

Guide pratique de l'éclairage

René Bouillot • Marianne Lamour

Guide pratique de l'éclairage

Cinéma • Télévision • Théâtre

7^e édition

DUNOD

Graphisme de couverture : Elizabeth Riba
Illustration de couverture : © Dedo Weigert Film

<p>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.</p> <p>Le Code de la propriété intellectuelle du 1^{er} 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</p>	 <p>DANGER LE PHOTOCOPIAGE TUE LE LIVRE</p>	<p>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.</p> <p>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).</p>
--	--	--

© Dujarric, 1991 et 2003
pour les deux premières éditions
© Dunod, 2007, 2012, 2016, 2019, 2022
11 rue Paul-Bert, 92240 Malakoff
www.dunod.com
ISBN 978-2-10-083688-8

Le Code de la propriété intellectuelle n'autorisant, aux termes de l'article L. 122-5, 2^o et 3^o 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	13
REMERCIEMENTS	14
CHAPITRE 1 – LA LUMIÈRE ET LA COULEUR	15
1.1 Nature de la lumière	15
1.1.1 Aspect ondulatoire	15
1.1.2 Aspect corpusculaire de la lumière : le transfert d'énergie	16
1.1.3 Composition de la lumière blanche	18
1.1.4 Radiations invisibles : ultraviolet et infrarouge	19
1.2 Notions de photométrie	19
1.2.1 Flux lumineux	20
1.2.2 Intensité lumineuse	20
1.2.3 Éclairement	21
1.2.4 Luminance	22
1.3 Éclairement et exposition	22
1.4 Caractérisation des couleurs	24
1.4.1 Caractéristiques des couleurs	24
1.4.2 Système colorimétrique CIE	25
1.4.3 Évolution du système colorimétrique CIE	26
1.5 Température de couleur de la lumière (T_c) et température corrélée (T_{cc})	28
1.5.1 La température de couleur (spectre continu)	28
1.5.2 La température de couleur corrélée (spectre discontinu)	29
1.5.3 Les blancs étalons	30
1.5.4 L'indice de rendu des couleurs IRC	30
1.5.5 Les indices CQS et TLCI	32
1.5.6 La méthode IES TM 30-15 (devenu TM 30-20)	33
1.5.7 Valeurs mired	35
1.5.8 Les filtres de corrections caméra	35
1.5.9 La balance des blancs en numérique	36
1.6 Instruments de mesure de la lumière	36
1.6.1 Mesure de la température de couleur : le thermocolorimètre	36
1.6.2 La mesure spectrale de la couleur : le spectromètre	39
1.6.3 Mesure de l'exposition	41
1.6.4 Le posemètre	41
1.6.5 Mesure en lumière incidente	42
1.6.6 Mesure en lumière réfléchie	43
1.6.7 Mesure de l'éclairement	44

1.7	Les effets visuels	44
1.7.1	Adaptation de l'œil aux différentes luminances	45
1.7.2	Luminance relative	45
1.7.3	Limite de contraste	45
1.7.4	L'effet des ombres	46
1.8	Adaptation de l'œil aux couleurs	46
1.8.1	Adaptation à la température de couleur de l'illuminant	46
1.8.2	Adaptation locale à la couleur du motif dominant	46
1.8.3	Adaptation aux couleurs environnantes	46

CHAPITRE 2 – LES BASES DE L'ÉCLAIRAGE

2.1	Rôle de l'éclairage	47
2.2	L'éclairage, « outil » de composition	48
2.3	Qualité de l'éclairage	49
2.3.1	Lumière dirigée (dure)	49
2.3.2	Lumière diffuse (douce)	50
2.3.3	Lumière semi-dirigée	51
2.3.4	Lumière semi-diffuse	51
2.4	La direction de l'éclairage	52
2.4.1	Lumière frontale	54
2.4.2	Lumière de face	54
2.4.3	Lumière en position haute, à 45° environ	54
2.4.4	Lumière latérale	55
2.4.5	Contre-jour et semi-contre-jour	55
2.4.6	Lumière par en dessous	56
2.5	Ombre et lumière	56
2.6	Bâtir l'éclairage	57
2.6.1	Éclairage de base	59
2.6.2	Éclairage de base : le triangle	59

CHAPITRE 3 – LES LAMPES NORMALISÉES

3.1	Les grandes familles de lampes	61
3.1.1	Généralités sur les sources de lumière artificielle	61
3.2	Lampes tungstène-halogènes (TH)	62
3.2.1	Types de lampes TH 3 200 K	66
3.2.2	Lampes à culot unilatéral (<i>single-ended</i> , SE)	66
3.2.3	Lampes à culot bilatéral (<i>double-ended</i> , DE)	68
3.2.4	Les lampes domestiques et types de culots	69
3.3	Lampes à décharge aux halogénures métalliques	69
3.3.1	HMI : nature et principe de fonctionnement	70

3.3.2	L'importance des HMI	72
3.3.3	Les ballasts pour HMI et lampes apparentées	73
3.3.4	Types de lampes HMI	80
3.3.5	Lampes CDM-T	81
3.3.6	Contrôle anti-UV	81
3.4	Éclairage par fluorescence	82
3.4.1	Tube fluorescent : nature et principe de fonctionnement	82
3.4.2	Tube fluorescent à luminophore « halophosphate »	83
3.4.3	Tube fluorescent « triphosphore » aux terres rares	84
3.4.4	Tubes ou lampes fluorescents utilisables pour la prise de vues	87
3.5	Les autres lampes à décharge	89
3.5.1	Vapeur de sodium	89
3.5.2	Iodures métalliques industrielles	90
3.5.3	Induction	90
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	110
4.2.3	Projecteurs de cyclorama : cycliode	113
4.2.4	Projecteurs fluorescents	115
4.2.5	Lumières pour les grands espaces et autres projecteurs particuliers	117
4.3	Pieds, supports, accroches et suspensions	119
4.3.1	Pieds ou supports	119
4.3.2	Pincés, clamps, rotules et bras magiques	121
4.4	Accessoires de contrôle du faisceau	122
4.4.1	Contrôle de la forme du faisceau	122
4.4.2	Contrôle d'intensité et de diffusion	123
4.5	Filtres gélatines et verres	127
4.5.1	Généralités	127
4.5.2	Les différentes gélatines	128
4.5.3	Les gélatines couleur	129

CHAPITRE 5 – L'ÉCLAIRAGE EN STUDIO

5.1	Dimensions du studio et hauteur utile du mur de fond	131
5.1.1	Hauteur totale du studio sous plafond	132

5.2	Niveau moyen de l'éclairage en studio	133
5.2.1	Les structures porteuses	133
5.2.2	Ponts et structures lumières démontables	139
5.3	Plans de plateaux	140
5.4	Notions d'éclairage scénique	145
5.4.1	Concept d'éclairage d'un spectacle	145
5.4.2	Positionnement des projecteurs	146
5.4.3	Sélection des projecteurs appropriés	147
5.4.4	Sélection des filtres	147
5.4.5	L'ordre des priorités	147
5.4.6	L'évolution de la lumière en cours de spectacle	148
5.4.7	Conception d'éclairage assistée par ordinateur	149
5.5	Éclairage des personnages	150
5.5.1	Un seul personnage	150
5.5.2	Contraste, caractère du personnage et climat dramatique	151
5.5.3	Deux personnages : le champ/contrechamp	152
5.6	Personnages en mouvement sur le plateau	152
5.7	Éclairage des objets	155
5.7.1	La lumière et le volume de l'objet	156
5.7.2	Évoquer la matière de l'objet par l'éclairage	156
5.7.3	Objets transparents	157
5.7.4	Objets métalliques	159
5.7.5	Objets translucides : porcelaine, faïence, matériau plastique	162
5.7.6	Objets en cuir, tissus, fourrure	163
5.7.7	L'éclairage de tableau de maître	164
<hr style="width: 20%; margin-left: 0; margin-right: auto;"/> CHAPITRE 6 – ÉQUIPEMENT TECHNIQUE DU STUDIO <hr style="width: 20%; margin-left: auto; margin-right: 0;"/>		165
6.1	Généralités	165
6.2	Câblage d'alimentation de puissance	166
6.3	Principes d'alimentation des luminaires	168
6.4	Gradateurs	169
6.4.1	Types de gradateurs	170
6.4.2	Les autres technologies de gradation	171
6.4.3	Protocole DMX	172
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	178
6.5.1	Console manuelle	179
6.5.2	Console à mémoire	179
6.5.3	Un exemple de console à mémoire	182

6.6	Projecteurs automatisés dits « asservis »	185
6.6.1	Généralités	185
6.6.2	Les différents réglages motorisés	186
6.6.3	L'encodage ou l'adressage	187
6.6.4	Les commandes depuis la console	189
6.6.5	Type de motorisation	191
6.6.6	Les projecteurs à miroir (les scanners)	193
6.6.7	Les projecteurs sur lyres asservies	193
6.6.8	Un autre exemple de projecteur asservi : le Sunstrip	194
6.7	Sécurité électrique	195
6.7.1	Rappel des notions électriques de base	196
6.7.2	Conseils de sécurité	196
6.7.3	Quelques calculs utiles	198
6.8	Sécurité mécanique	199

CHAPITRE 7 – ÉVOCATION D'UN CERTAIN CLIMAT

7.1	Effets atmosphériques	202
7.1.1	Brume et brouillard	202
7.1.2	La pluie	204
7.1.3	La nuit américaine	205
7.2	Contraste, valeurs sombres, valeurs claires	206
7.2.1	Image contrastée	206
7.2.2	Valeurs sombres (<i>low key</i>)	206
7.2.3	Valeurs claires (<i>high key</i>)	207
7.3	Éclairage changeant	207
7.4	Éclairage du décor	209
7.4.1	Niveau d'éclairage	209
7.4.2	Ombres gênantes sur le décor	209
7.4.3	Reflets	210
7.4.4	Architecture du décor et éclairage	210
7.4.5	Les lumières de jeu ou lampes domestiques	213

CHAPITRE 8 – L'ÉCLAIRAGE LED

8.1	Introduction	214
8.2	L'invention de la LED	214
8.2.1	Le principe	214
8.2.2	L'historique	215
8.2.3	Une première classification : la puissance de consommation	217
8.3	À la recherche de la lumière blanche : les différentes technologies	217
8.3.1	LED dites « blanches » utilisant la réémission d'un phosphore	217

8.3.2	LED émettrice d'ultraviolet excitant plusieurs phosphores	218
8.3.3	LED UV + phosphore RGB	218
8.3.4	La LED blanche à nanoparticules (QD-LED)	219
8.3.5	PRS-LED	220
8.3.6	Lumière blanche par mélange des faisceaux de LED de différentes couleurs	221
8.4	Particularités des luminaires à LED	224
8.4.1	Homogénéité de l'éclairage et de la teinte de la lumière	225
8.4.2	Pilotage (ou driver) et gradation des sources LED	225
8.4.3	Influence de la température	226
8.4.4	Efficacité lumineuse des LED	227
8.4.5	Mesure colorimétrique adaptée aux LED	228
8.4.6	Les risques oculaires	228
8.5	Les projecteurs à LED	228
8.5.1	Le SL1 Switch de DMG lumière (variable de 3 000 K à 5 600 K, 160 W, 3 000 lx à 1 m, 500 lx à 3 m)	228
8.5.2	Fiilex P360 (modulable de 3 000 K à 5 600 K, à 5 600 K de 185 lx à 530 lx à 3 m)	229
8.5.3	Trucolor HS2 de Cinéo lighting (450 W, à 5 600 K, 1 200 lx à 3 m)	229
8.5.4	Le Sky Panel S30-C d'Arri Lighting (200 W, à 5 600 K, de 513 lx à 908 lx à 3 m)	229
8.5.5	Autres montages LED	230
8.5.6	L'étude de la CST	230
8.5.7	Quelques performances particulières	230
8.5.8	La norme L70, un gage de qualité	231
8.6	Les autres domaines d'applications	231
8.6.1	L'innovation des logiciels de pilotage	231
8.6.2	Éclairage automobile et éclairage public	233
8.6.3	Éclairage domestique	233
8.6.4	Évolution et idées à suivre	234

CHAPITRE 9 – TOURNAGE HORS STUDIO

9.1	L'éclairage en production	235
9.1.1	Définition d'un style d'éclairage	235
9.1.2	L'homogénéité du traitement technique	236
9.1.3	Comment maintenir l'homogénéité de l'éclairage ?	237
9.2	Les conditions du tournage hors studio	238
9.2.1	Les branchements provisoires	238
9.2.2	Groupe électrogène	239
9.2.3	L'évolution nécessaire des groupes électrogènes mobiles	241
9.2.4	Quelques règles de sécurité et de bon sens du tournage en extérieur	241
9.3	Extérieur jour	242
9.3.1	Diminution du contraste : emploi de réflecteurs passifs	242

9.3.2	Diffuseurs et masques noirs	244
9.3.3	Emploi de projecteurs en extérieur	244
9.3.4	Emploi de luminaires TH	245
9.3.5	Équilibre lumière du jour/lumière d'appoint	246
9.4	Extérieur nuit	246
9.5	Éclairage en décors naturels	247
9.5.1	Les contraintes	248
9.5.2	Alimentation électrique des projecteurs	250
9.6	Ateliers, bureaux, locaux commerciaux	251
9.6.1	Éclairage fluorescent	251
9.7	Éclairage autonome	254
9.7.1	Batteries et packs	254
9.7.2	Les studios improvisés	259
9.7.3	Technique d'éclairage volant	260

CHAPITRE 10 – EFFETS SPÉCIAUX

10.1	Effets colorés	261
10.2	Feu	262
10.3	Éclairs d'orage	262
10.4	Lampe-torche et autres sources mobiles	263
10.5	Bougies, chandeliers, flambeaux	263
10.6	Éclairage des maquettes	264
10.7	Fonds photographiques et incrustations	266
10.7.1	Généralités	266
10.7.2	Découverte	266
10.7.3	Transparence	267
10.7.4	Image composite optique : le <i>travelling matte</i>	267
10.7.5	Image composite optique : la projection frontale	268
10.7.6	Image composite électronique : <i>colorkey, fond bleu et fond vert</i>	269
10.7.7	Prévisualisation	271
10.7.8	Incrustation décor sur dalles LED ou le Studio virtuel	271
10.8	La réalité virtuelle	271
10.8.1	Éclairage des objets virtuels	275
10.9	Éclairage assisté par ordinateur	275

ANNEXE 1 – SENSIBILITÉ ET EXPOSITION

A.1	Exposition	279
A.2	Sensibilité	281
A.3	Cinéma : calcul de l'éclairement requis	282

ANNEXE 2 – LAMPES DE PROJECTEURS TH		283
Tableau A.1	Lampes compactes à culot unilatéral	284
Tableau A.2	Lampes basse tension sans réflecteur incorporé	285
Tableau A.3	Lampes TH tubulaires à culot bilatéral	285
RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES ET LOGICIELLES		287
	Livres	287
	Articles	287
	Sites de références	288
	Logiciels cinéma pour smartphones	288
	Logiciels de pilotage DMX sans fil	289
GLOSSAIRE DE L'ÉCLAIRAGE		291
INDEX		299

Avant-propos

Les récentes évolutions de la technologie en matière de lumière ainsi que dans les médias influencent profondément les méthodes 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 ou celui des médias. Ces changements sont si profonds que l'on se retrouve avec une certaine uniformisation des techniques mises en place. Il nous faut pouvoir fournir vite et, surtout, être compétitif. C'est une des explication de l'explosion du marché des projecteurs multispectraux (associant plusieurs LED de couleurs avec de la LED blanche, permettant ainsi de couvrir une vaste gamme de couleur tout en gardant une haute qualité colorimétrique associée à de plus grande intensité lumineuse) et cela, peut-être, au détriment d'autres technologies.

Par le biais d'interfaces numériques embarquées, les projecteurs se sont transformés en véritables usines à lumière. Ils se pilotent tant en intensité qu'en couleur (par liaisons filaires ou sans fil) et permettent de multiples effets visuels, allant même jusqu'à la projection en temps réel d'images en mouvement (les décors virtuels) qui servent aussi, de cette façon, de base d'éclairage. La transformation a de quoi faire tourner la tête, tellement elle induit de forts changements dans notre pratique de l'éclairage.

Il est cependant une grande richesse qu'il nous faut garder à l'esprit : un des aspects fondamentaux de la lumière, et plus précisément de l'éclairage, est la transposition entre ce que l'on pourrait appeler la réalité et les images ou les scènes créées, traduisant les intentions d'un réalisateur ou d'un metteur en scène. 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. Ils restent, quelle que soit la source, toujours d'actualité.

Le parc d'éclairage dans sa totalité, par sa diversité, propose tous les outils possibles à ces représentations. La richesse réside fondamentalement dans ce mélange et ces différences. Le parc de projecteurs traditionnels reste donc un élément important du travail de lumière (ainsi que de sa compréhension).

Remerciements

Le travail lumière est un formidable travail d'équipe. J'en profite donc pour remercier pour leur gentillesse et leurs apports tous ceux qui ont aidé à finaliser cette réécriture et notamment :

Régis Prosper et Jean-Charles Pasquier – société Cartoni France

Gaël Ollier et Jean-François Maugier – société Innport

Andrei Velitchko et Sophie Kerényi – société Arri Lighting

Niels de Montgrand et Thomas Servelle – société DMG Lumière/Rosco

Franck Lependu – groupe TSF

Gilles Arnaud de la CST

François Roger – société Atohm

Vincent Palèse – société Axente

François Reumont, auteur de *Le guide machinerie de la prise de vue* (édition Dujarric, 2004)

Ainsi que les sociétés Dedo Weigert Film, K 5600 Lighting, Softlights, Exalux, CET Lighting, Dimatec, Key Lite, UPR Tech.

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^e 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 (λ) 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 THz (à la frontière du domaine UV) et 385 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. Les lumières monochromatiques (formées d'une seule longueur d'onde) n'existent pas réellement dans la nature (les lumières que l'on dit monochromatiques 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 sinusoidales : 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].

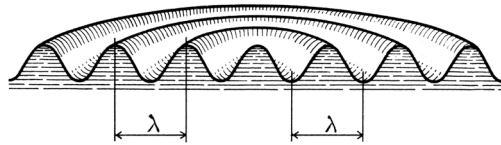


Figure 1.1 — Ondes formées à la surface d'un liquide : la longueur d'onde (λ) d'une vaguelette est la distance séparant deux ventres (crêtes) ou deux nœuds (fonds).

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 (λ). 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].

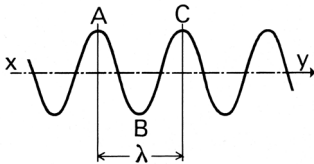


Figure 1.2 — Onde électromagnétique sinusoidale. La longueur d'onde (λ) est représentée par la distance AC.

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 ν (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 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].

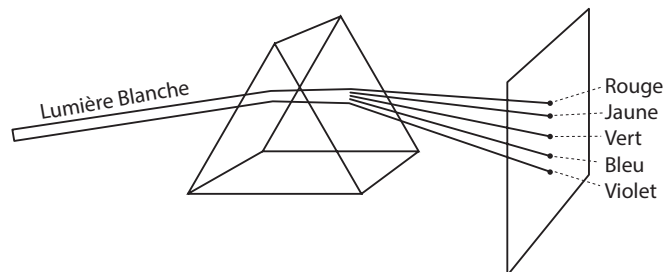
Tableau 1.1 — Énergie du photon en fonction de la longueur d'onde (λ) et de la fréquence (ν) de la lumière.

« Couleur » du photon	Longueur d'onde (λ)	Fréquence (ν) (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

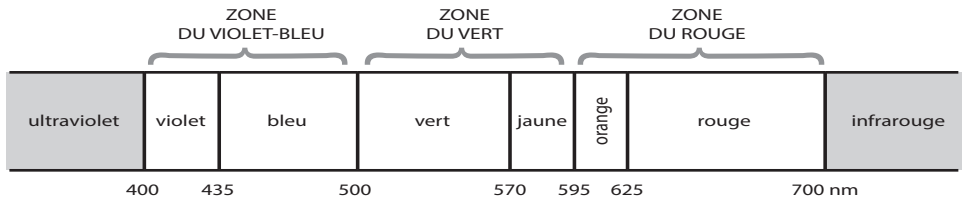


Figure 1.4 — Le spectre visible. Répartition des radiations en fonction de leur longueur d'onde.

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 μm (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 (cd/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 ω (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 de 1 m^2 sur une sphère de 1 m de rayon [cf. Fig. 1.5].

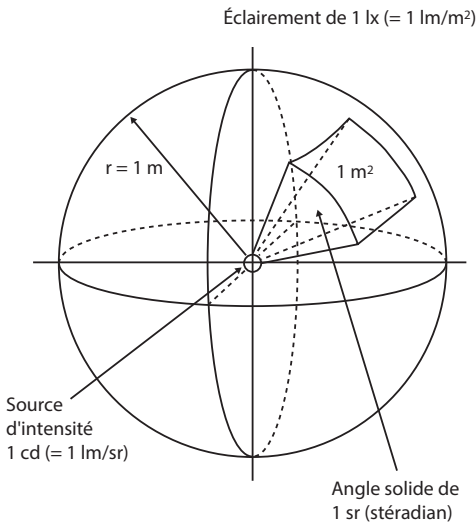


Figure 1.5 — Éléments de base de la photométrie. Une source d'intensité 1 candela placée au centre d'une sphère de rayon $r = 1 \text{ m}$, produit sur la calotte sphérique de surface 1 m^2 – délimitée par un angle solide de 1 stéradian (sr) – un éclairement de 1 lux (lx), soit 1 lumen par mètre carré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

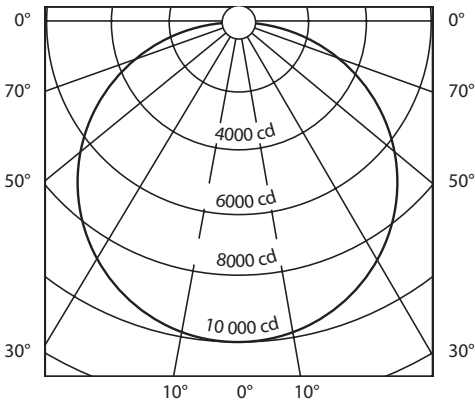


Figure 1.6 — Le diagramme polaire indique les valeurs d'intensité lumineuse (en cd) de la lampe ou du luminaire, dans les diverses directions. La longueur du vecteur issu de la source représente – en degrés par rapport à l'axe – l'intensité selon la direction considérée.
Document Osram.

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] :

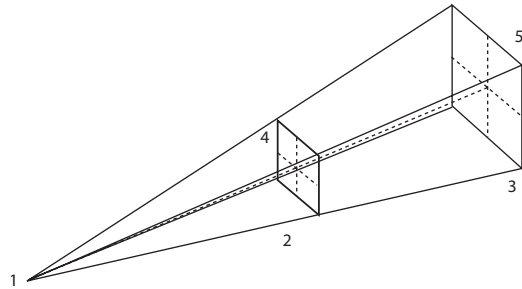
$$E \text{ (lx)} = \frac{I(\text{cd})}{d^2(\text{m})}$$

Lorsque la surface n'est pas perpendiculaire à l'axe de la source, l'éclairement diminue en raison du cosinus de l'angle α 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).

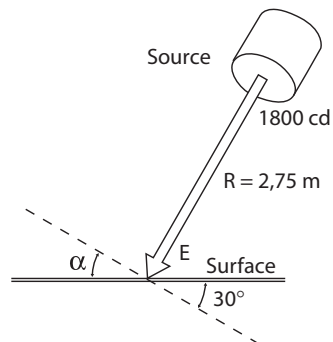


Exemple : soit une source de 40 000 cd placée à 5 m d'une surface inclinée à 45°. L'éclairement reçu par la surface est :

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

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 α 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 (cd/m²). 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 (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 :

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

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) : $L = 0,318 \times 0,18 \times 1\,130 = 65 \text{ cd/m}^2$
- Sous le soleil moyen (48 000 lx) : $L = 0,318 \times 0,18 \times 48\,000 = 2\,750 \text{ cd/m}^2$.

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 (de 0,15 à 1,2), permettant d'opérer à une ouverture de diaphragme « raisonnable ».

1.3 Éclairement et exposition

En numérique, 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,