

**René Bouillot • Marianne Lamour**

# **Guide pratique de l'éclairage**

**Cinéma • Télévision • Théâtre**

**5<sup>e</sup> édition**

**DUNOD**

*Illustration de couverture : © Arri Lighting*

Le pictogramme qui figure ci-contre mérite une explication. Son objet est d'alerter le lecteur sur la menace que représente pour l'avenir de l'écrit, particulièrement dans le domaine de l'édition technique et universitaire, le développement massif du photocopillage.

Le Code de la propriété intellectuelle du 1<sup>er</sup> juillet 1992 interdit en effet expressément la photocopie à usage collectif sans autorisation des ayants droit. Or, cette pratique s'est généralisée dans les établissements

d'enseignement supérieur, provoquant une baisse brutale des achats de livres et de revues, au point que la possibilité même pour

les auteurs de créer des œuvres nouvelles et de les faire éditer correctement est aujourd'hui menacée. Nous rappelons donc que toute reproduction, partielle ou totale, de la présente publication est interdite sans autorisation de l'auteur, de son éditeur ou du Centre français d'exploitation du droit de copie (CFC, 20, rue des Grands-Augustins, 75006 Paris).



© Dujarric, Paris, 1991 et 2003  
pour les deux premières éditions

© Dunod, 2007, 2012, 2016  
5 rue Paul Bert, 92240 Malakoff  
[www.dunod.com](http://www.dunod.com)  
ISBN 978-2-10-072666-0

Le Code de la propriété intellectuelle n'autorisant, aux termes de l'article L. 122-5, 2<sup>o</sup> et 3<sup>o</sup> a), d'une part, que les « copies ou reproductions strictement réservées à l'usage privé du copiste et non destinées à une utilisation collective » et, d'autre part, que les analyses et les courtes citations dans un but d'exemple et d'illustration, « toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite » (art. L. 122-4).

Cette représentation ou reproduction, par quelque procédé que ce soit, constituerait donc une contrefaçon sanctionnée par les articles L. 335-2 et suivants du Code de la propriété intellectuelle.

# Table des matières

	AVANT-PROPOS	11
	REMERCIEMENTS	12
	CHAPITRE 1 – LA LUMIÈRE ET LA COULEUR	13
1.1	Nature de la lumière	13
1.1.1	Aspect ondulatoire	13
1.1.2	Aspect corpusculaire de la lumière : le transfert d'énergie	14
1.1.3	Composition de la lumière blanche	16
1.1.4	Radiations invisibles : ultraviolet et infrarouge	17
1.2	Notions de photométrie	17
1.2.1	Flux lumineux	18
1.2.2	Intensité lumineuse	18
1.2.3	Éclairage	19
1.2.4	Luminance	20
1.3	Éclairage et exposition	20
1.4	Caractérisation des couleurs	22
1.4.1	Caractéristiques des couleurs	22
1.4.2	Système colorimétrique CIE	23
1.4.3	Évolution du système colorimétrique CIE	24
1.5	Température de couleur de la lumière (Tc) et température corrélée (Tcc)	26
1.5.1	La température de couleur (spectre continu)	26
1.5.2	La température de couleur corrélée (spectre discontinu)	27
1.5.3	Les blancs étalons	28
1.5.4	Indice de rendu des couleurs	28
1.5.5	Les indices CQS et TLCI	30
1.5.6	Valeurs mired	31
1.5.7	Les filtres de corrections caméra	32
1.5.8	La balance des blancs en numérique	32
1.6	Instruments de mesure de la lumière	33
1.6.1	Mesure de la température de couleur : le thermocolorimètre	33
1.6.2	La mesure spectrale de la couleur : le spectromètre	36
1.6.3	Mesure de l'exposition	37
1.6.4	Le posemètre	37
1.6.5	Mesure en lumière incidente	38
1.6.6	Mesure en lumière réfléchie	39
1.6.7	Mesure de l'éclairage	40

1.7	Les effets visuels	40
1.7.1	Adaptation de l'œil aux différentes luminances	41
1.7.2	Luminance relative	41
1.7.3	Limite de contraste	41
1.7.4	L'effet des ombres	42
1.8	Adaptation de l'œil aux couleurs	42
1.8.1	Adaptation à la température de couleur de l'illuminant	42
1.8.2	Adaptation locale à la couleur du motif dominant	42
1.8.3	Adaptation aux couleurs environnantes	42

---

## CHAPITRE 2 – LES BASES DE L'ÉCLAIRAGE

---

2.1	Rôle de l'éclairage	43
2.2	L'éclairage « outil » de composition	44
2.3	Qualité de l'éclairage	45
2.3.1	Lumière dirigée (dure)	45
2.3.2	Lumière diffuse (douce)	46
2.3.3	Lumière semi-dirigée	47
2.3.4	Lumière semi-diffuse	47
2.4	La direction de l'éclairage [Fig. 2.3]	48
2.4.1	Lumière frontale	50
2.4.2	Lumière de face	50
2.4.3	Lumière en position haute, à 45° environ	50
2.4.4	Lumière latérale	51
2.4.5	Contre-jour et semi-contre-jour	51
2.4.6	Lumière par en dessous	52
2.5	Ombre et lumière	52
2.6	Bâtir l'éclairage	53
2.6.1	Éclairage de base	55
2.6.2	Éclairage de base : le triangle	56

---

## CHAPITRE 3 – LES LAMPES NORMALISÉES

---

3.1	Les grandes familles de lampes	58
3.1.1	Généralités sur les sources de lumière artificielle	58
3.2	Lampes tungstène-halogènes (TH)	59
3.2.1	Types de lampes TH 3 200 K	63
3.2.2	Lampes à culot unilatéral (Single-Ended, <b>SE</b> )	64
3.2.3	Lampes à culot bilatéral (Double-Ended, <b>DE</b> )	67
3.3.4	Les lampes domestiques et types de culots	68

3.3	Lampes à décharge aux halogénures métalliques	69
3.3.1	HMI : nature et principe de fonctionnement	69
3.3.2	L'importance des HMI	71
3.3.3	Les ballasts pour HMI et lampes apparentées	72
3.3.4	Types de lampes HMI	79
3.3.5	Lampes CDM-T	80
3.3.6	Contrôle anti-UV	80
3.4	Éclairage par fluorescence	81
3.4.1	Tube fluorescent : nature et principe de fonctionnement	81
3.4.2	Tube fluorescent à luminophore « halophosphate »	82
3.4.3	Tube fluorescent « triphosphore » aux terres rares	83
3.4.4	Tubes ou lampes fluorescents utilisables pour la prise de vues	86
3.5	Les autres lampes à décharge	89
3.5.1	Vapeur de sodium	89
3.5.2	Iodures métalliques industrielles	89
3.5.3	Induction	89
3.5.4	Les directives environnementales	90
3.5.5	Évolutions et avenir	90

---

## CHAPITRE 4 – PROJECTEURS, SUPPORTS ET ACCESSOIRES

---

4.1	Généralités	92
4.1.1	Petit rappel d'optique	93
4.1.2	Caractéristiques du faisceau	94
4.2	Les grandes familles de projecteurs	96
4.2.1	Les projecteurs	97
4.2.2	Les ambiances	109
4.2.3	Projecteurs de cyclorama : cycliode	112
4.2.4	Projecteurs fluorescents	114
4.2.5	Lumières pour les grands espaces et autres projecteurs particuliers	116
4.3	Pieds, supports, accroches et suspensions	118
4.3.1	Pieds ou supports	118
4.3.2	Pincés, clamps, rotules et bras magiques	120
4.4	Accessoires de contrôle du faisceau	121
4.4.1	Contrôle de la forme du faisceau	121
4.4.2	Contrôle d'intensité et de diffusion	122
4.5	Les filtres gélatines	126
4.5.1	Généralités	126
4.5.2	es différentes gélatines	127
4.5.3	Les gélatines couleur	128

—————	CHAPITRE 5 – L'ÉCLAIRAGE EN STUDIO	—————	130
5.1	Dimensions du studio et hauteur utile du mur de fond		130
5.1.1	Hauteur totale du studio sous plafond		131
5.2	Niveau moyen de l'éclairage en studio		132
5.2.1	Les structures porteuses		132
5.2.2	Ponts et structures lumières démontables		138
5.3	Plans de plateaux		139
5.4	Notions d'éclairage scénique		144
5.4.1	Concept d'éclairage d'un spectacle [Fig. 5.13]		144
5.4.2	Positionnement des projecteurs		145
5.4.3	Sélection des projecteurs appropriés		146
5.4.4	Sélection des filtres		146
5.4.5	L'ordre des priorités		146
5.4.6	L'évolution de la lumière en cours de spectacle		147
5.4.7	Conception d'éclairage assisté par ordinateur [Fig. 5.14]		148
5.5	Éclairage des personnages		149
5.5.1	Un seul personnage		149
5.5.2	Contraste, caractère du personnage et climat dramatique		150
5.5.3	Deux personnages : le champ /contrechamp [Fig. 5.16]		151
5.6	Personnages en mouvement sur le plateau		151
5.7	Éclairage des objets		154
5.7.1	La lumière et le volume de l'objet		155
5.7.2	Évoquer la matière de l'objet par l'éclairage		155
5.7.3	Objets transparents [Fig. 5.21]		156
5.7.4	Objets métalliques		158
5.7.5	Objets translucides : porcelaine, faïence, matériau plastique		161
5.7.6	Objets en cuir, tissus, fourrure		162
5.7.7	L'éclairage de tableau de maître		163
—————	CHAPITRE 6 – ÉQUIPEMENT TECHNIQUE DU STUDIO	—————	164
6.1	Généralités		164
6.2	Câblage d'alimentation de puissance		165
6.3	Principes d'alimentation des luminaires		167
6.4	Gradateurs		168
6.4.1	Types de gradateurs		169
6.4.2	Les autres technologies de gradation		170
6.4.3	Protocole DMX		171
6.4.4	Étalonnage du potentiomètre gradateur : la loi des carrés		175
6.4.5	Les autres systèmes de transmission d'ordre		176

6.5	Consoles d'éclairage	177
6.5.1	Console manuelle	178
6.5.2	Console à mémoire	178
6.5.3	Un exemple de console à mémoire	181
6.6	Projecteurs automatisés dits « asservis »	184
6.6.1	Généralités	184
6.6.2	Les différents réglages motorisés	185
6.6.3	L'encodage ou l'adressage	186
6.6.4	Les commandes depuis la console	188
6.6.5	Type de motorisation	190
6.6.6	Les projecteurs à miroir (les scanners)	192
6.6.7	Les projecteurs sur lyres asservies	192
6.6.8	Un autre exemple de projecteur asservi : le Sunstrip	193
6.7	Sécurité électrique	194
6.7.1	Rappel des notions électriques de base	195
6.7.2	Conseils de sécurité	195
6.7.2	Quelques calculs utiles	197
6.8	Sécurité mécanique	198

---

## CHAPITRE 7 – ÉVOCATION D'UN CERTAIN CLIMAT

---

7.1	Effets atmosphériques	201
7.1.1	Brume et brouillard [Fig. 7.1]	201
7.1.2	La pluie	203
7.1.3	La nuit américaine	204
7.2	Contraste, valeurs sombres, valeurs claires	205
7.2.1	Image contrastée	205
7.2.2	Valeurs sombres ( <i>low key</i> )	205
7.2.3	Valeurs claires ( <i>high key</i> )	206
7.3	Éclairage changeant	206
7.4	Éclairage du décor	208
7.4.1	Niveau d'éclairement	208
7.4.2	Ombres gênantes sur le décor	208
7.4.3	Reflets	209
7.4.4	Architecture du décor et éclairage	209
7.4.5	Les lumières de jeu ou lampes domestiques	212

---

## CHAPITRE 8 – L'ÉCLAIRAGE LED

---

8.1	Introduction	213
8.2	L'invention	213

8.3	À la recherche de la lumière blanche : les différentes technologies	216
8.3.1	LED dites « blanches » utilisant la réémission d'un phosphore	216
8.3.2	LED émettrice d'ultraviolet excitant plusieurs phosphores	216
8.3.3	LED UV + phosphore RGB	217
8.3.4	La LED blanche à nanoparticules (QD-LED)	217
8.3.5	PRS-LED	219
8.3.6	Lumière blanche par mélange des faisceaux de LED de différentes couleurs	220
8.4	Particularités des luminaires à LED	223
8.4.1	Homogénéité de l'éclairage et de la teinte de la lumière	223
8.4.2	Gradation et pilotage (ou drivers) des sources LED	223
8.4.3	Influence de la température	225
8.4.4	Efficacité lumineuse des LED	225
8.4.5	Mesure colorimétrique adaptée aux LED	225
8.4.6	Les risques oculaires	226
8.5	Les projecteurs à LED	226
8.5.1	Le SL1 5600 de DMG lumière (140 W - 2 700 lux à 1 m, 400 lx à 3 m)	226
8.5.2	Le Sky panel C-Color de chez ARRI lighting (200 W. pour 5600 K - de 513 à 908 lux à 3 m)	226
8.5.3	Trucolor HS2 de Cinéo lighting (5600K, 450 W, 1 200 lux à 3 m)	227
8.5.4	Fiilex P360 (5600 K, 90 W, de 185 à 530 lx à 3 m)	227
8.5.5	Autres montages LED	227
8.5.6	L'étude de la CST	227
8.6	Les autres domaines d'applications	228
8.6.1	Éclairage automobile et éclairage public	228
8.6.2	Éclairage domestique	228
8.6.3	Spectacles et divertissements	229
8.6.4	Évolution et idées à suivre	229

---

## CHAPITRE 9 – TOURNAGE HORS STUDIO

---

9.1	L'éclairage en production	231
9.1.1	Définition d'un style d'éclairage	231
9.1.2	L'homogénéité du traitement technique	232
9.1.3	Comment maintenir l'homogénéité de l'éclairage ?	233
9.2	Les conditions du tournage hors studio	234
9.2.1	Les branchements provisoires	234
9.2.2	Groupe électrogène	235
9.2.3	Quelques règles de sécurité et de bon sens du tournage en extérieur	237
9.3	Extérieur jour	238
9.3.1	Diminution du contraste : emploi de réflecteurs passifs	238
9.3.2	Diffuseurs et masques noirs	239



9.3.3	Emploi de projecteurs en extérieur	240
9.3.4	Emploi de luminaires TH	241
9.3.5	Équilibre lumière du jour / lumière d'appoint	242
9.4	Extérieur nuit	242
9.5	Éclairage en intérieur existant	243
9.5.1	Les contraintes	244
9.5.2	Alimentation électrique des projecteurs	246
9.6	Ateliers, bureaux, locaux commerciaux	247
9.6.1	Éclairage fluorescent	247
9.7	Éclairage de reportage	250
9.7.1	Autonomie, packs et batterie	250
9.7.2	Technique d'éclairage volant	252
9.7.3	Les studios improvisés	253

---

## CHAPITRE 10 – EFFETS SPÉCIAUX

---

10.1	Effets colorés	255
10.2	Feu	256
10.3	Éclairs d'orage	256
10.4	Lampe-torche et autres sources mobiles	257
10.5	Bougies, chandeliers, flambeaux	257
10.6	Fonds photographiques et incrustations	258
10.6.1	Généralités	258
10.6.2	Découverte	259
10.6.3	Transparence	259
10.6.4	Image composite optique : le travelling matte	259
10.6.5	Image composite optique : la projection frontale [Fig. 10.3]	260
10.6.6	Image composite électronique : colorkey et fond bleu [Fig. 10.5]	261
10.7	Éclairage des maquettes	263
10.8	La réalité virtuelle	264
10.8.1	Éclairage des objets virtuels	268
10.9	Éclairage assisté par ordinateur	268

---

## CHAPITRE 11 – ANNEXE : SENSIBILITÉ ET EXPOSITION

---

11.1	Exposition	272
11.2	Sensibilité	274
11.3	Cinéma : calcul de l'éclairement requis	275

—————	RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES ET LOGICIELLES	—————	276
	Livres		276
	Articles		276
	Logiciels cinéma pour smartphones		276
	Sites de références		277
—————	GLOSSAIRE DE L'ÉCLAIRAGE	—————	278
—————	INDEX	—————	285

# Avant-propos

Dans cet ouvrage, nous utilisons le terme de photographie au sens étymologique « écrire avec la lumière », c'est-à-dire qu'il englobe tous les procédés d'obtention des images qu'elles soient fixes (la photo) ou animées (le cinéma et la vidéo), que leur support d'enregistrement soit argentique ou numérique. Cependant, comme pour tous les aspects de la réalisation, les considérations esthétiques, techniques et pratiques sont intimement liées et ne peuvent être envisagées que dans leur ensemble. Il va de soi que les notions théoriques ne servent à rien sans le « talent », mais ce dernier ne saurait s'exprimer pleinement sans une connaissance suffisante des équipements et de leurs possibilités.

Un aspect fondamental de l'éclairage, c'est qu'il ne s'applique pas directement : les images sont enregistrées sur des supports différents que nous appellerons de manière générale des caméras (quelles soient film, numérique ou pour l'image fixe) et ces différentes caméras ne réagissent pas comme notre œil et notre pensée. En d'autres termes, les images de la réalité que l'on « voit » ne sont pas identiques à celles qui sont effectivement enregistrées sur le film, sur disque dur ou carte Flash ou tout autre support de stockage des informations. Lors de la présentation publique, en projection ou en lecture, elles sont soumises à des conditions variables en fonction de l'environnement et des équipements utilisés. Il y a donc une certaine « transposition » à effectuer entre la prise de vues et les images « finales » pour que celles-ci traduisent fidèlement, non pas la réalité, mais les intentions du réalisateur. Ces facteurs prennent en compte différents aspects techniques, tels que le niveau d'éclairage, le contraste entre la lumière et l'ombre, la température de couleur, etc. Chacun d'entre eux a une influence décisive sur l'image, en contribuant ainsi à l'évocation d'un « certain climat », dans le dessein de « raconter une histoire », de relater des événements, de représenter des êtres et des choses, de faire partager des émotions.

Cet ouvrage permet également d'aborder et de comprendre les récentes évolutions de la technologie en matière de lumière ainsi que celles des médias, lesquelles influencent profondément les méthodes de tournage et les conditions de production. La LED a fait une apparition forte dans l'éclairage et a entraîné avec elle toute une remise en cause (des moyens de mesures de la colorimétrie à l'évolution des plateaux). On la retrouve donc présente dans la plupart des champs d'applications, que ce soit l'éclairage public, le monde du spectacle et celui des médias. Ces changements sont profonds mais le parc de projecteurs traditionnels reste encore à l'heure d'aujourd'hui, un élément clé du travail de lumière et qui plus est, il risque de nous réserver, encore de belles surprises.

# Remerciements

Le travail de la lumière a toujours été un travail de fourmi, de recherche. On apprend tous les jours et on continue avec les nouveaux supports, les nouvelles technologies. On découvre de nouveaux outils mais également des nouveaux horizons. Ce sont ces pas en avant constants qui rendent nos métiers si passionnants. C'est également un formidable travail d'équipe où l'on côtoie des personnalités et des savoirs si différents, si riches en découvertes. J'en profite donc pour remercier pour leurs gentillesse et leurs apports, tous ceux qui ont aidé à finaliser cette réécriture et notamment :

Robin Juttun de la société CET Lighting  
Henrich Moseid de la société Softs Lights  
Jean-Charles Pasquier de la société Eclalux  
Franck Ledesma de la société Key Lite  
Stéphane Samama de la société Dimatec  
Jean-Jacques Régule de Konica France  
L'équipe de K5600 (Bruno et Aveline)  
Jean-François Maugier de la société Maluna  
Gilles Arnaud et Benoît Gueudet de la CST  
Jean-Jacques Bouhon, chef opérateur  
Niels De Montgrand de la société DMG  
Aurélien Py, chef opérateur  
Paul Raz Chemin et M. P. Frappier

# Chapitre 1

## La lumière et la couleur

La lumière est produite par des sources naturelles (soleil, éclairs d'orage, éruptions volcaniques) ou artificielles, parmi lesquelles des sources à incandescence, des sources à décharge (HMI, tubes fluorescents, par exemple) et des sources à luminescence (diodes, écrans plasma, tubes cathodiques).

### 1.1 Nature de la lumière

Depuis le début du XX<sup>e</sup> siècle, on admet que les théories ondulatoire et corpusculaire des radiations ne sont pas opposées, mais qu'elles représentent deux aspects complémentaires d'une même réalité physique. En résumant, les ondes électromagnétiques sinusoïdales transportent des « grains » d'énergie appelés photons.

#### 1.1.1 Aspect ondulatoire

La lumière visible n'occupe qu'une toute petite fraction du spectre des ondes électromagnétiques, lequel s'étend des rayons cosmiques aux ondes hertziennes. Une radiation de la lumière peut être caractérisée par sa longueur d'onde ( $\lambda$ ) exprimée en nanomètres (nm) ( $1 \text{ nm} = 10^{-9} \text{ m}$ ) et par sa fréquence d'oscillation par seconde ( $f$ ) ( $1 \text{ Hz} = 1 \text{ cycle/s}$ ), que l'on exprime plus commodément en térahertz (THz) ( $1 \text{ THz} = 10^{12} \text{ Hz}$ ) et bien sûr, en fonction de la vitesse ( $c$ ) de propagation des ondes électromagnétiques dans le vide. Cette constante universelle vaut  $299\,792,5 \text{ km/s}$  (arrondi pour les calculs à  $3 \times 10^8 \text{ m/s}$ ). Les relations sont :

$$\text{Longueur d'onde : } \lambda = c / f$$

$$\text{Fréquence : } f = c / \lambda$$

Les radiations perceptibles par l'œil humain sont celles dont la fréquence est comprise entre  $789 \text{ THz}$  (à la frontière du domaine UV) et  $385 \text{ THz}$  (début du domaine IR), qui correspondent, respectivement, aux longueurs d'onde  $\lambda = 380 \text{ nm}$  et  $\lambda = 780 \text{ nm}$ .

À chaque longueur d'onde du spectre visible correspond une sensation visuelle de « couleur » différente. Cependant, les lumières monochromatiques (formées d'une seule longueur d'onde) n'existent pas réellement dans la nature (les lumières que l'on dit monochro-

matiques ne sont en effet jamais définies avec une seule longueur d'onde car elles possèdent également une longueur d'onde dans l'infra-rouge, que l'on nomme doublet). On peut cependant isoler les longueurs d'onde soit par étalement d'un spectre (spectrographie), soit en les engendrant par effet laser, soit encore en les extrayant de la lumière blanche à l'aide d'un filtre interférentiel à bande passante très étroite (technique que l'on utilise encore avec les thermocolorimètres pour analyser la couleur d'une source, cf. § 1.6.1).

Si, à notre échelle, la lumière se propage en ligne droite, c'est en réalité une suite de vibrations sinusoïdales : ces vibrations sont transversales, c'est-à-dire perpendiculaires à leur sens de propagation. Dans le cas d'un projecteur, la propagation est multi directionnelle. Il est cependant des cas où l'onde n'oscille que dans un seul plan de l'espace : elle est dite polarisée. La polarisation peut être naturelle (réflexion de la lumière sur une surface non métallique) ou provoquée par son passage à travers un filtre polariseur [cf. Fig. 1.1].

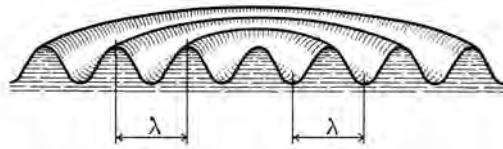


Figure 1.1 — Ondes formées à la surface d'un liquide : la longueur d'onde ( $\lambda$ ) d'une vaguelette est la distance séparant deux ventres (crêtes) ou deux nœuds (fonds).

On obtient des vibrations transversales – comme celles de la lumière – en jetant une pierre dans l'eau : les molécules du liquide sont alors animées d'un mouvement oscillatoire. À la surface de l'eau se forment des rides circulaires concentriques. La crête de chaque ride est le ventre, le fond est le nœud : la distance séparant deux nœuds (ou deux ventres) successifs est la longueur d'onde, symbolisée par la lettre grecque lambda ( $\lambda$ ). Un bouchon posé à la surface de l'eau suit les oscillations de la masse liquide en se soulevant sur la crête de la vague et en s'enfonçant dans le creux, mais sans changer de place. On voit que l'énergie cinétique développée par la pénétration de la pierre dans l'eau est transportée par les ondes, mais que la masse liquide ne fait qu'osciller perpendiculairement à leur sens de propagation [cf. Fig. 1.2].

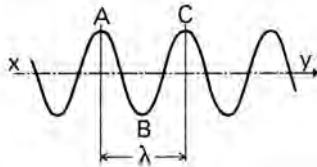


Figure 1.2 — Onde électromagnétique sinusoïdale. La longueur d'onde ( $\lambda$ ) est représentée par la distance AC.

### 1.1.2 Aspect corpusculaire de la lumière : le transfert d'énergie

Alors que les lois de l'optique classique – réflexion, réfraction, dispersion, diffraction, interférences, polarisation, etc. – sont vérifiées par la théorie ondulatoire d'Huyghens-Fresnel, cette dernière ne rend nullement compte de la photosensibilité des halogénures d'argent, ni de la conversion des photons en électrons dans le silicium dopé, ni de l'émission de rayons X par le bombardement électronique d'une cible métallique. Ces phénomènes ne s'expliquent que si l'on admet que ces rayonnements sont constitués de corpuscules se propageant à la vitesse de la lumière et transportant une quantité d'énergie strictement proportionnelle à la fréquence de l'onde associée. Le transfert d'énergie de la lumière à la

matière (cas de la lamination du film ou du capteur) s'effectue de manière discontinue ; la quantité d'énergie transférée est un multiple entier d'une grandeur unitaire qu'on appelle un quantum de lumière ou photon. Soit  $q$  cette grandeur unitaire, cela signifie qu'une lumière monochromatique de fréquence donnée ne peut céder son énergie à la matière que par « paquets » de  $1q, 2q, 3q, 4q, 5q \dots nq$  ;  $n$  étant un nombre entier.

### COMMENT CALCULER L'ÉNERGIE DES PHOTONS ?

Bien qu'ils sont inutiles en pratique, ces calculs intéresseront le lecteur curieux de la chose physique et sachant se servir d'une calculatrice scientifique ou d'un tableur d'ordinateur (sinon, c'est une occasion d'apprendre !). Calculons l'énergie des trois photons de couleur primaire, rouge, vert et bleu (valeurs indiquées dans le tableau 1.1).

Données de base :

Vitesse de la lumière :  $c = 3 \times 10^8$  m/s

Constante de Planck :  $h = 4,135 \times 10^{-15}$  eV  $\times$  1 nm =  $10^{-9}$  m.

1. Énergie du photon « bleu » primaire ( $\lambda = 436$  nm)

(a) Fréquence de la lumière bleue :

$$3 \times 10^8 / 436 \times 10^{-9} = 6,88 \times 10^{14} \text{ Hz (688 THz).}$$

(b) Énergie du photon bleu :  $W = 4,135 \times 10^{-15} \times 6,88 \times 10^{14} = 2,85$  eV

2. Énergie du photon « vert » primaire ( $\lambda = 546$  nm)

(a) Fréquence de la lumière verte :

$$3 \times 10^8 / 546 \times 10^{-9} = 5,49 \times 10^{14} \text{ Hz (549 THz).}$$

(b) Énergie du photon vert :  $W = 4,135 \times 10^{-15} \times 5,49 \times 10^{14} = 2,27$  eV

3. Énergie du photon « rouge » primaire ( $\lambda = 700$  nm)

(a) Fréquence de la lumière rouge :

$$3 \times 10^8 / 700 \times 10^{-9} = 4,285 \times 10^{14} \text{ Hz (428,5 THz).}$$

(b) Énergie du photon rouge :  $W = 4,135 \times 10^{-15} \times 4,285 \times 10^{14} = 1,77$  eV

L'action de la lumière sur la matière – à l'échelle atomique – fut expliquée en 1905 par Albert Einstein : en appliquant les principes établis par Max Planck à propos du rayonnement du corps noir [cf. § 1.5.1], il posa l'équation simple permettant de calculer l'énergie  $W$  d'un photon en fonction de la fréquence  $\nu$  (en hertz) de la lumière et de la constante de Planck ( $h$ ). Dans le système S.I. (m, s, J), la constante de Planck vaut :  $W = h \times \nu$  (Hz)

- Exprimée en joules par seconde :  $h$  (J/s) =  $6,625 \times 10^{-34}$
- Exprimée en électronvolts :  $h$  (eV) =  $4,135 \times 10^{-15}$

Le tableau 1.1 (ci-dessous) montre que l'énergie transportée par un photon est proportionnelle à sa fréquence, de sorte qu'un photon de lumière bleue est plus énergétique qu'un photon de lumière verte et qu'un photon de lumière rouge. Cela a deux conséquences intéressantes à connaître parmi d'autres :

- En optique dioptrique : un rayon bleu pénétrant dans un milieu plus réfringent (le verre d'un prisme ou d'une lentille) est plus réfracté (dévié) qu'un rayon rouge. C'est la cause de l'aberration chromatique qui, dans tout système optique, doit être corrigée par la combinaison de lentilles de différentes natures.

- En optoélectronique des capteurs imageurs : en pénétrant dans le silicium « photosensible », un photon bleu se convertit en électron près de la surface, alors qu'un photon rouge se convertit dans la profondeur du matériau. Ce phénomène a permis de créer un type de capteur avec lequel la sélection trichrome (RVB) est effectuée par chacun des pixels, c'est-à-dire sans emploi de filtres colorés (capteur FX3 de Foveon).

La trichromie est un élément constitutif de nos différents supports d'enregistrement. Les films couleur comprennent une couche sensible au rouge, une sensible au vert et une sensible au bleu. En numérique, les capteurs CCD séparent au moyen d'un prisme la lumière en trichromie sur trois capteurs différents. Pour les capteurs CMOS, c'est la matrice de Bayer qui fait fonction de filtre de la couleur en rouge, vert et bleu. Les informations sont ensuite converties par un nouveau passage par cette même matrice (debayerisation). Il est important de noter cette différence entre les deux procédés de captation en numérique. Cette différence aura son importance lorsque l'on s'intéressera de près à la mesure de la couleur [cf. § 1.6.1].

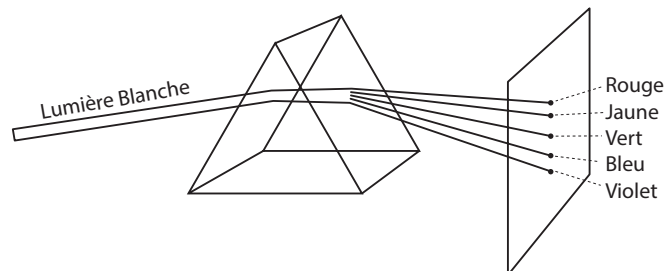
Tableau 1.1 — Énergie du photon en fonction de la longueur d'onde ( $\lambda$ ) et de la fréquence ( $\nu$ ) de la lumière

« Couleur » du photon	Longueur d'onde ( $\lambda$ )	Fréquence ( $\nu$ ) (en THz)	Énergie du photon (en J)	Énergie du photon (en eV)
Ultraviolet proche	350 nm	857	$5,68 \times 10^{-19}$	3,55
Bleu	436 nm	688	$4,56 \times 10^{-19}$	2,85
Vert	546 nm	549	$3,64 \times 10^{-19}$	2,28
Rouge	700 nm	428,5	$2,84 \times 10^{-19}$	1,77
Infrarouge proche	800 nm	375	$2,48 \times 10^{-19}$	1,55

### 1.1.3 Composition de la lumière blanche

Quand l'ensemble des radiations solaires frappe nos yeux, nous ressentons l'impression de lumière blanche, mais cette lumière blanche est formée du mélange d'un grand nombre de radiations correspondant chacune à une longueur d'onde et donc à une couleur déterminée. La démonstration en est faite – depuis Newton – en dirigeant un mince faisceau de lumière blanche sur la face d'un prisme. Le faisceau émergent est dévié vers la base du prisme et il est étalé en un spectre de plages colorées juxtaposées : c'est le phénomène de la dispersion. Les radiations étant d'autant plus réfractées qu'elles sont de plus courte longueur d'onde, les rayons bleus sont plus déviés que les rayons rouges [cf. Fig. 1.3].

Figure 1.3 — Expérience de Newton : dispersion de la lumière. Les radiations sont d'autant plus déviées vers la base du prisme que leur longueur d'onde est courte.





En observant un spectre solaire – un arc-en-ciel par exemple – on distingue trois zones principales : une zone violet-bleu, une zone verte et une zone rouge. Aux limites de recoupement de ces trois zones, on remarque deux bandes colorées très étroites : une bleu-vert (entre le violet-bleu et le vert) et une jaune (entre le vert et le rouge).

Le spectrographe permet d’obtenir un spectre très étalé selon les longueurs d’onde. On y distingue les raies spectrales qui correspondent à l’émission lumineuse des corps simples ou composés. Par convention, les différentes bandes de couleurs spectrales correspondent aux longueurs d’ondes suivantes [cf. Fig. 1.4] :

400 à 435 nm	violet	435 à 500 nm	bleu	500 à 570 nm	vert
570 à 595 nm	jaune	595 à 625 nm	orange	625 à 740 nm	rouge

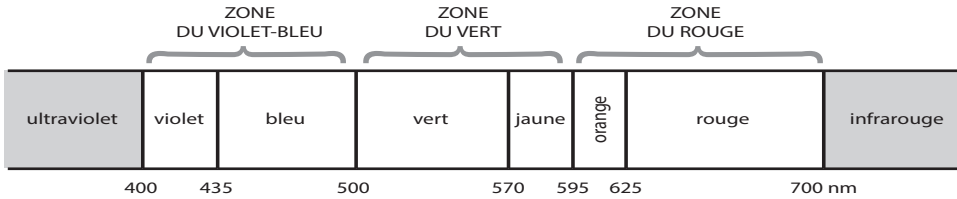


Figure 1.4 — Le spectre visible. Répartition des radiations en fonction de leur longueur d’onde.

### 1.1.4 Radiations invisibles : ultraviolet et infrarouge

Le spectre visible est prolongé à chacune de ses extrémités par des radiations invisibles. Du côté des longueurs d’ondes courtes se trouvent les radiations ultraviolettes (UV), lesquelles jouent un rôle sur la pigmentation de la peau que chacun connaît, jusqu’à provoquer avec certaines sources – telles les lampes HMI – des brûlures, si toutefois on ne s’en protège pas. Le domaine de l’ultraviolet est globalement compris entre 400 et 10 nm. Du côté des grandes longueurs d’ondes, le rouge visible est prolongé par l’infrarouge (IR) qui agit sur des capteurs électroniques (jusqu’à  $\lambda = 1\,000$  nm environ) et les films argentiques spécialement sensibilisés. Il est surtout connu pour ses propriétés calorifiques. La bande très vaste de l’infrarouge est globalement comprise entre 750 nm (limite du rouge visible par l’œil humain) et 300  $\mu\text{m}$  (300 000 nm). Au-delà de l’IR commence le domaine des ondes radio hyperfréquences.

## 1.2 Notions de photométrie

Il est difficile de parler objectivement de l’éclairage sans rappeler quelques notions simples de photométrie, qui est la science de la mesure des intensités lumineuses. Les données de base de la photométrie sont l’intensité, le flux lumineux, l’éclairement et la luminance. Ces quatre facteurs sont liés comme ceci : une source d’éclairage artificielle (une lampe électrique) rayonne dans toutes les directions de l’espace un flux lumineux dont l’unité est le lumen (lm). Ce flux a, dans une direction donnée, une certaine intensité exprimée en candelas (cd) ; une surface, placée à une certaine distance de la source, reçoit un éclairement qui s’exprime en lux (lx). Enfin, la surface éclairée renvoie une partie de l’éclairement reçu en direction de l’observateur (dans le cas qui nous occupe, l’objectif de la caméra) : c’est la luminance exprimée en candelas par mètre carré ( $\text{cd}/\text{m}^2$ ).

### 1.2.1 Flux lumineux

Le flux lumineux – exprimé en lumens (lm) – indique la quantité globale de lumière qu'une lampe émet dans toutes les directions. Telle lampe halogène de 2 000 W (2 kW) émet, par exemple, un flux lumineux de 52 000 lm.

### 1.2.2 Intensité lumineuse

L'intensité lumineuse (I) – dont l'unité est le candela (cd) – indique le flux lumineux émis par unité d'angle solide  $\omega$  (oméga) dans une direction donnée. L'angle solide est l'angle au sommet d'un cône. I est ainsi le rapport de la surface S du segment sphérique que le cône découpe sur une sphère de rayon  $r$ , au carré du rayon de cette sphère ( $\omega = S/r^2$ ). L'angle solide a la valeur d'un stéradian (sr), lorsque le cône délimite une surface d'un mètre carré sur une sphère d'un mètre de rayon [cf. Fig. 1.5].

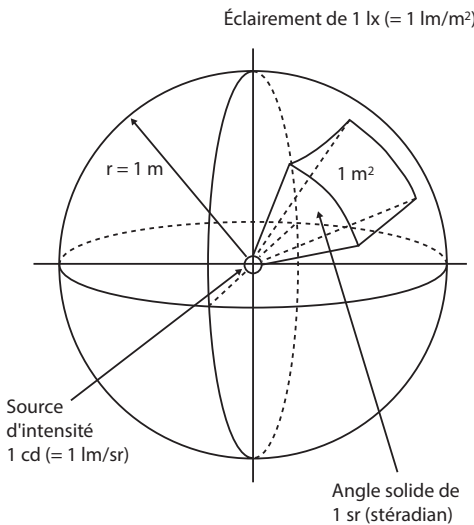


Figure 1.5 — Éléments de base de la photométrie. Une source d'intensité 1 candela placée au centre d'une sphère de rayon  $r = 1$  m, produit sur la calotte sphérique de surface  $1 \text{ m}^2$  – délimitée par un angle solide de 1 stéradian (sr) – un éclairement de 1 lux (lx), soit 1 lumen par mètre carré ( $\text{lm}/\text{m}^2$ ).

L'intensité lumineuse (d'une lampe ou d'un projecteur) varie dans les diverses directions : on peut la représenter par un diagramme polaire [cf. Fig. 1.6].

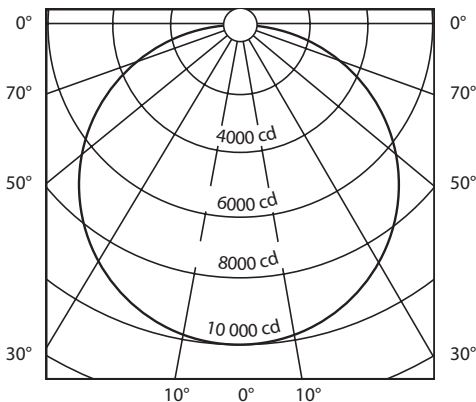


Figure 1.6 — Le diagramme polaire indique les valeurs d'intensité lumineuse (en cd) de la lampe ou du luminaire, dans les diverses directions. La longueur du vecteur issu de la source représente – en degrés par rapport à l'axe – l'intensité selon la direction considérée.  
Document Osram.

### 1.2.3 Éclairement

L'unité est le lux (lx). L'éclairement (E) indique le flux lumineux (lm) reçu par une surface d'un mètre carré. Connaissant l'intensité lumineuse I (cd) et la distance (d) d'un luminaire à la surface éclairée, on peut calculer l'éclairement en divisant l'intensité lumineuse I par le carré de la distance d (en mètres) [cf. Fig. 1.8] :

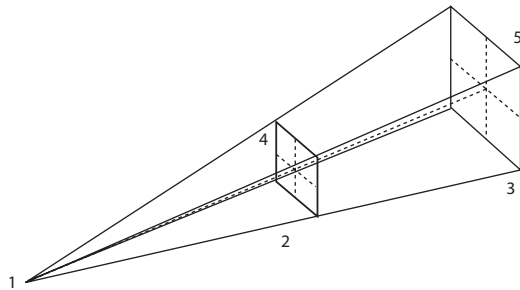
$$E \text{ (lx)} = \frac{I \text{ (cd)}}{d^2 \text{ (m)}}$$

Lorsque la surface n'est pas perpendiculaire à l'axe de la source, l'éclairement diminue en raison du cosinus de l'angle  $\alpha$  que fait la surface avec la direction de la source [cf. Fig. 1.7] :

$$E \text{ (lx)} = \frac{I \text{ (cd)}}{d^2 \text{ (m)}} \cdot \cos \alpha$$

Figure 1.7 — L'éclairement décroît en raison inverse du carré de la distance.

1. Source ponctuelle
2. Distance D1
3. Distance D2
4. Éclairement au centre (E1)
5. Éclairement au centre (E2).

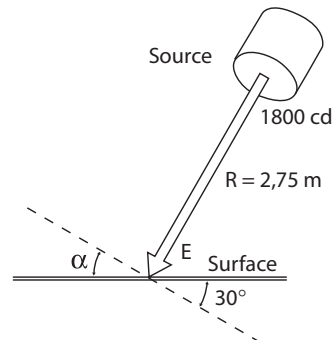


Exemple [Fig. 1.8] : soit une source de 40 000 cd placée à 5 m d'une surface inclinée à 45°. L'éclairement reçu par la surface est :

$$E \text{ (lx)} = \frac{40\,000}{5^2} \cdot \cos 45^\circ \text{ (soit } 0,707) = 1\,130 \text{ lx}$$

L'éclairement en lux est la valeur généralement utilisée pour caractériser un éclairage (dans ce cas perpendiculairement à la source et à une distance précisée), ainsi que la sensibilité relative d'un système vidéo ou cinéma. On dira, par exemple, qu'il faut (avec un sujet moyen) régler le diaphragme à f/4 pour un éclairement de 1 000 lx (sensibilité équivalente à 200 ISO).

Figure 1.8 — L'éclairement E (lx) dépend de l'intensité I (cd) de la source, de la distance R de la source à la surface éclairée et du cosinus de l'angle  $\alpha$  entre la surface et la normale à la source. Sur ce schéma : I = 1 800 cd ; R = 2,75 m ;  $\alpha = 30^\circ$ . Le calcul indique que cette surface reçoit un éclairement de 206 lx.



### 1.2.4 Luminance

La luminance visuelle ( $L$ ) est le quotient de l'intensité lumineuse d'une surface, par l'aire apparente de cette surface, pour un observateur lointain. En termes plus simples, c'est « la brillance » d'une surface réfléchissante éclairée, telle qu'elle est vue par l'œil ou l'objectif de la caméra. Son unité légale est le candela par mètre carré ( $\text{cd}/\text{m}^2$ ). Avec une caméra cinéma ou vidéo, c'est le seul paramètre significatif pour la détermination de l'exposition, c'est-à-dire l'ouverture du diaphragme en fonction de la sensibilité du système. La luminance varie selon deux facteurs : l'éclairement  $E$  ( $\text{lx}$ ) sur une zone déterminée de la scène et le facteur de réflexion ( $r$ ) de cette surface.

Le facteur de réflexion est le quotient du flux réfléchi par le flux incident :

$$r = \frac{\text{flux réfléchi}}{\text{flux incident}}$$

$r$  a toujours une valeur inférieure à 1 (ou à 100 % si on l'exprime en pourcentage), car aucune substance ne réfléchit 100 % de la lumière qu'elle reçoit. C'est ici qu'intervient la notion extrêmement importante de « facteur de réflexion moyen ». C'est celui d'une surface grise qui, quel que soit son éclairement, paraît à nos yeux exactement intermédiaire entre le blanc et le noir. Puisqu'il s'agit d'un jugement subjectif, la charte grise de référence (Kodak gris moyen) n'a pas un facteur  $r = 0,5$  (ou 50 %) (celle-ci paraîtrait presque blanche) mais son facteur de réflexion est  $r = 0,18$  (ou 18 %). Connaissant l'éclairement  $E$  (en lux) de telle zone du sujet vue par l'objectif, la relation suivante permet de calculer sa luminance  $L$  :

$$L (\text{cd}/\text{m}^2) = 1/\pi \times r \times E [1/\pi = 0,318]$$

- Exercice – Calculons la luminance du même sujet éclairé sous une incidence de 45° (comme au § 1.2.3) soit par un projecteur, soit par le soleil moyen [cf. Tab. 1.3] :
- Sous le projecteur (1 130 lx) :  $L = 0,318 \times 0,18 \times 1\,130 = 65 \text{ cd}/\text{m}^2$
- Sous le soleil moyen (48 000 lx) :  $L = 0,318 \times 0,18 \times 48\,000 = 2\,750 \text{ cd}/\text{m}^2$ .

Nous voyons que, toutes autres conditions étant égales, le même sujet moyen est 42 fois (2 750/65) plus lumineux au soleil que sous un projecteur de studio. Cela équivaudrait (la sensibilité globale du système restant constante) à fermer le diaphragme de 5,5 divisions (– 5,5 IL) environ. On comprend mieux pourquoi, en extérieur par beau temps, une caméra vidéo broadcast requiert l'insertion d'un filtre gris neutre et aussi pourquoi on a besoin de luminaires HMI très puissants pour réduire le contraste d'une scène tournée en plein soleil (ou, inversement, pour augmenter le contraste d'une scène platement éclairée par un ciel couvert). Les cinéastes savent que l'utilisation du film négatif type tungstène (3 200 K) en extérieur par beau temps (5 500 K) requiert l'emploi du filtre convertisseur 85B, mais également d'un filtre densité neutre 0,6 ou 0,9, permettant d'opérer à une ouverture de diaphragme « raisonnable ».

## 1.3 Éclairement et exposition

En vidéo, on ne se soucie guère de calculs : on dispose du viseur électronique de la caméra et, en studio, des indications, voire des réglages télécommandés depuis la régie via le CCU de chaque caméra s'il s'agit – comme sur un plateau de télévision – d'un tournage à plusieurs caméras. Il n'en va pas du tout de même en cinéma, où

l'opérateur doit impérativement savoir quelle ouverture de diaphragme afficher sur son objectif. En extérieur, il la mesure habituellement en lumière réfléchie (luminance) avec un posemètre ou un spotmètre dont le récepteur est orienté sur la plage « moyenne » (un visage ou l'élément important de la scène) : le temps de pose « normal » est à 25 im/s de 1/50 s, si l'obturateur est réglé à la valeur nominale de 180°. En studio, il est préférable d'établir une mesure d'éclairement au luxmètre dont l'intégrateur hémisphérique est dirigé vers l'objectif, juste au niveau du sujet (ainsi la « mesure » en lumière incidente tient compte de toutes les sources présentes atteignant le sujet à cet endroit précis). Les fabricants de film donnent habituellement un tableau de correspondance entre l'ouverture de diaphragme à adopter et l'éclairement nécessaire pour un film de sensibilité ISO donnée. Notez bien qu'en mesure incidente, la valeur mesurée est valable pour un sujet « moyen » ayant un facteur r de réflexion de 0,18 : elle est à modifier selon que ce sujet est plus ou moins réfléchissant que la moyenne (la correction d'ouverture à appliquer peut jouer sur plus d'une division de diaphragme en plus ou en moins).

Tableau 1.2 — Éclairement (lux), sensibilité film (ISO) et ouverture (f/n)

ISO	f/1,4	f/2	f/2,8	f/4	f/5,6	f/8	f/11	f/16
50	500	1 000	2 000	4 000	8 000	16 000	32 000	64 000
100	250	500	1 000	2 000	4 000	8 000	16 000	32 000
200	125	250	500	1 000	2 000	4 000	8 000	16 000
400	63	125	250	500	1 000	2 000	4 000	8 000
800	32	63	125	250	500	1 000	2 000	4 000

Tableau 1.3 — Valeurs repères d'éclairement en lux et en IL (Indice de lumination)

Pleine lune	0,5 lux	
Lumière d'une bougie à 30 cm	10 lux	4 IL
Rue de nuit bien éclairée	70 lux	5 IL
Pièce d'appartement	150 lux	6 IL
Bureau, atelier	300 lux	7 IL
Grande surface commerciale	600 lux	8 IL
Stade de nuit, salle de sport	1 500 lux	9 IL
Studio de cinéma, Télévision	2 600 lux	10 IL
Extérieur beau temps à l'ombre	10 000 lux	12 IL
Ciel couvert	20 000 lux	13 IL
Soleil légèrement voilé	42 000 lux	14 IL
Plein soleil	90 000 lux	15 IL

En vidéo, on « gagne » l'équivalent d'une division de diaphragme de l'objectif à chaque fois que l'on augmente le gain caméra de 6 dB ; mais on ne le fait qu'en cas d'absolue nécessité. Même si une caméra broadcast a la capacité de donner une image « accep-

table » sous un éclairage aussi faible que 25 lux par exemple, on cherche toujours à opérer sous un éclairage de 10 fois à 50 fois plus puissant. De cette manière, le gain électronique est optimal (0 dB), le rapport signal/bruit (RSB) en dB est maximal et le diaphragme est plus fermé. Les conséquences sur la qualité de l'image sont bien connues : meilleure résolution de l'image (en particulier dans les régions marginales), absence de bruit et profondeur de champ plus étendue, à distance et focale égales. En studio cinéma ou vidéo, l'éclairage au niveau des personnages se situe généralement entre 2 000 et 3 000 lux.

En cinéma ou en télévision, on travaille peu avec le candela/m<sup>2</sup>. On utilise plutôt une échelle logarithmique qui permet une correspondance directe avec le diaphragme affichable des optiques : l'indice de lamination IL (ou EV pour *exposure value*). Calculé avec une sensibilité de référence de 100 ISO, chaque indice correspond au doublement de l'éclairage reçu.

## 1.4 Caractérisation des couleurs

Bien évidemment, il ne suffit pas que le film ou le capteur numérique de la caméra reçoive une quantité suffisante de lumière, il faut également que la qualité spectrale de la lumière soit adaptée aux caractéristiques d'analyse du récepteur. Avec l'apparition de la fluorescence, l'industrie avait imaginé l'IRC pour définir une qualité de lumière. L'apparition des LED dans l'éclairage, leurs spectres discontinus et leurs réponses peu normalisables à la définition d'IRC, a obligé à redéfinir d'autres indices ainsi que les espaces colorimétriques de référence (la qualité d'une source n'étant plus définissable seulement par la température de couleur ou l'IRC).

Notre façon de qualifier la colorimétrie de ces nouvelles sources et de la mesurer a profondément changé et continue d'évoluer. Tout en restant dans notre domaine d'activité qu'est la conception d'éclairage, en voici les éléments clés.

### 1.4.1 Caractéristiques des couleurs

Une couleur peut être définie par trois caractéristiques fondamentales :

1. La teinte (longueur d'onde dominante) : c'est la sensation visuelle de « couleur » ressentie par l'observateur pour une radiation ou, plus généralement, un ensemble de radiations.
2. L'intensité, soit la luminance. L'ensemble des radiations élémentaires qui composent une couleur a son intensité propre. Si l'on veut augmenter ou diminuer l'intensité d'une couleur sans modifier sa teinte, il faut faire varier dans la même proportion toutes les intensités élémentaires qui la composent.
3. La saturation (ou facteur de pureté) : lorsqu'une couleur monochromatique (couleur spectrale) ou complexe (résultant du mélange de radiations de différentes longueurs d'ondes) n'est pas mélangée de lumière blanche, on dit que cette couleur est pure ou saturée. On a rarement affaire à des couleurs pures, c'est-à-dire saturées à 100 % : la couleur des objets est toujours mélangée de blanc (ou de lumière blanche).

### 1.4.2 Système colorimétrique CIE

#### ◆ Histoire de la trichromie

Tous les travaux relatifs à l'image couleur sont fondés sur le système colorimétrique XYZ défini à partir de 1931 par la Commission Internationale de l'Éclairage (CIE) en partant du principe que le mélange de trois couleurs primaires donne un aperçu de l'ensemble des couleurs. Ces trois primaires arbitraires, le bleu, le vert et le pourpre, appelées « coefficients de distribution chromatique » servent donc de coordonnées pour représenter une couleur. Leur longueur d'onde maximum est située à 435,8 nm pour la composante Z-bleue ; à 564,1 nm pour la composante Y-verte. Pour la composante X-pourpre (magenta), il y a deux longueurs d'onde dominantes : une à 600 nm, la principale, et une moins importante dans le violet-bleu (vers 450 nm) [cf. Fig. 1.9].

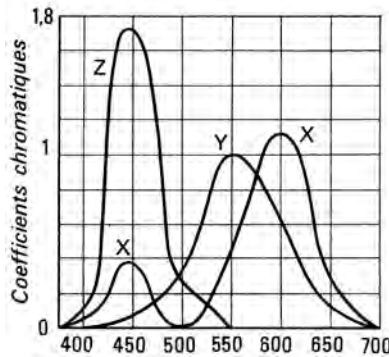


Figure 1.9 — Composantes primaires du système CIE de 1931. Composantes X (pourpre) ; Y (verte) ; Z (bleu). On remarque que la composante pourpre X présente un second maximum dans le violet-bleu (450 nm) ; cela s'explique par le fait que le pourpre n'est pas une couleur spectrale, mais la complémentaire du vert, d'où son nom minus green (moins vert). D'autre part, la composante verte Y reproduit sensiblement la courbe de sensibilité chromatique de l'œil. Ce mélange a été choisi comme la référence la plus proche de l'œil humain. On appelle ces courbes la fonction de mélange de l'observateur standard.

#### ◆ L'espace colorimétrique CIE Yxy 1931

La CIE a donc commencé par définir un observateur de référence que l'on appelle l'observateur standard et un angle d'observation ( $2^\circ$ , puis  $10^\circ$  quelques années plus tard). Une représentation graphique complète d'un espace colorimétrique nécessite un diagramme à trois dimensions. Pour arriver à une unification des résultats, la CIE a dû également redéfinir un nouvel espace de couleur pour la représentation graphique dans deux dimensions : il s'agit de l'espace couleur Yxy, dans lequel Y est l'intensité et x et y sont les coordonnées calculées à partir de la valeur tristimulus XYZ. Pour éliminer la variation d'intensité lumineuse, on divise tous les coefficients par la somme des trois. On remplace les composantes XYZ par des valeurs x, y, z telles que l'on ait toujours  $x + y + z = 1$ . Il est donc facile de retrouver la valeur de l'intensité avec les deux autres coordonnées et il n'est donc plus nécessaire de la représenter.

### ◆ Point de chromaticité et coordonnées chromatiques

La chromaticité permet de différencier toutes les sources de lumière, même celles dont le spectre est discontinu, en définissant des coordonnées chromatiques et en situant la « sensation de couleur » (stimulus) ressentie par l'observateur standard dans l'espace colorimétrique. Deux valeurs suffisent donc pour définir la chromaticité d'une couleur. Le point de (chaque) couleur est donc spécifié par ses coordonnées  $(x, y)$  sur le diagramme de chromaticité [cf. Fig. 1.10 ci-dessous. Voir également l'image en couleur au verso de la couverture].

Sur ce diagramme, les couleurs se situent nécessairement dans le polygone délimité par les couleurs qui ont servi pour les constituer. Il s'agit d'un triangle dont un sommet est du côté des rouges, un autre du côté des verts, et le troisième du côté des bleus. La limite en forme de fer à cheval donne la position des couleurs spectrales (saturées à 100 %). Les couleurs sont toujours contenues à l'intérieur. Le rapport d'une couleur donnée avec toutes les autres est instantanément visualisable. La ligne droite fermant le fer à cheval marque la position des magentas (pourpres), qui, bien que saturés, n'existent pas dans le spectre. On indique alors leur longueur d'onde dominante par la négative de leur complémentaire verte.

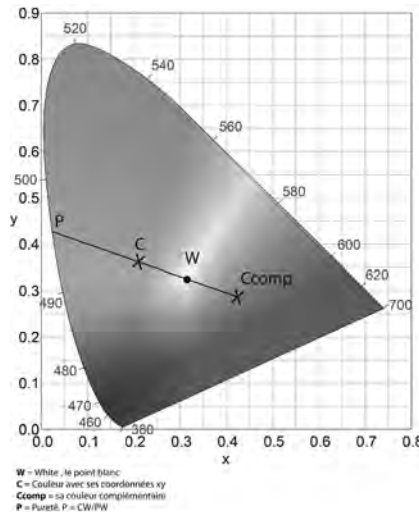


Figure 1.10 — Diagramme de chromaticité CIE Yxy 1931.

C'est l'observateur standard 2° qui a donné les bases du diagramme de chromaticité de la CIE Yxy de 1931. Issues de cet espace, nous retrouvons les coordonnées chromatiques qui définissent une couleur, en lecture sur les spectromètres [cf. § 1.6.2]. Le référent sur lequel s'appuie l'IRC actuel est l'observateur standard 10° et sa fonction de mélange. [Cette image est visible en couleurs en couverture].

## 1.4.3 Évolution du système colorimétrique CIE

### ◆ CIE Yxy 1931

La couleur étant définie par ses paramètres de teinte et de saturation, ce diagramme de chromaticité  $(x, y)$  présente plusieurs inconvénients :

- Les couleurs n'y sont pas uniformément distribuées (l'espace des verts étant disproportionné).



- Deux points de chromaticité éloignés de la même distance ne sont pas vus avec le même écart de couleur et limitent le nombre de couleurs intermédiaires que l'on peut différencier.

Mais son grand avantage est de permettre de déterminer sa couleur complémentaire très rapidement en traçant une droite du point de chromaticité d'une couleur et passant par le point blanc jusqu'à la limite opposée sur le fer à cheval (donnant ainsi deux nouvelles coordonnées) et également de mesurer sa saturation, ce qui permet de trouver rapidement une couleur identique, mais avec une saturation différente. La plupart des nuanciers de gélatines (pour la caméra ou pour les projecteurs) nous donnent les coordonnées chromatiques  $xy$  dans cet espace [cf. Fig. 1.10].

#### ◆ CIELUV 1976 et les autres espaces

Afin de permettre le contrôle des couleurs tout au long du processus allant de la prise de vues à la visualisation des images par le spectateur, le système colorimétrique de la CIE a fait l'objet de nombreux développements et adaptations. C'est pourquoi un autre diagramme, dit de chromaticité uniforme ( $u'$ ,  $v'$ ), a été défini en 1976. Il a été conçu pour fournir une perception plus uniforme des différences de couleurs entre deux points avec la même luminance et il correspond un peu plus à la perception humaine des couleurs. Les coordonnées chromatiques  $u$  et  $v$  sont également calculées à partir des valeurs de tristimulus XYZ. Nous les retrouvons donc dans la lecture des spectromètres utilisés dans nos métiers.

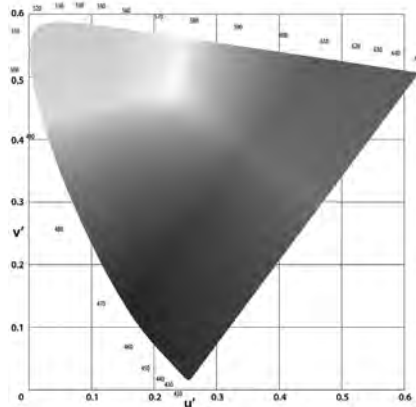


Figure 1.11 — Diagramme de chromaticité CIE Luv 1976.  
[Cette image est visible en couleurs en couverture]

La colorimétrie est un domaine en pleine évolution et dont les normes le sont également. L'industrie utilise d'autres espaces colorimétriques (CIE Lab, pour ne citer que lui, pour les couleurs de surface par exemple). Il n'est pas nécessaire de tous les aborder.

Pour ceux que le sujet intéresse, vous pouvez vous référer à l'excellent ouvrage de Jacques Gaudin sur la colorimétrie appliquée à la vidéo.

*« Aucune modélisation cependant ne peut contenir toute la vérité de la vision humaine ; une modélisation n'est rien d'autre qu'un outil et c'est avant tout son efficacité qui prime même si une certaine part d'empirisme demeure dans sa conception. »*

Jacques Gaudin, Colorimétrie appliquée à la vidéo, 2<sup>e</sup> édition

## 1.5 Température de couleur de la lumière (Tc) et température corrélée (Tcc)

Dans les métiers de l'éclairage, deux types de sources sont utilisées : les sources de lumière à spectre continu, comme le soleil ou l'incandescence, et celles avec un spectre discontinu, comme la fluorescence, les lampes à décharge ou encore les LED [cf. Fig. 1.12]. La température de couleur est une échelle permettant de les qualifier. Cependant, elle ne le fait pas avec la même précision selon qu'il s'agit de spectre continu ou de spectre discontinu.

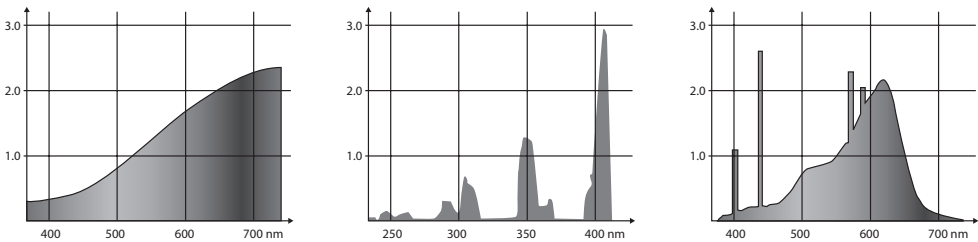


Figure 1.12 — Trois spectres de sources typiques.

1. Source continue (lampe TH 3 200 K).
2. Source discontinue (lampe à mercure émettant dans l'UV).
3. Source « combinée » (tube fluorescent).

### 1.5.1 La température de couleur (spectre continu)

La composition spectrale d'une lampe à incandescence, par exemple, est à spectre continu. Elle peut donc être définie avec précision par sa température de couleur (Tc) en kelvins (K). Pour ces corps incandescents – dits « corps noirs » – il y a en effet un rapport constant entre la température du corps chauffé et la composition de la lumière qu'il émet. On sait, par exemple, qu'un morceau de fer chauffé à 800 °C est rouge, à 1 000 °C jaune et à 1 500 °C (sa température de fusion) blanc : le rayonnement émis est d'autant plus riche en radiations bleues que la température est plus élevée. Les températures en kelvins ne sont autres que les températures exprimées en degrés absolus, c'est-à-dire à partir du zéro absolu (-273 °C). Par exemple, 1 000 K correspond à 1 000 - 273 = 727 °C (degrés Celsius).

Pour visualiser la température de couleur de source à spectre continu, on utilise l'équation du radiateur de Planck ou Corps noir, qui donne la relation entre un corps noir théorique absorbant toutes les radiations et la chaleur qu'il est nécessaire d'utiliser pour porter ce même corps à incandescence et qu'il émette une luminosité mesurable. Cette équation se présente sous la forme d'une courbe qui parcourt le diagramme de chromaticité en son centre, le blanc d'égal énergie (nous verrons plus tard son importance, cf. § 1.5.3) et qui affiche les différentes émissions de lumière normalisées en fonction de la température (en kelvins) [cf. Fig. 1.13].

La lumière solaire moyenne (mélange soleil et ciel au zénith) a une Tc voisine de 6 000/6 500 K ; les lampes à incandescence utilisées en studio (de la famille des lampes tungstène-halogène, ou TH) ont une Tc nominale de 3 200 K lorsqu'elles sont alimentées dans les termes indiqués par le constructeur.