* (1792 - 1871) décrit les propriétés de l'hyposulfite de sodium ( $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$ ) qui deviendra le *fixateur de Mijus*, et permettra donc de stabiliser l'image et de stopper le noircissement après l'exposition voulu du sel d'argent.

Niépce se rend compte que l'important est d'interrompre l'action du produit après une période d'exposition à la lumière. Il s'intéresse alors à différents acides qui agiraient sur une plaque avant d'être lavés. Mais l'acide ne réagit pas à la lumière. Le grand pas a été de comprendre que l'action de la lumière n'a pas besoin d'être visible immédiatement. L'idée d'un « *révélateur* » était née. Il tente d'utiliser la *résine de Gaïac*, sensible à la lumière ultra-violette et qui perd sa solubilité dans l'alcool, ce qui permet d'interrompre le procédé. L'opération est un échec en chambre noire car les ultraviolets, inconnus de Niépce, sont filtrés.



En 1822, il utilise l'asphalte, qui perd sa solubilité sous l'action du soleil. Une plaque de métal enduite de bitume est exposée plusieurs heures, avant d'être rincée au solvant puis rongée par l'acide aux endroits où le bitume est dissous. Le résultat est concluant et permet en particulier de créer des supports métalliques pour l'imprimerie. Niépce constate néanmoins que les dégradés ne sont pas satisfaisants. Des hachures peuvent rendre ce dégradé en imprimerie mais limite la source de l'image à des gravures.

Entre la fixation du négatif et la première photographie stable, de nombreux essais ont été nécessaires. La vue de sa propriété de Saint-Loup-de-Varennes en 1826 est majoritairement reconnue comme la première photographie en raison de sa stabilité. Il s'agit aussi de la première image connue prise avec une chambre noire utilisée comme appareil photographique. Niépce plaça une plaque d'étain recouverte de bitume dans une chambre noire, face à une fenêtre de sa propriété et l'exposa pendant huit heures.

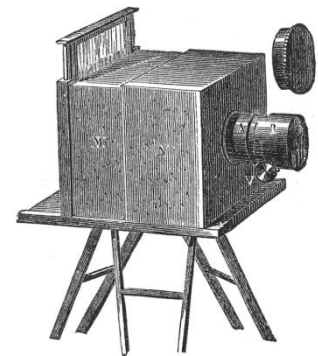
Les dégradés et la précision que Niépce souhaite ne sont réellement satisfaisants qu'en 1828, lorsqu'il utilise une plaque d'argent et de la vapeur d'iode. Le résultat est enfin à la hauteur de ses espérances, bien que le temps de l'exposition est toujours très élevé.



### 4.1.3. Le Daguerriotype

Pour affiner sa méthode, Niépce s'associe en 1829 au peintre nommé *Louis Jacques Mandé Daguerre* (1787 - 1851). À partir de 1829, Daguerre a commencé véritablement ses travaux en chimie en utilisant l'iode. Daguerre a accompli des progrès importants dans les années qui ont suivi la mort de Niépce. Les vapeurs d'iode sont utilisées comme agent sensibilisateur sur une plaque de cuivre recouverte d'une couche d'argent polie. La réaction entre l'iode et l'argent produit de l'iodure d'argent, une substance qui s'est révélée être plus sensible à la lumière que le bitume. Par hasard, il a découvert que si une plaque qui avait été exposée était traitée aux vapeurs de mercure, l'image latente apparaissait nettement. À partir de ce moment-là, le temps de pose se réduit considérablement.

Plus tard, Daguerre se rend compte qu'en trempant la plaque dans une solution saline, il pouvait empêcher l'image de noircir avec le temps. Toutefois, ces images ne pouvaient être produites qu'en un seul exemplaire à la fois, de qualité aléatoire et elles nécessitaient des temps d'exposition de plusieurs dizaines de minutes, ce qui rendait très difficile la réalisation de portraits. Malgré tout, en 1839, il commercialise le daguerriotype, invention qui recevra un accueil des plus enthousiastes de la part du public.



### 4.1.4. Le Premier Appareil Photo Numérique

En 1975, *Kodak* développe le premier appareil photo numérique. Son optique était celle d'une caméra *Super8*, l'enregistrement de l'image prise sur un capteur CCD (inventé en 1969) se faisait sur une cassette et il était alimenté par 16 batteries. L'image était composée de 100 lignes, l'image avec donc 10'000 pixels. L'enregistrement de l'image sur la cassette prenait plus de 20 secondes, la capture de l'image ayant duré 50ms.



Cet appareil n'a été dévoilé au public qu'en ... 2001 ! Pourtant, un brevet a été déposé. Mais à l'époque, cette invention a été reçue avec beaucoup de scepticisme, les gens ne voyant pas l'intérêt de voir une photo sur un écran de télévision... Pourtant, dans le rapport technique des ingénieurs de l'époque, il est écrit :

« L'appareil photo décrit dans ce rapport représente la première tentative de montrer un système photographique qui pourrait, avec des améliorations de la technologie, substantiellement changer la façon dont les images seront prises dans le futur. »

Maintenant que l'appareil photo numérique existe, reprenons l'optique appliquée à la photo !

## 4.2. LA DISTANCE FOCALE

La compréhension de la distance focale nécessite les notions les bases d'optique géométrique vues avant. Sa définition et sa compréhension permettent d'expliquer tous les problèmes (ou presque) qu'un objectif peut rencontrer dans son utilisation.

### 4.2.1. Approximation de la Lentille Mince

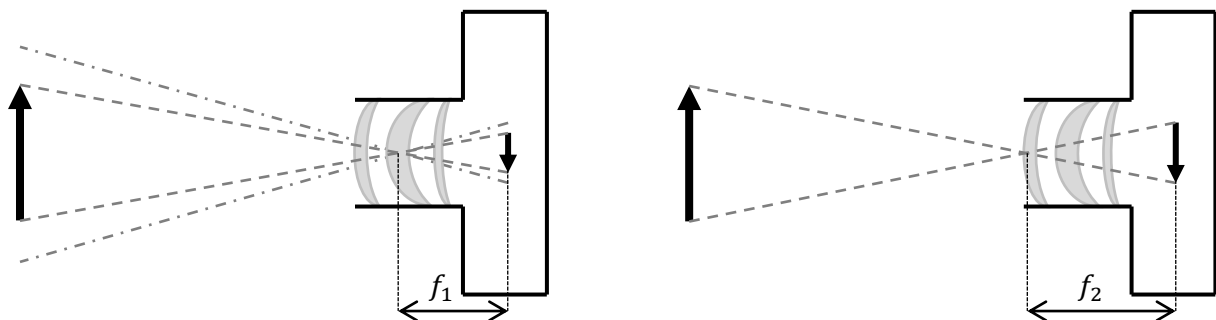
Les lentilles se comportent de manière connue et bien définie. Mais la « loi des lentilles » n'est valable que pour des lentilles minces, c'est-à-dire d'épaisseur négligeable. Tout le monde a déjà vu un objectif d'appareil photo et il est évident qu'un objectif n'est pas mince. Néanmoins, pour une compréhension simplifiée du fonctionnement d'un objectif, on obtient des résultats tout-à-fait acceptable en supposant qu'un objectif est une lentille mince (toujours convergente !), défini par sa distance focale. Par « compréhension simplifiée », il faut comprendre qu'on ne pourra pas ici expliquer les problèmes d'aberrations chromatiques, de distorsion, de coma, d'astigmatisme, etc.

La loi des lentilles est donc toujours valable :

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{p} + \frac{1}{p'}$$

où  $f$  est la distance focale (ou « la focale ») de l'objectif,  $p$  est la distance entre l'appareil – plus précisément l'objectif – et l'objet photographié et  $p'$  est la distance entre l'objectif et le capteur – grandeur souvent inconnue et fixe, propre à l'appareil utilisé.

La « distance focale » représente le comment l'image pour être « agrandie » : plus la focale est grande, plus l'objectif grandira l'image. Autrement dit, si la focale est grande (typiquement 100mm ou plus en photo), on a un zoom ou un téléobjectif et l'angle de vue est petit ; si la focale est petite (typiquement 35mm ou moins en photo), on a objectif « grand angle » et l'angle de vue est grand.



La loi du grandissement  $\gamma$  reste aussi valable.

Etant donné que les variables connues ou utiles sont la focale  $f$  et la distance de l'objet  $p$ , on peut la récrire en utilisant la loi des lentilles :

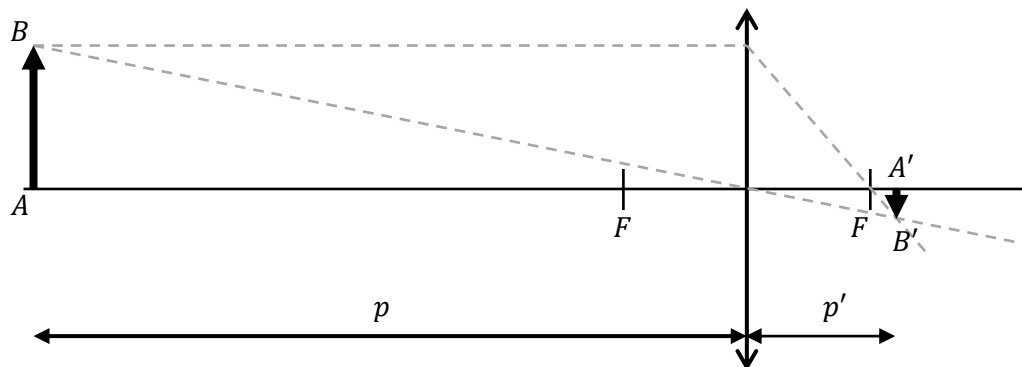
$$\gamma = \frac{A'B'}{AB} = \frac{p'}{p} = \frac{f}{p-f}$$

Il est alors possible de relier la taille d'une image, la taille du sujet, la distance du sujet et la distance focale utilisée. Bien que cela ne soit pas indispensable pour prendre des photos, cela permet de prévoir le matériel nécessaire, la faisabilité d'une image, ou de déterminer la taille ou la distance d'un sujet photographié. Cette relation se simplifie, car dans beaucoup de cas,  $p \gg f$  :

$$\gamma = \frac{f}{p}$$

Ainsi, par exemple, à 10m de distance, un objet photographié avec un objectif de 100mm sera 100 fois plus petit qu'en vrai.

On peut visualiser ce résultat comme sur la figure ci-dessous. Les foyers  $F$  de cette lentille sont donc les points se trouvant à une *distance focale*  $f$  de la lentille. L'objet  $AB$  photographié se trouve à une distance  $p$  suffisamment grande (au minimum quatre fois la distance focale pour un objectif standard, donc un objectif qui n'est pas macro) et l'image  $A'B'$  se forme alors à une distance  $p'$ , plus grande que  $f$ .



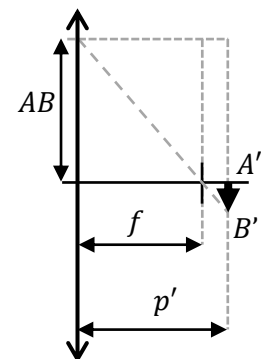
Les rayons lumineux qui arrivent parallèlement à l'axe optique – donc perpendiculairement au plan de la lentille – convergent au foyer  $F$  pour former l'image.

Les rayons passant par le centre de la lentille ne sont pas déviés. On peut ainsi établir des relations géométriques qui permettent de calculer la taille et la position de l'image.

On retrouve alors le grandissement  $\gamma$  comme une loi d'homothétie.

Mais ce comportement géométrique permet aussi de retrouver aussi la loi des lentilles, sans consister en une preuve non plus ! En effet, si on compare la taille de l'objet à la focale et la taille de l'objet et de l'image à la distance de la lentille à de l'image, on peut écrire :

$$\frac{AB}{f} = \frac{AB + A'B'}{p'}$$



De plus, on peut aussi écrire :

$$\frac{AB}{p} = -\frac{A'B'}{p'}$$

De cette relation, on peut alors sortir  $A'B' = -\frac{p'}{p} \cdot AB$ . En combinant ces relations, on trouve :

$$\frac{AB}{f} = \frac{AB + \frac{p'}{p} \cdot AB}{p'} = \frac{AB}{p} + \frac{AB}{p'}$$

On obtient alors la relation connue sous le nom de *loi des lentilles* :

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{p} + \frac{1}{p'}$$

### Application

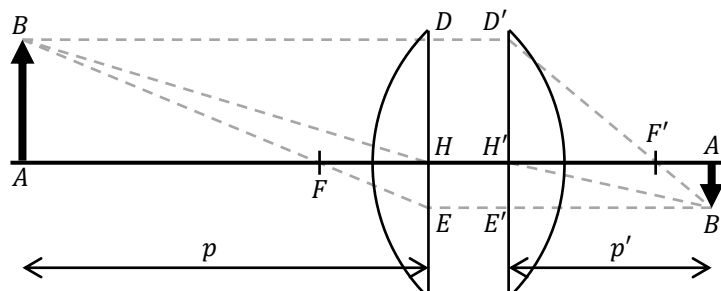
Soit un appareil photo numérique ayant un capteur composé de pixels de dimensions égales d'environ  $6\mu\text{m}$ . Cette taille de pixel correspond à un appareil photo compact de 24 mégapixels (avec un capteur de  $24\text{mm} \times 36\text{mm}$ ). Supposons un objet placé à une distance de 10m de l'appareil et que la distance focale de l'appareil soit de 50mm. Il est alors facile de déterminer le facteur d'échelle  $\gamma$  de l'image obtenue, donc la taille réelle que représente un pixel de l'image de l'objet.

On pose  $A'B' = 10\mu\text{m} = 10^{-5}\text{m}$ , soit la taille d'un pixel,  $f = 50\text{mm} = 0.05\text{m}$  et la distance de l'objet  $p = 10\text{m}$ . On trouve alors un grandissement  $\gamma \cong 5 \cdot 10^{-5}$ . La taille réelle que le pixel représente est alors obtenue en calculant  $AB = \frac{A'B'}{\gamma} \cong 1.99\text{mm}$ . Ainsi, dans ces conditions, les photographies prises permettront d'obtenir des détails d'environ 2mm à une distance de 10m.

### 4.2.2. Système Épais

Dans un système optique réel, l'épaisseur n'est pas forcément négligeable. On parle alors de *système épais*. On définit alors deux plans optiques principaux :

1. *Plan principal image* : Soit un rayon incident parallèle à l'axe optique comme le rayon  $BD$  sur la figure ci-dessous. Ce rayon est alors dévié par le système optique et ressort avec la direction  $F'B'$  en passant par le foyer  $F'$ . La distance focale  $f$  est alors déterminée par la distance entre le plan principal image et le foyer image  $F'$  du système optique.
2. *Plan principal objet* : Soit un rayon incident passant par le foyer objet  $F$  et qui émerge parallèlement à l'axe optique, donc perpendiculairement à la lentille. La distance focale  $f$  est alors déterminée par la distance entre le plan principal objet et le foyer objet  $F$  du système.



Il est alors assez aisé, d'un point de vue géométrique, de montrer que la loi des lentilles (dite *loi des lentilles minces*), aussi appelée relation de Snell-Descartes reste valable :

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{p} + \frac{1}{p'}$$

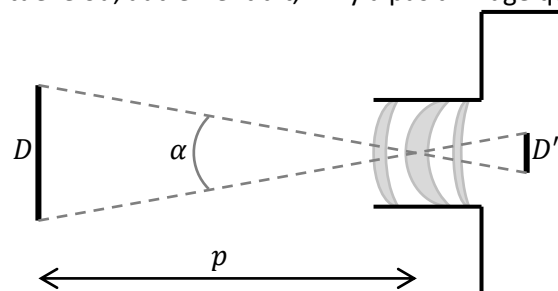
### 4.2.3. Angle de Champ

Un appareil photo est constitué de manière à ce que le système optique s'ajuste, automatiquement ou manuellement, afin d'obtenir une image nette. Notons  $D'$  la diagonale du capteur, soit la plus grande longueur possible sur l'image, et  $D$  la taille du champ de l'objet correspondant. Cette grandeur  $D$  est donnée par le grandissement et vaut donc

$$D = \frac{D'}{\gamma} = \frac{p-f}{f} \cdot D' = \left(\frac{p}{f} - 1\right) \cdot D'$$

Il apparaît alors clairement que le champ observable croît presque proportionnellement à la distance, puisque lorsque la distance de l'objet est grande par rapport à la focale de l'appareil, le terme  $\left(\frac{p}{f} - 1\right)$  est presque égale à  $\frac{p}{f}$  et la relation est donc quasi linéaire. Cette relation est quant à elle valable que lorsque la distance de l'objet  $p$  est supérieure à la distance focale  $f$ . Dans le cas contraire, le terme entre parenthèse devient négatif ; l'image est alors virtuelle ou, autrement dit, il n'y a pas d'image qui se forme sur le capteur.

On définit l'*angle de champ d'ouverture*  $\alpha$  comme l'angle avec lequel on voit l'objet photographié, comme on peut le voir sur la figure ci-contre.



On trouve alors facilement

$$\alpha = 2 \cdot \arctan\left(\frac{D}{2p}\right)$$

L'angle de champ ne présente un intérêt que lorsque la distance de l'objet est nettement plus grande que la distance focale. Dans la limite où  $p \gg f$ , on a  $D = \frac{p}{f} \cdot D'$  et on trouve :

$$\alpha = 2 \cdot \arctan\left(\frac{D'}{2f}\right)$$

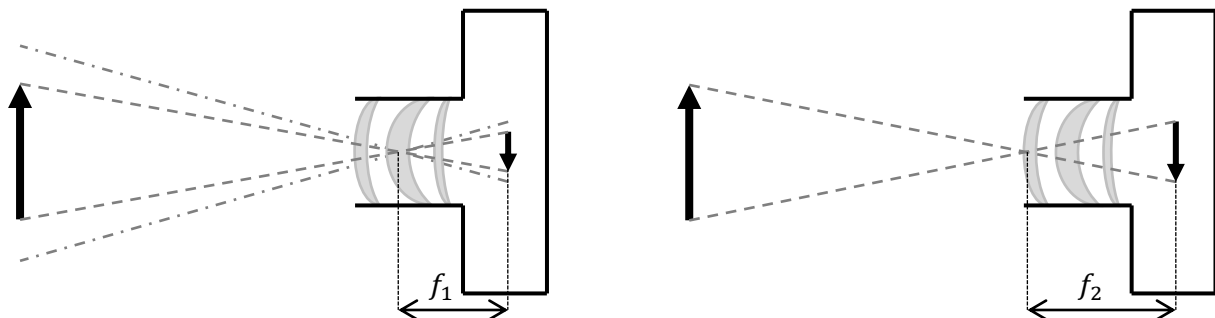
L'angle de champ est ainsi directement lié aux propriétés « techniques » de l'appareil : la taille du capteur et la distance focale utilisée.

Le tableau ci-dessous donne les angles de champ pour différentes valeurs de distances focales, pour un appareil numérique compact (capteur de 10mm x 12mm, donc  $D' = 15.6\text{mm}$ ), pour un appareil reflex numérique APS-C (capteur de 16mm x 24mm, donc  $D' = 28.8\text{mm}$ ) et pour un appareil reflex numérique plein format (négatif de 24mm x 36mm, donc  $D' = 43.3\text{mm}$ ).

Focale	Compact	APS-C	Plein Format
24mm	35.1°	62.0°	84.1°
50mm	17.8°	32.2°	45.8°
85mm	10.5°	19.3°	28.6°
200mm	4.5°	8.2°	12.3°
500mm	1.8°	3.3°	5.0°

Il est alors évident qu'un même objectif ne se comporte pas de la même manière en fonction de la taille du capteur, donc du type d'appareil. On voit, par exemple, qu'un objectif de 85mm de focale sur un appareil argentique, équivaut à peu près à un objectif de 50mm de focale sur un appareil reflex numérique et à un objectif de 24mm de focale sur un appareil numérique compact. C'est pourquoi on parle plus facilement de *focale équivalente* en faisant référence à l'équivalent argentique plutôt que de la valeur focale en elle-même, afin d'avoir une référence permettant des comparaisons sur le cadrage ou l'angle de champ.

Il faut malgré tout relever que bien que l'angle de champ dépende de la taille du capteur, le grandissement ne dépend, lui, que de la distance focale et de la distance de l'objet photographié. Autrement dit, le grandissement de l'objet dépend uniquement de la distance focale, quel que soit le type d'appareil utilisé. La ci-dessous montre l'effet de la distance focale sur l'angle de champ et sur le grandissement, ainsi que sur le cadrage, pour une taille de capteur équivalente.



On voit dès lors qu'une longue focale réduira l'angle de champ et donc le cadrage, mais augmentera le grandissement de l'objet photographié ; à taille de capteur équivalente bien sûr.

### 4.3. OUVERTURE ET PROFONDEUR DE CHAMP

On le sait et on l'a tous déjà vu, au cinéma ou ailleurs, la profondeur de champ peut varier ; c'est-à-dire qu'on peut avoir un sujet net et les plans avant et arrière flous ou ces mêmes plans nets aussi. Comment choisir cela ? Comme maîtriser ce point ? Et pourquoi ?

#### 4.3.1. Diaphragme et nombre d'ouverture

Le diaphragme, faisant partie intégrante de l'objectif, se trouve entre l'objectif et l'obturateur. Ce dernier élément ouvre « l'accès » au capteur (ou au film) lorsqu'on déclenche la prise de vue ; ce

dernier détermine donc la durée d'exposition, appelé le *temps de pose*. Il joue un rôle primordial dans la profondeur de champ.

Il est important de ne pas confondre la taille du diaphragme, désignée par la lettre  $\phi$  par la suite, de l'ouverture, désignée par la lettre  $F$  (elle-même ne devant pas être confondue avec la lettre  $F$ , désignant les foyers d'un système optique).

L'ouverture  $F$  est définie par un nombre adimensionnel : c'est le rapport de la distance focale  $f$  de l'objectif et du diamètre du diaphragme  $\phi$  :

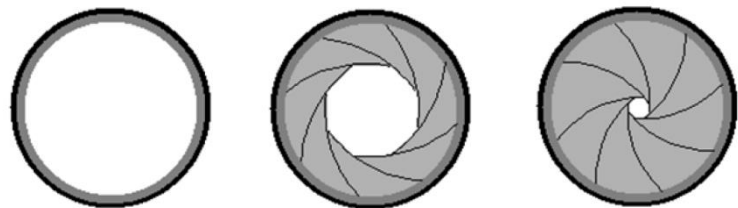
$$F = \frac{f}{\phi}$$

Donc, malgré son nom, plus le nombre d'ouverture est grand, plus le diaphragme est fermé.

Par exemple, un objectif de 50mm avec un diaphragme de 14.3mm de diamètre aura une ouverture F3.5, alors qu'un objectif de 200mm avec un diaphragme de 57.1mm de diamètre aura aussi une ouverture F3.5.

C'est pourquoi des téléobjectifs, donc des objectifs ayant une grande distance focale, très lumineux sont gros (et chers) : ils doivent avoir un diaphragme pouvant beaucoup s'ouvrir, et un système optique adapté (donc composé de grandes lentilles, qui sont lourdes et chères à fabriquer).

En termes de qualité, un diaphragme est composé de lamelles, qui peuvent ainsi se fermer ou s'ouvrir. Il ne s'agit pas d'un vrai cercle, qui serait difficile – voire impossible – à usiner. Les diaphragmes sont en général composés d'une petite dizaine de lamelles. La qualité de l'usinage de ces lamelles aura un impact sur la qualité de l'image finale et sur le rendu de certaines images.



Ainsi, lors d'images du Soleil par exemple, on observe parfois 4, parfois 6, parfois 9 (ou autres valeurs) rayons. Cela provient du fait que les rayons sont *diffractés* sur le bord des lamelles. Nous parlerons de *diffraction* plus tard. Si les lamelles sont mal usinées, donc si elles sont de qualité moyenne, la diffraction sera plus ou moins « nette » et donc les rayons apparaissant sur l'image seront plus ou moins homogènes, comme on peut le voir sur l'image ci-dessous.



### 4.3.2. Cercle de Confusion

Lors de la mise au point, chaque point de l'objet photographié fournit un point sur le capteur. Mais en réalité, les objectifs présentent des aberrations et des défauts, et donc les rayons provenant d'un point de l'objet photographié ne convergent pas parfaitement sur un seul point de l'image.

Malgré tout, on peut accepter une tolérance par rapport à une convergence parfaite des rayons lumineux sur le capteur, dans la mesure où le flou induit par ces aberrations n'est pas perceptible. Autrement dit, dans la limite où la taille d'une tache floue générée par un point lumineux est inférieure à la taille du pixel du capteur. C'est pourquoi les fabricants admettent une tolérance d'environ  $10\mu\text{m}$ , taille d'un des pixels composant les capteurs. Cette taille est appelée *cercle de confusion*, que l'on notera  $c$  par la suite.

### 4.3.3. Profondeur Focale

La *profondeur focale* désigne la zone proche du capteur où l'image est nette. La profondeur focale peut donc être considérée comme la tolérance de la position du capteur par rapport à la position théorique (donc exacte).

Elle dépend de plusieurs facteurs : l'ouverture  $F$  ; la distance de l'objet  $p$  ; et de la taille du cercle de confusion  $c$ . Dans cette zone de tolérance, l'image d'un objet ponctuel aura une dimension inférieure (ou éventuellement égale) au cercle de confusion, qui sera idéalement lui-même inférieur à la dimension du pixel.

Notons la profondeur focale par lettre  $u$ , telle que  $u$  représente la tolérance maximum par rapport à la position exacte, en avant ou en arrière. La grandeur  $u$  se trouve donc sur l'axe optique, et le cercle de confusion  $c$  se trouve dans le plan de l'image. Ainsi, par homothétie, on peut poser l'égalité :

$$\frac{\phi}{p'} = \frac{c}{u}$$

Cette égalité veut dire que le rapport entre la distance de l'image au système optique et la tolérance  $u$  est le même que le rapport de l'ouverture du diaphragme et la taille du cercle de confusion. D'après cette égalité, on peut donc exprimer la profondeur focale par

$$u = \frac{p'}{\phi} \cdot c$$

Sachant que  $p' = \frac{p \cdot f}{p - f}$  et que  $\phi = \frac{f}{F}$ , on peut reformuler encore cette dernière égalité et obtenir

$$u = \frac{F \cdot c \cdot p}{p - f}$$

La première observation de cette relation est que la profondeur focale augmente avec l'ouverture. Donc, plus le diaphragme est fermé, plus la profondeur focale est grande, donc plus il est aisé d'effectuer la mise au point.



Il est encore possible de simplifier cette relation, en exprimant la distance de l'objet  $p$  comme un multiple de la distance focale, soit  $p = m \cdot f$ , où  $m$  est un nombre entier.

On obtient alors :

$$u = F \cdot c \cdot \frac{m}{m-1}$$

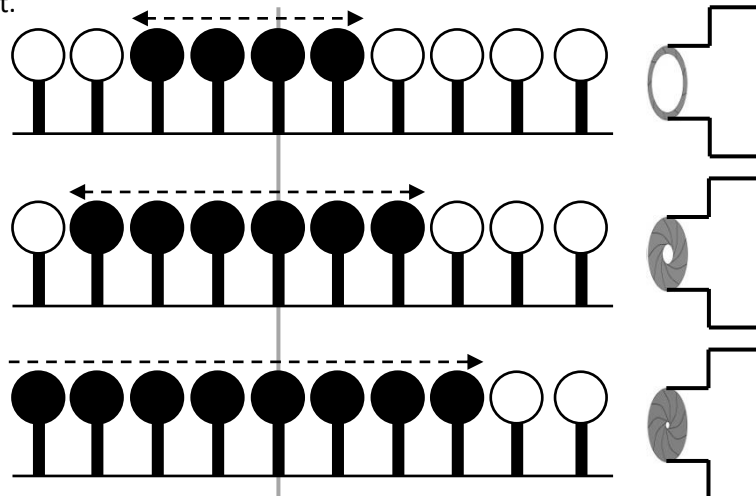
Ainsi, on montre que lorsque la distance de l'objet est grande, donc quand  $m$  devient très grand, le rapport  $\frac{m}{m-1}$  tend vers 1. On arrive de la sorte à l'approximation, valable pour des objets lointains :

$$u = F \cdot c$$

Autrement dit, la profondeur focale ne dépend ni de la valeur de la focale de l'objectif, ni de la distance de l'objet, mais uniquement de l'ouverture de l'objectif.

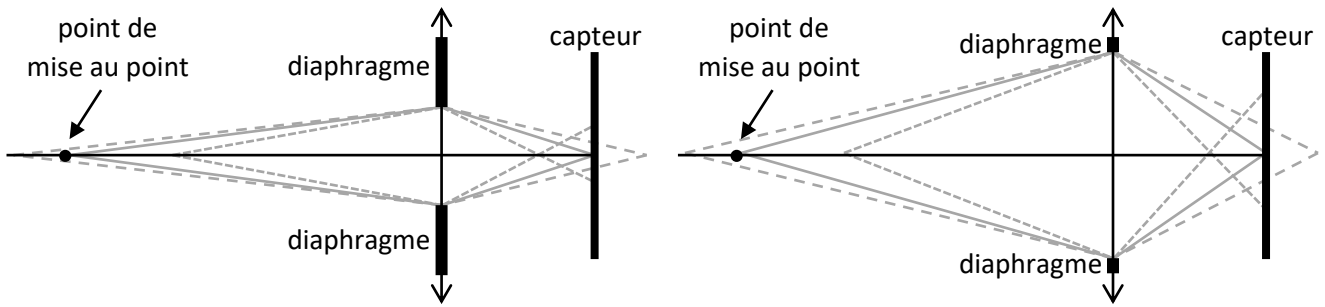
#### 4.3.4. Profondeur de Champ

La « profondeur de champ » représente la zone qui sera nette dans une image. Elle peut se modifier avec un grand nombre de paramètres. Mais le plus important à connaître est l'ouverture. Plus le diaphragme est fermé, donc plus le nombre d'ouverture est grand et plus la profondeur de champ est grande. Et inversement.



Ainsi, une petite ouverture (donc le diaphragme est grand ouvert), par exemple F2.8 aura une zone de netteté très faible alors qu'une grande ouverture (donc le diaphragme est petit), par exemple F22 aura une zone de netteté très étendue. Mais les objectifs ne permettent pas d'atteindre n'importe quelle valeur d'ouverture, et souvent les objectifs « lumineux », donc qui ont un petit chiffre d'ouverture, sont très chers (et encombrants).

Comme l'ouverture influe la profondeur de champ, la focale va aussi influencer cette profondeur. Plus la focale est grande, pour une valeur d'ouverture donnée, plus la profondeur de champ sera faible. Donc à ouverture identique, un téléobjectif aura une profondeur de champ plus petite qu'un objectif grand angle.

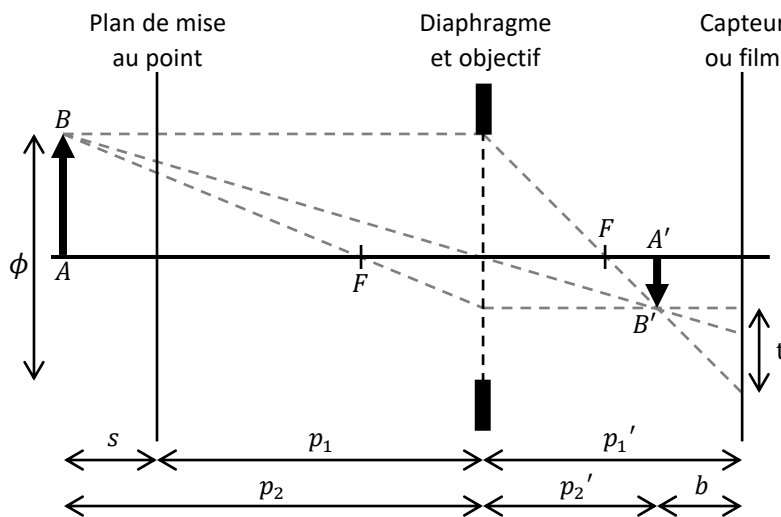


La *profondeur de champ* représente donc la zone, devant et derrière l'objet sur lequel la mise au point a été effectuée, dans laquelle l'image est nette. Autrement dit, lorsque la mise au point est parfaitement effectuée sur un point, une zone à l'avant et à l'arrière de l'objet reste dans les limites de tolérance du cercle de confusion : cette zone définit la profondeur de champ.

Pour déterminer la profondeur de champ, il faut donc évaluer la taille de la tache que produit l'image d'un point situé plus près, ou plus loin, que l'objet sur lequel la mise au point a été effectuée. Il faut donc différencier le cas où le point est situé plus loin de cet objet du cas où le point est situé plus près de cet objet.

#### 4.3.4.1. Le Point est plus loin que l'Objet Photographié

Considérons ici un objet situé à une distance  $s$  plus loin que le plan de mise au point. Cet objet aura une image qui va se former à une distance  $b$  devant le capteur. Notons  $t$  la taille de la tache produite par ce point. Notons aussi  $p_1$  et  $p'_1$  les distances du plan de mise au point et du capteur à la lentille, et  $p_2$  et  $p'_2$  les distances de l'objet et de son image à la lentille.



Par comparaison géométrique, on peut écrire :

$$\frac{t}{b} = \frac{\phi}{p'_2}$$

On a donc :

$$t = \phi \cdot \frac{b}{p'_2} = \frac{f}{F} \cdot \frac{p'_1 - p'_2}{p'_2}$$

En remplaçant :

$$p'_1 = \frac{p_1 \cdot f}{p_1 - f}$$

et

$$p'_2 = \frac{p_2 \cdot f}{p_2 - f} = \frac{(p_1 + s) \cdot f}{(p_1 + s) - f}$$

On trouve alors facilement :

$$t = \frac{s \cdot f^2}{F \cdot (p_1 + s) \cdot (p_1 - f)}$$

Cette relation permet plusieurs observations. La tache  $t$  est d'autant plus petite que l'éloignement du point  $s$  est petit. La tache est aussi d'autant plus petite que l'objet est éloigné (donc que  $p$  est grand). Une valeur d'ouverture  $F$  grande donne aussi une tache plus petite, alors qu'une distance focale  $f$  grande augmente la taille de cette tache.

Il peut alors être intéressant de chercher l'éloignement limite  $s_1$ , appelé *profondeur de champ arrière*, telle que la taille de la tache soit égale au diamètre du cercle de confusion.

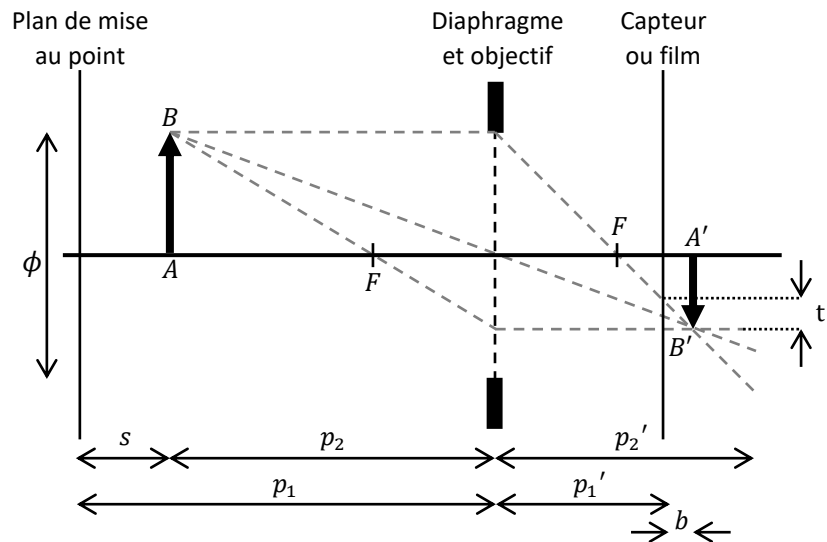
$$t = \frac{s_1 \cdot f^2}{F \cdot (p_1 + s_1) \cdot (p_1 - f)} = c$$

On trouve alors comme taille limite de la tache

$$s_1 = \frac{F \cdot c \cdot p \cdot (p - f)}{f^2 - F \cdot c \cdot (p + f)}$$

#### 4.3.4.2. Le Point est plus près que l'Objet Photographié

Considérons ici un objet situé à une distance  $s$  plus proche que le plan de mise au point. Cet objet aura une image qui va se former à une distance  $b$  derrière le capteur. Notons  $t$  la taille de la tache produite par ce point. Notons aussi  $p_1$  et  $p'_1$  les distances du plan de mise au point et du capteur à la lentille, et  $p_2$  et  $p'_2$  les distances de l'objet et de son image à la lentille.



Par comparaison géométrique, on peut écrire

$$\frac{t}{b} = \frac{\phi}{p'_2}$$

On a donc :

$$t = \phi \cdot \frac{b}{p'_2} = \frac{f}{F} \cdot \frac{p'_2 - p'_1}{p'_2}$$

En remplaçant :

$$p'_1 = \frac{p_1 \cdot f}{p_1 - f}$$

et

$$p'_2 = \frac{p_2 \cdot f}{p_2 - f} = \frac{(p_1 - s) \cdot f}{(p_1 - s) - f}$$

On trouve alors facilement :

$$t = \frac{s \cdot f^2}{F \cdot (p_1 - s) \cdot (p_1 - f)}$$

A un signe près, cette relation est la même que celle obtenue précédemment. Les mêmes observations sont donc toujours valables.

On cherche alors l'éloignement limite  $s_2$ , appelé *profondeur de champ avant*, telle que la taille de la tache soit égale au diamètre du cercle de confusion.

$$t = \frac{s_2 \cdot f^2}{F \cdot (p_1 - s_2) \cdot (p_1 - f)} = c$$

On trouve alors comme taille limite de la tache

$$s_2 = \frac{F \cdot c \cdot p \cdot (p - f)}{f^2 + F \cdot c \cdot (p + f)}$$

#### 4.3.5. La Distance Hyperfocale

La « distance hyperfocale »  $H$  est la distance de mise au point minimale pour laquelle la profondeur de champ arrière est infinie. Autrement dit, il s'agit de la distance à partir de laquelle l'objet ainsi que l'arrière-plan seront nets.

Afin de déterminer cette grandeur, reprenons le résultat de la profondeur de champ arrière. Lorsque la distance  $p$  tend vers cette valeur  $H$  à déterminer, la limite devrait valoir l'infini

$$\lim_{p \rightarrow H} s_1 = \lim_{p \rightarrow H} \left( \frac{F \cdot c \cdot p \cdot (p - f)}{f^2 - F \cdot c \cdot (p + f)} \right) = \infty$$

On a alors la condition suivante sur le dénominateur  $f^2 - F \cdot c \cdot (p + f) = 0$ .

On trouve alors :

$$H = f + \frac{f^2}{F \cdot c}$$

En prenant toujours la limite où  $p \gg f$ , on trouve :

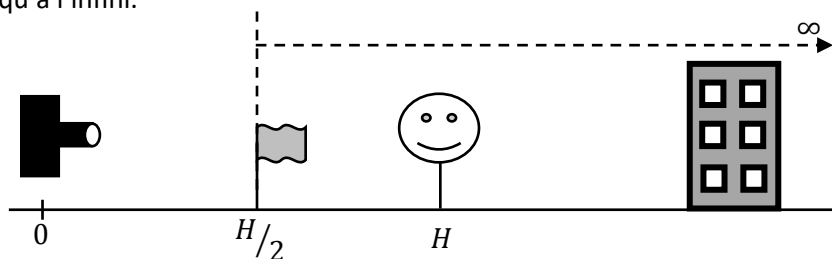
$$H = \frac{f^2}{F \cdot c}$$

On peut alors calculer la profondeur de champ avant, en introduisant cette équation dans l'équation du point plus près que l'objet photographié.

On trouve finalement :

$$s_2 = \frac{F \cdot c \cdot \left( f + \frac{f^2}{F \cdot c} \right) \cdot \frac{f^2}{F \cdot c}}{f^2 + F \cdot c \cdot \frac{f^2}{F \cdot c}} = \frac{1}{2} \cdot \left( f + \frac{f^2}{F \cdot c} \right) = \frac{H}{2}$$

En d'autres termes, lorsque la distance de mise au point de l'objectif est réglée sur la distance hyperfocale, la profondeur de champ s'étend d'une distance égale à la moitié de la distance hyperfocale jusqu'à l'infini.



Cette grandeur est « utile » en photographie de paysage par exemple, permettant ainsi d'avoir la quasi-totalité de l'image qui soit nette !

Cette définition est bien sûr relative, la notion de « net » et de « flou » étant fortement subjective... Techniquement, on désigne un objet comme étant net ou flou en plaçant une limite de contraste (typiquement 50%) entre un blanc et un noir.

Cette valeur est également utile lorsqu'on prend des photographies sans réglage de la mise au point ; comme pour des objectifs grands angles, des objectifs *fisheye* ou des objectifs manuels.

### Application

Prenons une photographie avec une focale de 24mm et une ouverture F11. Si les pixels de l'appareil ont une taille  $c = 10\mu\text{m}$ , la distance hyperfocale vaudra alors  $H = 5.26\text{m}$ . Donc tous les objets se situant à une distance d'au moins  $\frac{5.26}{2} = 2.63\text{m}$  seront donc nets.

### 4.3.6. Synthèse des Résultats

La profondeur de champ et la profondeur focale dépendent donc de la distance focale de l'objectif, de son ouverture, de la taille d'un pixel du capteur et de la distance de l'objet photographié.

Le tableau suivant résume les valeurs exactes calculées précédemment ainsi que les valeurs approximées dans la limite où l'objet est éloigné par rapport à la focale, donc où  $p \gg f$  :

Profondeur :	Expression exacte	Expression approximée
focale	$u = \frac{F \cdot c \cdot p}{p - f}$	$u = F \cdot c$
de champ arrière	$s_1 = \frac{F \cdot c \cdot p \cdot (p - f)}{f^2 - F \cdot c \cdot (p + f)}$	$s_1 = \frac{F \cdot c \cdot p^2}{f^2 - F \cdot c \cdot p}$
de champ avant	$s_2 = \frac{F \cdot c \cdot p \cdot (p - f)}{f^2 + F \cdot c \cdot (p + f)}$	$s_2 = \frac{F \cdot c \cdot p^2}{f^2 + F \cdot c \cdot p}$
de champ total	$s = \frac{2 \cdot F \cdot c \cdot f^2 \cdot p \cdot (p - f)}{f^4 - F^2 \cdot c^2 \cdot (p - f)^2}$	$s = \frac{2 \cdot F \cdot c \cdot f^2 \cdot p^2}{f^4 - F^2 \cdot c^2 \cdot p^2}$

D'après ces résultats, on peut donc conclure que

1. La profondeur de champ est d'autant plus grande que la distance focale est courte, et inversement
2. La profondeur de champ est d'autant plus grande que l'ouverture est grande, et inversement

3. La profondeur de champ est d'autant plus grande que l'ouverture du diaphragme est petite, et inversement
4. La profondeur de champ est d'autant plus grande que la distance de mise au point est grande, et inversement
5. La profondeur de champ avant est plus petite que la profondeur de champ arrière

#### 4.4. ABERRATIONS

On parle d'*aberrations* lorsque l'image fournie n'est pas nette ou du moins, pas l'exacte copie de l'objet considéré. Les *aberrations* sont donc des défauts des lentilles. On les classe en deux catégories : les aberrations géométriques et les aberrations chromatiques.

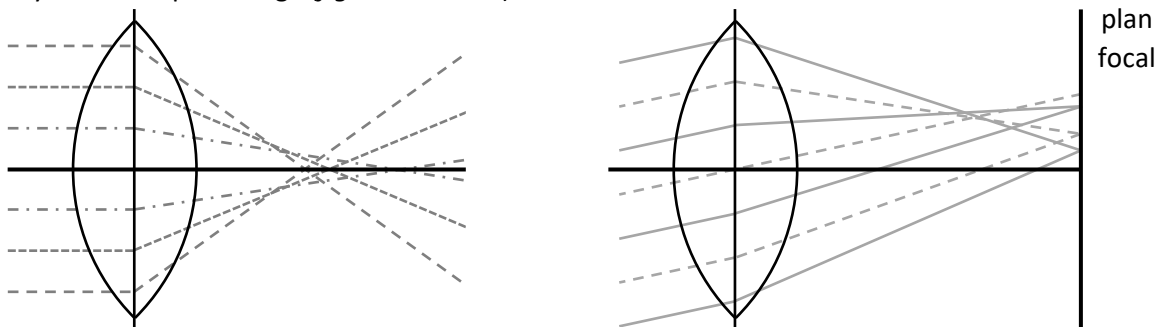
Les premières résultent de la forme, de la géométrie, des lentilles. On peut alors les classer en 5 sous-catégories : les aberrations sphériques, la coma, l'astigmatisme, la courbure de champ et la distorsion. On peut corriger ces aberrations par des choix de lentille adapté, en combinant diverses lentilles ou encore avec un usage adapté du diaphragme.

La dernière est liée aux caractéristiques des matériaux utilisés pour faire la lentille (on parle de *dispersion*). On peut les corriger en combinant diverses lentilles fabriquées dans des verres différents.

##### 4.4.1. Aberrations sphériques

La meilleure forme de lentille pour concentrer en un point l'ensemble de rayons lumineux issus d'un point source est une lentille non sphérique (*parabolique*). Mais pour des raisons de facilité de construction, la plupart des lentilles sont de forme sphérique. Cette forme de lentille induit alors des aberrations à cause de cette forme sphérique. Cette aberration peut être totalement annulée par une lentille non-sphérique, ou être compensée en réalisant un système optique comprenant plusieurs lentilles. On distingue alors :

- l'*aberration sphérique longitudinale*, qui est le déplacement des points d'intersection des rayons avec l'axe optique (*figure de gauche*).
- l'*aberration sphérique transversale*, qui est l'écartement transversal du point d'intersection du rayon avec le plan image (*figure de droite*).



L'aberration sphérique est réduite si la déviation du rayon lumineux est faible. Elle est ainsi réduite si

le nombre de lentilles composant le système est augmenté, ce qui diminue les angles d'incidence sur les faces des lentilles.

Il est possible de déterminer les rayons de courbure optimaux donnant l'aberration sphérique minimale. En désignant par  $r_1$  et  $r_2$  les rayons de courbure de la lentille (valeurs prenant un signe positif si la surface est convexe et négatif si elle est concave), le facteur de forme  $\gamma$  est défini par:

$$\gamma = \frac{r_1 + r_2}{r_2 - r_1}$$

Si l'objet est situé à une distance  $p_1$  devant la lentille et son image à la distance  $p_2$  derrière la lentille, l'aberration sphérique sera minimale pour:

$$\gamma = \frac{2 \cdot (n^2 - 1)}{n + 2} \cdot \frac{p_1 - p_2}{p_1 + p_2}$$

où  $n$  est l'indice de réfraction du verre constituant le lentille.

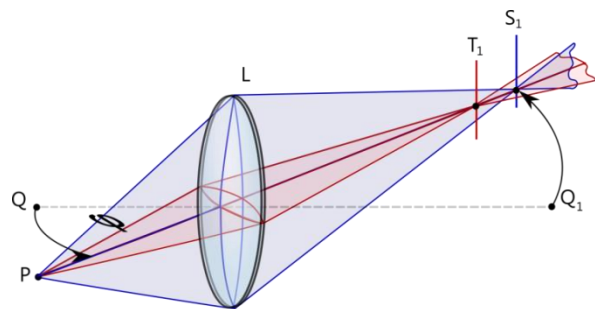
On peut ainsi déterminer la meilleure lentille pour réaliser une formation d'image, puisqu'à partir de là on pose :

$$\gamma = \frac{2 \cdot (n^2 - 1)}{n + 2} \cdot \frac{p_1 - p_2}{p_1 + p_2} = \frac{r_1 + r_2}{r_2 - r_1}$$

Mais une autre condition pour  $\gamma$  est imposée en fonction de la distance focale désirée. La conséquence de cette aberration est le floutage du foyer optique, puisque les rayons passant par le centre du système optique ne se focalisent pas au même endroit que ceux passant par les bords du système. Ainsi, l'image d'un point ne donne plus un point, mais un halo, plus dense en son centre.

#### 4.4.2. Astigmatisme

Les rayons issus d'un point se coupent en des plans images différents selon que les rayons se propagent selon les plans *sagittaux* ou *tangentiels* (respectivement en bleu et en rouge sur l'image ci-dessous). En d'autres termes, si on s'éloigne d'une distance donné  $\Delta$  du centre de la lentille, les deux rayons ne se focaliseront pas au même endroit en fonction de la *direction* du décalage, par exemple vertical ou horizontal si la lentille est verticale. Si ce phénomène se rencontre pour un point situé sur l'axe optique, le système optique comprend des surfaces sans symétrie de rotation (lentille à surfaces *toroidales*). La lentille a ainsi deux foyers, selon les deux plans orthogonaux considérés. La correction de cette aberration est plus complexe et exige souvent l'emploi d'un système composé de plusieurs lentilles ainsi que d'un diaphragme judicieusement placé (on l'a vu, le diaphragme permet de déterminer une zone de netteté). Ce problème est à traiter de préférence au moyen d'un logiciel de simulation optique.

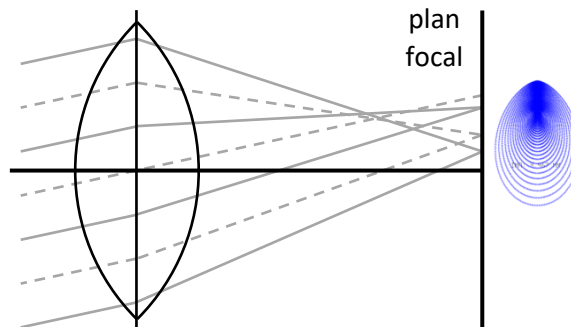




La conséquence de cette aberration est de courber ou déformer des objets qui devraient a priori être droit ou de créer une image « trait » (qui peut même être courbe) d'un objet « point ».

#### 4.4.3. Coma

Les rayons issus d'un point situé hors de l'axe optique ne se coupent pas en un point sur le plan image et forment ainsi une tache dont la forme rappelle celle d'une *comète* (d'où son nom). Cette aberration « ressemble » à l'*aberration sphérique transversale*, mais sa cause est différente.



La coma peut être totalement annulée si le facteur de forme vaut :

$$\gamma = \frac{2n^2 - n - 1}{n + 1} \cdot \frac{p_1 - p_2}{p_1 + p_2} = \frac{r_1 + r_2}{r_2 - r_1}$$

Mais dans ce cas, les aberrations sphériques réapparaissent ; il n'est donc pas possible d'optimiser les aberrations sphériques et le coma en même temps.

La conséquence de cette aberration est que les rayons parallèles mais qui ne sont pas parallèle à l'axe du système optique ne convergent pas tous en un même point sur le plan focal. Cette aberration dépend de l'ouverture de l'objectif et du champ, donc de la focale. Elle est complètement nulle pour les rayons passant par le centre du système optique.

Il faut noter que les aberrations sphériques et la coma dépendent de la taille de la lentille et diminuent avec sa taille ; ce qui n'est pas le cas de l'astigmatisme.

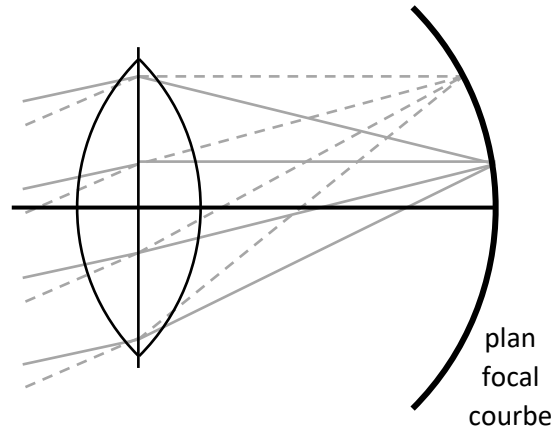
#### 4.4.4. Courbure de Champ

L'image d'un plan perpendiculaire à l'axe optique (parallèle à la lentille) n'est pas un plan perpendiculaire à l'axe, mais une surface courbe. Ce phénomène est évidemment gênant en photographie ou cinéma car il nécessiterait d'employer une surface photosensible (film ou capteur) courbe. Cette courbure de champ peut en plus être différente pour des rayons tangentiels ou sagittaux. La courbure de champ peut être approchée par la relation:

$$\frac{1}{R} = - \sum_i \frac{1}{f_i \cdot n_i}$$

où  $R$  est le rayon de courbure de la surface image et  $f_i$  et  $n_i$  sont respectivement les distances focales et indices de réfraction des lentilles composant le système.

Donc, si on fabriquait un objectif de 24mm ou 200mm de focale avec une seule lentille (prenons  $n = 1.5$ ), le rayon de courbure de l'image serait donc de 36mm dans le premier cas et de 300mm dans le second cas (plus le rayon de courbure est grand, plus l'image est plate ; un plan parfait a un rayon de courbure infini).



La conséquence de la courbure de champ est un flou de plus en plus important lorsque l'on s'éloigne du centre de l'image, si la mise au point a été effectuée sur le centre.

**Remarque :**

Un système optique simple ne comportant qu'une seule lentille de forme appropriée associée à un diaphragme judicieusement placé permet de réduire simultanément ces quatre aberrations. C'est l'*objectif paysage* (« *landscape objective* ») développé il y a presque un siècle.

**4.4.5. Distorsion**

Cette aberration est très gênante en technique (et en métrologie). Elle se traduit par le fait que le grandissement dépend de la distance à l'axe de l'objet, donc de sa grandeur. Autrement dit, une distance objet donnée n'est pas identique sur l'image en fonction de sa distance au centre de l'image. Donc si on photographie une règle graduée, un centimètre de la règle au centre de l'image n'aura pas la même longueur qu'un centimètre de la règle sur le bord de l'image. L'image se trouve donc déformée : les lignes droites sur les bords de la photographie deviennent courbes.

Cette distorsion peut prendre deux aspects : « *en coussinet* » si les côtés d'un carré sont courbés en lignes concaves (*figure de gauche*) ou « *en barillet* » si les lignes forment une figure convexe (*figure de droite*).



La distorsion en coussinet a plutôt lieu sur des objectifs grands angles (donc petite focale, comme des objectifs *fisheye* ou des images obtenues sur des *GoPro*) alors que la distorsion en barillet aura plutôt lieu avec des téléobjectifs (donc grande focale).

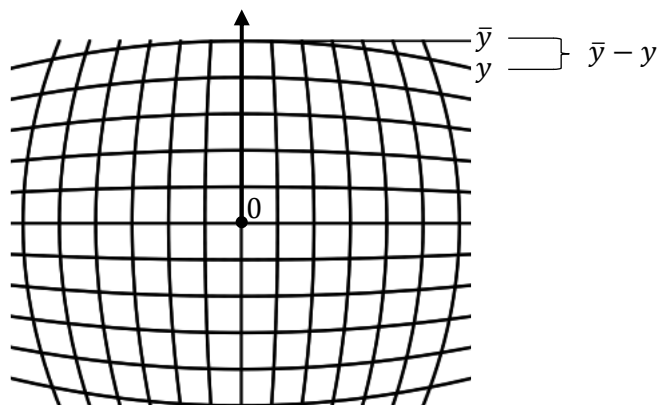
Cette aberration géométrique de l'objectif peut être corrigée et est indépendante des paramètres de l'objectif, donc de l'ouverture. De plus, ce défaut ne mérite pas entièrement le terme d'« *aberration* » puisque l'image d'un point reste un point ; seule sa position est modifiée.

### Mesure de la distorsion

La distorsion  $V(y)$  s'exprime par la relation:

$$V(y) = \frac{\bar{y} - y}{y}$$

où  $\bar{y}$  est la hauteur théorique de l'image et  $y$  sa hauteur effective.  $V$  est donc positif pour une déformation en coussinet, négatif pour une déformation en barillet.

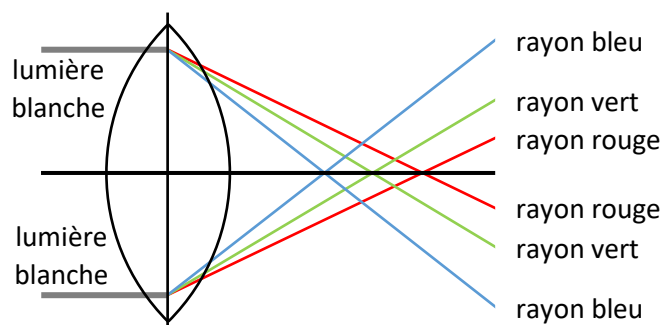


Pour effectuer cette mesure, on mesure l'écartement d'une ligne droite par rapport à la longueur de cette ligne. Afin d'obtenir une valeur «maximale», on effectue cette mesure pour une ligne se trouvant proche d'un bord de l'image. Comme ordre de grandeur, la distorsion est considérée comme négligeable lorsqu'elle est inférieure à 0.3%, « sensible » ou « visible » pour des valeurs comprises entre 0.4% et 0.6% et elle devient gênante pour des valeurs supérieures à 1%.

La distorsion peut être corrigée optiquement sur l'objectif, mais également par un traitement numérique de l'image.

### 4.4.6. Aberrations Chromatiques

On appelle *dispersion* le fait que l'indice de réfraction dépende de la longueur d'onde. Donc, la *distance focale* dépend de la longueur d'onde aussi. On peut avoir un décalage longitudinal (*aberration*)



*chromatique longitudinale*) autant que transversal (*aberration chromatique transversale*), pour les points situés hors axe.

La variation de l'indice de réfraction d'un verre en fonction de sa couleur est alors caractérisée par la *constringence d'un verre*, aussi appelée *nombre d'Abbe*, noté  $v$ , qui se calcule par la relation :

$$v = \frac{n_D - 1}{n_F - n_C}$$

Les indices  $n_D$ ,  $n_F$  et  $n_C$  correspondent aux indices de réfractifs pour des longueurs d'ondes de référence :  $\lambda_D = 589.2938\text{nm}$  (*raie D du sodium*),  $\lambda_F = 486.1327\text{nm}$  (*raie F de l'hydrogène*) et  $\lambda_C = 656.2725\text{nm}$  (*raie C de l'hydrogène*). Ces raies correspondent aux *raies de référence de Fraunhofer*, qui correspondent à des discontinuités du spectre solaire.

La correction de l'aberration chromatique nécessite l'emploi de deux lentilles de verres différents, l'un à faible dispersion (« *crown* »), l'autre à haute dispersion (« *flint* »). La relation à satisfaire pour un système à deux lentilles est:

$$f_1 \cdot v_1 + f_2 \cdot v_2 = 0$$

où  $f$  et  $v$  désignent les distances focales et constringences (donc la dispersion) des deux lentilles.

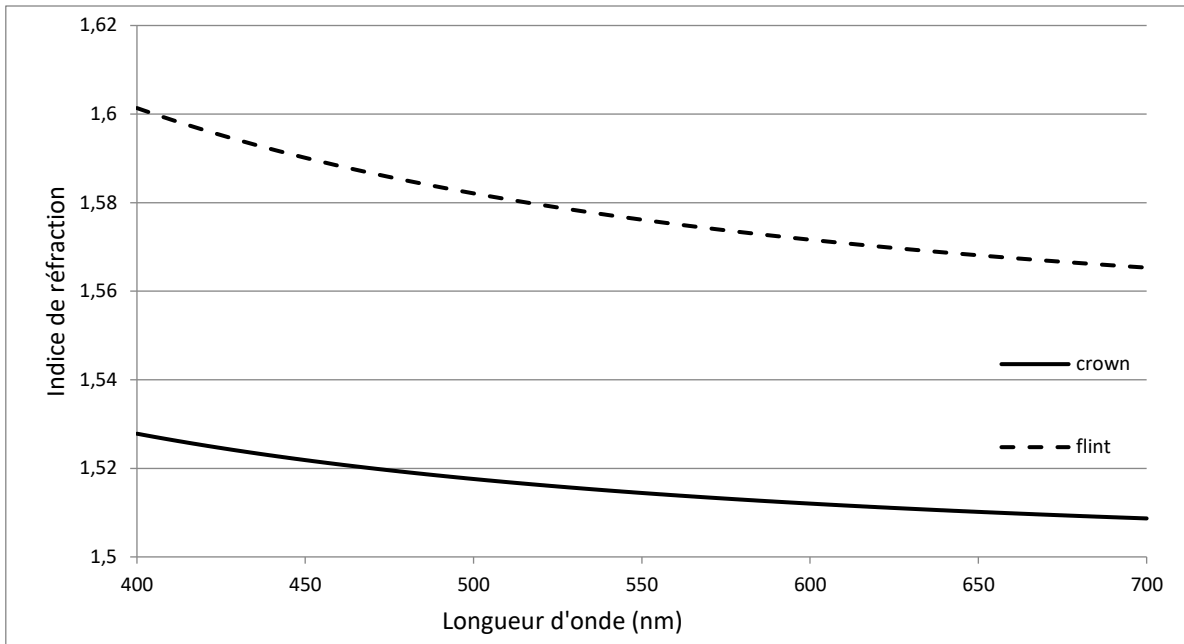
A noter que cette correction assure que les plans focaux coïncident pour deux longueurs d'ondes. Un objectif *apochromatique* (« *APO* » sur les objectifs), composé d'au moins trois lentilles de verres différents offre une meilleure correction (les plans focaux coïncident pour trois longueurs d'ondes).

D'autres définitions existent, utilisant d'autres indices mesurés pour d'autres raies. Plus cette constringence est élevée, moins le verre provoque de dispersion chromatique ; autrement dit plus les couleurs se comportent de la même manière.

On peut alors calculer l'indice de réfraction en fonction de la longueur d'onde  $\lambda$  (en nanomètre) par la *loi de Cauchy* (démontrable avec les *équations de Maxwell*), qui décrit l'indice de réfraction en fonction de la longueur d'onde, de l'indice  $n_d$  et du nombre d'Abbe  $v$  et qui s'écrit :

$$n(\lambda) = n_d + \frac{n_d - 1}{v \cdot \left( \frac{1}{\lambda_F^2} - \frac{1}{\lambda_C^2} \right)} \cdot \left( \frac{1}{\lambda^2} - \frac{1}{\lambda_D^2} \right)$$

La valeur  $n_d$  correspond ici à l'indice de réfraction pour une longueur d'onde  $\lambda_d = 587.5618\text{nm}$  (*raie d de l'hélium*). Cette relation est une première approximation (donc simplifiée) qui se calcule normalement par un développement en série impliquant des termes d'ordre supérieur (en  $\frac{1}{\lambda^4}$ , etc). Par exemple, on trouve que pour un verre « *crown* » on a  $n_d = 1.5125$  et  $v = 59$  alors que pour un verre « *flint* » on a  $n_d = 1.5725$  et  $v = 35$ .



On peut dès lors voir l'impact qu'aura ce changement d'indice de réfraction sur la distance focale d'une lentille sphérique mince. En effet, dans un tel cas, la distance focale se calcule par la relation :

$$f = \left[ \left( \frac{n_v}{n_a} - 1 \right) \cdot \left( \frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2} \right) \right]^{-1}$$

où  $n_v$  et  $n_a$  sont respectivement les indices de réfraction du verre (donc celui calculé au-dessus) et de l'air (ou du milieu entourant la lentille), et  $R_1$  et  $R_2$  les rayons de courbures de la lentille. On peut donc calculer, pour une lentille donnée, sa variation de distance focale en fonction de la longueur d'onde  $f(\lambda)$ . L'effet est une « *défocalisation* » des rayons lumineux en fonction de leur couleur. Soit une lentille ayant une distance focale  $f_v$  donnée avec un indice de réfraction  $n_v$  donné. Il est alors possible de montrer que la distance focale en fonction de sa longueur d'onde peut s'écrire :

$$f(\lambda) = \frac{n(\lambda) - 1}{n_v - 1} \cdot f_v$$

où on pourrait prendre l'indice  $n_v$  comme un indice « moyen » pour une longueur d'onde moyenne, en posant par exemple  $n_v = n_D$ .

Ainsi, la focale  $f(\lambda)$  se calculerait à partir de la focale  $f_v = f_D$  :

$$f(\lambda) = \left[ 1 + \frac{1}{v \cdot \left( \frac{1}{\lambda_F^2} - \frac{1}{\lambda_C^2} \right)} \cdot \left( \frac{1}{\lambda^2} - \frac{1}{\lambda_D^2} \right) \right] \cdot f_v$$

La conséquence de l'aberration chromatique est de provoquer un dégradé irisé sur les contours des objets photographiés, particulièrement sur les limites à fort contraste (en contre-jour).

Ce problème peut être résolu de différentes manières : l'une est l'utilisation d'un filtre qui laisse passer une gamme de longueur d'onde plus faible qu'au naturel ; une autre est l'utilisation de verre à faible dispersion, dont l'indice de réfraction est moins sensible à la longueur d'onde. Ainsi, les objectifs dits

*apochromatiques* sont des objectifs spéciaux qui permettent une correction (quasi) totale de ce défaut (en utilisant 3 lentilles ou 2 lentilles avec un verre à faible dispersion). Cette aberration existe dans tout système optique et peut aussi toucher l'œil humain par exemple.

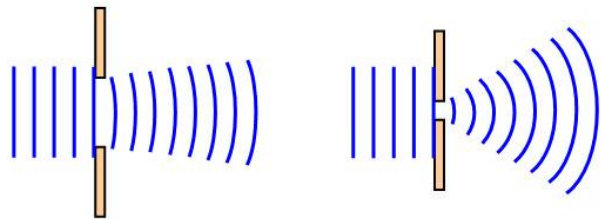
## 4.5. AUTRES LIMITATIONS OPTIQUES

En plus des aberrations vues avant, divers phénomènes peuvent limiter la qualité de l'image ; certains peuvent avoir un attrait « artistique » alors que d'autres sont indésirables et dégradent la qualité finale de l'image.

### 4.5.1. La Diffraction sur un Trou

Ce phénomène limite la résolution optique des systèmes optiques comme ceux des appareils photo, de l'œil ou d'un microscope. En photographie, il apparaît principalement lors d'images prises avec un grand nombre d'ouverture, donc avec un diaphragme très fermé. Mais d'autres manifestations de ce phénomène, plus esthétiques, peuvent avoir lieu dans d'autres conditions.

La diffraction est une sorte de phénomène de « diffusion » de l'onde lorsque cette dernière rencontre un « obstacle ». Le principe de base est que lorsque le rayon lumineux, considéré comme une onde, croise le chemin d'un obstacle, l'onde ne se déplace plus dans une seule et unique direction mais part dans toutes les directions (*principe de Huygens*).



En fonction de la géométrie de l'objet, la diffraction se manifeste sous diverses formes : rayons lumineux qui sont à la base inexistantes ou des sortes de « halos ». La forme qui nous intéresse ici est de savoir ce qui se passe lorsqu'on traverse « un trou » ; donc le diaphragme. L'onde partant dans toutes les directions (principe vu avant), un phénomène d'*interférence* va alors apparaître, ce qui va créer une tache centrale et des halos concentriques autour. On appelle cette figure la *tache d'Airy*. Ainsi, le cercle central contient une grande majorité de l'intensité lumineuse (environ 85%), le premier anneau une grande partie de l'intensité restante (environ 7% du total), etc.

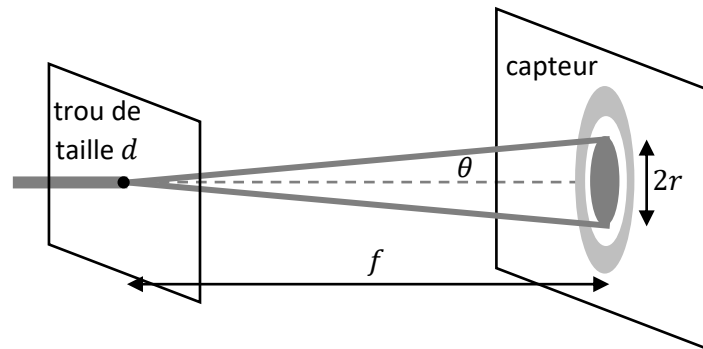
Ce phénomène dépend de la taille de l'obstacle, donc du trou. Plus l'ouverture est grande, moins l'onde sera perturbée ; et plus l'obstacle est de faible taille, plus le phénomène sera marqué.

Ainsi, l'image d'une lumière ponctuelle ne sera pas un point mais une tache (on négligera l'effet des anneaux sur l'image). Cet effet va donc créer un flou sur l'image, flou qui n'est pas lié au système optique mais uniquement à la taille du diaphragme. Tant que la taille de la tache ne dépasse pas la limite de résolution de l'image (la taille du pixel pour un appareil photo, la taille d'une cellule photosensible dans le cas d'un œil, etc), cela ne pose pas de problème. Mais lorsque cette tache dépasse ces dimensions, un effet de flou va donc dégrader la qualité de l'image.

Les lois de la physique nous permettent de déterminer la taille de cette tache. On peut alors estimer l'angle de déviation des rayons, donc la taille de la tache, avec la relation :

$$\theta \cong 1.22 \frac{\lambda}{d}$$

où  $\theta$  est l'angle considéré,  $d$  la taille du trou et  $\lambda$  la longueur d'onde (donc la couleur) considérée.



De cette relation, on peut en déduire une autre relation, utile en photographie, où on peut estimer le rayon de la tache à l'aide de la relation, en considérant que la distance entre le diaphragme et le capteur est égal à la distance focale  $f$  :

$$r \cong 1.22 \cdot \lambda \cdot F$$

où  $r$  est donc le rayon de la tache et  $F$  le nombre d'ouverture ( $F = \frac{f}{d}$ ).

Pour chercher l'ouverture maximale (donc le plus petit diaphragme) afin de ne pas dégrader l'image, on définit  $c$  est la taille d'un pixel et on pose :

$$\sin\theta = \frac{c}{f} \cong \theta$$

En égalisant ces deux relations angulaires, on trouve alors :

$$F = \frac{c}{1.22 \cdot \lambda}$$

En calculant cette valeur pour une taille de pixel de l'ordre de  $6\mu m$  et une couleur verte (où l'œil est le plus sensible)  $\lambda = 550nm$ , on trouve une valeur d'ouverture d'environ  $F = 9$ . Dans le spectre visible ( $\lambda = 400 - 700nm$ ), on trouve des valeurs de  $F$  allant de 7 à 12.

On voit ainsi que la taille de la tache d’Airy (donc la taille du « flou ») est proportionnelle à la valeur d’ouverture. Ainsi, plus l’ouverture est grande, plus l’effet de diffraction sera élevé ; ce qui diminuera le contraste de l’image. En effet, si la tache est plus grande, cela signifie que l’image d’un point sera représenté sur une surface



plus grande sur le capteur, donc sur plusieurs pixels. Pour des raisons de « fabrication » de l’image couleur (à travers la *matrice de Bayer*), on peut tolérer sans perte un flou couvrant un diamètre de deux pixels. On considère ainsi souvent qu’au-delà d’une ouverture de  $F16$ , la qualité de l’image sera détériorée par la diffraction, puisque du coup le rayon de la tache atteint alors environ  $10\mu\text{m}$ , ce qui est plus ou moins la taille de deux pixels (la taille d’un pixel varie souvent autour des 4 à  $8\mu\text{m}$ ).

Il est important de noter que la diffraction est un phénomène totalement indépendant de la distance focale. Seul le diamètre du diaphragme est important. Mais il est également important de noter que deux objectifs de distances focales différentes ayant une même ouverture n’ont pas le même diaphragme. En effet, un 24mm ouvert à 2.8 a un diaphragme de 8.6mm ( $24/2.8$ ) alors qu’un 200mm ouvert à 2.8 a un diaphragme de 71mm ( $200/2.8$ ). On en conclut que le phénomène de diffraction sera plus important sur une petite focale que sur une longue (si on compare des objectifs à même ouverture).

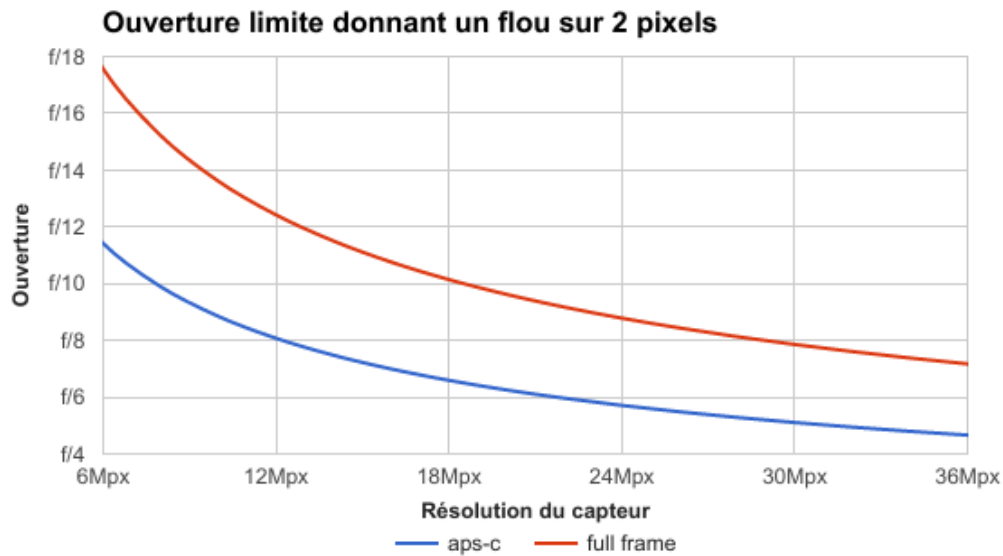
On peut alors comparer l’effet de la diffraction pour différents capteurs et ouvertures. Les tailles de la tache de diffraction sont données en pixels et les capteurs choisis sont de trois types : un APS-C de dimension : 16mm x 24mm et un plein format (FF pour *Full Frame*) de dimension : 24mm x 36mm. Pour chaque capteur, trois résolutions ont été prises : 24Mpx, 36Mpx et 42Mpx.

Ouverture	Tache d’Airy ( $\mu\text{m}$ )	Rapport taille de la tache d’Airy / taille du pixel					
		APS-C 24Mpx (px)	APS-C 36Mpx (px)	APS-C 42Mpx (px)	FF 24Mpx (px)	FF 36Mpx (px)	FF 42Mpx (px)
1.4	1.9	0.5	0.6	0.6	0.3	0.4	0.4
2.8	3.8	0.9	1.2	1.2	0.6	0.8	0.8
5.6	7.5	1.9	2.3	2.5	1.3	1.5	1.7
8	10.7	2.7	3.3	3.6	1.8	2.2	2.4
11	14.8	3.7	4.5	4.9	2.5	3.0	3.3
15	20.1	5.0	6.2	6.7	3.4	4.1	4.4
22	29.5	7.4	9.0	9.8	4.9	6.0	6.5
32	42.9	10.7	13.1	14.2	7.2	8.8	9.5

On retrouve en gras dans le tableau les valeurs qui excèdent les deux pixels de couvertures. On remarque bien sûr que la taille de la tache est d’autant plus grande que l’ouverture est grande, donc que le diaphragme est fermé. On observe aussi que l’effet est plus important pour les petits capteurs ; ce qui s’explique logiquement par la taille plus petite des pixels. Il en va de même pour les capteurs à grand nombre de pixels.



Le tableau ci-dessus peut plus simplement être représenté graphiquement, en montrant l'ouverture à ne pas dépasser en fonction du nombre de pixels pour chacun des capteurs ci-dessus :



Bien sûr, encore faut-il que l'œil soit capable de voir ce flou. Car l'œil a lui aussi résolution limite. La vision de l'œil humain étant limitée à un angle de  $1/60^\circ$ , soit  $0.0167^\circ$ , cela signifie que si l'on regarde une image à 50cm de distance, on percevra des détails de 0.15mm. Donc, pour une photo A4 (env. 20cm x 30cm) regardée à 50cm de distance, on trouve une telle tache pour une ouverture équivalente d'environ  $F13$ . Si l'image est agrandie, l'ouverture limite devrait diminuer : pas plus de  $F9$  pour du A3 (env. 30cm x 42cm) par exemple. En d'autres termes, bien que la diffraction soit un phénomène réel, il ne faut pas oublier, qu'au final, notre œil limite ce que l'on voit !

#### 4.5.2. La Diffraction et l'œil Humain

On peut donc maintenant se poser la même question pour notre œil. Dans ce cas, le diaphragme de l'œil est ce qu'on appelle la *pupille*, qui peut changer en taille en fonction de la luminosité et qui varie donc entre 3 et 8mm. La distance focale de l'œil est fixe (en vrai, elle varie mais sa variation ne changera quasiment rien aux résultats) et est typiquement de 18mm. La taille des cônes et des bâtonnets, donc des cellules photosensibles de l'œil, est de l'ordre de  $1.5\mu\text{m}$ . Avec ces données, la taille de la pupille minimale pour que la tache ne recouvre qu'une seule cellule est donc donnée par :

$$d = \frac{1.22 \cdot \lambda \cdot f}{\rho}$$

La pupille devrait donc être ici d'au moins 8mm, soit sa taille maximale !

Inversement, on peut calculer la taille de la tache lorsque notre pupille est fermée au maximum :

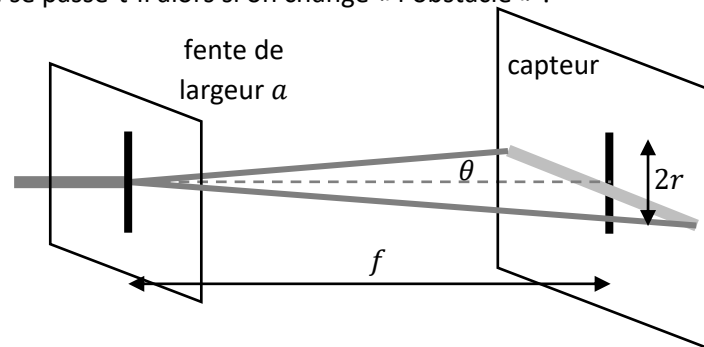
$$\rho = \frac{1.22 \cdot \lambda \cdot f}{d}$$

On trouve alors environ  $4\mu\text{m}$ , soit pas loin de 3 fois la taille des cellules... On peut donc en conclure que la vision, en pleine lumière, est fortement perturbée par la diffraction. Mais ce problème est peu

visible, d'une part grâce à notre cerveau qui traite l'information et recompose notre vision, et d'autres parts grâce aux défauts optiques de l'œil en lui-même, qui a un *pouvoir séparateur* d'environ  $0.0167^\circ$ , ce qui correspond à environ  $6\mu\text{m}$  sur la rétine, donc le même ordre de grandeur.

### 4.5.3. La Diffraction sur une Fente – L'Effet du Diaphragme

On en a parlé au début du paragraphe précédent, la diffraction peut prendre différentes « formes ». Dans la discussion précédente, nous avons considéré la diffraction sur un trou pour observer ce qui se passe sur un trou. Que se passe-t-il alors si on change « l'obstacle » ?



On s'intéresse à ce qui se passe sur une fente de largeur  $a$ . On observe dans ce cas une ligne perpendiculaire à la fente. En réalité, cette ligne n'est pas homogène, mais a une zone centrale très intense, puis une zone noire, puis une seconde zone claire, etc... Un peu comme si on coupait une tranche de la tache d'Airy !

On peut montrer que l'angle  $\theta$  qui donne l'ouverture de la ligne centrale se détermine par :

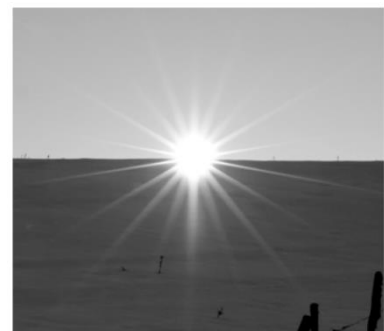
$$\theta = \frac{\lambda}{a}$$

Ce même angle est déterminable géométriquement par la distance focale, on a alors :

$$\theta = \frac{L}{f} = \frac{\lambda}{a}$$

où  $L$  est la « demi-largeur » de la ligne centrale. Mais quel rapport avec la photo et pourquoi en parler ici ? Simplement le fait que la lumière rencontre les bords du diaphragme, composé de lamelle. On peut donc voir ça comme des « demi-fentes », ou comme une fente lorsque le diaphragme est relativement fermé !

On explique ainsi la présence des rayons du Soleil ou la jolie forme en étoile d'une photo d'étoile ou d'un point lumineux lointain lorsque l'image est prise avec un diaphragme fermé (donc un grand nombre d'ouverture !)



#### 4.5.4. Le Vignettage

Ce « défaut » est l'assombrissement des bords, en particuliers des coins, de l'image. Ce problème est lié à la géométrie de l'objectif. On utilise le terme de *faux vignettage* pour désigner l'ombre portée par le pare-soleil de l'objectif ou encore le fait que l'objectif utilisé ne couvre pas la totalité du format du capteur.

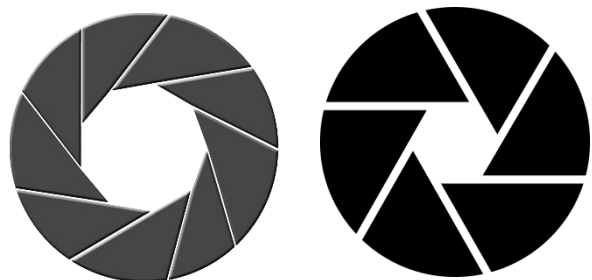
Le vignettage est surtout visible à pleine ouverture du diaphragme ; c'est en effet dans ces conditions que l'on utilise l'entier de la lentille. Si on ferme légèrement le diaphragme, cela permet de rendre l'effet quasi imperceptible, puisque la lumière passera principalement le centre du système optique. Il est également plus fort pour des petites distances focales que pour de grandes distances focales, les rayons incidents pouvant avoir un angle (d'incidence) bien plus grand et donc une « perte » de ces mêmes rayons par reflet ou diffusion dans la lentille bien plus élevée.



Il ne faut par contre pas oublier que tous les objectifs donnent une image dont les coins sont plus sombres. Le vignettage se mesure en calculant la différence entre la quantité de lumière reçue sur les bords et sur le centre de l'image.

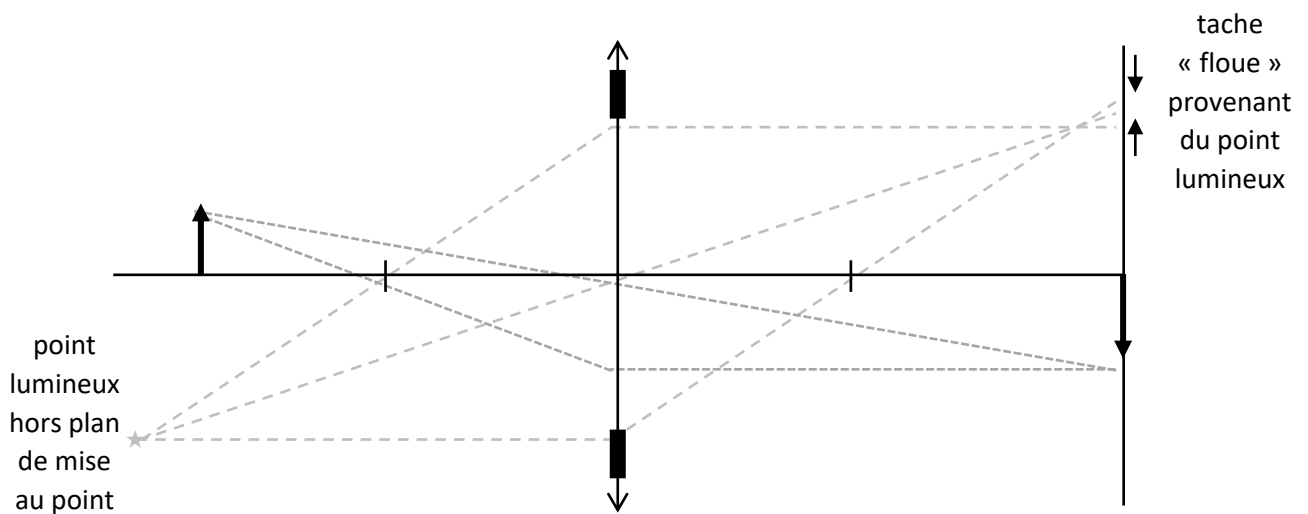
#### 4.5.5. Le Bokeh

Le terme « *bokeh* » nous vient du mot japonais « *boke* » qui signifie « *flou* ». Ainsi, le flou utilisé volontairement pour détourner le sujet principal peut devenir « habillé » et embelli grâce à la présence de certaines formes. Ce flou provient d'une source de lumière ponctuelle ou très petite, comme des phares, des lampadaires, des guirlandes lumineuses, ou encore des reflets sur des gouttes d'eau ou des zones réfléchissantes. Le bokeh s'intensifie lorsque la profondeur de champ diminue, donc lorsque l'on travaille à grande ouverture (petite valeur de F) ; mais son rendu ne dépend que de la conception du diaphragme de l'objectif. Ainsi, certains diaphragmes ne comptent que 6 lamelles et formeront donc un bokeh hexagonale, alors que d'autres objectifs auront un diaphragme arrondi à 9 lamelles et permettront d'obtenir une bokeh quasiment circulaire très esthétique.

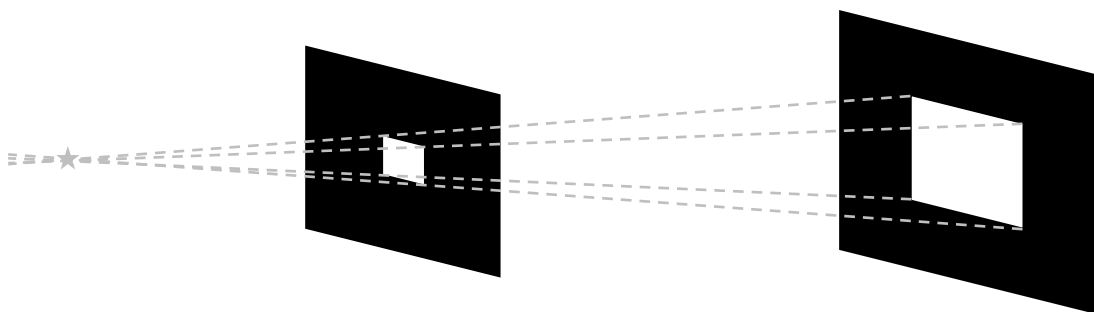


L'optique de l'objectif peut ensuite modifier ce rendu : un bokeh « écrasé », donc en forme d'ellipse par exemple, est dû à un objectif *anamorphique* (*cinémascope* : le rapport « standard » est de 2.39 : 1, ce qui nous donne le rapport des petits et grands axes de l'ellipse) ou un bokeh en forme d'anneau (ou de beignet) est dû à un objectif *catadioptrique* (à miroir).

L'explication du phénomène est au final assez simple : l'image d'un point lumineux se trouvant hors du plan de mise au point donnera une tache qui aura la forme du diaphragme. En effet, ce point lumineux (l'étoile grise dans la figure ci-dessous) a une image formée avant le capteur dans le cas où elle se trouve plus loin du plan de mise au point. On voit ainsi que les rayons forment une tache sur le capteur, qui est délimitée par la taille du diaphragme. On imagine alors aisément que si le diaphragme a une forme donnée (cercle, hexagone, etc), elle se reproduit sur le capteur.

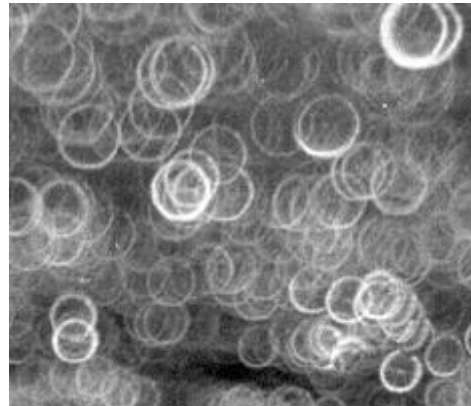


On peut alors « simplement » voir que la forme du diaphragme va être projetée sur le capteur ; imaginons pour cela et pour simplifier un diaphragme carré.



Si le diaphragme était parfait, le bokeh aurait alors des bords parfaitement nets et son intensité lumineuse serait d'autant plus faible que la tache est grande ; en effet, la puissance lumineuse de la source se répartit sur la surface formée et sera donc inversement proportionnelle à cette surface.

Les deux images ci-dessous illustrent de « variante » de bokeh : à gauche une image avec un diaphragme à 5 lamelles formant donc un bokeh pentagonal et à droite une image prise avec un objectif *catadioptrique* (donc à miroir).



L'image ci-contre montre le bokeh dans un film en cinémascope, donc où l'image est déformée.

On voit qu'aucun de ces bokeh ne sont vraiment esthétiques. On y préfère en général une forme plus proche du cercle, ce qui demande un diaphragme composé de plus de lamelles et donc mieux usiner. Mais le rendu est nettement plus beau.



Ainsi, pour se former, il est indispensable d'avoir une source de lumière intense par rapport à au milieu environnant ; sinon ces « halos » flous vont se mélanger entre eux pour former un fond flou homogène.

Il ne faut de plus pas oublier que l'objectif est composé de lentilles, qui vont rendre la répartition de la lumière inhomogène comme c'est le cas pour la *vignettage*. De plus, toutes les aberrations que nous avons déjà vues vont modifier le rendu du bokeh. Autrement dit, des flous et des déformations vont s'ajouter à ce bokeh qui n'avait jusque-là rien à voir avec les lentilles !



Si on compare les bokeh, non pas au niveau de leur forme sur leur nature ou leur origine, on peut en distinguer trois types :

1. Le premier, l'arrière-plan est totalement flou. Le bokeh est relativement doux et il n'est pas possible de distinguer de forme. L'arrière-plan est homogène ou ne contient qu'un doux dégradé de teintes et se détache donc parfaitement du premier plan, contenant le sujet qui se découpe alors très bien du fond. Aucune forme de bokeh n'est visible ; seul un fond « vide » de toute texture ou forme est présent.
2. Le deuxième, l'arrière-plan n'est que légèrement flouté. Il est encore possible de distinguer des éléments dans l'arrière-plan. Le bokeh s'intègre alors dans un décor reconnaissable, bien que les détails ne soient pas perceptibles.
3. Le troisième, l'arrière-plan contient des éléments lumineux ayant la forme du diaphragme. Cela nécessite la présence de lumières ponctuelles sur le sujet. Les bokeh ainsi formés seront donc d'autant plus grands que le flou sera marqué.



Afin de jouer avec ce troisième « type » de bokeh (et dans une moindre mesure avec le second), il est possible de créer un cache, que l'on posera devant l'objectif, avec un trou de la forme qui nous plaît. Le bokeh prendra alors cette forme, si la taille de la forme est environ égale à la taille du diaphragme, voire légèrement plus petite. Pour connaître cette taille, il suffit donc de diviser la distance focale par le nombre d'ouverture. Ainsi, un objectif 50mm  $F1.4$  aura besoin d'un trou d'une taille de 30mm environ alors qu'un objectif 200mm à  $F2.8$  aura besoin d'un trou de 70mm. Le cache créera aussi un fort vignettage. Il est alors agréable d'anticiper et de cadrer plus large pour pouvoir rogner l'image.

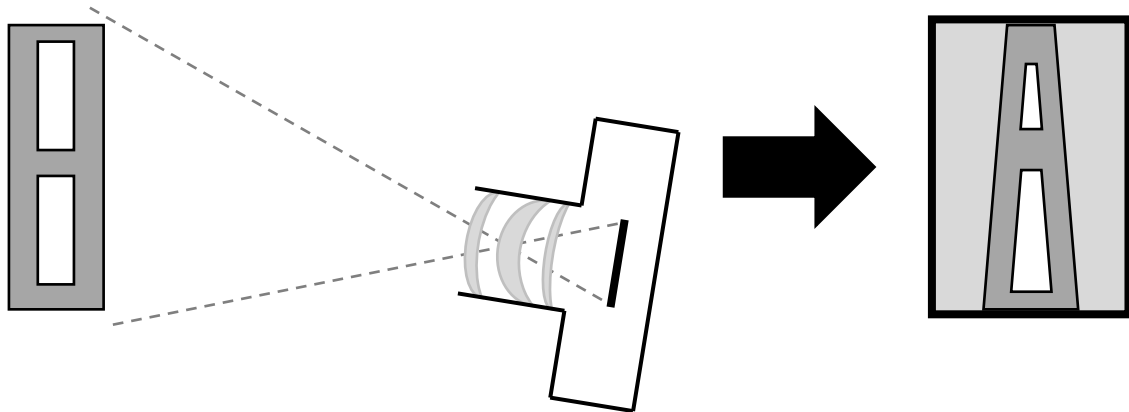
#### 4.6. OBJECTIF À BASCULE ET DÉCENTREMENT (OU *TILT-SHIFT*)

Un objectif particulier mérite une petite discussion : l'*objectif à bascule et décentrement*. En effet, dans certains domaines de la photographie, notamment en photographie d'architecture, les perspectives peuvent jouer de mauvais tours ; l'*objectif à décentrement (shift)* joue alors son rôle. Un autre intérêt de cet objectif est son rendu « *effet maquette* », provoqué par la bascule (*tilt*).

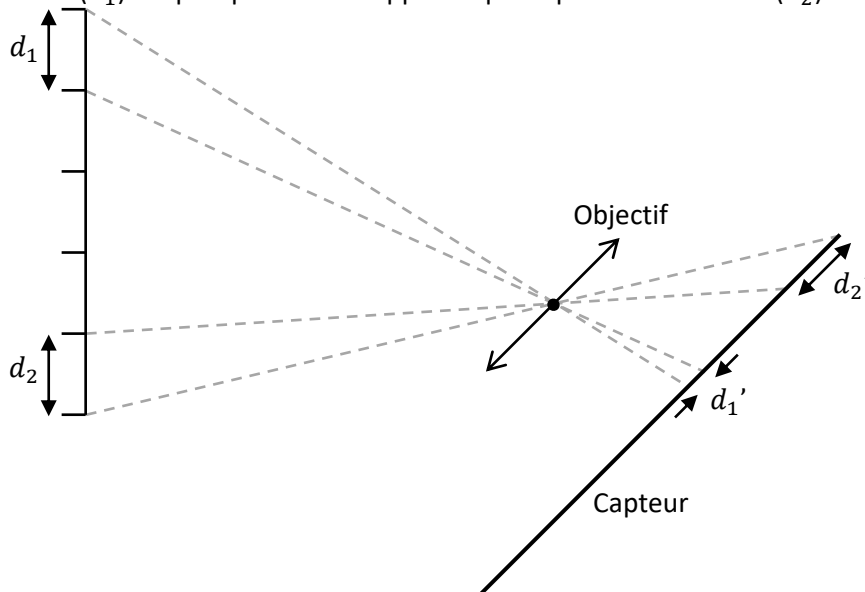
Cet objectif propose presque toujours les deux « options » en même temps, d'où son nom « Tilt-Shift » (« *TS* »).

#### 4.6.1. Objectif à décentrement (« shift »)

Imaginons vouloir photographier un immeuble (schématisé par le rectangle gris avec deux rectangles blancs). Le problème qui va apparaître est de voir toute l'image sur le capteur de l'appareil photo. On va alors incliner l'appareil vers le haut pour couvrir tout l'immeuble. A la prise de vue, pas de problème apparemment ; on est habitué à voir un immeuble avec une telle perspective. Mais à l'image, l'immeuble va alors apparaître tout déformé, à cause de la perspective (image de droite ci-dessous).

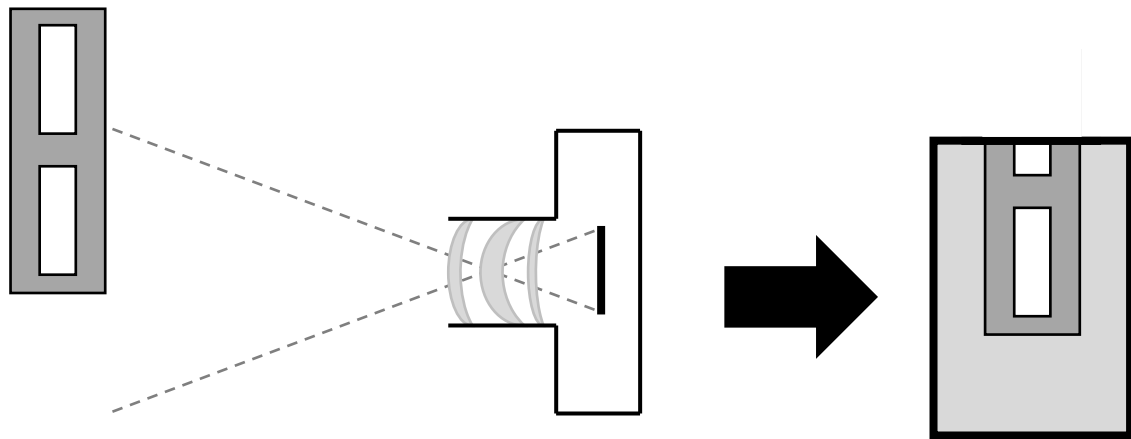


Que s'est-il passé ? Une analyse plus détaillée des rayons lumineux l'explique facilement. La partie « en bas » de l'immeuble ( $d_1$ ) est plus proche de l'appareil que la partie « en haut » ( $d_2$ ).



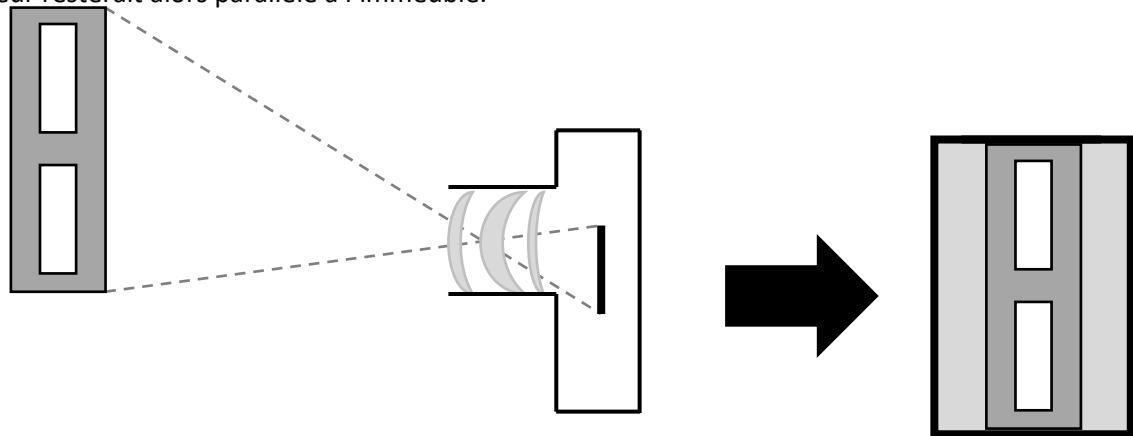
Il en ressort que l'image de la partie du haut ( $d_1'$ ) est plus petite que l'image de la partie bas ( $d_2'$ ). Les proportions ne sont pas respectées : l'image est déformée.

Quelle solution alors ? On peut avoir l'idée de cadrer l'image avec l'appareil horizontal ! Le capteur est alors parallèle au bâtiment et il n'y a alors aucune déformation.

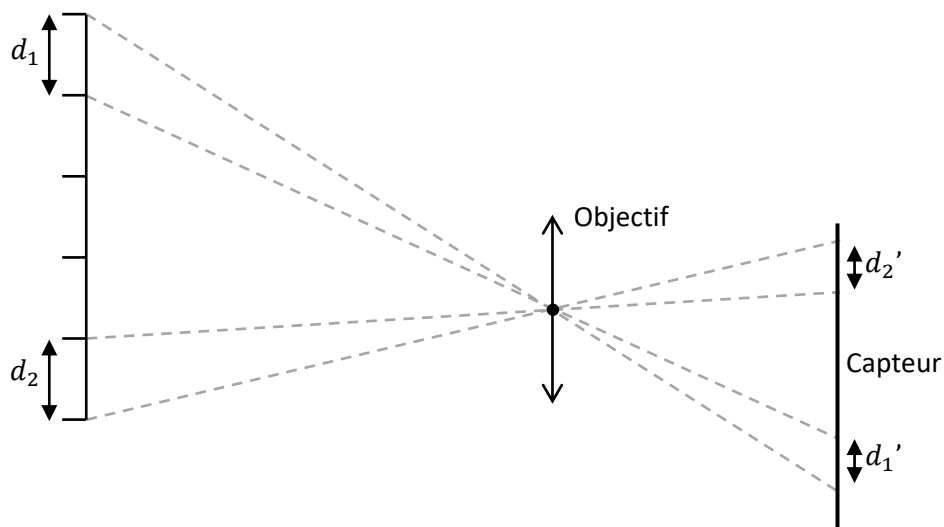


Mais la distance focale est souvent trop longue ; autrement dit, l'angle de champ pas suffisant pour couvrir l'entier du bâtiment. L'image résultante s'en retrouve alors tronquée.

C'est là que le *décentrement* entre en jeu ! Si on pouvait décaler l'objectif par rapport au capteur, on aurait le même effet qu'en inclinant l'appareil, mais sans provoquer cette déformation : en effet, le capteur resterait alors parallèle à l'immeuble.



Optiquement, il est facile de montrer et de comprendre que les dimensions sont alors respectées. En effet, sur l'image ci-dessous, on constate aisément qu'avec un objectif *décentré* par rapport au capteur, les distances sont conservées (des distances  $d_1 = d_2$  donne des distances  $d'_1 = d'_2$  sur l'image projetée sur le capteur).



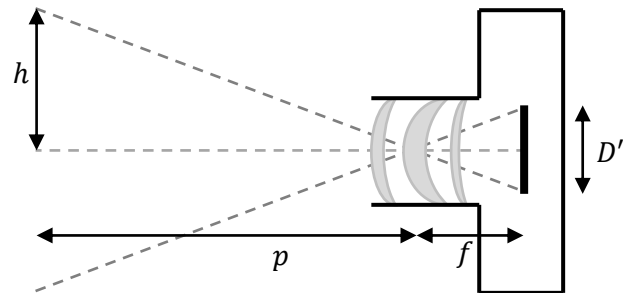


Le fait de décentrer permet donc de projeter une image fidèle en termes de proportions géométriques sur le capteur, tout en orientant son appareil comme on le souhaite.

De plus, ces objectifs étant souvent « grand angle » (typiquement 24mm), un faible décentrement suffira, typiquement 12mm. En effet, pour des grands angles en ce genre, on peut considérer que la distance (centre) optique – capteur est environ égale à la focale. Ainsi, un tel décalage veut dire que le centre optique de l'objectif peut être décalé en tout d'une focale approximativement ( $\pm 12\text{mm}$ ).

Tentons alors d'observer ce que cela implique sur l'image. Commençons par déterminer ce que l'appareil peut voir avec l'objectif centré.

On note  $h$  la hauteur du sujet photographié,  $p$  la distance du sujet (supposé beaucoup plus grand que la focale  $f$ , de telle sorte que  $p' = f$ ) et  $D'$  la taille du capteur.



Comme application numérique, on prendra une focale  $f = 24\text{mm}$  et on utilisera l'appareil « en portrait » et « en paysage », donc avec  $D_1' = 24\text{mm}$  et  $D_2' = 36\text{mm}$ .

En observant le schéma, on écrit que :

$$\frac{D'}{2f} = \frac{h}{p}$$

D'où on déduit :

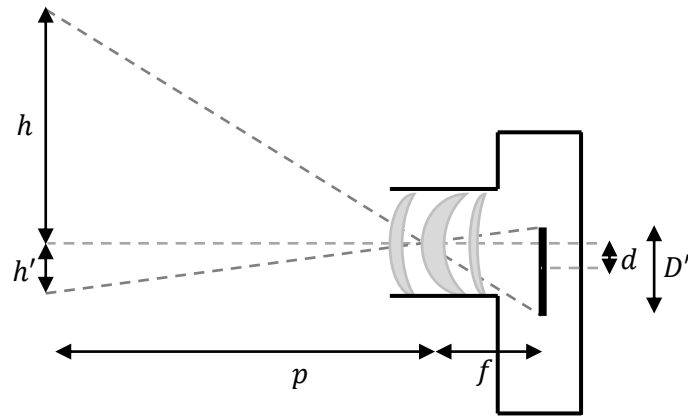
$$h = \frac{D'}{2f} \cdot p$$

On trouve alors :

	Paysage ( $D' = 24\text{mm}$ )	Portrait ( $D' = 36\text{mm}$ )
Hauteur $h$	$\frac{1}{2}p$	$\frac{3}{4}p$
Couverture totale de l'image $h_{tot}$	$p$	$\frac{3}{2}p$

Autrement dit, dans ce cas (focale et capteur donnés), on couvre un champ de l'ordre de grandeur de la distance qui nous sépare au sujet. Donc si on voulait photographier un immeuble haut de 50m depuis le sol, on devrait se trouver, au plus près, à 100m de distance en paysage et à 67m en portrait !

Regardons maintenant ce qu'il se passe si le même objectif est décentré d'une distance  $d = 12\text{mm}$ .



Avec des considérations comparables à avant, on peut écrire que :

$$\frac{\frac{D}{2} + d}{f} = \frac{h}{p} \quad \text{et} \quad \frac{\frac{D}{2} - d}{f} = \frac{h'}{p}$$

D'où on déduit :

$$h = \frac{\frac{D}{2} + d}{f} \cdot p \quad \text{et} \quad h' = \frac{\frac{D}{2} - d}{f} \cdot p$$

On trouve alors :

	Paysage ( $D' = 24\text{mm}$ )	Portrait ( $D' = 36\text{mm}$ )
Hauteur $h$	$p$	$\frac{5}{4}p$
Hauteur $h'$	0	$\frac{1}{4}p$
Couverture totale de l'image $h_{tot}$	$p$	$\frac{3}{2}p$

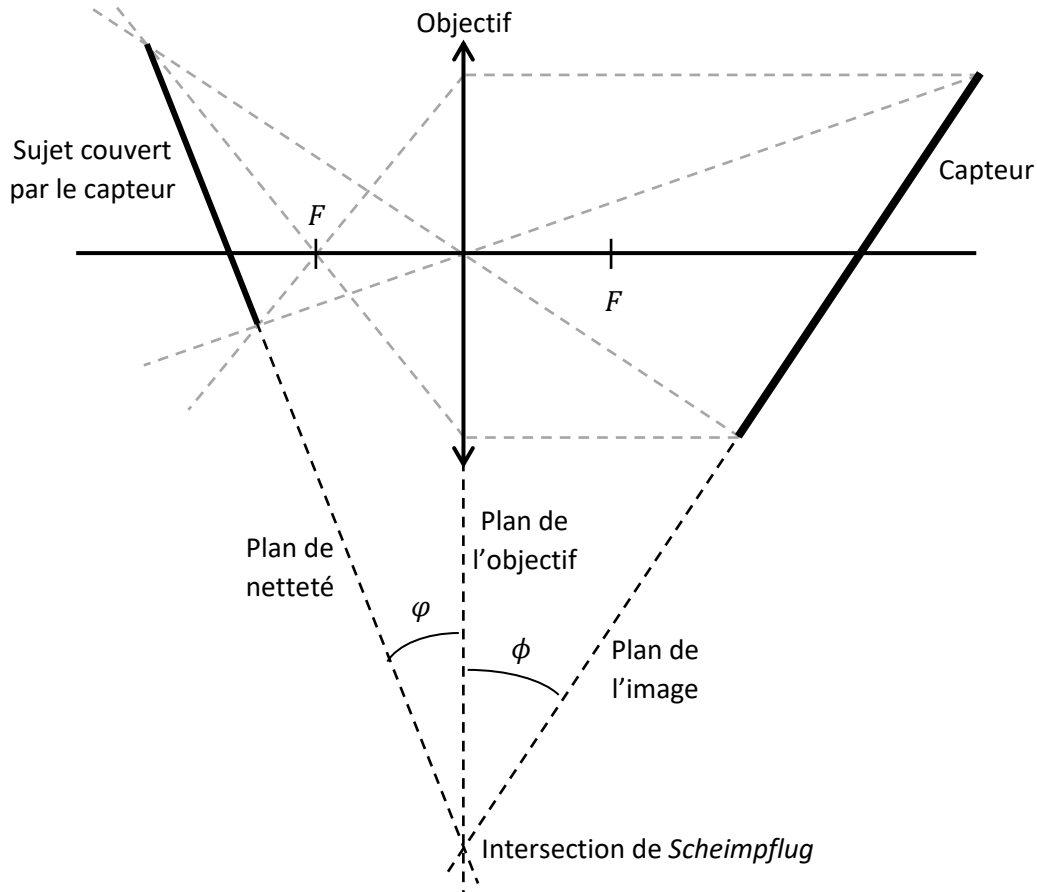
On remarque donc que la couverture totale ne change pas ! Heureusement, la focale et donc l'angle de champ n'a pas changé ! Par contre, on couvre maintenant un champ beaucoup plus grand sur la partie haute de l'image. Pour photographier l'immeuble haut de 50m depuis le sol, on devrait se trouver 50m de distance en paysage et à 40m en portrait !

#### 4.6.2. Objectif à bascule (« tilt »)

L'intérêt de l'objectif à bascule (« tilt ») réside en ses propriétés. Imaginons un appareil où le plan du capteur n'est pas parallèle au plan optique. Dans une telle situation revient à avoir un objectif dont la distance focale dépend de « où » passent les rayons. Donc, dans une situation donnée, un côté de

l'image provient d'un sujet lointain alors que l'autre côté de l'image provient d'un sujet plus proche. La figure ci-dessous montre ce comportement.

Ainsi, en inclinant l'objectif d'un angle  $\phi$  par rapport au capteur, on incline également le plan de netteté d'un angle  $\phi$  avec l'optique. Ces trois plans ont la particularité de se croiser en un point, quel que soit l'angle d'inclinaison (de « tilt ») de l'objectif, appelé l'*intersection de Scheimpflug*.



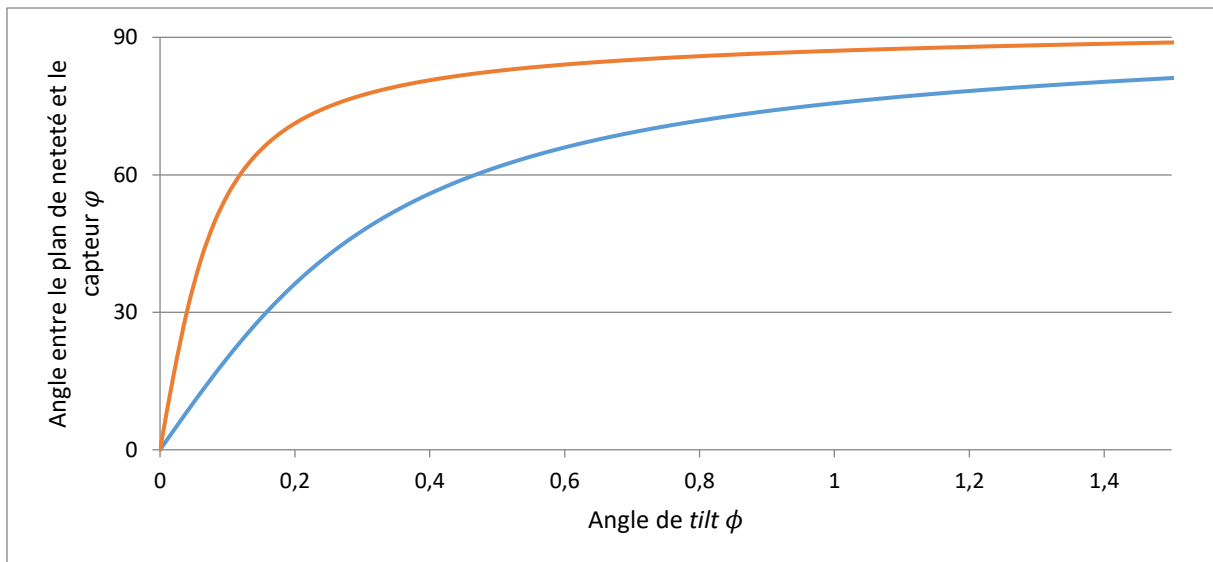
Dans une limite où les sujets photographiés sont bien plus éloignés que la focale ( $p \gg f$ ), ce qui est facilement le cas pour de tels objectifs où typiquement  $f = 24\text{mm}$ , on peut montrer que (en considérant l'axe optique) :

$$\frac{p'}{\tan(\phi)} = \frac{p}{\tan(\phi)}$$

Donc, avec l'hypothèse que  $p \gg f$ , on a que  $\frac{p'}{p} = \frac{f}{p}$  ce qui nous permet de trouver :

$$\phi = \arctan\left(\frac{p}{f} \cdot \tan(\phi)\right)$$

Ces objectifs permettant un *tilt* variant de  $\pm 8.5^\circ$ , cela se traduit facilement par des plans de nettetés formant un angle de  $80^\circ$  avec le système optique, atteignant presque  $90^\circ$  pour des sujets éloignés. Autrement dit, il serait possible de photographier de manière nette et de face des gens alignés les uns derrière les autres en ayant les côtés de chaque côté de la ligne complètement flou.

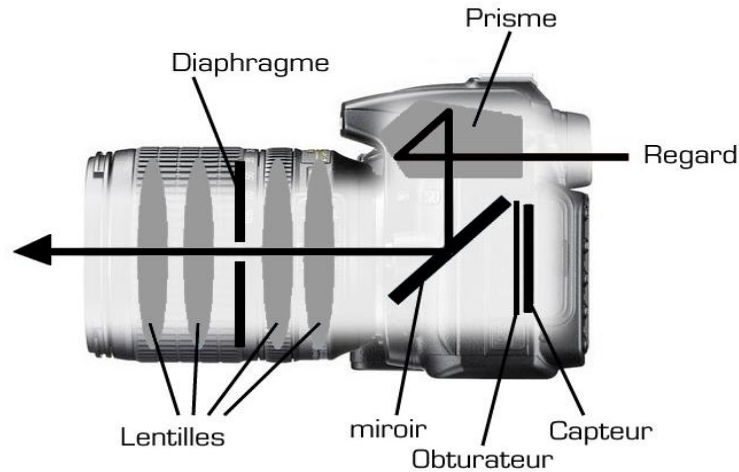


Ce graphique représente l'angle formé entre le plan de netteté et le plan du capteur (donc  $+\varphi$ ) en fonction de l'angle de « tilt » (donc  $\phi$ ). La courbe rouge (du haut) est calculée pour un sujet à 20m, la courbe bleue (du bas) pour un objet à 5m. On voit que l'angle atteint très rapidement un angle proche de  $90^\circ$  ; on comprend alors mieux pourquoi ces objectifs à bascule ne peuvent basculer que de quelques degrés ! Les  $8.5^\circ$  proposés par ces objectifs sont bien souvent totalement inutiles ! Cette courbe peut même dépasser les  $90^\circ$ , puisque l'angle  $\varphi$  tend vers  $90^\circ$  lorsque l'angle de tilt augmente. La photo ci-dessous illustre une telle prise de vue.



## 5. LA PHOTOGRAPHIE

Un appareil photo reflex se constitue d'un système optique – l'objectif – où la lumière est déviée de manière à ce qu'une image nette se forme sur le capteur (ou sur un film si on dispose encore d'un appareil argentique). Afin de régler la quantité de lumière qui arrive sur le capteur, on dispose de deux éléments : un diaphragme qui est un trou de taille variable et le temps de pose qui représente le temps d'exposition du capteur à la lumière.

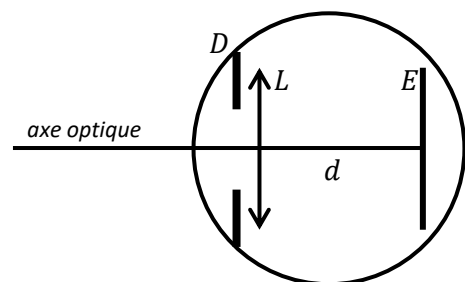


La lumière traverse ainsi de nombreuses lentilles dans l'objectif et passe à travers le trou du diaphragme. Le diaphragme est composé de « lamelles » qui peuvent s'écarter ou se resserrer pour laisser entrer plus ou moins de lumière.



La lumière est ensuite reflétée sur un miroir avant de rentrer dans le « pentaprisme » qui lui permettra de ressortir par le « viseur », où l'on place l'œil pour regarder et cadrer sa photo. Lorsque l'on déclenche pour prendre une photo, le miroir se relève, et la lumière passe tout droit. Le rideau, aussi appelé « obturateur » (ou le « shutter » en anglais), s'ouvre pour lui permettre d'atteindre le capteur (ou le film). C'est le rideau, en s'ouvrant et en se refermant, qui définira combien de temps le capteur est exposé à la lumière. La photo est prise !

On peut ainsi schématiser l'appareil photo de la même manière que l'œil : il y a un système optique (cornée-cristallin ou objectif), un diaphragme (iris ou diaphragme) et un écran (rétine ou capteur).



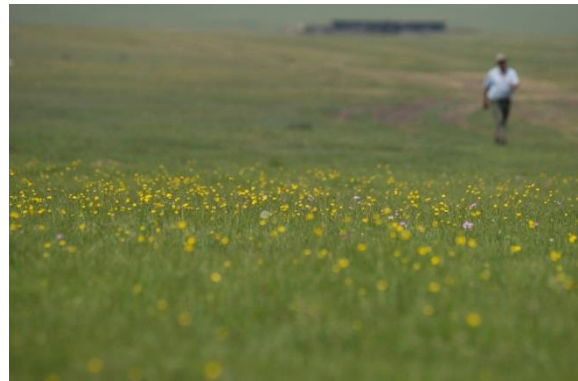
## 5.1. LES TROIS TYPES DE FLOU

Une photo peut être, en partie ou intégralement floue. Elle n'est pas ratée pour autant ! Cela peut être voulu comme une erreur du photographe. Afin de maîtriser au mieux son image, il faut distinguer les 3 types de flou qui existent !

Il faut noter que les deux derniers types de flou présentés ci-dessous sont parfois difficiles à distinguer. Par exemple, si on est soi-même en mouvement en train de prendre une photo d'un sujet aussi en mouvement, il sera difficile de dire quel mouvement est (le plus) « fautif » du flou.

### 5.1.1. Le Flou de Mise au Point

De manière volontaire ou non, l'image a des zones floues, parce que la mise au point n'a pas été faite à cet endroit. Cette effet peut être recherché pour, par exemple, faire ressortir un élément de la photo ; comme par exemple dans la photo de portrait.



### 5.1.2. Le Flou de Bougé du Sujet

La photo a été prise avec, peut-être, un temps de pose trop long, et le sujet a bougé. L'image est donc floue. Il s'agit du seul flou qui n'est généralement pas recherché, sauf peut-être en photo de sport pour montrer la vitesse et le mouvement.



### 5.1.3. Le Flou de Mise Bougé du Photographe

La photo a aussi été prise avec un temps de pose trop long ; mais cette fois c'est le photographe qui bouge et non le sujet. La photo est également floue ! Cet effet peut parfois être recherché pour effectuer un filé, comme dans l'exemple ci-contre.

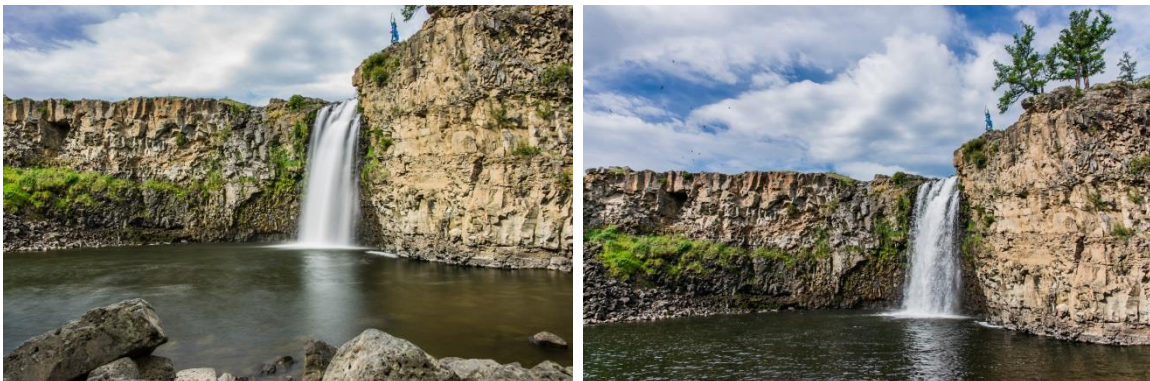


## 5.2. FONCTIONNEMENT D'UN APPAREIL

Sur un appareil photo, il est possible de régler plusieurs paramètres. Le but premier de ces réglages est de faire entrer la bonne quantité de lumière dans l'appareil. En effet, s'il n'y a pas assez de lumière, la photo sera noire, alors que s'il y a trop de lumière elle sera toute blanche (on dit qu'elle est « brûlée »). Il faut donc « paramétrer » l'appareil pour que la bonne quantité de lumière arrive sur le capteur. En mode « automatique » ou en mode « P » (c'est-à-dire « Programme »), ces réglages se font automatiquement par l'appareil.

### 5.2.1. Le Temps de Pose

Le premier réglage est le « temps de pose ». Il définit pendant combien de temps le capteur sera exposé. Il peut varier sur la plupart des appareils de  $\frac{1}{8000}$  de seconde à 30 secondes. En fonction des sujets photographiés, cette grandeur peut être une contrainte. Par exemple, si on photographie des sujets en mouvement (sport, animaux, enfants, ...), il faut utiliser un temps de pose court, rapide, afin d'éviter que l'image soit floue à cause du mouvement du sujet photographié. A l'inverse, on peut jouer du temps de pose long, pour créer des « flous », c'est-à-dire des effets de coulé (nuage, rivière) ou des effets de mer « ouateuse », par exemple.



Pour des photos à main levée, on accepte en général comme temps de pose minimal « l'inverse de la valeur focale (en mm) ». Donc, avec un objectif de 50mm, pas plus long que  $\frac{1}{50}$  de seconde pour que l'image soit nette ; avec un objectif de 200mm, pas plus long que  $\frac{1}{200}$  de seconde. Cette valeur peut augmenter avec les stabilisateurs intégrés dans les optiques ou les appareils, ou en s'appuyant contre mur, ou sur quelque chose.

### 5.2.2. L'Ouverture

Le second réglage est l'ouverture. Cette grandeur regarde le rapport entre la focale et le diamètre du diaphragme. L'ouverture, notée  $F$ , ne dépend donc que de la focale, notée  $f$ , et du diamètre du diaphragme (donc du diamètre du trou), noté  $\phi$ .

Il s'agit donc d'un nombre sans unité.

$$F = \frac{f}{\phi}$$

Ainsi, plus  $F$  est petit, plus le diaphragme est grand ouvert et donc plus il y a de lumière, et inversement. Il faudra donc un  $F$  petit en faible lumière ou pour obtenir un temps de pose rapide. Si on divise par 2 le nombre d'ouverture (de F5.6 à F2.8 par exemple), on obtient 4 fois plus de lumière et on peut alors exposer 4 fois moins longtemps, car si  $\phi$  double, la surface quadruple !

Mais l'ouverture, donc la taille du diaphragme, a un autre effet sur l'image : la profondeur de champ. Cette grandeur représente la zone où l'image est nette. Si le diaphragme est grand ouvert, ce qui veut



dire que le nombre d'ouverture est petit, la profondeur de champ sera très courte. Cet effet peut être recherché en portrait par exemple, où on cherche à détacher le sujet de son milieu pour obtenir un flou arrière esthétique. Par contre, en photographie de paysage par exemple, on préfère avoir une profondeur de champ grande, pour que le sujet soit net partout ; dans ce cas il faut « fermer le diaphragme » et donc augmenter son ouverture. La conséquence est qu'il faudra compenser la fermeture du diaphragme, qui laissera du coup entrer moins de lumière, par un temps de pose plus long. Avec, un risque, du coup, d'un flou dû au mouvement du sujet. Il s'agit donc de faire un compromis entre le temps de pose et l'ouverture, en fonction de l'image désirée.

### 5.2.3. La Sensibilité

Le troisième réglage est la sensibilité. Il permet d'augmenter artificiellement le rendu final de l'image. On le mesure en « ISO ». Si on « monte en ISO », on augmente la sensibilité. En contrepartie, il y a une augmentation du « bruit ». Le bruit vient de défauts électroniques sur le capteur, qui provoqueront l'apparition de « grains », faisant baisser la qualité et la résolution de l'image.



#### 5.2.4. La Mise au Point

La mise au point est un réglage qui se passe sur l'objectif plus que dans l'appareil photo. Son but est de faire que l'image soit nette sur le capteur et cela pour des objets à différentes distances. Bien que l'on puisse le faire à la main, les appareils le font très bien eux-mêmes et il serait dommage d'en s'en privé. Il peut par contre, dans certaines situations, être intéressant de bloquer la mise au point, afin d'éviter que l'appareil tente d'ajuster la mise au point. C'est le bouton ou l'option « AF / MF », donc « Auto Focus / Manual Focus ».

#### 5.2.5. Sur un Appareil Photo

Sur un appareil photo, on a le choix entre 4 « positions » de travail : P / A (ou Av) / S (ou Tv) / M. Le « P » est « Programme » et l'appareil gère l'ouverture et le temps de pose tout seul. Le « A » ou « Av » signifie « Aperture », soit « Ouverture » en anglais ; avec ce réglage on peut décider de la valeur d'ouverture  $F$  et l'appareil adapte le temps de pose. Le « S » ou « Tv » signifie « Speed », soit « Vitesse » en anglais ; avec ce réglage on peut décider du temps de pose et l'appareil adapte l'ouverture dans la mesure du possible. Le réglage « M » signifie « Manuel » et c'est à l'utilisateur de régler ces deux grandeurs. Il y a très souvent une autre position disponible « Auto » (souvent écrite en vert) qui s'approche de la position « P » mais qui ajoute encore la valeur de sensibilité dans son réglage.



Sur la partie frontale de l'objectif, on peut souvent lire plusieurs informations. Sans rentrer dans les détails des codes utilisés (donc les lettres, genre EF, APO, DG, HSM, ...), il est quand même utile de savoir interpréter les valeurs données. Par exemple, sur l'image ci-contre, on retrouve le « 28 – 80mm » qui correspond aux distances focales possibles, donc entre 28mm et 80mm ; le zoom est donc presque un « 3 fois », puisque le rapport entre la plus petite et la plus grande est de presque 3. Ensuite, le « 1 : 3.5 – 5.6 » veut dire que l'objectif a une ouverture de 3.5 à la petite focale, soit 28mm, et une ouverture de 5.6 à la plus grande focale, soit 80mm. La dernière valeur donnée, le « Ø58mm » donne le diamètre de l'objectif. Cette valeur n'est utile que si on veut ajouter un filtre (UV, polarisant, coloré, dégradé, etc.) sur l'objectif.

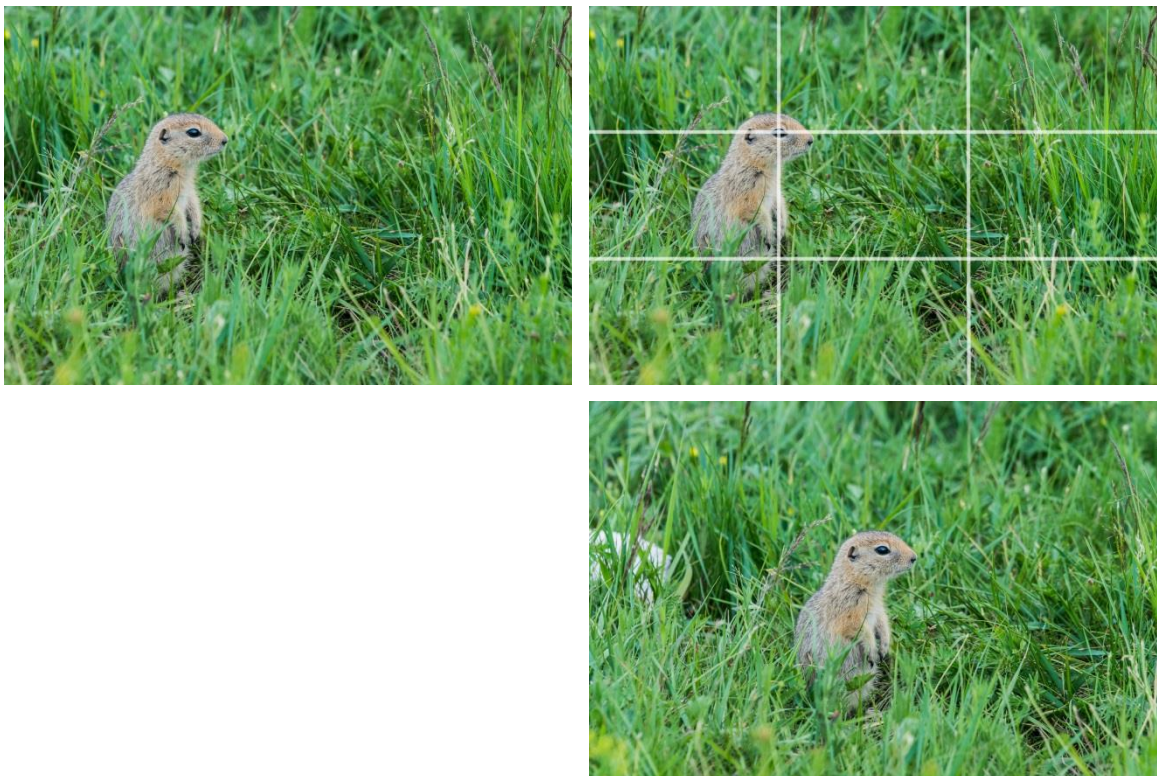


### 5.3. RÈGLES DE COMPOSITION

Comme en musique ou en peinture, les photographes ont créés quelques règles de composition pour qu'une image nous paraisse belle et équilibrée. Ce chapitre traite de quelques « règles », qu'il faut plus prendre comme des indications ou des conseils que comme des règles strictes à appliquer.

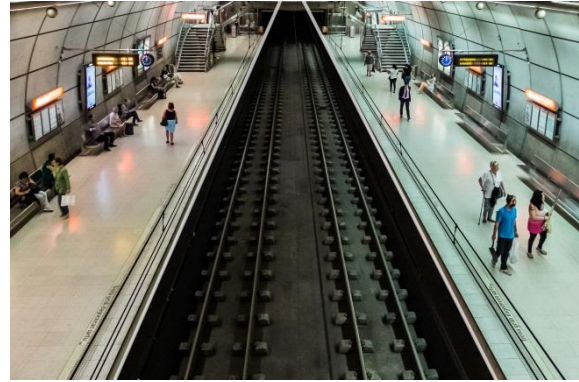
### 5.3.1. La Règle des Tiers

A la lecture d'une image, l'œil n'est généralement pas attiré par son centre, mais par certains éléments. Imaginons que l'on coupe, horizontalement et verticalement, une image par 2 lignes (donc l'image est coupée en trois dans chaque direction, donc en 9 rectangles). Les intersections de ces lignes donnent quatre points. Ces points sont appelés « points stratégiques » ou « points de force » ; on choisit souvent de placer le sujet sur ces points et de l'aligner sur ces lignes. Il n'est bien sûr pas nécessaire d'avoir des éléments sur chacun des points ou chacune des lignes. Mais par exemple, une photo avec un horizon sera souvent plus intéressante avec l'horizon sur une des lignes plutôt que centré. Si un sujet vertical ou horizontal se trouve sur l'image, elle sera plus équilibrée s'il occupe une des lignes. Si un point important de l'image, comme l'œil d'une personne ou d'un animal, se trouve sur l'image, il sera plus mis en valeur s'il se trouve sur un des quatre points stratégiques.



### 5.3.2. Les Lignes de Fuits

Beaucoup d'image contiennent des lignes directrices. Elles sont souvent dues à la perspective des éléments de l'image. Une image paraîtra souvent déséquilibrée si le point de fuite – donc la rencontre de ces différentes lignes – se trouve en dehors de la photo (et même si ce point ne se voit directement sur l'image).



### 5.3.3. Les Différents Plans

Pour donner de la profondeur à l'image, il faut se servir des différents plans existants, autrement dit du fait que certains éléments de l'image se trouvent proches, d'autres à une distance raisonnable et d'autres encore sont éloignés. De façon naturelle, l'œil partira du premier plan pour aller à l'arrière-plan, en traversant la scène et les différents plans. Jouer avec ces éléments de distances différentes permet de redonner à une image, qui est aplatie par définition, une profondeur que l'œil voit en vrai mais pas forcément en photographie.



### 5.3.4. Le Regard

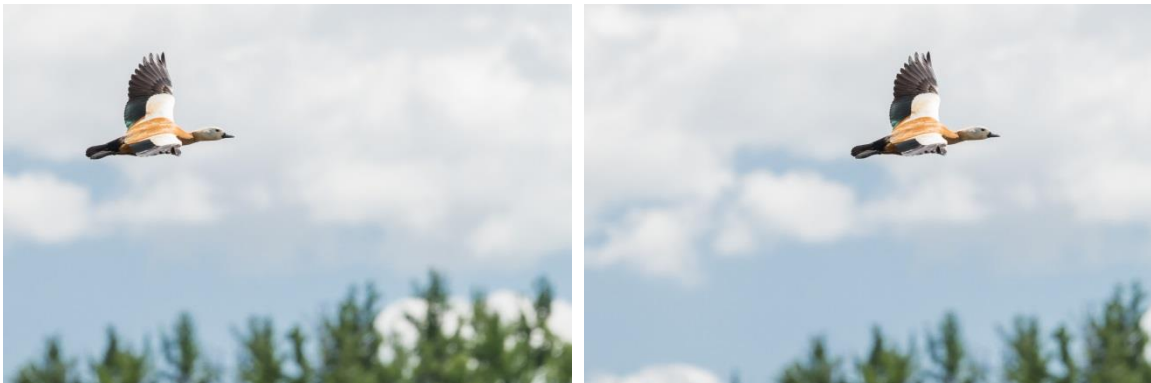
Lorsqu'on photographie un être vivant qui regarde de côté, il est souvent préférable de décentrer le sujet et de laisser de l'espace devant le regard. Celui qui regardera aura tendance à regarder là où le



regard est dirigé ; ce qui n'est pas possible si l'image s'arrête. Le sens du regard donnera aussi une émotion à l'image : un regard à droite (dans le sens de la lecture) sera positif, heureux, optimiste alors qu'un regard à gauche sera plutôt nostalgique, triste ou mélancolique.

### 5.3.5. Le Mouvement

Comme pour le regard, le mouvement doit être représenté de manière à laisser la place au sujet de se déplacer. L'œil aura tendance à vouloir voir où le sujet en mouvement se déplacera. Il faut donc laisser de l'espace devant le sujet qui se déplace, comme sur l'image de gauche ci-dessous.



### 5.3.6. L'Horizon Fuyant

Lorsqu'on photographie un paysage avec une ligne d'horizon bien marquée, comme par exemple la mer, on ne tient pas toujours son appareil droit. Même si on peut choisir de faire une image « penchée », cela peut s'avérer très déséquilibré si l'horizon penche légèrement ; on dit alors que « l'horizon est fuyant ». Cela donne l'impression que tout ce qui se trouve sur l'horizon (ou l'eau dans le cas de la mer) devrait se déverser d'un côté. Cela est aussi valable pour un bâtiment ou tout objet qui devrait avoir une horizontalité ou une verticalité bien définie. Ci-dessous, l'image de gauche est bien équilibrée alors que celle de droite penche ; cette dernière donne envie de tomber à droite.



### 5.3.7. Les Couleurs

L'œil et le cerveau aiment l'équilibre. Et cela ne se réduit pas à des critères géométriques. Ainsi, l'équilibre est aussi recherché pour au niveau des couleurs auxquelles l'œil est sensible. Une image contenant du rouge, du vert et du bleu sera souvent plus esthétique qu'une image ne contenant que deux de ces couleurs par exemple.



### 5.3.8. Les Éléments Parasites

Parfois on ne les remarque pas, parfois on ils nous sautent aux yeux. Mais il faut toujours observer la scène avant de la photographier. Vous êtes en vacances et voyez un joli paysage naturel, vous faites une photo. Une fois à la maison, vous remarquez qu'une voiture ou une poubelle se trouve sur l'image ; la photo est ratée. Alors que si vous l'aviez remarqué dès le début, vous auriez pu faire un pas à gauche pour cacher l'élément derrière un arbre ou un buisson. C'est ce qu'on appelle un « élément parasite ». Il peut s'agir d'un avion, d'une ligne électrique, ou d'un passant que vous n'aviez pas remarqué. En nature, il peut s'agir de promeneurs, typiquement vêtus de couleurs vives comme du rouge, qui ne se voit pas forcément lorsque l'on prend la photo. Une fois la photo à l'écran, dans un paysage tout vert et bleu, ce point rouge saute aux yeux et gâche la photo.

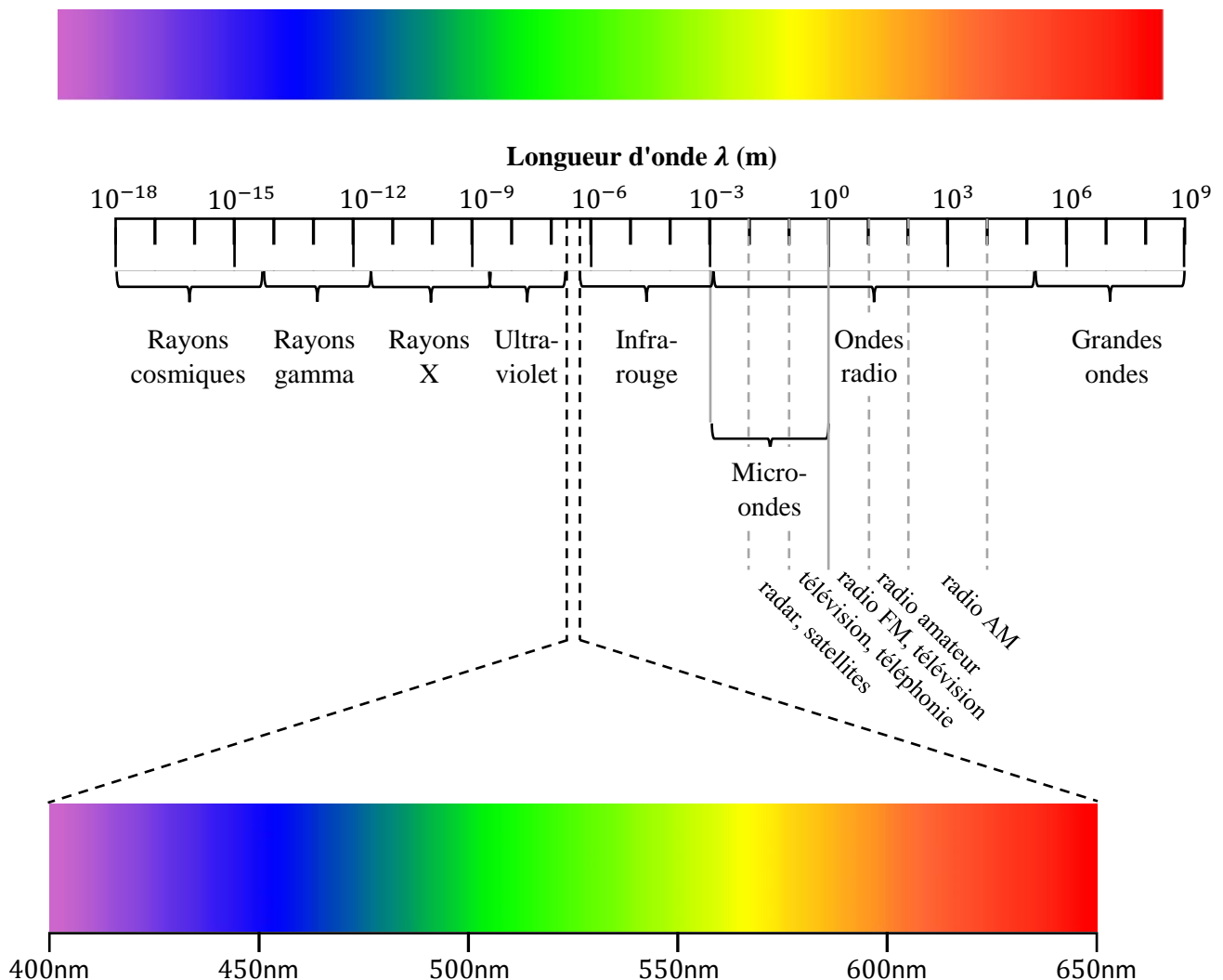


## 6. LES COULEURS

Avant d'aborder les problèmes liés aux couleurs, donc la *colorimétrie*, il est dans un premier temps important de comprendre ce qu'est la lumière. On l'a déjà vu, la lumière peut être abordée sous deux aspects : particule ou onde.

Le premier est un aspect corpusculaire, où il existe une « particule de lumière », que l'on appelle le *photon*. Cette approche ne nous intéresse pas ici ; mais il est important de noter que lorsqu'on aborde des problèmes d'optiques géométriques, comme dans le cas des lentilles, où tous les rayons se déplacent en ligne droite, la notion de photon est implicite.

Le second aspect est ondulatoire ; la lumière est une onde, ou un rayonnement. De ce fait, il faut caractériser ce qu'on appelle «la lumière» par sa fréquence ou sa longueur d'onde. C'est cette approche qui va principalement nous intéresser ici. C'est aussi cette approche qui est à la base des phénomènes de diffraction (que nous verrons plus tard).



La lumière blanche que l'on a sur Terre est en fait une superposition de toutes ces couleurs. Autrement dit, un grand nombre d'ondes nous arrivent dessus, chacune ayant une longueur d'onde déterminée, donc une certaine couleur. Lorsqu'elles arrivent toutes mélangées, on voit du blanc.

Comme longueurs d'onde « de référence », on peut retenir le rouge à environ 660nm, le vert à 550nm et le bleu à 400nm. Au-delà de ce spectre, donc de ces valeurs, on trouve des ondes où l'œil n'est pas sensible : les *ultraviolets* et les *infrarouges* pour les plus proches.

## 6.1. LES SYSTÈMES COLORIMÉTRIQUES

La reproduction de tout le spectre de la couleur sensible à l'œil humain (de 400 nm à 700 nm) se fait par le mélange de trois couleurs fondamentales, les cellules sensibles de l'œil étant composées de trois types de cellules (cônes) différents.

Les couleurs sont très difficiles à décrire et à quantifier. Tout le monde apprend à l'école que les trois couleurs "fondamentales" sont le bleu, le jaune et le rouge. Malheureusement, la réalité physique est légèrement différente, et plus complexe...

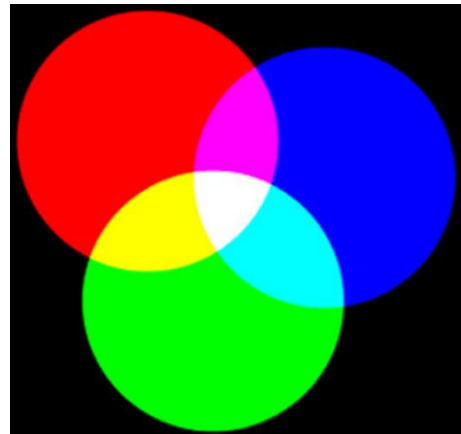
Il faut déjà différencier deux genres de couleurs que l'on peut percevoir ou utiliser : celles que l'on voit car elles sont émises par une source de lumière, comme par exemple une télévision, et celles que l'on voit par réflexion d'une lumière (blanche) sur une surface (colorée), comme par exemple une peinture. A ces deux "genres" de couleur correspondent deux systèmes de couleur : le *système additif* et le *système soustractif*.

### 6.1.1. Le Système Additif

*Définition:* Deux couleurs sont complémentaires lorsque leur addition donne le blanc.

Ce système est celui que tout le monde utilise, sans pour autant le connaître. Lorsqu'on « additionne » les couleurs, on obtient du blanc. Dans ce système, qui concerne les écrans ou la photographie (prise de vue), on superpose des couleurs différentes. En superposant plusieurs couleurs, il y a de moins en moins de couleurs qui ne sont plus représentées et on obtient donc du blanc.

Deux couleurs sont dites « complémentaires » lorsque leur addition donne le blanc. Dans ce système, les trois couleurs fondamentales sont le rouge, le vert et le bleu. Les trois couleurs complémentaires sont alors simplement la superposition de deux de ces trois couleurs.



- La couleur complémentaire du rouge est le cyan, obtenu par superposition du vert et du bleu.
- La couleur complémentaire du vert est le magenta, obtenu par superposition du rouge et du bleu.
- La couleur complémentaire du bleu est le jaune, obtenu par superposition du rouge et du vert.

On retrouve ainsi le système connu par les webmasters et tous les photographes ou graphistes soucieux de voir leur travail rendu avec fidélité sur un écran d'ordinateur : le système RVB

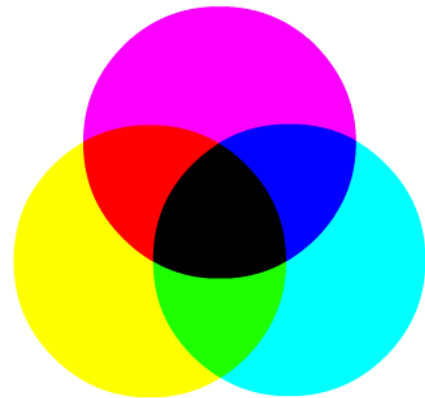
Les trois couleurs fondamentales sont émises par des sources indépendantes (les pixels). Dans ce système, les trois couleurs fondamentales sont le rouge, le vert et le bleu. Ces trois couleurs superposées donnent alors du blanc.

### 6.1.2. Le Système Soustractif

*Définition:* Deux couleurs sont complémentaires lorsque leur addition donne le noir.

Ce système est celui que tout le monde connaît. C'est celui de dessin et de la peinture. Lorsqu'on dépose de la peinture sur une surface, on dépose une substance qui va absorber certaines couleurs. Si on peint en rouge, la peinture mise va absorber toutes les couleurs sauf le rouge qui sera réfléchi ; raison pour laquelle on la voit rouge. Ainsi, on retire, ou soustrait, des couleurs à la lumière blanche qui illumine la surface. Si on dépose les trois couleurs en même temps, toutes les couleurs sont soustraites, aucune lumière ou couleur n'est réfléchi, on obtient du noir.

Deux couleurs sont dites « complémentaires » lorsque leur addition donne le noir. Dans ce système, les trois couleurs fondamentales sont le cyan, le magenta et le jaune. Les trois couleurs complémentaires sont alors simplement la superposition de deux de ces trois couleurs.



- La couleur complémentaire du cyan est le rouge, obtenu par mélange du magenta et du jaune.
- La couleur complémentaire du magenta est le vert, obtenu par mélange du cyan et du jaune.
- La couleur complémentaire du jaune est le bleu, obtenu par mélange du cyan et du magenta.

Dans ce système, les trois couleurs fondamentales sont le magenta, le jaune et le cyan. Ces trois couleurs superposées donnent alors du noir. Dans ce cas, une couleur a la propriété d'absorber la couleur complémentaire.

### 6.1.3. Le Deux Systèmes

On remarque que ces deux systèmes sont complémentaires l'un avec l'autre : les couleurs de l'un sont les couleurs complémentaires de l'autre. Ce qui explique leur choix et leur existence. On voit surtout qu'il ne s'agit pas d'un choix d'utiliser l'un ou l'autre, mais bien d'une contrainte, en fonction du type « d'appareil » utilisé, du type de couleur que l'on veut rendre.

On comprend maintenant un peu mieux un des grands dilemmes de la photographie numérique : le choix du système de couleur sur lequel on travaille. Entre la prise de vue qui "fonctionne" en système RVB (*Rouge-Vert-Bleu* donc *additif*), le post-traitement à l'ordinateur qui fonctionne aussi en système RVB, et le rendu sur papier qui concerne le système CMJN (*Cyan-Magenta-Jaune-Noir* donc *soustractif*, le Noir étant ajouté car en réalité le mélange des trois couleurs seules ne donner pas un noir assez



profond), il est impossible d'éviter à un moment ou à un autre, le changement de système, qui transforme quelque peu le rendu de l'image colorée.

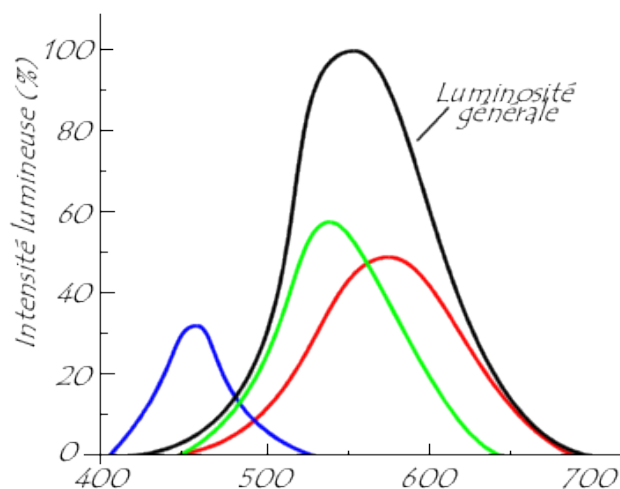
## 6.2. L'ŒIL EST LES COULEURS

L'œil utilise le système RVB. Ce qui explique non seulement l'existence de ce système et le choix de ces couleurs, mais aussi le nombre de couleurs dites fondamentales. L'œil possède deux types de récepteurs de lumières : les cônes et les bâtonnets. Les premiers sont sensibles à la couleur et sont plus utiles la journée, lorsque la lumière est intense. Les seconds sont sensibles à la luminance, donc à l'intensité lumineuse, sans distinction des couleurs, et sont plus utiles dans des conditions de faibles lumières. Les bâtonnets sont plus sensibles que les cônes ; ils prennent donc le dessus en faible lumière. Ne dit-ton pas que « *la nuit tous les chats sont gris* » ?

Comme il existe deux types de cellules photosensibles dans l'œil, ce dernier ne se comporte pas de la même façon lorsque l'une ou l'autre de ces cellules est mise à contribution.

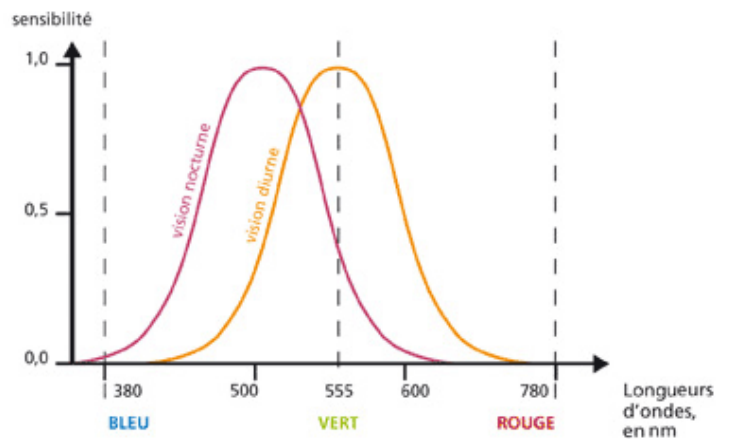
### 6.2.1. Vision Photopique (Diurne)

Les courbes de la figure ci-contre montrent les sensibilités de chacun des cônes ainsi que la luminosité générale de l'œil. On y voit très bien que la couleur à laquelle l'œil est la plus sensible se trouve dans le vert-jaune ( $\lambda = 555\text{nm}$ ). C'est pour cette raison que ces couleurs nous paraissent plus lumineuses et sont donc considérées comme couleurs chaudes dans le monde artistique. D'un point de vue physique, ces couleurs sont des couleurs « froides », donc de faible énergie, par rapport au bleu ou au violet. On y distingue aussi la perte de sensibilité aux extrémités, c'est à dire dans les violets et les bleus ainsi que dans les rouges. On appelle ce mode de vision la *vision photopique*.



### 6.2.2. Vision Scotopique (Nocturne)

La nuit, la vision est principalement assurée par les bâtonnets, bien plus sensibles et nombreux (environ 120 millions de bâtonnets par œil, contre 5 millions de cônes). En contrepartie, on ne voit plus que les contrastes (donc en noir et blanc) et le maximum de sensibilité de l'œil se décale légèrement vers le vert-bleu ( $\lambda = 555\text{nm}$ ). On voit donc que la nuit, l'œil sera plus sensible dans les bleus, alors que le jour il est plus sensible dans jaunes-rouges.



On comprend mieux pourquoi la nuit les couleurs bleutées sont les plus visibles. On appelle ce mode de vision la *vision scotopique*.

### 6.2.3. Niveaux d'Éclairement

Les cônes perçoivent correctement des intensités lumineuses allant de 1 lux au plus faible à environ 10'000 lux. Cela signifie approximativement que les cônes ne voient juste pas (ou voient tout juste) correctement par nuit de pleine Lune et qu'ils sont rapidement saturés, éblouis en plein jour. On parle d'éblouissement dès quelques dizaines de milliers de lux. Des lésions rétiniennes peuvent intervenir à environ 1'00'000 lux.

Les bâtonnets quant à eux fonctionnent correctement entre  $10^{-5}$  lux et 1 lux. La valeur de  $10^{-5}$  lux représente le seuil minimal de vision nocturne. Dans ce cas, l'œil détecte de la lumière à partir d'environ trois photons. Les bâtonnets ne sont plus actifs au-delà du lux.

Dans la zone entre quelques millièmes de lux et un lux, on parle de vision *mésopique*. Cela signifie que les cônes et les bâtonnets travaillent ensemble.

### 6.2.4. L'Effet Purkinje

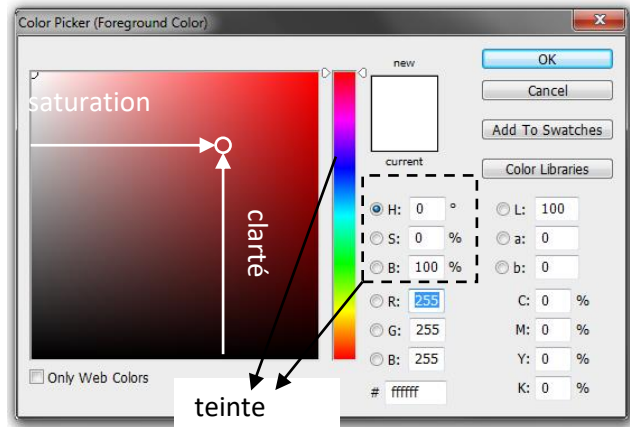
Le fait qu'il existe un décalage du maximum de sensibilité entre la vision photopique et scotopique est connu sous le nom d'*effet Purkinje*. De jour, une couleur jaune-rouge nous paraîtra plus lumineuse qu'un bleu, alors que de nuit ce sera l'inverse. Purkinje, anatomiste et neurophysiologiste tchèque du XIX<sup>ème</sup> siècle a mis cela en évidence. Cette différence de sensibilité est



exploitée pratiquement. Par exemple, les signaux d'arrêts placés proche des aiguillages des gares sont violets, afin d'être mieux perceptibles de nuit.

### 6.3. « CLASSEMENT » DES COULEURS

Comment classer des couleurs ? Afin de pouvoir les décrire, il est important de savoir sur quels critères ! Un des classements les plus naturels qui se fait se retrouve sur les logiciels de traitement d'images. Si on devait classer un tas de pièces colorées, on commencerait par regrouper les mêmes couleurs ; on mettrait donc les mêmes « *teintes* » ensembles. On regarderait ensuite, au sein d'une même teinte, lesquels sont par exemple plus claires ou plus



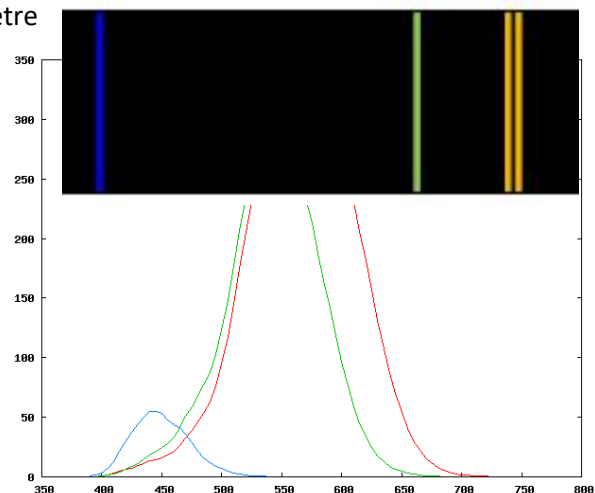
foncées ; on les classerait donc par « *clarté* ». Puis, si là encore il nous reste des pièces ensembles qui ne sont pourtant pas les mêmes, on pourrait encore imaginer que certaines sont plus pastels alors que d'autres sont plus saturées ; on les classerait alors par « *saturation* ». Ces trois critères – *clarté*, *teinte*, *saturation* – reviendront plus tard dans la discussion.

### 6.4. NOTIONS DE PHOTOMÉTRIE ET DE COLORIMÉTRIE

La description des couleurs est une chose ; arriver à reproduire une couleur et, encore plus difficile, reproduire une couleur telle que l'œil la perçoit en est une autre !

La *photométrie* est l'étude de la lumière, par rapport à la perception de l'œil humain. La *colorimétrie* est une technique de mesure et d'analyse de la couleur, élaborée principalement par Maxwell et basée sur le système *RVB* pour « Rouge-Vert-Bleu », *RGB* par la suite pour « Red-Green-Blue »). Nous allons ici un peu mélanger ces deux notions.

Pour décrire ou reproduire une couleur, il faut être capable de décrire une couleur à partir de trois couleurs fondamentales ; mais on ne maîtrise que peu le spectre d'une source lumineuse, donc de l'émission en fonction de la longueur d'onde. Il a donc été choisi de définir trois couleurs fondamentales monochromatiques. Les lampes à mercure émettent un spectre très discontinu, avec entre autres, un pic d'émission à 435nm (bleu), un autre à 545nm (vert) et deux autres proches autour des 578nm (rouge). Il est intéressant de préciser que le rouge tel qu'on se le représente



généralement n'est pas une couleur monochromatique, mais un composé de différentes longueurs d'onde. On remarque que le pic du « rouge » dans la lampe à mercure est « peu rouge » et très proche du vert. C'est pourquoi il a été choisi, arbitrairement, de fixer un de référence à 700nm. Le bleu et le vert de référence sont donc ceux de la lampe à mercure. Cette décision pose les bases du système *RVB*.

On l'a vu, en vision diurne (*photopique*), l'œil a trois capteurs – les *cônes* – qui perçoivent des couleurs de manière différentes. La perception et la sensibilité de ces cônes est représentée sur le graphique ci-contre, où le « L-cone » représente le cône rouge (courbe de droite), le « M-cone » le cône vert (courbe du centre) et le « S-cone » représente le cône bleu (courbe de gauche). Sur ce graphe, il est représenté l'excitation du cône pour un signal d'une énergie donnée.

On note chacune de ces courbes :  $R(\lambda)$  ;  $G(\lambda)$  et  $B(\lambda)$ .

Ainsi, si je voulais décrire mon bleu de référence, il « suffit » de lire sur les courbes les valeurs de chacune de ces courbes ; donc :

$$R(\lambda = 435\text{nm}) = 11 \quad ; \quad G(\lambda = 435\text{nm}) = 14 \quad ; \quad B(\lambda = 435\text{nm}) = 50$$

Faisons de même pour les deux autres couleurs de références :

$$R(\lambda = 545\text{nm}) = 300 \quad ; \quad G(\lambda = 545\text{nm}) = 286 \quad ; \quad B(\lambda = 545\text{nm}) = 0$$

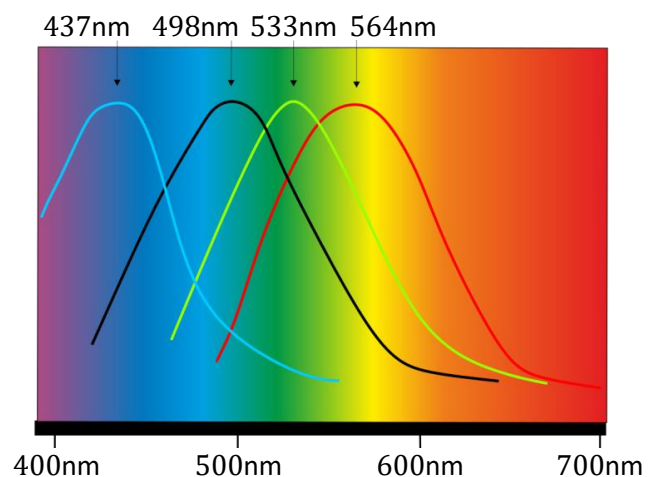
et

$$R(\lambda = 700\text{nm}) = 2 \quad ; \quad G(\lambda = 700\text{nm}) = 0 \quad ; \quad B(\lambda = 700\text{nm}) = 0$$

On peut retenir deux choses de cet exemple :

1. La première, et nous y reviendront plus tard, est que le ressenti total de l'œil, donc la somme de ces trois valeurs, n'est pas constant ; autrement dit, certaines de ces couleurs, à puissance d'émission égale, nous paraîtront plus claires ou plus foncées. On le voit, en vision diurne, l'œil est plus sensible au rouge-vert qu'au bleu. On pourrait également représenter ce même diagramme en normalisant la hauteur de ces courbes ; c'est ce que montre la figure suivante. Le trait noir représente la sensibilité des bâtonnets.

La sensibilité de l'œil est mesurée sur un angle de vue de 10°. Son efficacité maximale a été fixée à 683.6 lm/w pour une longueur d'onde de 557nm (vert), son maximum de sensibilité. Donc avec un watt de puissance lumineuse, on ne pourra obtenir, dans le meilleur des cas, une efficacité lumineuse de 683.6lm.



2. La seconde est qu'on peut ainsi calculer pour l'œil sa sensibilité à une source du moment que l'on connaît le spectre d'émission de la source. Donc, la sensibilité de l'œil peut alors être calculée pour chacun des cônes :

$$L_i = \int_{\lambda_{min}}^{\lambda_{max}} V_i(\lambda) \cdot I(\lambda) \cdot d\lambda$$

où  $I(\lambda)$  est le flux de puissance lumineuse (donc le spectre de la source),  $V_i(\lambda)$  la sensibilité spectrale de l'œil qui prend donc les « valeurs »  $B(\lambda)$ ,  $G(\lambda)$  et  $R(\lambda)$ . L'intégrale (donc la somme pour chaque longueur d'onde) se fait entre  $\lambda_{min} = 400nm$  et  $\lambda_{max} = 750nm$  par le fait que l'œil n'est plus sensible au-delà de ces valeurs.

On définit alors les *coefficients colorimétriques*  $R$ ,  $G$  et  $B$  de la manière suivante

$$R = \int_{\lambda_{min}}^{\lambda_{max}} I(\lambda) \cdot R(\lambda) \cdot d\lambda \quad ; \quad G = \int_{\lambda_{min}}^{\lambda_{max}} I(\lambda) \cdot G(\lambda) \cdot d\lambda \quad ; \quad B = \int_{\lambda_{min}}^{\lambda_{max}} I(\lambda) \cdot B(\lambda) \cdot d\lambda$$

Un ressenti de couleur  $L$  ressentie s'exprime par la superposition de ces trois coefficients :

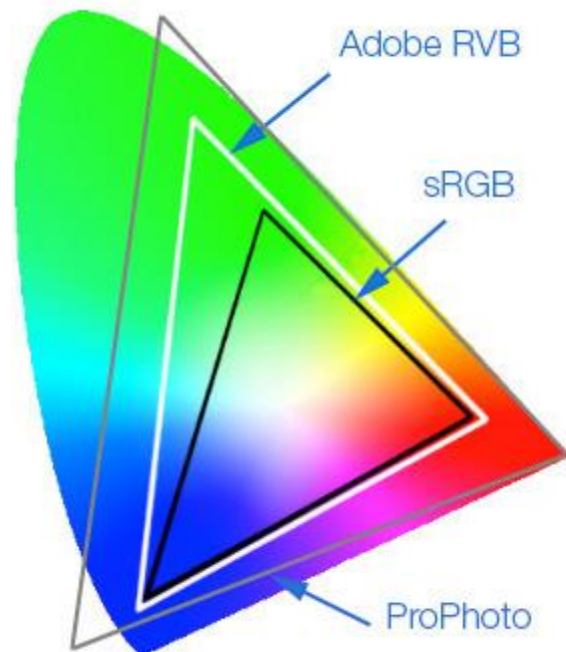
$$L = \sum_i^3 L_i = R + G + B$$

Le ressenti de couleur est donc simplement la superposition des signaux reçus par chaque cône.

A priori, tout semble relativement simple finalement...

## 6.5. LES ESPACES COLORIMÉTRIQUES DE LA CIE

Un « espace couleurs » est un ensemble de couleurs, souvent appelé gamut. Il représente donc toutes les couleurs reproductibles par le support, que ce soit un écran, une imprimante, un appareil photo ou même l'œil. Ces espaces couleurs sont en général liés à un appareil et on appelle alors ces espaces le **gamut**. Si un appareil a un grand gamut, cela veut dire qu'il permet de retranscrire une grande gamme de couleurs. Mais pour « coder » les couleurs, il est nécessaire d'avoir un outil théorique ; c'est ce qu'on appelle les **espaces colorimétriques** (à ne pas confondre avec les « espaces couleurs » !). Les plus connus sont sRGB, AdobeRGB ou ProPhoto. Mais il en existe un grand nombre : les RVB, CMJN,  $L^*a^*b^*$ , CIE XYZ,  $L^*u^*v^*$ ,  $L^*C^*h$ , ... Le plus grand de tous ces espaces est celui qui représente la vision de l'œil humain : le  $L^*a^*b^*$ . Ainsi, tous les autres espaces

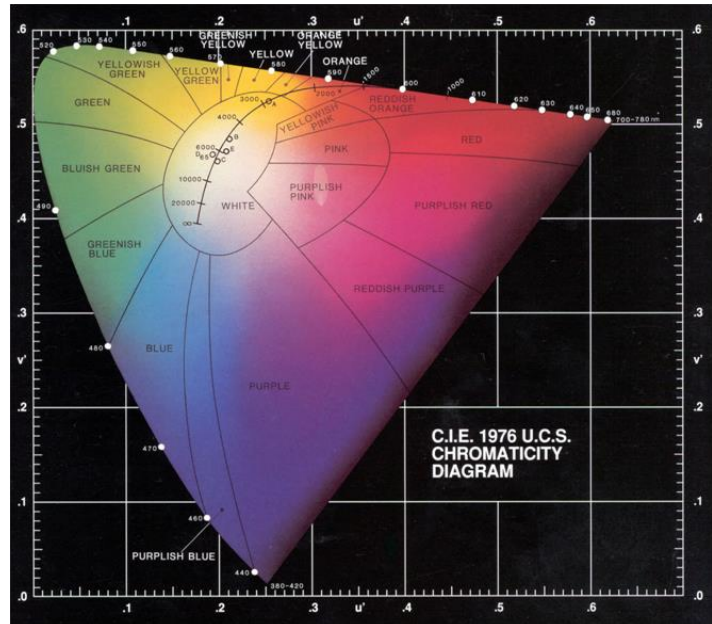


sont plus petits que le  $L^*a^*b^*$ . Les deux principales différences entre un espace et l'autre sont d'une part la saturation des couleurs et d'autre part le « détail » de couleur (on parlera plus tard de « distance colorimétrique »). Lorsque ces espaces colorimétriques dépendent d'un matériel, comme un écran par exemple, on utilise alors « profil ICC » (International Color Consortium). Ces profils ICC contiennent donc l'information de la couleur de l'appareil source et les convertit vers un espace colorimétrique

choisi, comme un  $L^*a^*b^*$ . Il agit donc comme un traducteur entre deux manières de coder l'information de la couleur.

Un *espace colorimétrique*, ou *espace de couleur*, est un moyen de coder la couleur en attribuant un nombre à chaque couleur. L'idée est donc, ayant défini les trois longueurs d'onde de référence, de recréer un ressenti de couleur correspondant à l'excitation des cônes. C'est donc en quelque sorte l'opération inverse de ce que nous venons de faire.

D'un point de vue numérique, les couleurs sont en générales codées sur 8 bits, bien qu'actuellement les appareils photo permettent couramment de faire du RAW en 14 voire 16 bits. Cela signifie, typiquement pour écran en 8 bits, que pour chaque valeur  $R$ ,  $V$  ou  $B$ , on a  $2^8 = 256$  niveaux différents. C'est pourquoi sur les logiciels de traitement ou de création d'image, on voit souvent apparaître un curseur avec une variable allant de 0 à 255, soient 256 niveaux.



En fonction des besoins (impression, rendu sur un écran, prise de vue, etc), un espace permet de distinguer des couleurs plus ou moins éloignées les unes des autres.

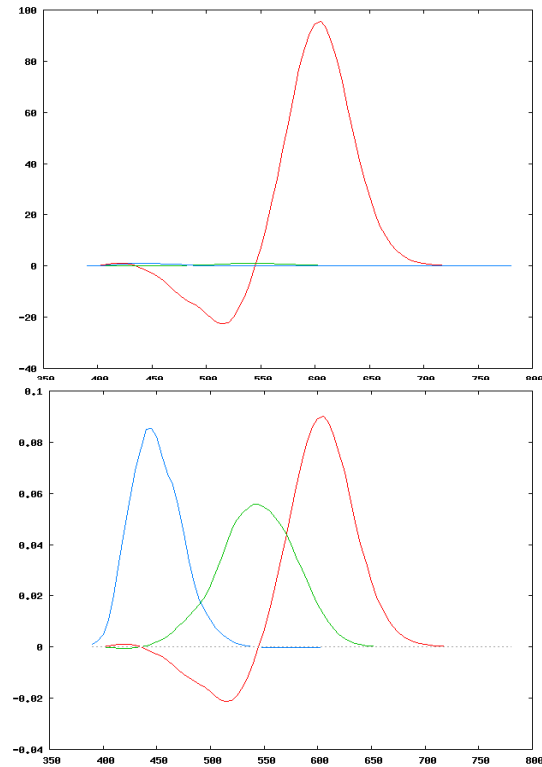
Que ce soit à l'écran ou sur papier, les possibilités de rendu des couleurs ne permettent pas de reproduire toutes les couleurs visibles. Il a alors fallu définir ce qu'on appelle un *profil de couleur*, qui définit les possibilités qu'ont le support en question de rendre les couleurs. L'ensemble des couleurs que l'espace est capable de reproduire est appelé le « *gamut* ». Ce terme est important car il décrit si l'espace est performant ou pas en termes de reproduction des couleurs. Il ne faut pas le confondre avec le terme de « *gamma* », qui traduit en quelque sorte le contraste rendu par le support qui capte ou affiche l'image, autrement dit du capteur ou d'un écran (ou d'une pellicule ou d'un scanner). Le gamma représente en réalité la *fonction* (au sens mathématique) qui relie une lumière émise à la réponse du capteur, du film ou de l'œil. Le *gamma* standard d'un écran est de 2.2.

Afin de pouvoir jongler entre ces espaces et ces profils de couleurs, il a fallu définir un standard. Ce travail a été fait par l'«*International Color Consortium*», à travers ce qui a été appelé le *profil ICC*.

### 6.5.1. L'Espace RVB (RGB)

Sur la base de ce que nous avons vu plus haut, on peut alors déterminer l'intensité à fournir aux trois couleurs de références (435.8nm, 546.1nm et 700nm) afin d'obtenir une sensation de couleur voulue par les cônes. Le résultat nous donne les courbes suivantes, que l'on nomme  $r(\lambda)$ ,  $g(\lambda)$  et  $b(\lambda)$ .

On le voit, le rouge doit être stimulé de manière bien plus intense que les autres, ce qui n'est pas une grande surprise puisqu'à cette longueur d'onde de l'œil n'a quasiment plus aucune sensibilité. C'est pourquoi cette longueur d'onde n'est généralement pas utilisée comme couleur de référence dans de « vrais » appareils comme les écrans ou les appareils photo. Pour mieux distinguer l'allure de ces courbes, on peut les normaliser de manière arbitraire, que l'on nomme  $r'(\lambda)$ ,  $g'(\lambda)$  et  $b'(\lambda)$ .



Ces trois courbes sont les « fonctions d'équivalence de couleurs », « *color matching functions* ». Ce sont ces dernières qui sont utilisées pour déterminer si une couleur aura un ressenti colorimétrique équivalent ou non, par les relations :

$$R = \int_{\lambda_{min}}^{\lambda_{max}} I(\lambda) \cdot r'(\lambda) \cdot d\lambda \quad ; \quad G = \int_{\lambda_{min}}^{\lambda_{max}} I(\lambda) \cdot g'(\lambda) \cdot d\lambda \quad ; \quad B = \int_{\lambda_{min}}^{\lambda_{max}} I(\lambda) \cdot b'(\lambda) \cdot d\lambda$$

Donc, du moment que les valeurs R, G et B sont les mêmes (pas « entre elles », mais « entre deux situations »), cela signifie que l'excitation de nos cônes est équivalente et donc que la couleur nous est indiscernable, et ce même si les fonctions spectrales sont différentes (cela viendrait donc du fait que le flux de puissance lumineuse  $I$  est différent et nous en reparlerons en parlant de métamérisme).

Le grand défaut et problème de cette description est bien sûr au niveau du rouge pour une longueur d'onde d'environ 510nm et valeurs voisines : comment fournir une « excitation négative » ?! Ce problème sera repris plus tard.

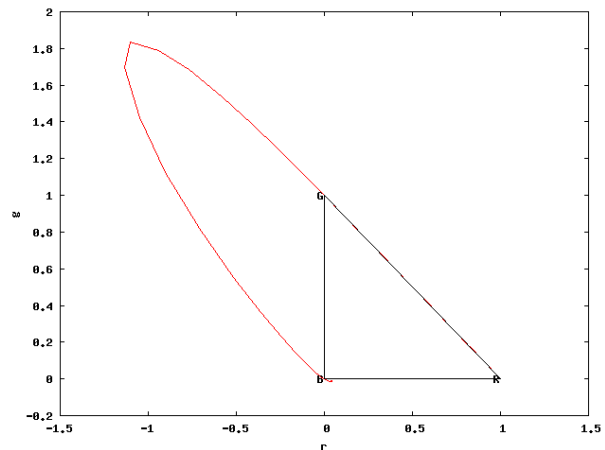
Il est aussi possible de décrire ces courbes de manières relatives ; donc en les normalisant sur une intensité lumineuse totale relative. On définit alors :

$$\bar{r}(\lambda) = \frac{r'(\lambda)}{r'(\lambda) + g'(\lambda) + b'(\lambda)} \quad ; \quad \bar{g}(\lambda) = \frac{g'(\lambda)}{r'(\lambda) + g'(\lambda) + b'(\lambda)} \quad ; \quad \bar{b}(\lambda) = \frac{b'(\lambda)}{r'(\lambda) + g'(\lambda) + b'(\lambda)}$$

de manière à remplir la condition :  $\bar{r}(\lambda) + \bar{g}(\lambda) + \bar{b}(\lambda) = 1$ .

L'intérêt de cette représentation est qu'une couleur est définie sur un couple de deux valeurs, par exemple  $\bar{r}(\lambda)$  et  $\bar{g}(\lambda)$ . Le désavantage est que toute information de luminosité, de clarté est perdue.

En représentant alors graphiquement sur un axe par exemple  $\bar{g}(\lambda)$  en fonction de  $\bar{r}(\lambda)$ , on obtient les classiques « *diagrammes trichromatiques* ». L'enveloppe ce graphe est alors représenté sur la figure ci-contre ; on se rend donc vite compte qu'il est impossible de représenter toutes les couleurs avec trois couleurs primaires, puisque les valeurs « accessibles » se trouvent dans la partie du graphe où les coefficients sont positifs !



Il n'est donc pas possible de calculer ces coefficients. Mais on peut s'approcher de la « meilleure » solution, en minimisant l'écart au signal que l'on devrait obtenir. En effet, si un ressenti à obtenir se calcule théoriquement par la relation :

$$L = \int_{\lambda_{min}}^{\lambda_{max}} L(\lambda) \cdot I(\lambda) \cdot d\lambda$$

Il « suffit » alors de minimiser ce rendu à ceux que ces paramètres nous donneraient, en les pondérant par des coefficients  $a$ ,  $b$  et  $c$ . Il faut donc minimiser :

$$\int_{\lambda_{min}}^{\lambda_{max}} [L(\lambda) - a \cdot \bar{r}(\lambda) - b \cdot \bar{g}(\lambda) - c \cdot \bar{b}(\lambda)] \cdot I(\lambda) \cdot d\lambda$$

On trouve alors comme résultat :

$$a = 0.176966 \quad ; \quad b = 0.812398 \quad ; \quad c = 0.010636$$

Ces valeurs sont bien sûres elles-aussi normalisées de manière à ce que leur somme donne 1.

Quelle interprétation donner ? Celui donné par la CIE-1931 : avec les trois longueurs d'onde référence choisies, la couleur rouge représente 18% de la luminosité, le vert 81% et le bleu 1% !

En conclusion, cet espace est certainement le plus utilisé, puisqu'il est celui par défaut de tout appareil photo et de tout logiciel de traitement ou création d'image. Le choix de cet espace est simple : il est le même que celui qu'utilise notre œil. Malheureusement, comme on l'a vu, sa définition n'est pas si simple.

De plus, il reste encore un « choix » : définir le blanc (qui n'est pas unique comme on le voit sur le diagramme trichromatique). Par exemple, les différents systèmes de télévisions (*PAL, SECAM, NTSC*) n'utilisent pas les mêmes références.

Il faut aussi gérer ou « jongler » entre les différents espaces créés comme le *sRVB* ou l'*AdobeRVB*, entre autre.

Mais le principal problème de l'espace *RVB* est, comme on l'a vu, les valeurs des fonctions qui comportent des parties négatives. Ce qui veut dire qu'il est impossible de créer certaines couleurs dans le système additif. La CIE a créé un autre espace pour contrer ce problème : l'espace *CIE XYZ*.

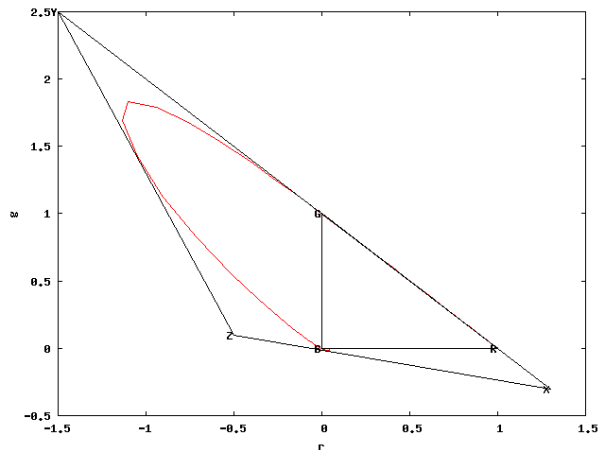


### 6.5.2. L'Espace CIE XYZ

Cet espace est basé sur le même principe que le *RVB*, sauf que pour éviter d'obtenir des valeurs négatives dans la valeur des fonctions, les trois couleurs de références ont été choisies dans une partie non visible du spectre, comme on peut le voir dans la figure ci-contre.

Ainsi, le congrès de la *CIE* en 1931 a fixé plusieurs conditions pour la création de cet espace : le principe de superposition utilisé plus haut devait

rester utilisable, le rapport des intensités relatives entre les couleurs devaient rester identiques, une de ses fonctions (la fonction  $Y(\lambda)$ ) devait être égale à la luminance de l'œil, toutes les valeurs devaient être positives, un signal d'énergie constante donne les valeurs sur chacun des axes et enfin que le triangle contenant l'ensemble des couleurs doit être le plus petit possible.



Finalement, le passage de l'espace *RVB* à l'espace *XYZ* se fait en effectuant un changement de base linéaire, de la manière suivante :

$$\begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0.490000 & 0.310000 & 0.200000 \\ 0.176966 & 0.812398 & 0.010636 \\ 0.000000 & 0.010000 & 0.990000 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} R \\ V \\ B \end{pmatrix}$$

Ces coefficients (de la matrice) dépendent donc de la définition du blanc de référence. Ainsi, il existe là encore d'autres matrices, puisqu'on peut choisir plusieurs blancs de références différents.

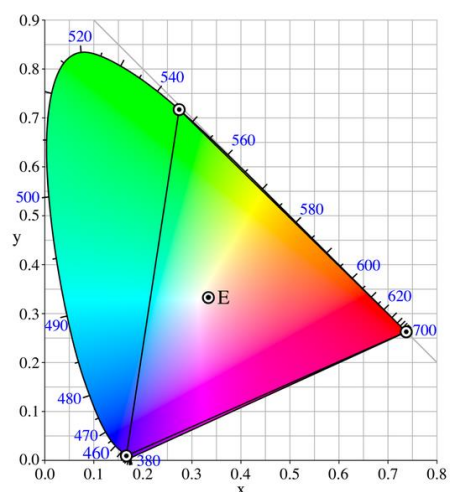
On peut aussi normaliser ces grandeurs par rapport à l'intensité lumineuse globale.

On obtient alors les *coordonnées trichromatiques*  $x$ ,  $y$  et  $z$  telles que  $x + y + z = 1$ .

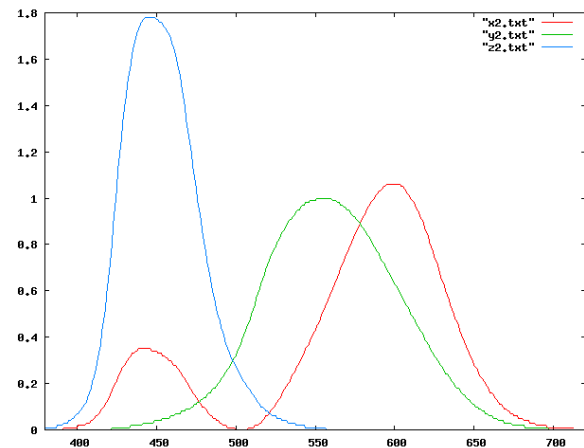
$$\begin{cases} x = \frac{X}{X + Y + Z} \\ y = \frac{Y}{X + Y + Z} \\ z = \frac{Z}{X + Y + Z} \end{cases}$$

A partir de ces coordonnées, étant donné que leur somme est égale à 1, il est toujours possible de représenter les couleurs à partir de seulement deux coordonnées. C'est ainsi qu'on obtient le diagramme trichromatique  $xy$ , illustré dans la figure ci-contre.

On peut encore se demander à quoi ressemblent alors les fonctions de sensibilité de ce modèle.



Un œil humain performant est capable de distinguer peut-être 1 ou 2 millions de couleurs. Il a donc été nécessaire de les représenter mathématiquement. C'est ce que la CIE – la Compagnie Internationale de l'Éclairage – a fait. Étant donné que la couleur est formée de trois couleurs fondamentales, il est nécessaire de les représenter sur un diagramme à trois dimensions. C'est l'espace visible ci-dessous à droite, où l'axe de droite représente les rouges, celui qui va à gauche représente les verts, ceux qui viennent ou s'éloignent de nous représentent les bleus alors que l'axe vertical représente la luminosité ; le sommet « du haut » est donc blanc et celui « du bas » est noir. Mais une manière plus « simple » de représenter la couleur est d'exclure la luminosité. On représente la couleur en répartition relative des trois couleurs par rapport à un 100% de lumière (qui est dans l'absolu une valeur variable). On obtient alors le « *diagramme trichromatique* » ou le « *diagramme de chromacité* » ; c'est la figure de gauche ci-dessous. On a ici représenté une couleur sur deux axes rouge et vert. Si, par exemple, on a un rouge à 0.4 (= 40%) et un vert à 0.5 (=50%), le bleu est obligatoire la part restante, soit 0.1 (=10%). On a ainsi le sommet en vert, l'extrême gauche en rouge et le coin en bas à gauche en bleu. L'intérêt autre de cette représentation, est que la bordure du diagramme représente les couleurs dites « monochromatiques » ou pures ; en d'autres termes, les couleurs de l'arc-en-ciel. On voit d'ailleurs que la bordure est « numérotée », puisqu'elle va de 460nm à 700nm, soit les longueurs d'onde des couleurs visibles par l'œil humain. Ainsi, « au centre », on retrouve les mélanges possibles. Tout au centre, on retrouve les blancs. Pourquoi « les blancs » et pas « le blanc » ? C'est une histoire de **température de couleur**, mais on en parlera dans un autre chapitre.



### 6.5.3. L'Espace CIE xyY

Cet espace est rigoureusement le même que le précédent, mais en valeur relative ( $x$  et  $y$ ) et en conservant la luminosité globale ( $Y$ ).

### 6.5.4. L'Espace CIE L\*u\*v\*

Cet espace devient un standard de la CIE dès 1976. Il découle directement de l'espace XYZ. Son intérêt est qu'il s'agit d'un des espaces se rapprochant le plus du fonctionnement de l'œil humain.

Mathématiquement, après avoir défini un blanc de référence ( $X_0Y_0Z_0$ ) dans l'espace XYZ, il se définit comme suit :

$$L^* = \begin{cases} 116 \cdot \sqrt[3]{\frac{Y}{Y_0}} - 16 & \text{si } \frac{Y}{Y_0} > 0.008856 \\ 903.3 \cdot \frac{Y}{Y_0} & \text{si } \frac{Y}{Y_0} \leq 0.008856 \end{cases}$$

Le choix de la racine cubique a été démontré par des expériences psychophysologiques sur l'œil, et le seuil de 0.008856 afin d'éviter des variations trop violentes proche de zéro. Quant au rapport  $\frac{Y}{Y_0}$ , il permet de simuler l'adaptation de l'œil humain à une intensité lumineuse donnée.

Les deux autres grandeurs,  $u^*$  et  $v^*$ , sont définies par

$$\begin{aligned}u^* &= 13 \cdot L^* \cdot (u' - u'_0) \\v^* &= 13 \cdot L^* \cdot (v' - v'_0)\end{aligned}$$

où les quantités  $u'$ ,  $u'_0$ ,  $v'$  et  $v'_0$  sont définies par :

$$\begin{aligned}u' &= \frac{4X}{X + 15Y + 3Z} \\v' &= \frac{9Y}{X + 15Y + 3Z} \\u'_0 &= \frac{4X_0}{X_0 + 15Y_0 + 3Z_0} \\v'_0 &= \frac{4Y_0}{X_0 + 15Y_0 + 3Z_0}\end{aligned}$$

La valeur  $L^*$  représente la *clareté*, le terme  $u^*$  l'*opposition vert-rouge* et le terme  $v^*$  l'*opposition bleu-jaune*.

On peut également obtenir un diagramme de chromaticité à partir des grandeurs  $u'$  et  $v'$ .

### 6.5.5. L'Espace CIE $L^*a^*b^*$

Cet espace est très proche de l'espace  $L^*u^*v^*$ , mais il est obtenu par des relations non-linéaires, bien qu'il reste inversible. La définition du  $L^*$  est la même que pour l'espace  $L^*u^*v^*$ , mais les composants chromatiques sont définis différemment :

$$\begin{aligned}a^* &= 500 \cdot \left( f\left(\frac{X}{X_0}\right) - f\left(\frac{Y}{Y_0}\right) \right) \\b^* &= 300 \cdot \left( f\left(\frac{Y}{Y_0}\right) - f\left(\frac{Z}{Z_0}\right) \right)\end{aligned}$$

où :

$$f(x) = \begin{cases} \sqrt[3]{x} & \text{si } x > 0.008856 \\ 7.787 \cdot x + \frac{16}{116} & \text{si } x \leq 0.008856 \end{cases}$$

et  $X_0$ ,  $Y_0$  et  $Z_0$  sont les valeurs maximales du système.

Dans cet espace, la grandeur  $L^*$  représente la luminosité, au sens perception et non pas la luminance absolue et varie de 0 (noir) à 100 (blanc). La grandeur  $a^*$  représente aussi l'opposition vert-rouge – les valeurs négatives vers le vert et les valeurs positives vers le rouge - et  $b^*$  l'opposition bleu-jaune – les valeurs négatives vers le bleu et les valeurs positives vers le jaune. Ainsi, les axes  $a^*$  et  $b^*$  ont une orientation presque comparable à celle des teintes élémentaires, mais comme cet espace est obtenu par des transformations non-linéaires, il est impossible de le définir à l'aide d'un diagramme. L'avantage de cet espace est qu'il représente un bon compromis entre l'espace  $RVB$  (écrans, appareils photo, ...) et l'espace  $CMJN$  (imprimantes) qui sera décrit plus tard.

Cet espace permettant de facilement basculer d'un espace à un autre est la base de nombreux logiciels, comme *Photoshop*.

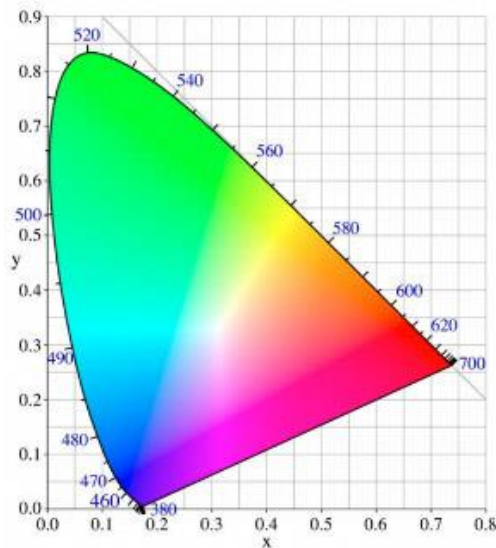
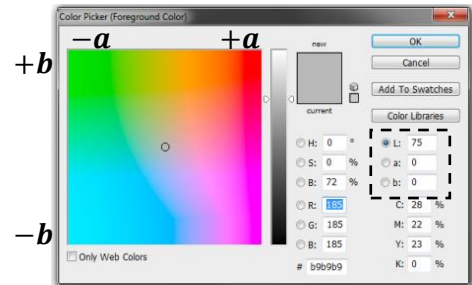
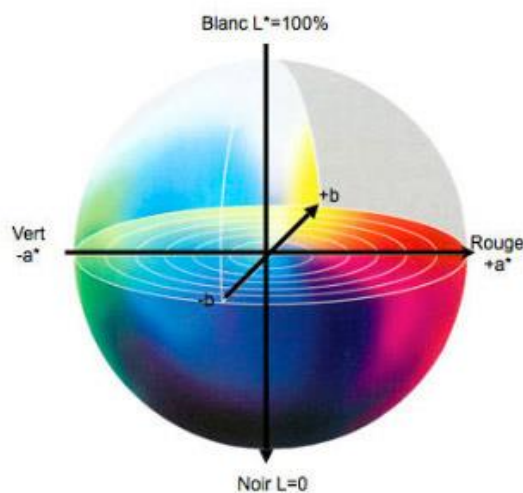


Diagramme de chromaticité



Espace Lab

### 6.5.6. L'Esace CIE $L^*C^*h^*$

Cet espace est obtenu à partir de l'espace  $L^*a^*b^*$  ou  $L^*u^*v^*$ , à choix. Il suffit de les transformer en coordonnées polaires. La luminance est toujours définie de la même manière, la grandeur  $C^*$  représente ici le *chroma* et  $h^*$  la *teinte* (*hue* en anglais). La notion de *chroma* sera discutée un peu en-dessous. On les obtient avec les transformations suivantes :

$$\begin{cases} C_{uv}^* = \sqrt{(u^*)^2 + (v^*)^2} \\ C_{ab}^* = \sqrt{(a^*)^2 + (b^*)^2} \end{cases}$$

et

$$\begin{cases} h_{uv}^* = \arctan\left(\frac{u^*}{v^*}\right) \\ h_{ab}^* = \arctan\left(\frac{a^*}{b^*}\right) \end{cases}$$

Comme cette définition de la teinte ne permet d'obtenir que des angles entre  $-90^\circ$  et  $+90^\circ$ , il faut encore effectuer une petite transformation afin d'obtenir des angles compris entre  $0^\circ$  et  $360^\circ$  :

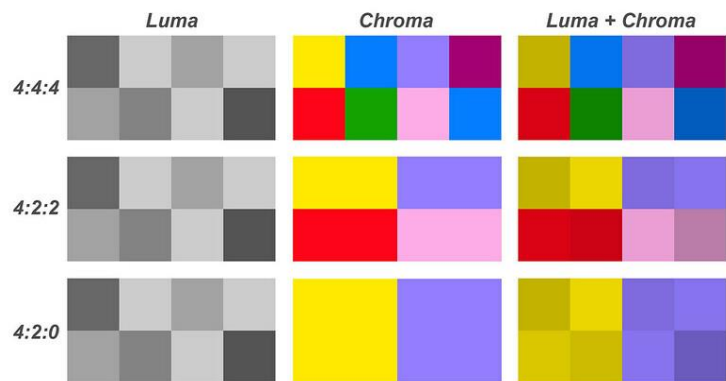
$$\begin{aligned} h_{uv,ab}^* & \quad \text{si } u^*, a^* > 0 \text{ et } v^*, b^* > 0 \\ h_{uv,ab}^* + 180^\circ & \quad \text{si } u^*, a^* < 0 \text{ et } v^*, b^* > 0 \\ h_{uv,ab}^* + 180^\circ & \quad \text{si } u^*, a^* < 0 \text{ et } v^*, b^* < 0 \\ h_{uv,ab}^* + 360^\circ & \quad \text{si } u^*, a^* > 0 \text{ et } v^*, b^* < 0 \end{aligned}$$

Il est possible dans cet espace de définir la saturation  $S_{uv}^*$  (et non  $S_{ab}^*$ , puisque ce dernier ne possède pas de diagramme de chromaticité). Cette notion est définie par le rapport chroma/luminance :

$$S_{uv}^* = \frac{C_{uv}^*}{L^*} = 13 \cdot \sqrt{(u' - u'_0)^2 + (v' - v'_0)^2}$$

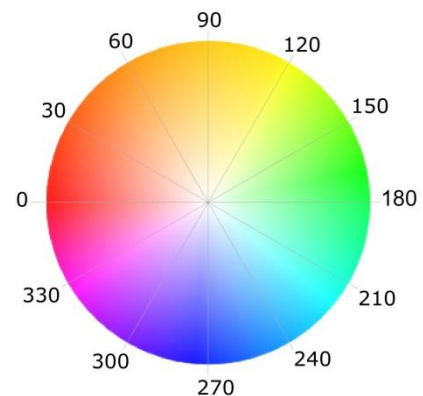
En effet, le *chroma* et la saturation sont relativement liés ; on pourrait même dire que c'est « la même chose ». Mais on remarque qu'en assombrissant une couleur, on augmente sa saturation dans un espace  $L^* a^* b^*$ . Ici, le chroma est conçu pour que l'écart entre deux couleurs soit représentatif de l'écart de perception ; en tenant donc compte de l'impact de la luminance.

Cet espace joue un rôle intéressant pour l'envoi de données ; il est par exemple couramment utilisé pour des scanners haut de gamme ou pour des retransmissions télévisées. Les différents « standards » sont le 4:4:4, le 4:4:2 et le 4:4:0, permettant respectivement aucun gain de compression, un gain d'un facteur deux et un gain d'un facteur 4 de l'information transmise.



### 6.5.7. L'Espace TSL (HSL ou HSV ou HSB)

Cet espace est obtenu à partir des données « intuitives » citées en tout début de chapitre : Teinte – Saturation – Luminance. On remplace parfois cette dernière « variable » par le terme *Valeur*, d'où l'apparition du « V » possible à la place du « L ». En anglais, *Hue – Saturation – Lightness*, ou *Value*, ou *Brightness*. La teinte peut varier entre  $0^\circ$  et  $360^\circ$  en balayant toutes les couleurs ; les deux autres valeurs fluctuent entre 0 et 1.



Cet espace est souvent déconseillé, étant considéré comme très imprécis. Mais son côté très intuitif lui permet de survivre à ses défauts. Le gros défaut de ce système est que les grandeurs proposées ne sont pas additives, donc un bleu 270° et un bleu 270° « mélangé » donnerait, si on les additionnait un vert 180° (équivalent à 540°), ce qui est évidemment faux ! Mais la conversion d'un espace RVB en un tel espace reste aisé.

### 6.5.8. L'Espace CMJN

Cet espace est un espace spécialement créé pour l'impression. Il découle du système soustractif. En effet, ces couleurs sont les couleurs complémentaires de celles du système additif. On peut ainsi passer de l'un à l'autre par les relations :

$$\begin{cases} C = 1 - R \\ M = 1 - V \\ J = 1 - B \end{cases}$$

Les lettres désignent les valeurs relatives définies plus haut, donc  $R = \bar{r}$ ,  $V = \bar{v}$  et  $B = \bar{b}$ . Pour des raisons purement techniques d'impression (et à l'origine aussi pour des raisons de coûts !), ces trois couleurs n'étaient pas suffisantes pour obtenir de bons tons foncés. Ainsi, on a rajouté une quatrième "couleur" : le noir. C'est ainsi qu'on parle souvent de l'espace CMJN (CMYK en anglais, *Cyan, Magenta, Yellow* et *Black*). On définit alors mathématiquement ces quatre nouvelles composantes par les relations

$$K = \min(C, M, J)$$

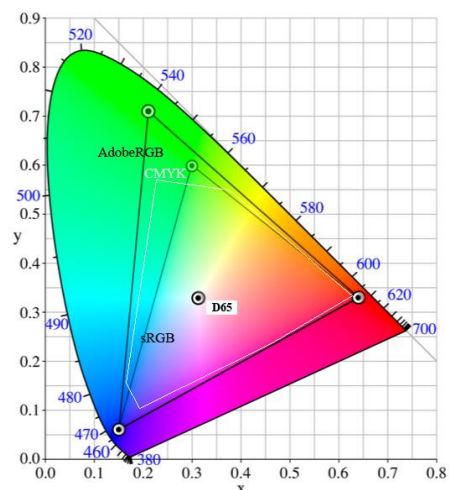
$$C = \frac{1 - R - K}{1 - K}$$

$$M = \frac{1 - V - K}{1 - K}$$

$$J = \frac{1 - B - K}{1 - K}$$

Cette définition modifie évidemment légèrement les valeurs définies ci-dessus. Mais on imagine bien que la définition de cet espace dépend de la définition des facteurs RV B, dont on n'a vu plusieurs variables ! Ainsi, il n'existe pas UN espace CMJN... C'est pourquoi il est important de *calibré* un système ordinateur – appareil – imprimante afin de « traduire » correctement une couleur RVB dans l'espace CMJN.

Comme on peut le voir dans la figure ci-contre, le gamut de cet espace est plus petit que celui du AdobeRVB mais meilleur que celui du sRVB. On imagine bien les difficultés pour un photographe par exemple, qui prend ses photos en AdobeRVB, les traite en RVB ou sRVB et les imprime en CMJN...



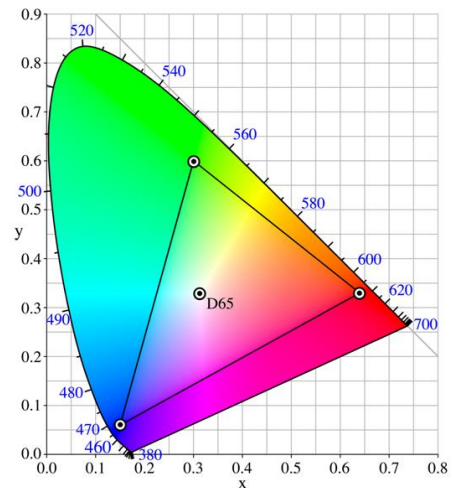
### 6.5.9. Autres Espaces RVB

Cet espace est un espace spécialement créé pour l'impression. Il découle du système soustractif. En effet, ces couleurs sont les couleurs complémentaires de celles du système additif. On peut ainsi passer de l'un à l'autre par les relations :

#### 6.5.9.1. L'Espace sRVB (Rec709)

Cet espace a suivi une petite transformation par rapport au RVB et ces couleurs de références ne sont plus les mêmes. Son gamut est diminué ; autrement dit, il y a moins de couleurs possibles avec cet espace qu'avec le RVB. On remarque surtout que les couleurs de références ne sont plus monochromatiques et que toute la gamme des couleurs monochromatiques ne sont pas accessibles.

Cet espace a été créé pour les écrans et les moniteurs d'ordinateur ; c'est pourquoi on l'appelle parfois « *espace moniteur* ». C'est d'ailleurs le même modèle utilisé sur les télévisions *HDTV*.

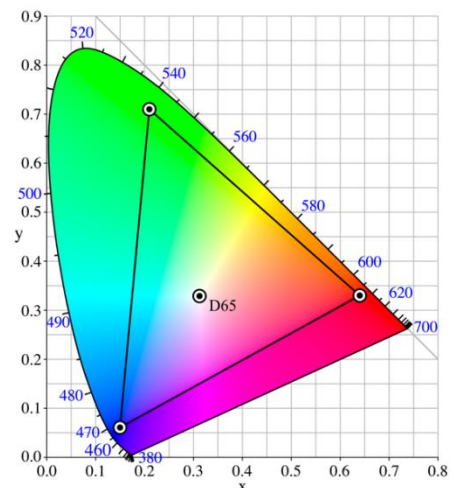


Le point « *D65* » signifie que la température de couleur, autrement dit le choix du blanc, correspond à une température de couleur de 6500K. Ce choix correspond à « *la lumière provenant d'un ciel bleu exposé au Nord, avec environ 3/5 de nuages blancs épars, vers 10h du matin en septembre, sous nos latitudes et sans réflexion parasite* ».

#### 6.5.9.2. Autres AdobeRVB

Cet espace a un gamut plus large que le sRVB. Il est couramment utilisé sur les appareils photo, car il représente un excellent compromis entre le sRVB des écrans et le CMJN des imprimantes.

Son blanc de référence est le même que pour l'espace sRVB, soit le point « *D65* » correspondant à une température de couleur de 6500K.

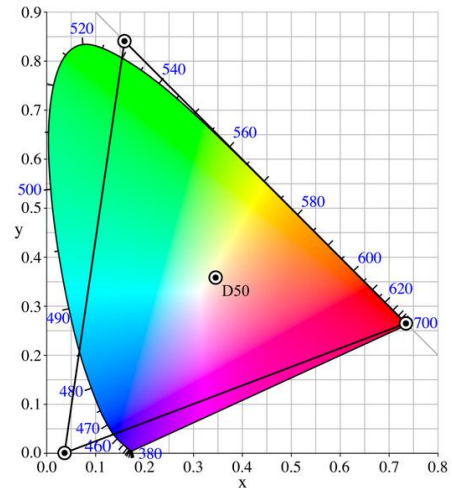


#### 6.5.9.3. Autres AdobeRVB

Cet espace développé par *Kodak* a un point blanc différent et un gamut encore plus grand que celui du Adobe RVB. Il couvre environ 90% des couleurs représentables, mais 13% des couleurs « possibles » n'existent pas, puisqu'elles se trouvent en dehors du diagramme. D'ailleurs, 2 des trois couleurs de référence n'existent pas !

Ces points sont des atouts pour la représentation des couleurs mais représentent aussi un risque pour l'impression, puisqu'un grand nombre de couleurs peuvent devenir « non-imprimable » lors de leur conversion.

Le point « D50 » signifie que sa température de couleur est de 5000K.



### 6.5.10. Distance Chromatique – Distance entre Deux Couleurs

Avec tous ces espaces, il est possible de décrire d'un point de vue numérique ce qu'est une couleur. Afin de différencier deux couleurs, il faut intéressant de calculer la « distance entre deux couleurs », appelée « distance chromatique ». Cette notion est aussi très importante pour passer d'un espace à un autre, d'un gamut différent ; il faut en effet choisir la « couleur la plus proche » à la couleur initiale... Cette définition devient donc inévitable !

Pour les espaces  $L^*a^*b^*$  et  $L^*u^*v^*$ , cette distance  $\Delta E^*$  est simplement définie par

$$\Delta E_{ab}^* = \sqrt{(\Delta L^*)^2 + (\Delta a^*)^2 + (\Delta b^*)^2}$$

$$\Delta E_{uv}^* = \sqrt{(\Delta L^*)^2 + (\Delta u^*)^2 + (\Delta v^*)^2}$$

où  $\Delta x = x_2 - x_1$  pour  $x = L^*, a^*, b^*, u^*, v^*$  est la différence entre les valeurs pour chacune des deux couleurs considérées.

Pour l'espace  $L^*C^*h^*$ , étant donné qu'il est en coordonnées polaires, cette distance se calcule un peu différemment.

$$\Delta E_{ch}^* = \sqrt{(\Delta L^*)^2 + (\Delta C^*)^2 + (\Delta h^*)^2}$$

où

$$\begin{cases} \Delta C^* = C_2 - C_1 \\ \Delta h^* = \sqrt{C_1^* \cdot C_2^*} \cdot \sin\left(\frac{h_2^* - h_1^*}{2}\right) \end{cases}$$

où  $h_1$  et  $h_2$  pour  $x = C^*$  et  $h^*$  sont les valeurs pour chacune des deux couleurs considérées.

A partir de ces définitions, l'idée est donc de pouvoir évaluer mathématiquement si deux couleurs sont proches ou éloignées de manière « équivalente ».

Lors d'un changement d'espace où une couleur n'existe pas dans le nouvel espace, on cherche alors la couleur dont la distance chromatique est la plus proche et qui se trouve dans le nouvel espace ; on limite ainsi de trop « modifier » l'image originale. Ce problème est particulièrement connu des personnes qui impriment eux-mêmes leurs images, puisqu'un passage en espace CMJN est obligatoire.



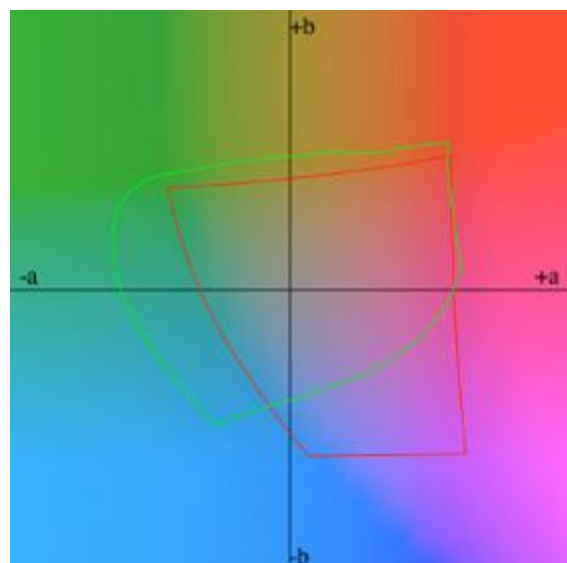
Les logiciels de retouches comme *Photoshop* proposent alors de détecter les couleurs dites « imprimables » de celles qui ne le sont pas ; autrement dit de reconnaître les couleurs qui existent dans l'espace CMJN, ou non.

### 6.5.11. Intérêt d'Avoir Différents Espaces Colorimétriques

Une première raison est pratique : ces deux espaces ne sont pas très intuitifs, et un espace RVB par exemple est beaucoup plus intuitif. Une seconde raison est de penser au fait que le problème des couleurs est de pouvoir photographier une couleur telle que l'œil la voit ; mais de la voir de la même manière sur tous les intermédiaires, de l'écran de l'appareil photo à l'écran de l'ordinateur, puis sur la tablette où nous mettrons l'image ou sur le papier où nous l'imprimerons. Le problème est, qu'en fonction du support, les couleurs fondamentales de références (rouge, vert et bleu) ne sont pas rigoureusement les mêmes ! Il faut donc attribuer à chaque appareil intermédiaire un profil ICC qui lui est propre, qui transforme le signal « d'entrée » en un signal « de sortie » qui puisse être lu par un support suivant quelconque. Il faudra ainsi appliquer une transformation et donc une correction qui tiendra compte des propriétés, contraintes et défauts de chaque appareil intermédiaire (appareil photo, ordinateur, écran, imprimante, tablette, ...).

### 6.5.12. Autres Couleurs « Dépendants »

La notion de *calibration* est très importante pour compléter correctement une chaîne colorimétrique. Tant que la calibration n'a pas été faite, il est impossible de savoir si la couleur qui va être imprimée est fidèle à l'information première qui a été enregistrée. Les périphériques successifs peuvent avoir des défauts, ou simplement ils peuvent ne pas avoir le même gamut entre eux, ce qui implique une interprétation de certaines couleurs. Il est donc primordial d'appliquer un profil ICC personnalisé et mesuré (ou calibré) à chaque périphérique afin de corriger au mieux ces différences. Dans le cas des écrans, il faut être conscient qu'un écran peut être plus ou moins lumineux, plus ou moins contrasté, que l'angle de vue sur l'écran peut aussi influencer la perception, tout comme la lumière ambiante. Et bien sûr, les réglages peuvent accentuer une couleur ou une autre. Tous ces problèmes peuvent être corrigés avec une calibration et un profil ICC. Les problèmes sont les mêmes pour une imprimante, le noir peut être plus ou moins profond, le « blanc » du papier ainsi que sa texture vont influencer le rendu, tout comme la saturation de l'encre ou des pigments utilisés. On voit dans l'image ci-contre le gamut d'un papier brillant (en vert) et celui d'un écran sRVB, dessinés sur l'espace  $L^*a^*b^*$  projeté. On voit que les deux sont nettement plus petit que le  $L^*a^*b^*$ , typiquement environ un quart de la surface. Autrement dit, sur une base théorique idéale de 8



millions de couleurs perceptibles pour l'œil, les périphériques ne sont capables que de reproduire environ 2 millions de couleurs. On voit aussi qu'un grand nombre de couleurs ne sont pas communes aux deux périphériques. Ce qui ramène à la notion de « couleur imprimable » ou « couleur non-imprimable » dans les logiciels de photo.

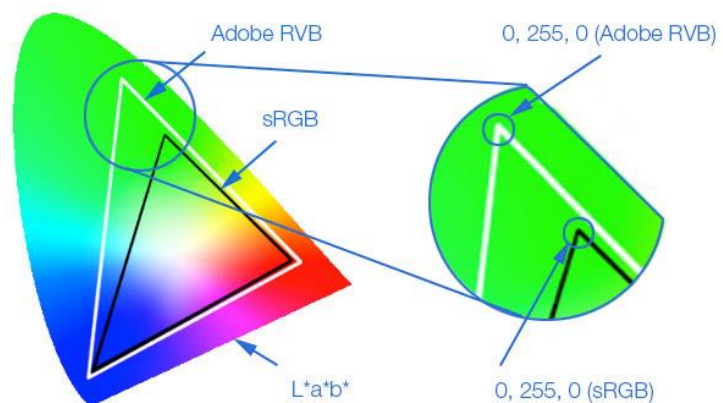
Un autre grand problème, invisible sur un tel diagramme, est le défaut des périphériques. Prenons un RVB « un tiers, un tiers, un tiers » théorique, il devrait se trouver au centre de ce diagramme, soit à 0 sur l'axe « a » et « b ». En réalité, à cause des imperfections de chaque périphérique, une telle couleur se trouvera légèrement décalée de ce centre. Du coup, une telle couleur, qui devrait être un gris, sera légèrement coloré. Mais chaque périphérique aura son propre décalage, ses propres défauts. Ces espaces sont donc dits dépendants ; la théorie ne suffit pas et ils dépendent du périphérique.

### 6.5.13. Espaces Couleurs « Indépendants »

Dans un tel espace, la transformation de la couleur d'un espace en un autre est uniquement théorique et mathématique. Le périphérique n'influence en rien la transformation. C'est le cas pour les espaces RVB, comme le  $L^*a^*b^*$ , sRGB, AdobeRVB, ProPhoto, entre autres. Par exemple, le sRGB est reproductible sur tous les écrans et toutes les imprimantes. Ainsi, la majorité des couleurs sont gérables si elles sont enregistrées dans cet espace. Ce qui fait que cet espace, bien qu'il soit le plus petit de tous (et donc le moins « performant »), a un grand avantage : celui d'être lu correctement partout ! De manière concrète, ces espaces sont ceux utilisés sur un flux de travail. Si on travaille image dans un logiciel, et que suite à quelque transformation, une couleur devient saturée, il est possible de changer l'espace, pour l'étendre, et alors la même transformation donnera une nouvelle couleur qui ne sera pas saturée. On reste ici dans un monde « virtuel » où on ne se soucie pas des périphériques.

### 6.5.14. Couleurs Reproductibles

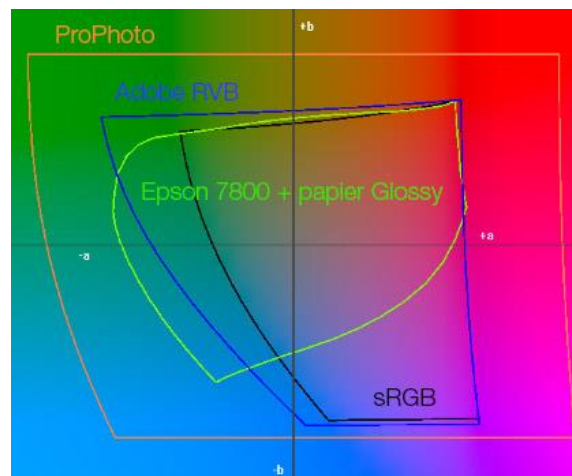
Sur l'image ci-contre, on retrouve le diagramme trichromatique. La différence de base entre les différents profils est le choix des couleurs de bases. Donc le vert de référence n'est pas le même pour ces espaces ; de même pour le rouge de référence et le bleu. Ainsi, les couleurs reproductibles sont celles qui se trouvent dans le triangle formé par les trois couleurs de bases. On voit donc que l'espace sRGB a le plus petit triangle, donc la moins grande gamme de couleurs reproductibles. A l'opposé, le ProPhoto a des couleurs (théoriques) à l'extérieur des couleurs existantes et permet donc une gamme de couleur maximale (entre ces trois espaces).



### 6.5.15. Changements d'Espaces Colorimétriques

Un problème fréquent concernant les couleurs est celui des couleurs trop ternes. Ce problème n'est en général pas dû à l'espace lui-même mais à la mauvaise attribution de la couleur à une image ; par exemple une image enregistrée en AdobeRVB ouverte dans un logiciel la traitant en sRVB. La différence entre deux espaces est leur gamut, c'est-à-dire l'ensemble des couleurs qu'il est possible de reproduire. Donc les couleurs communes à différents espaces seront strictement identiques entre un espace et l'autre. Ainsi, la différence entre deux espaces apparaîtra lorsque l'on s'approchera des limites de l'espace ; autrement dit des couleurs saturées. Ainsi, un problème courant est qu'une couleur « existante » dans l'image (en AdobeRVB par exemple) n'existera sur l'écran, qui travaille en sRVB, et ne sera donc pas (fidèlement) reproductible ! Donc le gamut de sRVB est plus petit que celui du AdobeRVB qui est plus petit que celui de ProPhoto. Donc des couleurs saturées en sRVB seront encore nuancées en ProPhoto. Malheureusement, ça ne veut pas dire qu'avoir le meilleur gamut promet le meilleur résultat, car la majorité des supports (écran, impression, web, ...) ne permettent pas de l'exploiter pleinement, étant eux-mêmes limité par leur propre espace qui est souvent du sRVB.

Lorsqu'on ouvre une image dans un logiciel d'image, un profil ICC – c'est-à-dire la représentation d'un espace colorimétrique – doit forcément lui être attribué. Très souvent, l'espace par défaut imposé est le sRVB. Ce qui aura pour effet, si l'image ouverte est, elle, enregistrée en AdobeRVB, de modifier la couleur et de rendre ainsi, dans ce cas, des couleurs plus ternes. De manière simple, un vert pur saturé en sRVB se codera (0, 255, 0). Si maintenant on se place dans un espace AdobeRVB et que la couleur est toujours lue (0, 255, 0), la couleur rendue ne sera pas la même, on aura le vert saturé dans l'espace AdobeRVB (voir le schéma ci-dessous). Il faudrait donc convertir l'un en l'autre, et voir que le vert sRVB (0, 255, 0), qui existe bien dans l'espace AdobeRVB mais qui correspond – par exemple – au (0, 235, 0).



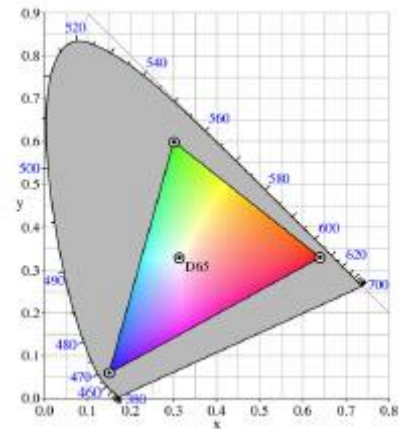
Et tout cela sans discuter le fait qu'une image codée en RVB par exemple peut être enregistrée en d'autres modes colorimétriques, c'est-à-dire en CMJN (Cyan – Magenta – Jaune – Noir), le profil des imprimeurs, ou en L\*a\*b (L=luminance et « a » et « b » codent la couleur), ou ...

Mais les différents espaces colorimétriques ne se distinguent pas que par leur gamut. Le blanc de référence – donc la température de couleur – peut aussi varier d'un espace à l'autre, tout comme la courbe gamma. Une manière de comparer différents espaces, et surtout en prenant toute la chaîne d'outils, allant de l'appareil photo à l'imprimante, en passant par l'ordinateur et l'écran, est de placer leur gamut sur un diagramme de chromacité. Bien que certains espaces semblent nettement moins bons – comme le AdobeRVB et le sRVB – il faut aussi se demander si on a besoin de ces couleurs ou si les couleurs « à disposition » sont suffisantes. Ainsi, si on aime les images sobres et peu saturées, ces

espaces sont largement suffisants. Dans le cas contraire, il faudra préférer un espace avec un gamut plus large, comme le ProPhoto.

Il peut aussi être intéressant de déterminer la température de couleur, donc la « température du blanc », qu'on appelle « l'illuminant ». Des valeurs classiques sont en général à 5000K (noté D50) ou 6500K (noté D65). Le premier est celui utilisé dans l'espace ProPhoto par exemple, alors que le second est utilisé par les deux espaces RVB. Ce choix n'est en fait pas intéressant, sauf si on travaille sur une chaîne de travail (appareil, écran, imprimante) entièrement calibrée.

Dernier des trois « paramètres, le gamma. Le gamma est le lien entre la lumière reçue et la luminosité observée (par l'œil ou l'appareil). Si on double les sources lumineuses dans un lieu sombre, on « ne voit pas » deux fois plus. On dit que la réponse de l'œil n'est « pas linéaire ». Ainsi, l'intensité de la source de lumière, notons là SL, est liée à l'intensité du signal créé sur le capteur, appelons le SC. Ce lien se fait par une relation mathématique, faisant intervenir un nombre appelé « gamma » et noté  $\gamma$ . Ce lien est relativement simple, puisque  $SL = SC^{\gamma}$ . Le but est d'en avoir un le plus proche de l'œil humain, qui se situerait à environ 2.4. Généralement, le gamma se trouve entre 1.8 (comme ProPhoto) et 2.2 (comme les RVB).



## 6.6. LA TEMPÉRATURE DE COULEUR

La température de couleur définit la température d'une source de lumière depuis sa couleur. Cette température peut se trouver entre 2000K et 10'000K, en comparaison à la température théorique d'un corps noir de même température. Un corps noir est un objet qui émet des ondes lumineuses qui ne dépendent que de sa température. La façon dont ces ondes sont émises est décrite par la loi de Planck, qui sera discutée plus tard. Pour

Bien que les températures données n'aient pas forcément de relation avec la celles du corps noir, les couleurs apparentes peuvent aller du rouge comme dans le cas d'une bougie (environ 2000K) au bleu comme dans le cas d'un flash (environ 10'000K). Ainsi, une lumière dite chaude aura une teinte légèrement dans les rouges et une faible température de couleur (puisque le rouge est un couleur « froide » en termes d'onde !) alors qu'une lumière dite froide aura une teinte légèrement dans les bleus et une température de couleur élevée. En gros, la température nous donne la couleur la plus présente dans le blanc que l'on reçoit de la source ; une lumière naturelle « normale » a une température de l'ordre de 5000 ou 6000K (celle du Soleil !) et un maximum dans les 550nm, la couleur verte.

Quelle que soit la source de lumière, naturelle ou artificielle, il est alors possible de lui attribuer une température de couleur. Il est alors important de ne pas se tromper de température de couleur de la prise de vue, pour ne pas altérer les "vraies" couleurs de l'image. Car c'est à cause de cette notion que les couleurs peuvent énormément varier entre une prise de vue en intérieur, souvent avec une

dominante orangée, et en extérieur, souvent à dominante bleue. En effet, l'œil et le cerveau sont très bon et corrigent automatiquement cette variation ; de plus, l'œil et le cerveau savent qu'une feuille de papier est blanche et doit donc être vue ainsi ! Mais l'appareil photo, lui, ne le sait pas ! Il est donc primordial que cette information soit correcte pour que le rendu des couleurs de l'image soit « juste » et équilibré !

Le tableau suivant présente quelques températures standards de quelques éclairages :

<b>Sources de lumière</b>	<b>Température</b>
Ciel bleu	7800K
Ciel peu nuageux	6700K
Soleil au zénith	5600K
Lampe LED « blanc froid »	5000K
Lampe LED « blanc neutre »	3500K
Lampe tungstène	3200K
Lampe halogène	3000K
Lampe à incandescence	2800K
Lampe LED « blanc chaud »	2700K
Soleil à l'horizon	2500K
Bougie	1800K

### 6.6.1. La Loi de Planck

La loi du corps noir décrit le comportement d'un corps noir. En effet, cette loi décrit la densité d'énergie lumineuse émise en fonction de la longueur d'onde, pour un corps émettant à une température donnée. Cette loi est la suivante :

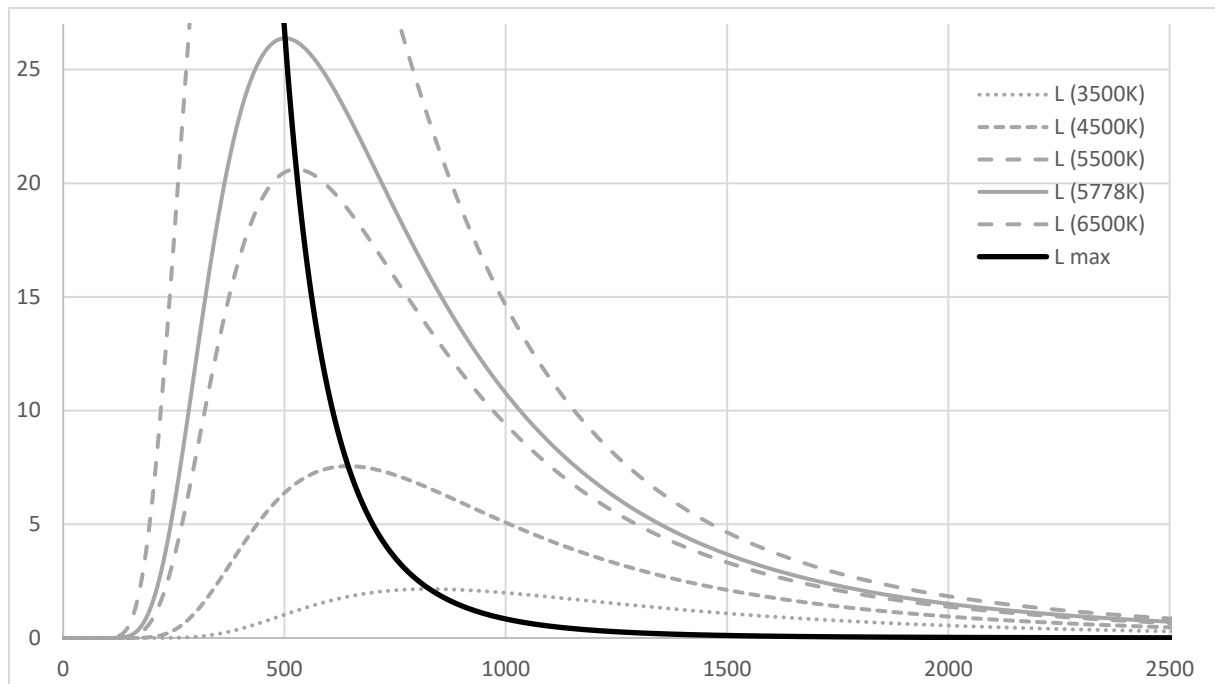
$$u(\lambda) = \frac{8\pi \cdot h \cdot c}{\lambda^5 \cdot \left[ \exp\left(\frac{h \cdot c}{\lambda \cdot k_B \cdot T}\right) - 1 \right]}$$

où  $h$  est la constante de Planck et vaut  $6.626 \cdot 10^{-34}$ J·s,  $c$  est la vitesse de la lumière,  $k_B$  est la constante de Boltzmann et vaut  $1.38 \cdot 10^{-23}$ J/K et  $T$  la température du corps en question (en kelvin).

Les maxima de ces courbes respectives se trouvent facilement par la loi du déplacement de Wien ( $\lambda_{max}$ ), qui s'exprime :

$$\lambda_{max} \cdot T = b$$

où  $b = 2.9 \cdot 10^{-3}$ m·K et  $\lambda_{max}$  signifie la longueur d'onde maximale d'émission. On peut dès lors relier la « couleur » dominante d'une lampe à sa température, et réciproquement.



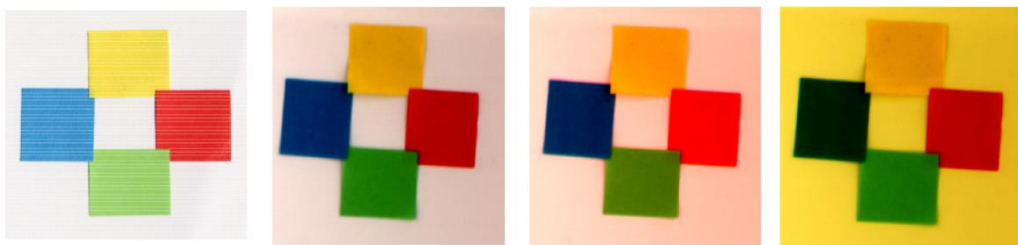
Ainsi, à la prise de vue, un appareil photo « compte » les nombres de pixels bleus, verts et rouges totaux ; leur rapport dépend de la source de la lumière et la lumière est ainsi déterminée !

C'est pourquoi la température de couleur (ou la *balance des blancs*) est parfois mal réglée sur des sujets quasiment monochromatiques ou des sujets avec de forts contrastes de température de couleur, comme un paysage marqué par une grande zone d'ombre et une grande zone au soleil.

### 6.6.2. Métamérisme

Les objets qui nous entourent ont des couleurs parce qu'ils absorbent une partie de la lumière qu'ils reçoivent et en rejettent une autre. Si on modifie le genre de lumière qu'ils reçoivent, ils ne pourront ni absorber ni rejeter de la même façon. Cela explique le fait qu'en fonction de l'éclairage, la couleur apparente d'un objet peut changer. C'est ce qu'on appelle le *métamérisme*.

Ce problème n'est ni anodin, ni trivial, et encore moins inutile. Il (a)mène une question fondamentale, bien qu'elle puisse paraître ridicule de prime à bord : «qu'est-ce que le blanc ?».



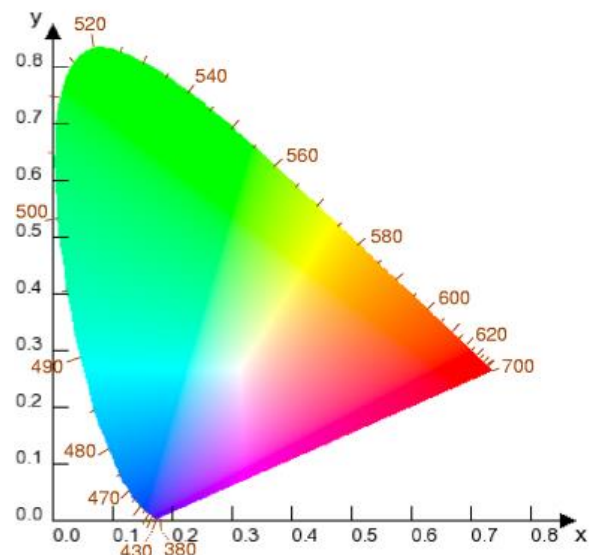
L'appareil photo, souvent en mode automatique sur ce problème, répond souvent à cette question à notre place, en attribuant à un blanc sa température de couleur.

La première image, à gauche, est la cible choisie et photographiée « correctement » d'un point de vue des couleurs. La deuxième image depuis la gauche est effectuée en prenant un spectre d'émission

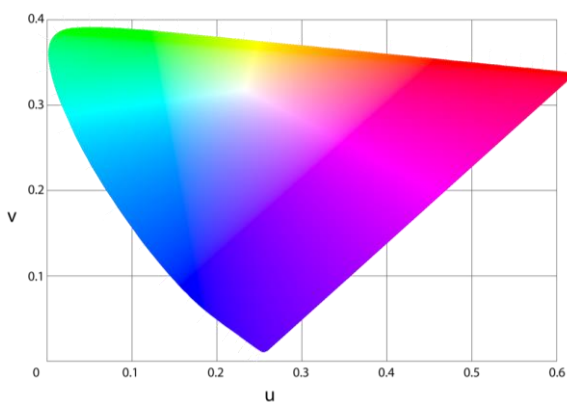
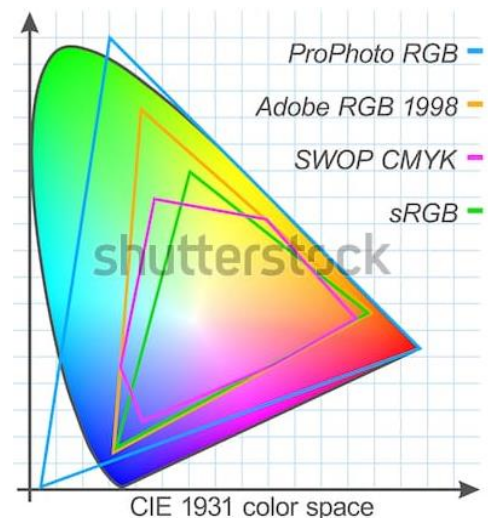
constant, donc une loi de Planck étant une droite horizontale. La troisième image prend en compte une température de couleur de 6000K, température de la surface du soleil. La dernière image a elle été créée en normalisant exactement à la même intensité les trois signaux rouge, vert et bleu.

## 6.7. LE DIAGRAMME TRICHROMATIQUE

L'intensité lumineuse, appelée luminance, se détermine par la somme des trois couleurs fondamentales rouge, vert et bleu. Ainsi, pour une luminance donnée (ou normalisée), si les « quantités » de rouge et de vert sont données (par exemple), la quantité de bleu est « imposée ». Il est alors possible de représenter les mélanges de couleurs dans un diagramme à deux dimensions, d'axes « rouge » et « vert » (choix arbitraire). Ce diagramme, dit trichromatique, représente alors toutes les couleurs qu'on peut reproduire en mélangeant les couleurs fondamentales. Les couleurs bordant le diagramme (zone « courbe ») sont les couleurs pures (ou « spectrales »), donc les couleurs de l'arc-en-ciel.



En informatique, afin de caractériser les couleurs, il est indispensables de définir les couleurs de références RVB (les sommets des triangles). Le diagramme ci-contre est le même qu'avant, mais il montre les différents espaces colorimétriques qui recouvrent donc les couleurs « possibles », que ce soit pour internet ou pour l'impression, aussi bien que pour le rendu photographique, en fonction du choix des couleurs de références.



Le

diagramme ci-contre est encore une fois le même, sauf que la *distance chromatique* est respectée, ce qui n'est pas le cas dans les deux premiers. Ce dernier point est important lorsque l'on parle du ressenti des couleurs et du ressenti de l'éclairage (deux lampes peuvent paraître plus ou moins intenses alors qu'elles émettent une même puissance, mais pas dans les mêmes couleurs). Pour les « connaisseurs », c'est l'espace  $L^*u^*v^*$ , espace dérivé du  $L^*a^*b^*$ .

## 7. LA PHOTOGRAPHIE NUMÉRIQUE

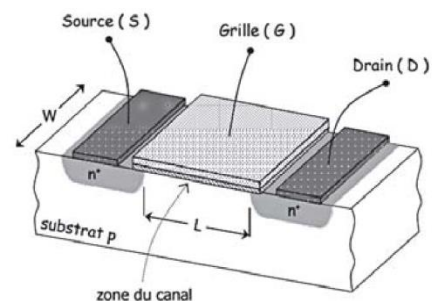
On peut encore s'intéresser à toute l'approche numérique de la photo : fonctionnement d'un capteur, comment obtenir la couleur et donc comment la coder, l'enregistrer et l'interpréter !

### 7.1. LES CAPTEURS – PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT

Les capteurs numériques d'image sont omniprésents dans notre vie de tous les jours. Téléphones portables, appareils photographiques, caméras scientifiques haute sensibilité, caméras rapides, le marché des capteurs a littéralement explosé ces dernières années. Face aux applications toujours plus poussées et à la grande diversité de produits sur le marché, il est important de revenir à l'essentiel et d'identifier les questions à se poser pour choisir la technologie et donc le capteur adapté au besoin de chacun. Cet article a donc pour vocation de rappeler le fonctionnement et les caractéristiques propres des deux grandes familles de capteurs : CCD et CMOS.

#### 7.1.1. Fonctionnement d'un Capteur à Capacité MOS

La technologie de base sur laquelle reposent les capteurs CCD et CMOS est la capacité MOS. Il s'agit en fait d'un sandwich de couches minces composé de trois types de matériaux : un métal (appelé porte ou grille), un isolant (en l'occurrence un oxyde) et un semi-conducteur (dopé généralement P, avec deux inclusions dopées N appelées source et drain) comme visible en figure 1. Lorsqu'un photon d'énergie supérieure au gap est absorbé dans le semi-conducteur, une paire électron/trou est créée. Il s'agit en fait d'un atome du réseau du semi-conducteur qui va libérer un électron (promotion de la bande de valence à la bande de conduction) et laisser à sa place une charge positive appelée trou. Sous l'effet du champ appliqué au niveau de la grille (zone de déplétion), l'électron va migrer à l'interface entre le semi-conducteur et l'oxyde et rester piégé dans un puits de potentiel tandis que le trou va migrer vers l'électrode de terre. Le nombre d'électrons qui peuvent ainsi être collectés dépend de



Comment fonctionnent les capteurs CCD et CMOS ? Thomas ESTRUCH Ingénieur études et applications, Photon Lines th-estruch@photonlines.com Les capteurs numériques d'image sont omniprésents dans notre vie de tous les jours. Téléphones portables, appareils photographiques, caméras scientifiques haute sensibilité, caméras rapides, le marché des capteurs a littéralement explosé ces dernières années. Face aux applications toujours plus poussées et à la grande diversité de produits sur le marché, il est important de revenir à l'essentiel et d'identifier les questions à se poser pour choisir la technologie et donc le capteur adapté au besoin de chacun. Cet article a donc pour vocation de rappeler le fonctionnement et les caractéristiques propres des deux grandes familles de capteurs : CCD et CMOS. la contenance du puits qui est une fonction de la surface et de la tension appliquée à la grille ainsi que de l'épaisseur de la couche d'oxyde. Si le principe de génération et de stockage d'une charge à partir de l'absorption d'un photon leur est commun,



les capteurs CCD et CMOS présentent toutefois des différences fortes, dont la principale tient à la manière dont vont être transférées les charges piégées dans les puits de chaque pixel vers la partie électronique de façon à obtenir l'image de la scène.

Le schéma montre une capacité MOS. La grille (G) représente la zone photosensible tandis que les électrodes de source (S) et de drain (D) permettent de piéger les électrons dans le puits de potentiel situé sous chaque grille.

### 7.1.2. Fonctionnement d'un Capteur CCD

Le CCD (charge coupled device) consiste en une juxtaposition matricielle de capacités MOS. Pour obtenir l'image de la scène, il faut compter le nombre d'électrons piégés dans chaque puits, qui est proportionnel au nombre de photons incidents sur chaque pixel. Pour ce faire, on commande séquentiellement la tension des grilles de chaque capacité MOS au rythme d'une horloge, ce qui va permettre de transférer les électrons d'une capacité vers sa voisine : on parle de registre à décalage. Après n transferts, les charges sont converties en tension dans un condensateur puis amplifiées. Elles sont ensuite codées numériquement à l'aide d'un convertisseur analogique/numérique à l'extérieur de la matrice CCD. Il existe plusieurs architectures pour les capteurs CCD qui dépendent directement du type d'applications visées. Les systèmes à transferts de bloc complet (full frame transfer visible en figure 2a) ou partiel (frame transfer en figure 2b) sont surtout utilisés dans le milieu scientifique. Les systèmes à transferts interligne (interline transfer en figure 2c) sont utilisés dans les caméras pour le grand public et les systèmes de télévision professionnels. Les CCD full frame transfer : cette architecture full frame est la plus simple. Les photons sont collectés sur l'ensemble de la surface du capteur qui est photosensible. Le capteur est ensuite lu verticalement ligne par ligne à l'aide du registre à décalage. Chaque ligne une fois transférée au registre de lecture est lue horizontalement pour obtenir la valeur de chaque pixel. Cette lecture progressive est lente mais les capteurs CCD full frame sont les plus sensibles du marché et peuvent fonctionner dans de nombreuses configurations d'illumination. Les CCD frame transfer : l'architecture à transfert de bloc (frame transfer) est basée sur la division de la zone photosensible du capteur en deux parties symétriques et de mêmes dimensions (cf. figure 2b). La première partie collecte les photons de manière classique. Ils sont ensuite rapidement transférés (en quelques millisecondes) vers la deuxième partie du capteur qui est protégée de la lumière incidente et sert au stockage des électrons pour la lecture de l'image. Ainsi on peut faire l'acquisition de

l'image n+1 sur la partie exposée du capteur pendant que l'image n est lue sur la partie du capteur masquée. On augmente donc

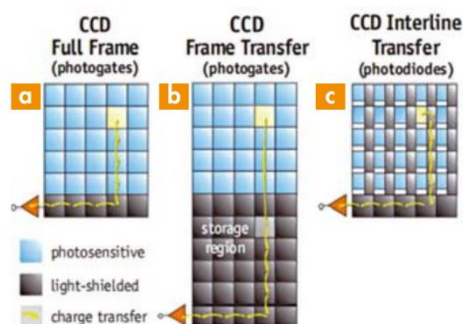


Figure 2. Schéma des différents types d'architecture de capteurs.



Figure 3. Exemple de *smearing* et de *blooming* sur une image prise par un capteur CCD. Le *smearing* donne lieu à une ligne verticale saturée. Le *blooming* donne lieu à une saturation des pixels les plus proches.

considérablement la cadence par rapport à l'architecture full frame. Ces capteurs frame transfer ont un facteur de remplissage équivalent au full frame mais sont plus chers car la taille du capteur doit être doublée pour être équivalente à un capteur full frame. Les CCD interline transfer : l'architecture interligne incorpore, au niveau de chaque pixel, un canal de transfert de charges (registre vertical recouvert d'un blindage optique métallique) directement adjacent à une photodiode de manière à ce que les charges accumulées puissent rapidement (de l'ordre de la microseconde) être transférées une fois que l'acquisition est terminée. On peut ainsi atteindre des temps d'exposition très courts ce qui permet d'éviter de saturer les pixels et ce, sans avoir recours à une obturation mécanique du CCD. En revanche, le blindage des registres verticaux agit comme un store vénitien et réduit la zone photosensible du capteur par rapport aux architectures full frame. Pour compenser cet effet indésirable et réaugmenter le facteur de remplissage, on peut utiliser des matrices de microlentilles pour focaliser la lumière incidente sur les photodiodes mais, dans le cas où l'objectif est très ouvert (illumination grand angle), la sensibilité reste faible. De par leur architecture, les capteurs CCD offrent l'avantage d'un facteur de remplissage proche de l'unité (> 98 %). Cela signifie que la zone photosensible est quasiment égale à la dimension du capteur. La dynamique d'un capteur est liée au rapport entre la capacité quantique de chaque photosite (proportionnelle à la taille de la zone photosensible) et la somme des bruits d'obscurité (faible pour les CCD) et des bruits de lecture. Les CCD ont ainsi une grande dynamique :  $\text{Dynamique} = 20 \log(\text{capacité} / (\text{obscurité} + \text{lecture}))$  De plus, si la sensibilité est définie comme la capacité d'un pixel à atteindre sa saturation rapidement, les capteurs CCD sont très sensibles car continuellement exposés. Les principaux défauts que l'on retrouve sur des images provenant de capteurs CCD sont liés au fait que le capteur est exposé en continu et les charges accumulées dans les puits quantiques doivent être transférées à la fin de l'acquisition. Ainsi lorsqu'un pixel reçoit une quantité trop importante de photons (qui dépasse sa capacité), il sature et déborde sur ses voisins un peu à la manière d'un seau trop rempli. Ce phénomène porte le nom de blooming (cf. figure 3). De même lorsqu'un pixel est saturé, il va lors de sa lecture par le registre à décalage saturer toute la colonne qui lui est associée. On parle alors de colonnage ou smearing (cf. figure 3). Il est donc parfois nécessaire d'ajouter un système d'obturation mécanique pour éviter que le capteur ne soit exposé pendant la lecture de l'image. Enfin, malgré l'évolution des architectures des capteurs CCD pour augmenter la cadence de lecture, il est impossible d'adresser la valeur d'un pixel individuel en sélectionnant une région d'intérêt ce qui limite les cadences atteignables par cette technologie (la limite supérieure est de quelques dizaines de kHz).

### 7.1.3. Fonctionnement d'un Capteur CMOS

La technologie de base sur laquelle reposent les capteurs CCD et CMOS est la capacité MOS. Il s'agit en fait d'un sandwich de couches minces composé de trois types de matériaux : un métal (appelé porte ou grille), un isolant (en l'occurrence un oxyde) et un semi-conducteur (dopé généralement P, avec deux inclusions dopées N appelées source et drain) comme visible en figure 1.

Lorsqu'un photon d'énergie supérieure au gap est absorbé dans le semi-conducteur, une paire électron/trou est créée. Il s'agit en fait d'un atome du réseau du semi-conducteur qui va libérer un électron (promotion de la bande de valence à la bande de conduction) et laisser à sa place une charge positive appelée trou.

Sous l'effet du champ appliqué au niveau de la grille (zone de déplétion), l'électron va migrer à l'interface entre le semiconducteur et l'oxyde et rester piégé dans un puits de potentiel tandis que le trou va migrer vers l'électrode de terre.

Le nombre d'électrons qui peuvent ainsi être collectés dépend de Comment fonctionnent les capteurs CCD et CMOS ? Thomas ESTRUCH Ingénieur études et Les années 90, les capteurs CMOS (complementary metal oxyde semiconductor) sont néanmoins basés sur le même principe d'absorption de photons et de génération de courant proportionnel au flux incident sur chaque pixel. La différence provient de la façon dont les charges sont lues. Contrairement aux capteurs CCD, les charges sont cette fois directement converties au niveau du photosite de génération par le biais d'un amplificateur sur chaque pixel (figure 4). Cette particularité permet de supprimer un

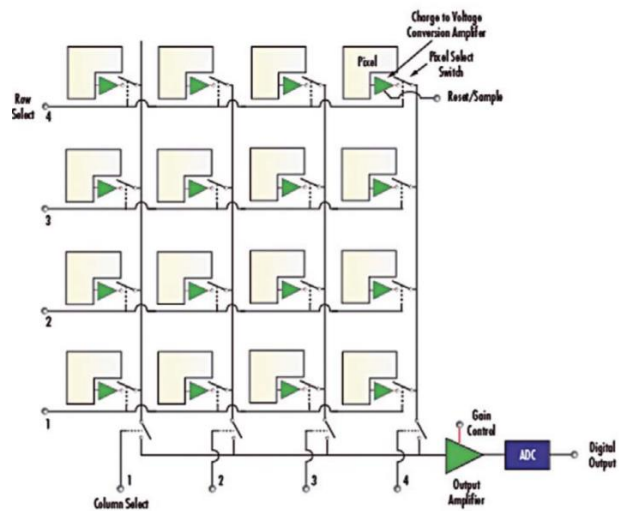


Figure 4. Schéma de l'architecture d'un capteur CMOS. Chaque photosite dispose de son propre amplificateur. Chaque pixel peut donc être adressé individuellement et possède une réponse propre indépendante de ses voisins.

grand nombre de transferts comme dans le cas des registres à décalage du CCD et donc d'augmenter la cadence de lecture. La taille des capteurs est voisine de celle des CCD mais la résolution spatiale est moindre, du fait de la présence des amplificateurs associés à chaque pixel (un peu comme dans le cas des CCD interlignes). On peut là encore adjoindre une matrice de microlentilles pour compenser en partie cet effet Une autre différence fondamentale est la façon dont est acquise l'image. Dans les architectures CCD, à un instant donné, l'ensemble du capteur et donc des pixels est exposé simultanément. L'instant d'après les photosites sont obturés le temps du comptage des électrons générés de manière à obtenir une image.

On parle de fonctionnement en global shutter (cf. figure 5). Dans le cas du capteur CMOS, chaque photosite ou pixel va être exposé pendant un temps identique mais ne collecte pas la lumière au même instant. Cette acquisition séquentielle ligne par ligne en partant de la partie supérieure du capteur porte le nom de rolling shutter (cf. figure 6). Grâce à son système de lecture qui permet d'adresser chaque pixel individuellement contrairement au cas du capteur CCD, il est possible de ne lire qu'une partie de la matrice du capteur CMOS.

Cette sélection d'une zone d'intérêt sur l'image permet de diminuer le temps de lecture pour chaque image et donc d'atteindre des cadences supérieures à ce qu'il est possible d'atteindre avec un capteur CCD interligne par exemple. Il est également possible de corriger la valeur de chaque pixel en lui appliquant une fonction choisie ce qui permet de corriger la non-linéarité de certains phénomènes, ou tout simplement de s'affranchir du bruit FPN (bruit fixed pattern noise lié à la réponse non uniforme de chaque pixel de la matrice du capteur à une même illumination ou en l'absence d'illumination). De plus, la fabrication de cette technologie de capteur a l'avantage d'être compatible avec les installations de fabrication de masse des circuits intégrés et son coût en est largement diminué. En contrepartie, la zone photosensible associée à chaque pixel étant réduite par la présence des amplificateurs, le facteur de remplissage (sans utilisation de matrice de microlentilles) est beaucoup plus faible que pour un capteur CCD (< 30 %) ce qui impacte grandement la sensibilité. De plus, ce type de capteur est très

sensible aux sources de bruits (bruits de lecture et de numérisation) qui vont dégrader le rapport signal à bruit sur une image.

Enfin, le fonctionnement en global shutter des capteurs CMOS peut avoir des conséquences sur la qualité de l'image dans le cas d'un mouvement d'objet trop rapide par rapport à la cadence de la caméra. Si l'objet se déplace horizontalement, il est possible que son image apparaisse avec un angle lié à la lecture séquentielle de chaque ligne du capteur. Pour les mêmes raisons, dans le cas d'un éclairage fluctuant, l'intensité de l'image ne sera pas uniforme sur la matrice. En conclusion, les capteurs CCD et CMOS sont deux technologies performantes qui sont complémentaires. Il est donc important d'identifier les facteurs clés qui vont permettre de réaliser une image exploitable sur la scène considérée pour choisir son type de capteur. Si la sensibilité et la dynamique sont prépondérantes par rapport à la cadence, on optera plutôt pour un capteur CCD full frame. Si la cadence et le temps d'exposition de la scène (risque de saturation) sont les éléments déterminants, alors il faudra s'orienter vers des capteurs CMOS.

Tableau comparatif des CCD et CMOS.

	CCD	CMOS
Facteur de remplissage	50 à 98 %	30 à 50 %
Sensibilité à la lumière	Élevée (0,1 lux)	Plus faible (10 lux)
Sensibilité aux UV et IR	Étendue	Étroite
Réponse	Moyenne	Très rapide (10 à 100x plus)
Consommation d'énergie	Élevée (2 à 4x plus que CMOS)	Faible
Dynamique	Élevée	Moyenne
Uniformité du capteur	Élevée (1 à 2 % de FPN*)	Faible à modérée (5 à 20 % de FPN*)
Bruit électronique	Faible	Moyen à élevé (10x plus que CCD)
Courant d'obscurité	Faible	Moyen
Sélection d'une région d'intérêt	Très limité	Élevé
Anti blooming	Absent (sauf solution custom)	Présent par défaut
Shuttering	Assez rapide	Faible
Biasing et clocking	Multiple, tension élevée	Unique, basse tension

\*FPN : fixed pattern noise

#### 7.1.4. Performance des Capteurs

La résolution maximale d'un capteur est fonction du nombre de photosites qui permettra d'obtenir autant de pixels grâce à une interpolation. Selon les performances requises, un capteur CMOS peut être supplanté par un CCD ou inversement ; cependant, les appareils photo grand public tendent à utiliser des capteurs CMOS, de qualité comparable aux CCD et à des coûts plus faibles. Le CCD reste utilisé dans certaines applications telles que l'imagerie très haute cadence ou à très bas niveau de lumière, car il génère des images moins bruitées que les CMOS.

L'efficacité quantique du capteur est définie par le rapport électrons produits par nombre de photons incidents (ce qui est un point commun avec le principe de base de la photographie argentique). Mais elle est surtout fonction de la taille de la partie active de chaque photosite, donc de la surface de capture des photons.

La réduction de la surface des photosites influence surtout la sensibilité du capteur, ce qui freine la course au mégapixels. La sensibilité d'un capteur est généralement évaluée par la formule :

$$\text{Sensibilité} = 20 \cdot \log\left(\frac{\kappa}{I + B}\right)$$

où la sensibilité est obtenue en dB (décibels),  $\kappa$  est la capacité de stockage d'un photosite,  $I$  le courant d'obscurité et  $B$  le bruit de lecture sont évalués en électrons.

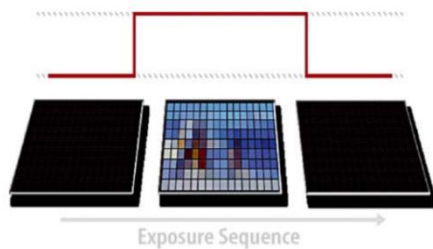


Figure 5. Fonctionnement du capteur CCD en *global shutter*. Le capteur est entièrement exposé puis obturé le temps de la lecture de l'image.

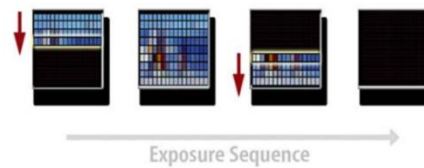


Figure 6. Fonctionnement en *rolling shutter* d'un capteur CMOS. Le capteur est lu séquentiellement ce qui peut induire des défauts de représentation si le phénomène se déplace trop rapidement.

On remplace souvent le terme « sensibilité » par « dynamique », terme ambigu qui pourrait aussi refléter la « plage » de luminosité disponible entre le blanc et le noir.

Afin de comparer la sensibilité des capteurs à la sensibilité nominale des films argentiques, la norme internationale ISO 12232 définit une sensibilité ISO des systèmes numériques.

### 7.1.5. Norme ISO

Un appareil photo numérique comporte un capteur constitué d'une matrice de photodiodes (capteurs analogiques), un amplificateur analogique, un convertisseur analogique-numérique et une chaîne de traitement numérique du signal. Il produit la plupart du temps des fichiers au format JPEG dans l'espace de couleurs sRGB, mais d'autres formats sont possibles, notamment le RAW qui enregistre les données non traitées issues du convertisseur.

La sensibilité pour ces appareils est définie en tenant compte de toute la chaîne, du capteur au fichier final. Elle est facilement contrôlée en modifiant le gain de l'amplification analogique, voire, pour les sensibilités extrêmes, avec une amplification supplémentaire dans la chaîne numérique. La norme ISO 12232 définit plusieurs façons de la déterminer :

- *Standard output sensitivity (SOS)* est défini comme  $S(SOS) = 10/H(SOS)$  en lx·s où  $H(SOS)$  est l'exposition qui produit la valeur numérique 118 (soit 18% de luminance) sur les pixels d'un fichier sRGB 8bits (en lien avec le *gris* 18%).
- *Recommended exposure index (REI)* est définie comme la valeur de sensibilité qui produit des images bien exposées selon le jugement du fabricant de l'appareil.
- Deux autres mesures, basées sur la saturation et le niveau de bruit, sont aussi définies, mais rarement utilisées.

### 7.1.6. Norme ISO

Un appareil photo numérique comporte un capteur constitué d'une matrice de photodiodes (capteurs analogiques), un amplificateur analogique, un convertisseur analogique-numérique et une chaîne de traitement numérique du signal. Il produit la plupart du temps des fichiers au format JPEG dans l'espace de couleurs sRGB, mais d'autres formats sont possibles, notamment le RAW qui enregistre les données non traitées issues du convertisseur.

## 7.2. LA GESTION DES COULEURS

La couleur est partout. Devant nos yeux. À l'écran. Sur notre appareil. Mais d'où vient-elle ? Comment se comporte-t-elle ? Voit-on tous pareil ? Pourquoi est-ce que, à l'écran, la couleur ne paraît pas la même qu'en « réalité » ? Et c'est quoi au fond, la vraie couleur ?

Pour expliquer et comprendre tout cela, bien que cela puisse paraître simple de prime abord, il faut des notions vites complexes et un vocabulaire adapté. Pourtant, ces notions sont une des clefs pour améliorer considérablement le rendu des photos.

Mais pourquoi se poser tant de questions ? Simplement parce que notre œil ne se comporte ni comme notre appareil photo, ni comme notre écran, ni comme notre imprimante, ni comme notre scanner, ... Et eux-mêmes ne se comportent pas de la même manière entre eux. Autrement dit, tous ces intermédiaires de l'image ont chacun leur propre langage et mœurs, qu'il est indispensable de traduire le plus fidèlement possible à chaque étape afin d'obtenir à la fin de la chaîne la traduction la fidèle possible de l'échantillon d'origine.

### 7.2.1. Bref Historique

Depuis bientôt deux siècles, nous savons que l'œil humain voit le monde en couleur. On sait que notre œil est composé de bâtonnets – capables de voir la quantité de lumière reçue – et de cônes – capables détecter les couleurs. Ces derniers sont aux nombres de trois, étant sensibles aux couleurs rouge, vert et bleu. Sur cette base, on a construit un monde virtuel de l'image, basé sur cette « simple » connaissance : trois couleurs fondamentales. On a inventé des règles pour les peintres, des règles d'équilibres colorimétriques pour tout artiste, et des technologies qui tentent de singer l'œil humain : les écrans, les capteurs, les scanners, ... Mais le premier problème a vite été rencontré, aucun appareil ne réagissait à la lumière de la même manière que notre œil. Le vert unique n'existe pas, tout comme le rouge ou le bleu. L'absolu en termes de couleur est inexistant. Tant de paramètres rentrent en compte. Du moins, c'est ce qu'on pensait...

### 7.2.2. Couleur L\*a\*b\*

Un jour, on inventât un système tentant de reproduire la vision de l'œil humain : les couleurs L\*a\*b\* sont nées. Tous les systèmes qui vont ensuite être discuté se trouvent dans ces couleurs. N'importe quelle couleur, sRVB, CMJN, ou autre, a un seul et unique équivalent en L\*a\*b\*, si l'appareil est bien défini (à travers son profil ICC). L'inverse n'est malheureusement pas vrai ; une couleur L\*a\*b\* peut être « traduite » de plusieurs manières en RVB. La couleur L\*a\*b\* est donc une sorte de couleur absolue vraie au-delà de tout paramètre ou appareil extérieur.

Mais pour cela, il est indispensable de gérer ses couleurs, à travers toute la chaîne d'outils utilisés : appareil photo, écran, ordinateur, écran, imprimante, scanner. Les profils ICC jouent le rôle de traducteur, tentant tant bien que mal d'être fidèle à la version originale. Mais la perfection ne fait pas partie de ce monde. Et comme un traducteur a besoin d'une formation, un profil ICC est créé à travers

un processus appelé « calibration ». Le but étant de traduire une couleur le fidèlement à sa couleur d'origine, sachant qu'elle ne sera jamais rigoureusement et exactement la même !

### 7.3. LA COULEUR EN INFORMATIQUE

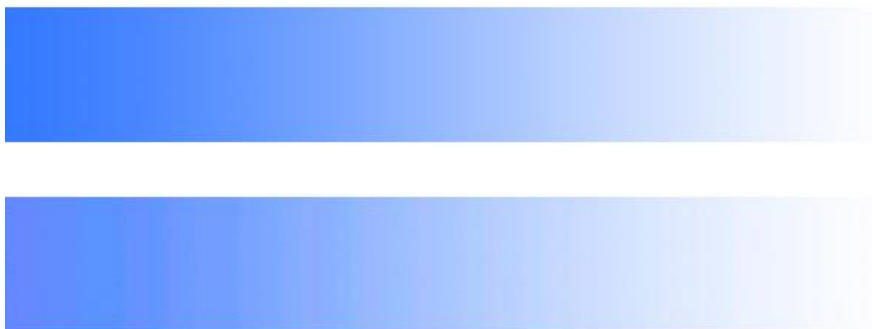
Comment faire communiquer un outil naturel, développé sur des milliers d'années, avec des outils binaires, développés en quelques années ? En effet, d'un côté l'œil, appareil de vision, super performant, très élaboré, et pourtant très limité. D'un autre côté, le pixel ou le photosite, nouveau-né, ultrasensible (quoique...), toujours fidèle et constant (quoique...) et pourtant, la communication avec son maître, l'œil, qu'il tente d'imiter, est loin d'être si aisée.

L'œil voit ; il envoie à notre cerveau des informations par des signaux électriques. Le pixel, lui, envoie des informations perçues par des « 0 » et des « 1 » ; c'est le monde binaire. Seulement des couleurs, il y en a des milliers ; que dis-je, des millions !

L'œil serait capable, dans un cas idéal, de détecter jusqu'à 8 millions de couleurs. En vrai, une personne lambda en voit environ 300'000. Une personne chanceuse ou issue d'un peuple avantageé peut peut-être monter à 1 ou 2 millions de couleurs. Maximum. De là, on a eu besoin de représenter la vision de notre organe à l'aide de « bit » informatique, donc de « 0 » et de « 1 ». Arrive alors l'octet, qui vaut 8 bits. Le bit, c'est facile, 0 ou 1 ; allumé ou éteint ; blanc ou noir ; signal ou pas signal. L'octet, c'est 8 bits ; donc une suite de 8 chiffres valant tous 0 ou 1. Il y a donc  $2^8=256$  combinaisons possibles. « 0 » en code binaire (codé en 8 bits) : 00000000. « 1 » en code binaire (codé en 8 bits) : 00000001. Et donc, si on a 256 combinaisons, et que la première est « 0 », 11111111 en code binaire est égale à ... 255 ! Mais pourquoi 8 bits ?

Imaginons que je travaille en 2 bits. Je reçois une lumière sur mon pixel. Soit la lumière est suffisante (plus qu'un gris 50%, donc c'est « plutôt clair »), et j'obtiens un « 1 » ; soit la lumière est faible (moins qu'un gris 50%, donc c'est « plutôt sombre »), et j'obtiens un « 0 ».

Des chercheurs de la CIE – la Compagnie Internationale de l'Éclairage –, dans les années 1930, ont constaté que dans le meilleur des cas, il était possible de voir environ 200 nuances dans un dégradé d'une couleur donnée. Comme le montre l'image ci-dessous, où au moins 200 nuances sont perceptibles dans la bande bleue du haut, alors qu'il y en a moins dans celle du bas. Résultat : on voit des bandes, des brisures de continuités.



Résultat ? Puisque nous sommes contraints à « écrire les couleurs » avec des 0 et des 1, si on fait du binaire, on n'a que « noir » ou « blanc ». Si on prend deux chiffres, on aura 4 possibilités : 00, 01, 10,

11. Si on prend 3 chiffres, on aura 8 possibilités,  $2^3$ . Comme  $2^7=128$ , qui est toujours inférieur à la perception idéale et maximale d'un œil humain, on choisit alors  $2^8=256$ , qui est supérieur à 200. On a alors 256 façons de représenter un « clair » ou « sombre ».

Imaginons que maintenant, je mets un filtre coloré devant le capteur, et on est capable de « mesurer » une couleur. Imaginons encore que maintenant on met des filtres de couleurs différentes, et on est capable de « mesurer » la répartition de différentes couleurs sur l'image prise. Notre œil fonctionne de la même manière ; à l'exception de l'aspect binaire cela va de soi !

D'après un test scientifique plus récent, les humains ne verraient que 2 millions de nuances de couleurs environ. D'autres experts, plutôt en marketing et communication, concluraient que l'être humain n'est capable de percevoir distinctement environ 300'000 couleurs. Il faudrait ici différencier la comparaison de deux couleurs proches de la reconnaissance « absolue » ; il est plus facile de distinguer deux couleurs côte-à-côte plutôt que de voir l'une après l'autre !

Ainsi, avec le choix du « 8 bits », on a 256 couleurs « primaires ». Sachant que l'œil se base sur trois couleurs primaires, on a alors une gamme de  $256 \times 256 \times 256$  couleurs, soit 16'777'216 couleurs. 60 fois les 300'000 couleurs ! Donc on a bien de la marge par rapport à la vue de « monsieur tout le monde ».

On a alors décidé, à l'époque, de tout « coder » en 8 bits. Ce standard a pris le dessus, à tel point que l'on a rebaptisé ce standard. L'octet. Définition issue directement de notre organe : l'œil.

Ainsi, il faut bien se rendre compte que si on ouvre une image dans un logiciel d'image, et qu'on lit, sur un pixel, sa valeur RVB (200, 200, 200), et qu'on se déplace d'un pixel et qu'on lit soit (199, 200, 200) ou (201, 200, 200) ; on n'aura aucune nuance !!!

Du coup, une image est codée en 24 bits, soit  $3 \times 8$  bits ; 8 bits pour chacune des trois couleurs fondamentales. Par exemple, un jaune « pure » s'écrira, en RVB, (255, 255, 0), donc le rouge et le vert complètement allumés et le bleu complètement éteint.

Le problème est maintenant qu'un même signal RVB – par exemple (245, 225, 12) – donc plutôt jaune, ne sera pas traduit rigoureusement de la même manière en fonction du support, de l'écran utilisé. Donc, un signal un RVB ne représente pas réellement une couleur, mais une interprétation (une traduction) d'une couleur « vraie », qui serait initialement codée en  $L^*a^*b^*$ . Inversement, si sur plusieurs écrans différents, on veut afficher une même couleur, il faudra avoir des données RVB différentes, propres à chaque écran. Ce choix de « triplet RVB » sera fait à travers les profils ICC, qui définissent et connaissent les périphériques.

#### **7.4. CAPTURE DES COULEURS EN PHOTOGRAPHIE NUMÉRIQUE : LE DÉMATRIÇAGE**

A la base, un capteur numérique d'appareil photo n'est pas sensible à la couleur, dans le sens qu'il n'est pas capable de détecter la couleur. Il ne peut que déterminer une quantité de lumière reçue. Pour obtenir une image numérique en couleur, il est alors nécessaire de mettre des filtres de couleurs sur le capteur. On choisit généralement les couleurs rouge, verte et bleue qui sont les couleurs que l'on retrouve sur les cônes de l'œil. On obtient alors une image composée d'une mosaïque de points de couleur rouge, verte ou bleue et d'intensités différentes.



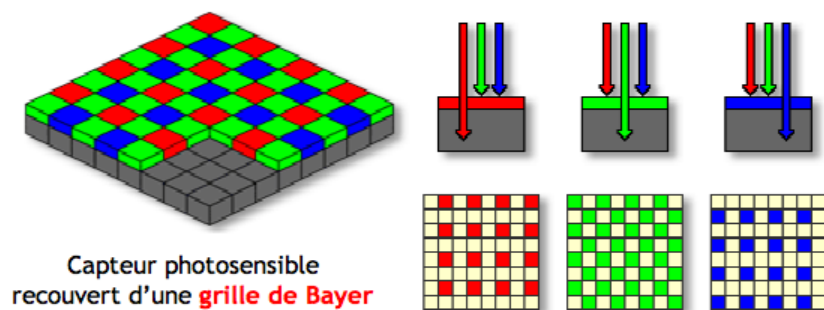
Chaque pixel a alors une couleur qui lui est attribuée. Le processus d'interprétation qui redonne à chaque pixel une couleur dite « vraie » nécessite (paradoxalement) une interprétation de cette mosaïque. Ce processus indispensable s'appelle le dématriçage. Il se fait généralement automatiquement dans les appareils photos. Mais il est possible d'agir dessus en prenant des photos en format « RAW » (« brut » en anglais). Par opposition au format usuel « JPG » (ou « PNG » ou...), le RAW donne accès à l'information enregistrée par chaque pixel, sans interprétation. Ce qui n'est pas le cas des autres formats.

Le terme « dématriçage » vient du fait que la mosaïque formée par les capteurs d'appareil photo est donc traitée comme une matrice. Chaque pixel, ou pour être plus précis, chaque « photosite » n'enregistre l'information que d'une seule couleur. On recrée donc après, la couleur supposée vraie du photosite par rapport aux couleurs des photosites voisins. Ce processus est source d'altération potentielle de l'image, comme par exemple le moiré, qui est l'apparition de lignes colorées au lieu d'un noir ou d'un blanc.

### 7.4.1. Structure du Capteur

On l'a déjà dit, un photosite n'est sensible qu'à une seule couleur ; il est donc totalement aveugle aux autres ! La manière dont les couleurs sont choisies et organisées se base sur le fonctionnement de l'œil. Comme l'œil a des cônes rouge, vert et bleu, et qu'il connaît un maximum de sensibilité dans le vert, une matrice courante, appelée « matrice de Bayer », est un agencement de 2 photosites verts pour 1 rouge et 1 bleu. De plus, deux couleurs ne peuvent pas être côte-à-côte.

La lumière que reçoit un photosite est traduit, sous forme d'un signal en électrique, en terme d'intensité. L'électronique fonctionnant en système binaire, on la code « traditionnellement » en 8bits ; c'est-à-dire qu'il



existe  $2^8=256$  niveaux différents entre le plus clair, soit le blanc, et le plus foncé, soit le noir. Dans un logiciel de retouche d'image, il est possible d'observer que l'on peut modifier les « niveaux » d'intensité lumineuse sur 256 niveaux, de 0 à 255 (si on travaille en 8bits). Avec la qualité des appareils photos récents, ce codage en 8bits devient insuffisant, et on travaille souvent en 12bits (donc  $2^{12}=4096$  niveaux) voir 14bits (donc  $2^{14}=16384$  niveaux).

Une opération mathématique permet alors de combiner l'information de ces photosites pour obtenir une image couleur composée de « pixels », qui est l'abréviation de « PICTure ELEMent ». On obtient donc (plus ou moins) autant de pixels qu'il y a de photosites. Chaque pixel est alors composé de l'information des 3 couleurs sur 256 niveaux en 8bits : il y a alors  $(2^8)^3=16'777'216$  couleurs différentes.

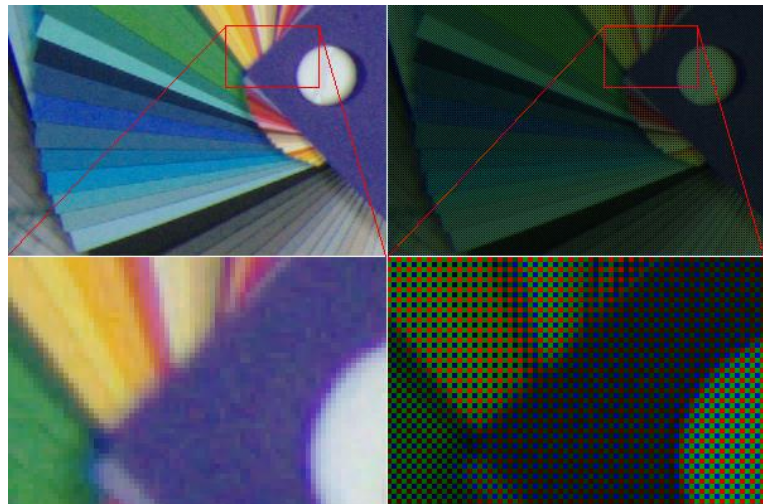
En 12bits, on obtiendrait  $(2^{12})^3$  couleurs, soit environ 68.7 milliards de couleurs. Ou encore, plus de 281'000 milliards de couleurs en 16bits !

Toutes ces informations sont donc enregistrées telles quelles dans un fichier « RAW », ou sont compressées dans un autre format.

Il faut donc bien comprendre que les capteurs, nativement, ne voient pas les couleurs mais ne voient qu'une différence d'intensité lumineuse. Ils « voient » en noir et blanc, comme les bâtonnets. Le silicium, qui compose les capteurs, est en fait même sensible dans l'infrarouge, raison pour laquelle tous les appareils sont munis d'un filtre infrarouge afin qu'il soit sensible « comme l'œil » dans le spectre des couleurs dites visibles (sauf pour des appareils photos spéciaux, souvent dédiés à l'astrophoto ou de la photo « scientifique » pour qui l'information des infrarouges peut être intéressante).

### 7.4.2. Image Matricée

Il faut donc bien comprendre que l'image vue par un capteur n'est pas complète. Schématisons ceci par l'image ci-contre, où on retrouve à gauche deux images dites « réelles » et à droite les deux images enregistrées par le capteur. Chaque pixel n'enregistre donc qu'un seul canal. Dans les images du bas, qui sont un zoom de celles du haut, on peut observer la matrice de Bayer. Là où la couleur est blanche, les 3 « canaux » rouge, vert et bleu sont allumés ; le jaune est obtenu à l'aide du vert et du rouge, le violet est lui obtenu avec le rouge et le bleu, etc. Ainsi, lors de la prise de vue, le capteur n'enregistre qu'un tableau de nombre, représentant l'intensité lumineuse enregistrée par photosite. L'intensité varie d'un minimum, 0 (noir), à un maximum, 255, si on se trouve en 8bits.



### 7.4.3. Le Dématriçage

A la base, un capteur numérique d'appareil photo n'est pas sensible à la couleur, dans le sens qu'il n'est pas capable de détecter la couleur. Il ne peut que déterminer une quantité de lumière reçue. Pour obtenir une image numérique en couleur, il est alors nécessaire de mettre des filtres de couleurs sur le capteur. On choisit généralement les couleurs rouge, verte et bleue qui sont les couleurs que l'on retrouve sur les cônes de l'œil. On obtient alors une image composée d'une mosaïque de points de couleur rouge, verte ou bleue et d'intensités différentes.

Chaque pixel a alors une couleur qui lui est attribuée. Le processus d'interprétation qui redonne à chaque pixel une couleur dite « vraie » nécessite (paradoxalement) une interprétation de cette mosaïque. Ce processus indispensable s'appelle le dématriçage. Il se fait généralement automatiquement dans les appareils photos. Mais il est possible d'agir dessus en

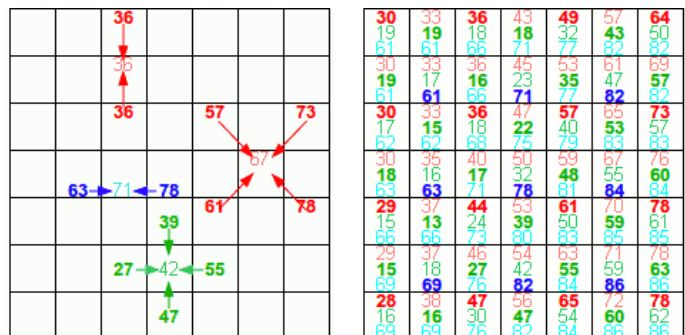


prenant des photos en format « RAW » (« brut » en anglais). Par opposition au format usuel « JPG » (ou « PNG » ou...), le RAW donne accès à l'information enregistrée par chaque pixel, sans interprétation. Ce qui n'est pas le cas des autres formats.

Le terme « dématriçage » vient du fait que la mosaïque formée par les capteurs d'appareil photo est donc traitée comme une matrice. Chaque pixel, ou pour être plus précis, chaque « photosite » n'enregistre l'information que d'une seule couleur. On recrée donc à près, la couleur supposée vraie du photosite par rapport aux couleurs des photosites voisins. Ce processus est source d'altération potentielle de l'image, comme par exemple le moiré, qui est l'apparition de lignes colorées au lieu d'un noir ou d'un blanc.

Le « dématriçage » correspond donc au passage de ce tableau de nombre correspondant à la valeur de chaque photosite pour UNE couleur à celui d'un tableau donnant un triplet de nombre par pixel pour donner une couleur dite réelle.

Un pixel est donc composé de l'intensité de son propre photosite pour la couleur qu'il représente, et on lui attribue la valeur moyenne de ses photosites voisins pour chacune des deux autres couleurs. On obtient ainsi une information de couleur calculée et qui représente la couleur dite réelle.



Si on reprend le tableau précédent, on obtiendrait, en calculant les moyennes des voisins, le tableau ci-contre.

#### 7.4.4. La Sensibilité « ISO »

Un réglage proposé par tous les appareils photos numériques est la sensibilité, ou « les ISO ». Il faut se rendre compte qu'il n'est pas possible physiquement de rendre un capteur plus ou moins sensible. Le rendement obtenu par le silicium qui compose nos capteurs est fixe : si trois particules lumineuses, appelées « photons », arrivent sur le capteur, deux électrons sont générés. Le courant électrique ensuite créé par ces électrons nous permet d'interpréter l'intensité lumineuse.

Afin d'augmenter la sensibilité, on peut bien sûr augmenter la taille des photosites, mais elle restera fixe pour un capteur (et donc un appareil) donné. L'autre manière est donc purement mathématique ;

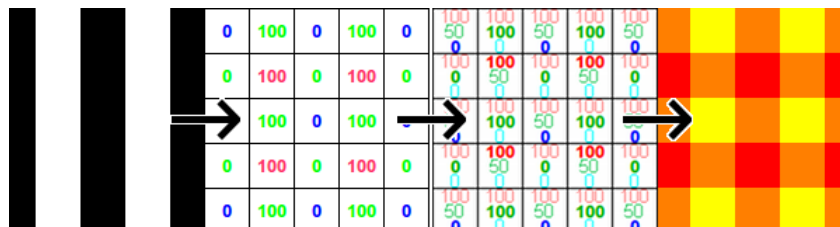
on peut amplifier le signal ainsi obtenu. Le problème est que, parfois, un électron est créé dans un photosite pour une autre raison que l'arrivée d'un photon.

Sans rentrer dans les détails, il peut arriver qu'un électron soit créé pour des raisons thermiques, car le capteur chauffe, surtout si l'on fait des photos avec de long temps d'exposition. Un autre phénomène qui peut se produire, est le passage d'un photosite à un autre, sous l'effet de phénomène quantique.

Quelle que soit la raison, ces électrons créés, et non désirés, vont se traduire par des signaux erronés, que l'on appelle « bruit ». Et bien sûr, si on augmente mathématiquement le signal, on augmente également le bruit ! Ce bruit peut être atténué à travers des algorithmes mathématiques qui vont interpréter l'image, mais il ne sera jamais intégralement supprimé. Ainsi, en fonction de l'algorithme choisi, le processus de dématricage d'une image peut se faire de différentes manières qui donneront donc des rendus différents.

### 7.4.5. Le Moiré

Un problème qui peut se rencontrer lors du dématricage est le phénomène appelé « moiré ». Pour l'illustrer, prenons un cas extrême. Imaginons que l'on photographie des lignes verticales noires et blanches, qui correspondent parfaitement à la taille des photosites deux capteur. Les colonnes noires donneront alors un résultat de zéro à chaque photosite, alors que les colonnes blanches auront tous les photosites à 100% (équivalent au 255 en 8bits). Si on applique le dématricage comme nous l'avons vu plus haut, on obtient alors un motif carrelé.



Il est presque facile d'expliquer, dans ce cas, le phénomène :

Dans les colonnes blanches, les photosites verts (qui sont donc à 100) sont entourés de voisins bleus avec une valeur zéro et de photosites rouges avec une valeur 100. Donc, le pixel aura comme couleur calculée 100 de vert, 100 de rouge et 0 de bleu ; ce qui donne du jaune.

Dans les colonnes noires, les photosites verts (qui sont donc à 0) sont entourés de voisins bleus avec une valeur zéro et de photosites rouges avec une valeur 100. Donc, le pixel aura comme couleur calculée 0 de vert, à 100 de rouge et 0 de bleu ; ce qui donne du rouge.

Il en va de même pour les photosites bleu et rouge.

Le dématricage produit donc des interférences, il détériore l'image. Ce phénomène arrive lorsque la taille des détails photographiés est proche de la taille du photosite, appelée « fréquence spatiale du capteur ». Cela se produit donc facilement sur des motifs petits et répétitifs, comme des barrières, des tuiles sur un toit, des feuilles dans un arbre, etc.

On peut combattre ce problème en utilisant, par exemple, un « filtre passe-bas » sur le capteur. Ce capteur va optiquement flouter l'image seulement pour des détails de cette taille-là. Cela

transformerait nos colonnes noires et blanches en un gris uniforme à 50%. Bien sûr, cela fait perdre du détail à l'image ; mais il permet aussi de faire disparaître ces interférences.

Une autre manière d'éviter ce problème est de modifier l'algorithme de dématricage, autrement dit la manière dont on calcule le triplet pour un pixel. Il est par exemple possible d'intégrer un détecteur de ligne ou de colonne (numériquement), et de demander alors un calcul allant dans la direction de la ligne ou colonne. Dans ce cas, et pour l'exemple précédent, on obtiendrait une colonne noire qui serait noire et une colonne blanche qui serait jaune, puisque composée uniquement de vert (à 100) et de rouge (à 100). Le résultat ne serait certes pas parfait, mais déjà bien plus proche de la réalité !

Il serait aussi possible de regarder les pixels plus éloignés que les voisins directs. On perdrait alors, comme avec le filtre passe-bas, du détail mais on perdrait également l'interférence !

Sans rentrer dans des détails algorithmiques, l'image ci-dessous présente le résultat du dématricage d'un même fichier RAW utilisant 4 algorithmes différents : AHD, VNG4, bilinéaire (logiciel gratuit « DCraw ») et Bibble 5 (logiciel payant).



On remarque que le « AHD » a un rendu assez net. Il rend bien le reflet bleu sur la soudure en haut à gauche. Le VNG4 est déjà plus flou ; le reflet bleu sur la soudure a été éliminé. Le bilinéaire est celui qui n'a aucun moiré, mais c'est surtout celui qui est clairement le plus flou. Le Bibble donne l'image la plus nette des quatre. Mais le moiré est très visible sur les pattes du composant en bas à gauche. On voit donc qu'il s'agit d'un problème de compromis entre perte de précision et élimination des interférences. Et c'est en ça que réside l'intérêt du format RAW : choisir le dématricage le plus adapté en fonction de l'image et des problèmes rencontrés sur cette image.

C'est donc dans cette problématique qu'un capteur à très haute définition (grand nombre de megapixels) est avantage par rapport à un appareil avec une résolution plus mauvaise. La sensibilité au moiré sera plus petite, les détails concernés seront plus petits et il faudra des détails beaucoup plus fins pour qu'un moiré apparaisse. De plus, dans le cas de l'utilisation d'un filtre passe-bas, il concernera des détails beaucoup plus fins et donc bien moins visibles. Il faut en plus ajouter à cela, comme dernier avantage (mais non le moindre), que les capteurs à très haute définition arrivent dans les limites de la résolution optiques des objectifs ; en d'autres termes, l'image sera naturellement floutée par l'objectif et donc moins sujette au moiré.

## 7.5. LE GAMMA

On appelle « le gamma » le fait qu'un dispositif, œil ou appareil ou photo ou autre, ne réagit pas de manière linéaire à la lumière. Plus clairement, cela veut dire que si on éclaire quelque chose un sujet sombre ou un sujet déjà éclairé avec une même source de lumière, la réaction de l'observateur (œil, appareil photo) ne sera pas identique. Ce qui est presque logique. Imaginons une pièce noire ; on allume une lampe, on a une certaine quantité de lumière. On allume une seconde lampe, parfaitement identique à la première, on n'a pas le double de lumière ! Et si on allume la même lampe en pleine journée, il n'y aura quasiment aucune différence ; alors que la quantité de lumière apportée est la même dans tous les cas !

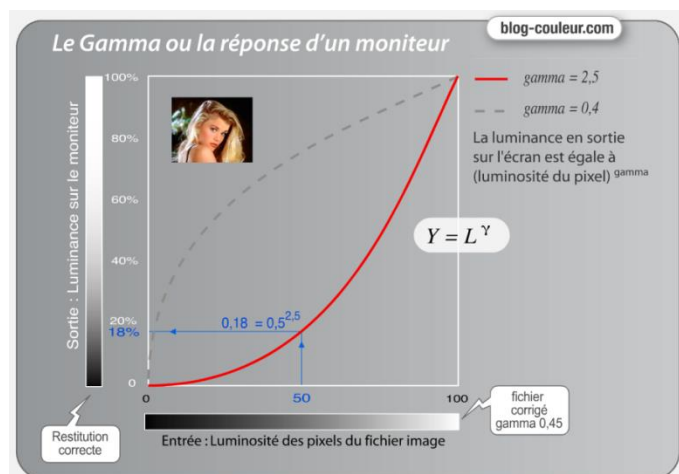
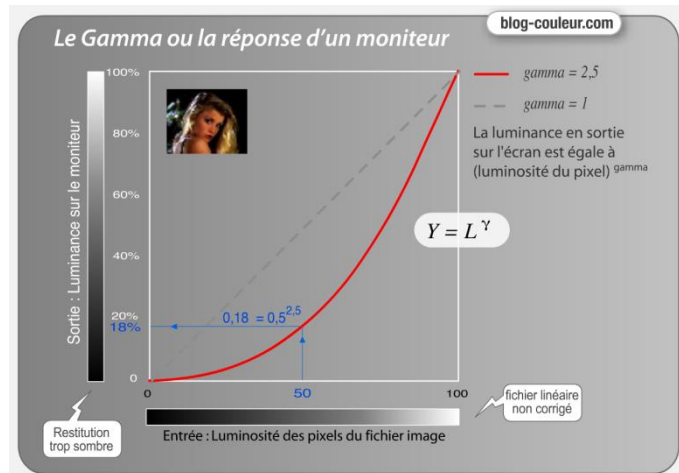
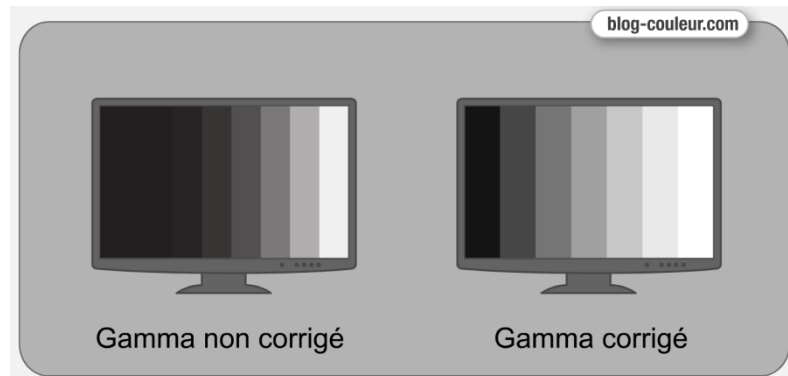
Le problème s'est posé dès l'apparition du téléviseur, il y a plus d'un siècle. Les images étaient très sombres et très contrastées.

Très rapidement, on comprît que si on doublait la tension d'accélération des électrons du tube cathodique, la luminosité ne doublait pas. Si on attribue une valeur relative de 100 de luminosité avec une tension de 100V (par exemple), on remarque qu'avec une tension de 50V on obtient une luminosité (relative) de 18. Ce rapport est donc « non-linéaire » et on l'appelle **gamma**. Cette valeur de gris à 18% est d'ailleurs restée comme référence ; puisqu'elle correspond à la valeur émise à partir d'une source dont on a divisé par deux l'intensité.

Ainsi, le lien entre le signal d'entrée et de sortie suit donc une fonction exponentielle. Si « Y » est la luminance de l'écran et « L » la luminosité du pixel enregistré, alors lien entre les deux s'écrit simplement

$$Y = L^\gamma$$

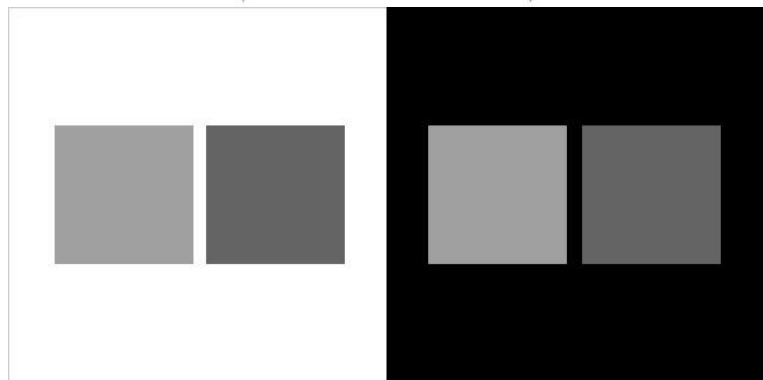
où  $\gamma$  est le gamma.



L'image ci-dessous illustre la problématique, en montrant l'assombrissement de l'image à cause de l'écran. Si maintenant on corrige ce problème à la prise de vue, le rendu sera tout de suite meilleur et l'image nous semblera plus claire, ou du moins « normalement » exposée. Ainsi, tous les appareils de prise de vue corrigent à l'enregistrement ce problème.



Le seul problème qui peut alors rester est le fait que l'écran utilisé n'est pas forcément exactement avec un gamma de 2.2. On appelle alors « réglage du gamma » la mesure et la correction de la dérive de l'écran par rapport à cette valeur de 2.2.



Ainsi, notre œil a un gamma, un appareil photo en a un autre, un écran en a un encore différent. Tous ces intermédiaires résultent en l'image finale, que nous voyons.

Cette notion est surtout importante pour un écran. Les valeurs « typiques » sont en général de 1.8 ou 2.2. Mais que choisir ? Quel est le gamma de l'œil ?

Cette notion est surtout importante si on veut calibrer son matériel (écran, scanner, ...). Ce gamma est en fait une courbe mathématique ; une relation entre la lumière « perçue » (la source de lumière) ou le signal de sortie (noté Y) et la lumière « rendue » (le capteur, l'œil, ...) ou le signal d'entrée (not L). Comme on l'a vue avant, cette relation s'écrit « simplement » :  $Y = L^\gamma$ .

Autrement dit, supposons un gamma de 2 pour simplifier le calcul ici, si on veut doubler la lumière reçue par mon appareil photo (ou mon œil) – donc L – il faut quadrupler la lumière émise – donc Y (car  $2^2=4$ ). Un œil ou un appareil n'a donc pas la même sensibilité à un changement de lumière si le milieu est fortement ou faiblement illuminé ; ce qui est assez intuitif. La lumière de l'écran de notre téléphone portable ne se voit quasiment pas en plein jour alors qu'elle sert presque de lampe de poche en pleine nuit !

Afin d'illustrer encore cela, l'image ci-dessous devrait aider. On place 2 carrés de gris différents côte-à-côte. A gauche, sur fond blanc ; à droite, sur fond noir. Il est alors évident que le contraste entre les deux gris, la différence entre un gris et l'autre, paraît plus marqué sur fond blanc que sur fond noir !

Pourtant, ce contraste est le même. Mais le gamma est différent ; une même quantité de lumière n'est pas perçue de manière identique dans un milieu lumineux (le fond blanc) que dans un milieu sombre (le fond noir).

Pour l'œil, son gamma change, typiquement entre 2 et 3 entre un temps couvert et une belle journée ensoleillée. Devant un écran, il est évalué à environ 2.2. L'œil s'adapte donc, pour s'adapter à la lumière environnante. Cela permet de lui éviter de saturer trop vite les cônes et les bâtonnets qui composent nos cellules photosensibles. Comment fait-il ? Simplement avec son **iris**. Cette jolie partie colorée qu'on admire chez les autres, joue en fait le rôle de rideaux, comme au théâtre, mais circulaire. Ainsi, la **pupille**, qui n'est en fait qu'un trou, est plus ou moins grande ; elle laisse passer plus ou moins de lumière. L'ouverture ou la fermeture se fait relativement rapidement. Elle passe de environ 1 millimètre de diamètre dans les cas de forte lumière et peut monter jusqu'à 6-7 millimètres de diamètre en pleine nuit (bien qu'il soit nécessaire de patienter plusieurs minutes parfois). Cela représente un rapport 7 en diamètre, donc un rapport 49 en surface ; autrement dit, 49 fois plus ou moins de lumière. En terme de photo, on parle de diaphragme, qui augmente ou diminue la quantité de lumière d'un facteur  $\sqrt{2}$  à chaque pas. On passe par exemple d'une ouverture F2.8 à F4 (facteur  $\sqrt{2}$ ) ou de F8 à F11 (facteur  $\sqrt{2}$ ). L'œil est donc capable de couvrir environ 24 diaphragmes. Sachant que pour une ouverture donnée – donc pour une taille d'iris fixe – l'œil est capable de voir environ 15 diaphragmes, cela donne à l'œil une flexibilité énorme en terme de lumière ; soit environ 40 diaphragmes. Il faut alors se rappeler, à titre de comparaison, que les appareils photo les plus performants dans ce domaine n'atteignent pas les 15 diaphragmes...

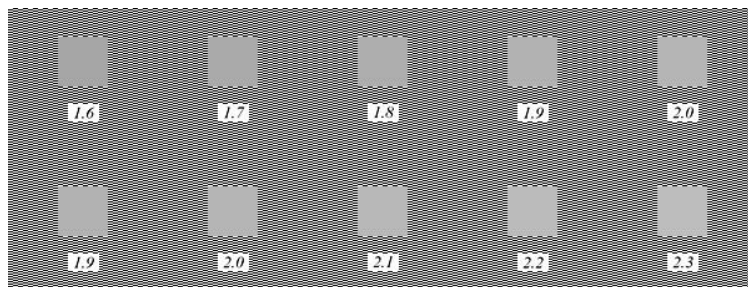
Une application de ce changement de gamma en fonction du contexte lumineux est l'image HDR ; High Dynamic Range. Le gamma de l'œil qui regarde « en vrai » et de l'œil qui regarde « sur l'écran » n'est pas le même. Comme une image HDR amène à un contraste atteignant facilement 15 diaphragmes, il est impossible de les reproduire sur un écran ayant un gamma de 2.2. L'image paraît alors fade. Du coup, on augmente le contraste pour la rendre plus « percutante », et comme effet secondaire, l'augmentation du contraste provoque une sursaturation des couleurs. On trouve ainsi ces photos HDR qui sont souvent fatigantes à regarder. L'exemple ci-dessous montre la différence entre une photo normale, avec un gamma adapté, une image HDR.

Pour illustrer autrement cette différence de gamma, imaginons qu'on voit illuminé d'un signal lumineux étant un gris à 50% parfait, donc un 127 sur des niveaux allant de 0 à 255. La courbe bleue illustre la réponse linéaire. Sur écran de gamma 2.2, le rendu sera un gris relativement foncé, puisqu'à cette valeur, le rendu est de 0.2, donc 20%, au lieu de 0.5. Si par contre on se met sur un gamma de 1.8, le même signal lumineux sera déjà plus clair puisqu'il se trouvera à environ 0.3, soit 30%.





Pour conclure, l'image ci-contre illustre le gamma en fonction de l'environnement. Si on s'approche de l'écran, certains échantillons vont se fondre sur le fond gris et d'autres sur le fond blanc ou gris claire du logiciel. Si on s'éloigne de l'écran, le gamma de notre œil change. Si on se repose les mêmes questions, on remarque que les pastilles qui se fondent dans le fond ou sur l'écran ne sont plus les mêmes.



## 7.6. LES PROFILS ICC

Pour bien gérer la couleur, il est obligatoire de comprendre le rôle des profils ICC. Ces profils décrivent le comportement colorimétrique d'un appareil. Ils permettent donc de traduire la couleur enregistrée, par exemple, par un appareil photo en une couleur identique retransmise par, par exemple, un écran ou une imprimante. Ces profils contiennent donc les notions de gamut, qui décrivent l'étendue des couleurs possibles par le périphérique concerné. Mais ils contiennent aussi les défauts ou les corrections à apporter au périphérique pour assurer un bon rendu de la couleur.

Concrètement, un profil ICC est un petit fichier, avec comme extension « .icc », qui est lié à un appareil : une imprimante, un écran, un scanner. Ces profils peuvent donc être modifié (ou remplacé) après un processus de calibration, qui permet de vérifier que le rendu des couleurs est fidèle (généralement en utilisant des mires ou des images de références).

Donc, comme on l'a dit en introduction, ce profil contient le gamut ou l'espace couleurs utilisés. Il donne ainsi « la liste » des couleurs possibles sur le périphérique concerné et dans la configuration donnée. Par contre, ce gamut est dépendant du périphérique. Il permet donc de dire si une couleur « absolue » est reproductible (ou non) sur ce périphérique. Il permet donc aussi de déterminer la valeur RVB d'une couleur codée « vraie » codée en  $L^*a^*b^*$ .

Le profil ICC est donc composé d'un tableau de nombre – une matrice – qui permet d'effectuer cette traduction. A l'extrême, cette matrice contiendrait 8 millions de nombres, correspondant aux 8 millions de couleurs contenues dans l'espace  $L^*a^*b^*$ . En pratique, cela demanderait beaucoup trop de ressources informatiques ; toutes les informations ne sont donc pas enregistrées et seules quelques valeurs sont retenues, en plus de la liste complète des « défauts », appelés *caractéristiques colorimétriques*.

Un profil ICC est donc totalement dépendant de son périphérique. Et même plus que cela, il dépend du périphérique et des conditions dans lesquelles la calibration a été effectuée. Autrement dit, on pourrait calibrer un écran de nuit avec un rendu parfait ; mais il faudrait le re-calibrer si on voulait l'utiliser avec une lumière allumée (et techniquement le faire pour chaque éclairage différent).

Ainsi, il est important de comprendre qu'un *espace couleur* n'est qu'une *gamut* ; un *profil ICC* est un *gamut* ET des *caractéristiques colorimétriques* propres au périphérique. La différence réside alors en la dépendance ou l'indépendance par rapport au périphérique.

Il est donc indispensable qu'une photo contienne le profil ICC de l'appareil qui l'a prise. Mais elle sera ensuite convertie – donc traduite – en un espace dans le logiciel utilisé. Une photo en JPEG est généralement enregistrée en sRGB ou en AdobeRGB ; alors qu'un RAW le sera en sRGB, AdobeRGB ou ProPhoto (généralement).

## **7.7. GAMUT D'UN PROFIL ICC**

L'espace couleur qui dépend d'un périphérique décrit alors les couleurs qu'il peut acquérir ou reproduire. C'est ce qu'on appelle son gamut. Mais il décrit également ses défauts, ou son comportement colorimétrique. Il faut donc définir deux éléments : d'une part ce que le périphérique est capable de capter ou d'imprimer ; d'autre part, la manière dont il le fait. En d'autres termes, imaginons une couleur absolue donnée, qui envoyée en impression sur une imprimante, qui imprime une couleur proche mais légèrement différente. Cette différence sera enregistrée dans son profil ICC afin de corriger ce « défaut » dans une future impression. Le processus de calibration est alors indispensable, qu'il s'agisse d'un écran, d'une imprimante, d'un scanner ou même ... d'un appareil photo !