

Premier contact

On pourrait dire de la photographie ce que Hegel disait de la philosophie : « Aucun autre art, aucune autre science, n'est exposé à ce suprême degré de mépris que chacun croie qu'il les possède d'un coup¹ » [BOU 65].

1.1. Vers une société de l'image

C'est peu de dire qu'au cours de ces trente dernières années, une véritable révolution a frappé le monde de la photographie et a modifié en profondeur les multiples aspects techniques, économiques, industriels et sociétaux dans lesquels elle se développe.

D'un point de vue technique, le remplacement du film argentique analogique par un capteur solide numérique a été timidement commencé il y a quarante ans environ, copiant une mutation de l'analogique au numérique que l'on retrouve dans beaucoup d'autres domaines (téléphone, télévision, imprimerie, etc.). Il n'aurait pu être qu'une évolution importante certes, mais somme toute naturelle et de peu d'effets pour l'utilisateur (l'utilisateur est-il vraiment sensible au passage à la télévision numérique terrestre ou à la photocomposition des journaux ?). Il a au contraire profondément modifié le concept même de photographie, poussant à l'avant de la scène des types d'appareils inédits, le compact d'abord que l'on glisse dans une poche et que l'on oublie, puis le téléphone mobile ou la tablette, que l'industrie photographique renierait volontiers comme des enfants illégitimes et passablement dégénérés s'ils ne portaient en eux les promesses d'un marché inépuisable.

Les conséquences de cette mutation technique se sont avérées dévastatrices pour l'économie établie de la photographie. Des acteurs majeurs (Kodak, Agfa, Fuji, Ilford,

1. Préface au *Principe de la philosophie du droit*, G.W.F. Hegel, 1820.

Minolta, etc.) qui semblaient installés sur des empires ont dû se replier sur des créneaux incertains, se regrouper et parfois disparaître. De nouveaux venus se sont installés, dont la culture photographique était souvent ténue (Sony, Samsung), parfois inexistante (Nokia, Apple, etc.). D'autres acteurs se créent des royaumes de toute pièce autour des services en ligne de l'image ou de ses réseaux sociaux, mais qui sont gens de l'Internet, de l'informatique et des télécoms et non de la photo. Si les industries chimiques qui produisaient les films et les produits dérivés ont naturellement le plus fortement souffert, les laboratoires de traitement, lorsqu'ils n'ont pas disparu, ont dû se reconverter totalement et la distribution a entamé une profonde mutation, qu'elle concerne les matériels ou les services.

Les reconfigurations du tissu industriel, loin d'être achevées, se poursuivent aujourd'hui, associant de plus en plus intimement des acteurs qui s'ignoraient, certains issus de l'image, mais beaucoup qui prospéraient à distance du métier de la photo : les experts de l'électronique embarquée, les fondeurs de circuits intégrés, les développeurs de logiciels, les acteurs des réseaux et les acteurs de la téléphonie mobile se sont transformés pour l'occasion en concepteurs de boîtiers et d'objectifs.

Les activités de la société sont elles-mêmes profondément affectées par ces reconfigurations. Ont-elles accompagné la mutation industrielle ou en sont-elles l'une des causes ? Ce n'est pas à nous de le dire. Mais les mutations sociétales de la photographie sont tout aussi notables et irréversibles. Elles se manifestent de plusieurs façons, mais c'est tout d'abord la généralisation de l'usage de la photographie qui frappe. Généralisation au sein de la famille : la photo n'est plus l'apanage du *pater familias* comme au début du siècle précédent, des adultes et des grands adolescents comme à la fin du siècle ; c'est maintenant un attribut personnel qu'utilise chacun, l'enfant comme l'aïeul. Toute la société y est également exposée et il n'est pas de niche quel que soit son niveau de richesse ou d'éducation, qui y échappe, pas de population, quelle que soit sa localisation, citadine ou rurale qui n'y participe. Et sa répartition est remarquablement diffuse sur le globe, aucun pays n'en étant exclu, au moins dans la composante de sa population exposée à la vie moderne.

A ce point, il nous faut constater, en relisant l'analyse célèbre que faisaient Bourdieu et ses collaborateurs il y a cinquante ans, le chemin parcouru depuis un demi-siècle [BOU 65]. Si rien ne démontre que la photographie n'est plus un « art moyen » comme ils le déploraient à l'époque, il est évident que les catégories familiales, culturelles et socio-professionnelles qui permettaient alors d'identifier des comportements typiques face à la photographie sont aujourd'hui totalement brouillées. Les attitudes sont étonnamment semblables entre une classe de lycéens parisiens en sortie de nature, un car de touristes japonais du troisième-âge à Capri, ou la foule assemblée pour le retour d'une *rock-star* au stade de Wembley. La photo est omniprésente et permanente, elle est spontanée, individuelle et collective, frénétique et virale, intime et partagée et bien peu en échappent.

Cet engouement universel pour la photo en affecte profondément les usages. Certes, des pans entiers de la « culture » photographique demeurent très peu changés (la photo d'art, la photo événementielle, familiale ou publique, la photo professionnelle des journaux, des catalogues et de la publicité, la photo scientifique, etc.), et le lecteur retrouverait mot pour mot, pour ces domaines, la pertinence des analyses de Bourdieu. Mais des facettes anciennes s'amplifient ou se déforment, des facettes nouvelles émergent : la photographie de loisirs ou de voyages maintenant dégagée des stéréotypes de la conformité « à l'antique » (au profit d'une conformité « jeune » ?), la photographie du quotidien, du détail, de l'anecdotique, du sensationnel, du constat, du curieux, la photographie de soi en situation ou en compagnie, du microcosme, de la microcommunauté et son aboutissement dans le narcissique *selfie*, etc. Ces formes nouvelles conjuguent une façon souvent simplifiée de photographier et des moyens modernes de communication instantanée, distante et massive ; elle s'appuie sur une formidable technique, à la fois cachée et exhibée, suivant les règles du meilleur marketing. Les MMS² et Internet sont les prolongements naturels de l'image photographique ; les réseaux sociaux en sont l'amplificateur à moins qu'ils n'en soient l'objectif. On ne sait s'il faut aujourd'hui inclure ou non YouTube, Facebook, Twitter, Instagram, Tumblr, Picasa et autres Flickr dans les « produits photos ».

Les chiffres disent tout de cette évolution sans précédent, mais ils n'expliquent rien³. Il serait naïf d'imaginer qu'elle doit tout à l'avènement de l'image numérique et de son outil naturel de création, l'appareil photographique, mais on peut douter qu'une telle évolution se soit jamais produite avec une telle ampleur sans que soit disponible un système d'acquisition d'image simple et universel, parfaitement compatible avec les moyens modernes de communication et de traitement de l'information. A l'inverse de l'appareil photo argentique, l'appareil photo numérique joue ce rôle⁴.

2. MMS = *multimedia messaging services* = l'extension aux documents (dont les images) des messages téléphoniques SMS (*short message services*).

3. En vrac, et sur la foi des seules déclarations des propriétaires, 150 millions d'utilisateurs d'Instagram en 2013, 400 millions fin 2015, 6 milliards de photos enregistrées sur Flickr et 100 milliards sur Facebook en 2011, 32 millions de galeries photos sur iAlbum et plus de 200 millions de blogs sur Tumblr, 70 millions d'images de paysages et de voyages sur Panoramio, 100 millions d'images visitées chaque jour sur Facebook et de l'ordre d'un milliard sur la totalité des sites d'échange et des réseaux, Instagram racheté pour un milliard de dollars en 2012, avec une croissance de 23 % en 2013, un marché de la photo numérique (produits et services) estimé à 70 milliards de dollars en 2014, en croissance de 5 à 6 % par an probablement jusqu'en 2020 au moins.

4. On rapprochera les nombres ci-dessus de ceux que Bourdieu jugeaient à son époque considérables : « 8 135 000 appareils en état de fonctionnement, [...] et 845 000 appareils vendus chaque année » ([BOU 65] p. 23) qui sont plusieurs ordres de grandeur en dessous des chiffres actuels (par exemple les prévisions de marché annuel des photoscopes de dernière génération sont largement supérieures à cent millions d'unités).

L'objectif de cet ouvrage n'est pas de prolonger cette étude sociologique qui le mériterait pourtant, mais d'expliquer comment fonctionne l'appareil photo numérique en examinant en détail chacun des composants qui le constituent.

1.1.1. *Un peu de vocabulaire en forme de zoologie*

Il est intéressant de noter que nous n'avons pas de nom commun en français pour désigner l'instrument permettant de prendre des photographies. Nous emploierons par la suite l'expression composée la plus usuelle : « appareil photographique » ou « appareil photo » en bref. Cette expression couvre les formes diverses d'instrument, sur film ou numérique et dans ses déclinaisons actuelles variées. Quelles sont ces formes aujourd'hui ? Nous les avons illustrées sur les figures 1.1 et 1.2. Les dénominations que nous employons sont celles qui découlent logiquement des fonctionnalités présentées. Elles ne sont cependant pas figées et, en raison des nombreuses configurations intermédiaires et de stratégies commerciales particulières, ces termes peuvent être parfois appliqués à des modèles assez différents de ceux que nous représentons.

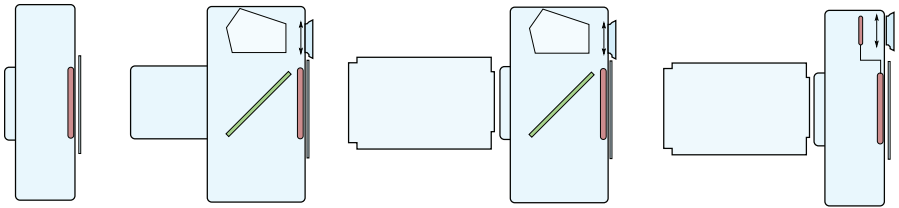


Figure 1.1. *Les quatre architectures principales des appareils photo numériques grand public : compact, bridge, réflex, hybride*

Le réflex : c'est de longue date l'appareil de référence de la photographie argentique, en particulier dans le format historique 24×36 mm. Le chemin optique se fait traditionnellement, soit vers le capteur, soit vers le viseur, par l'usage d'un miroir mobile et d'un prisme à section pentagonale. Il dispose d'objectifs interchangeables. En version numérique, il est apparu très tôt sur le marché (dès les années 1990), mais avec des capteurs de petite taille, généralement inférieure au 24×36 mm. Depuis 2010 environ, il est disponible avec un capteur de taille 24×36 mm.

L'appareil compact : c'est un système complet de prise de vue de petite taille, pouvant être glissé dans une poche ou un petit sac de façon à être emporté partout sans gêne. Son optique est inamovible, généralement à focale variable et rétractable. La visée se fait sur un écran et non par un oculaire. Les plus petits compacts ont la taille d'une carte de crédit. Beaucoup de compacts ont un fonctionnement très simple et très intuitif, mais la gamme offre aussi des compacts quasiment professionnels qui

proposent toutes les fonctionnalités d'un réflex sous un encombrement très réduit et permettent, par exemple, de préparer un travail qui sera poursuivi ultérieurement avec un appareil plus sophistiqué. Le compact est le premier appareil numérique à avoir conquis une place sur le marché, au début des années 1980.

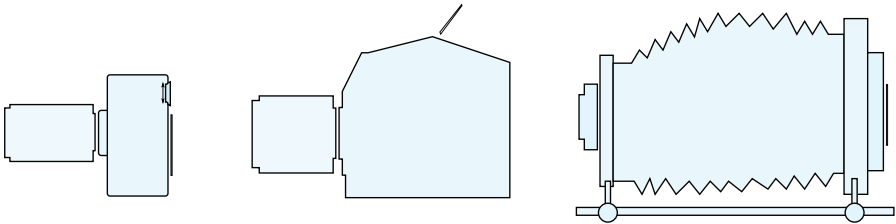


Figure 1.2. Appareils photo professionnels : à gauche appareil réflex au format 24×36 mm ; au centre appareil moyen format ; à droite chambre photographique. Les schémas ne sont pas à l'échelle, les tailles sont indicatives

Le bridge : il a également une optique inamovible, généralement un zoom, mais un boîtier, un gabarit et un chemin optique semblables à ceux d'un réflex. Il utilise généralement un prisme et un miroir mobile dans le circuit optique permettant une visée réflex. Son nom provient de son positionnement intermédiaire entre compact et réflex. Il est apparu sur le marché dans les années 1995 et a vu sa diffusion décroître fortement dans les années 2010.

L'appareil hybride : il ressemble à un réflex par ses optiques interchangeables et ses fonctionnalités souvent avancées, mais il n'utilise pas de prisme ni de miroir mobile sur la voie optique, la visée se faisant par un oculaire électronique. Son boîtier offre ainsi un encombrement plus réduit que le réflex, mais ses performances et son usage sont très proches de ceux du réflex. Des raisons techniques ont retardé son apparition sur le marché où il n'est guère présent que depuis 2010 environ.

Le moyen format : c'est un appareil dont le capteur (traditionnellement du film) est plus grand que le 24×36 mm. Dans sa version argentique, il utilise des surfaces sensibles en bobines et prend des photos de taille de 4×4 cm, 6×6 cm, ou 6×7 cm. Des moyens formats numériques sont disponibles sur le marché depuis quelques années, mais à des coûts généralement élevés les désignant pour des usages professionnels ou semi-professionnels.

Les chambres photographiques : pour les formats au-delà de ceux du moyen-format, on parle de chambres photographiques (formats de 9×12 cm à 20×25 cm), qui utilisent des plaques ou des plans films conditionnés individuellement. Les chambres photographiques sont réservées aux applications professionnelles : architecture, mode, œuvres d'art, etc. En 2015, il n'y a pas véritablement de capteurs numériques

disponibles sur le marché et adaptés aux chambres. Les capteurs de très grandes dimensions qui peuvent être adaptés sur des chambres sont utilisés surtout dans le domaine scientifique, en microélectronique, astronomie, physique des particules ou téledétection. Ce sont encore souvent des prototypes constitués de mosaïques de capteurs juxtaposés. Par ailleurs, pour les applications qui le permettent, de très grandes images (typiquement de $50\,000 \times 50\,000$ pixels et au-delà) sont obtenues par le déplacement d'un capteur (linéaire ou matriciel) à l'aide de mécanismes robotisés comme en biologie ou pour la saisie des œuvres d'art.

Les photoscopes : nous traiterons également dans cet ouvrage des capteurs qui assurent la fonction photographique des ordinateurs, des tablettes ainsi que des téléphones portables. Ces appareils sont très proches dans leur architecture et leur conception des plus petits compacts. Ils s'en distinguent par l'automatisation de la plupart des fonctions et par l'utilisation intensive des fonctions de communication et de calcul. Ils apparaissent pour cela en avance sur de nombreux aspects techniques par rapport à leurs cousins seulement voués à la photo. Quoique la qualité limitée des images qu'ils procurent et la faible liberté qu'ils laissent au photographe les exposent à la condescendance d'une partie de la communauté des photographes, ils deviennent progressivement la source de photos la plus importante de l'énorme marché que nous avons décrit plus haut. A ce titre, ils reçoivent la plus grande attention de tous les fabricants, des développeurs de composants et de logiciels, et cette attention porte ses fruits. Ils obtiennent dorénavant des performances étonnantes. Nous surveillerons particulièrement toutes les innovations qu'ils proposent ; ce sont de bons marqueurs des tendances de la photo. Nous les désignerons par la suite tantôt par photoscope, tantôt par téléphone mobile.

Les caméras : ce terme est souvent employé en place et lieu de l'expression appareil photo, en particulier dans une littérature fortement inspirée du monde anglo-saxon. Le mot est issu du latin *camera obscura* qui désigne un instrument apparu dès le XIV^e siècle pour l'aide au dessin, mais dont l'usage peut être retracé chez les Grecs anciens (IV^e siècle avant JC) et le fonctionnement au Proche-Orient au X^e siècle. En français, caméra est un terme plutôt réservé à l'enregistrement d'images animées (films ou vidéo). En anglais il est utilisé indifféremment pour les images fixes et les images animées, sur film ou numérique. Nous l'emploierons souvent pour alléger l'écriture lorsque la substitution ne portera pas à confusion. *Camera* a également donné en français le terme « chambre », que nous avons vu plus haut, qui tombe en désuétude.

Parmi les termes nouveaux, et à côté de photoscope, on rencontre souvent l'acronyme « APN » qui est employé génériquement pour désigner l'appareil photo numérique sous toutes ses formes.

Notons enfin qu'aucun des termes ci-dessus ne figure au récent *Vocabulaire technique de la photographie* [CAR 08], ce qui reflète assez bien le fossé qui demeure

au sein même du monde de la photographie entre ceux qui conçoivent les appareils et ceux qui les utilisent.

Le vocabulaire anglais est au moins aussi divers, touffu et mal stabilisé que le vocabulaire français, mais le terme *camera* y est universellement reconnu. Il couvre tout appareil qui permet d'enregistrer une photo. Pour les nouveaux appareils photo électroniques, de multiples formes plus concises sont proposées, exploitant l'usage des lettres D (*digital*) ou E (*electronic*) associées à des acronymes pas toujours très explicites, comme DSC (*Digital Still Camera*), ESPC (*Electronic Still Picture Camera*), ESPI (*Electronic Still Picture Imaging*), DSLR (*Digital Single Lens Reflex*⁵).

Ce vocabulaire standardisé pour la photographie fait l'objet d'une norme ISO récemment complétée [ISO 12], mais encore peu suivie.

1.1.2. Une brève histoire de la photographie

« *Chemin faisant nous sommes entrés dans la vidéosphère, révolution technique et morale qui ne marque pas l'apogée de la "société du spectacle" mais sa fin.* » [DEB 92]

Les composants techniques permettant d'enregistrer une image sont tous disponibles au début du XIX^e siècle, certains depuis longtemps : la *camera obscura* qui constitue le boîtier de la chambre photo est connue depuis l'Antiquité aussi bien en Europe qu'en Asie, et particulièrement familière des artistes de la Renaissance, la lentille qui canalise efficacement le flux lumineux capté peut être retracée plusieurs millénaires avant notre ère mais n'a véritablement servi à la formation des images que depuis le XII^e siècle, les composants photosensibles, soit en négatif (comme le chlorure d'argent), soit en positif (comme le bitume de Judée, mélange d'hydrocarbures naturels) sont familiers des chimistes de la fin du XVII^e siècle. De plus, les lois de la propagation et les mystères de la lumière et de la couleur sont bien maîtrisés depuis deux cents ans pour l'un et cinquante pour l'autre.

Les premiers essais de photographie peuvent être datés de 1812, par Nicéphore Niepce. Néanmoins, si l'image est alors bien enregistrée, au prix de très longs temps d'exposition, elle n'est pas stable et disparaît trop vite. Des efforts sont donc déployés dans ces deux directions : d'une part améliorer la sensibilité des récepteurs, d'autre part, surtout, maintenir l'image après sa formation.

La première photographie d'après nature a été faite en 1826 par Nicéphore Niepce de son domaine : « Point de vue du Gras ». Elle a été réalisée sur une plaque d'étain recouverte de bitume et a nécessité un temps de pose de huit heures.

5. Les termes *single lens* sont très souvent employés pour décrire les réflex, exprimant que la même lentille sert pour la visée et pour l'image (ce que l'on voit est exactement ce que l'on va enregistrer) au contraire des compacts qui utilisent deux voies optiques différentes.

Cherchant à améliorer son procédé, Nicéphore Niepce teste de très nombreux supports et révélateurs, les meilleurs étant les plaques d'argent et les vapeurs d'iode⁶. Il s'associe à Louis Daguerre, en 1829 pour mettre en place ce qui va devenir un procédé industriel : le daguerréotype. Il utilise des sels d'argent sur une plaque de cuivre et les révèle aux vapeurs d'iode. Niepce meurt en 1833. En 1839, le daguerréotype est présenté au public et Arago présente officiellement la photographie à l'Académie des Sciences. C'est le début d'un succès commercial immédiat du daguerréotype et de la photographie dans le grand public.

En Italie et en Angleterre, William Fox Talbot travaille en parallèle sur des procédés d'enregistrement photographiques en s'intéressant particulièrement à la reproduction sur papier (papier couvert de chlorure de sodium et de nitrate d'argent fixé au sel de potassium). Il obtient ses premières photos en 1835. Il met au point en 1840 le négatif papier qui permet de reproduire de nombreux clichés à partir d'un seul original. Il généralise l'usage de l'hyposulfite de soude comme fixateur et dépose un procédé original en 1841 : le calotype.

C'est néanmoins le daguerréotype, libre de droits, qui s'est largement diffusé, plus que le calotype, pénalisé par son brevet. Le calotype prendra sa revanche plus tard, puisque le principe du négatif photographique a été pendant cent ans au moins à la base de toute l'industrie photographique.

Un autre progrès décisif a été fait nettement plus tard par George Eastman, aux Etats-Unis. En 1884, il propose des supports photographiques non plus en verre mais sur cellulose souple découpée en bandes : le film est né. Dans la foulée (1888), il propose un boîtier très compact utilisant ce film et permettant de prendre cent photos à la suite. La photographie individuelle est prête pour un grand public qui ne veut plus s'embarrasser de boîtiers encombrants, de trépieds et de boîtes de plaques photo, fragiles et lourdes.

Cette évolution est entérinée par la sortie du Brownie Kodak en 1900, appareil, au prix de 1 dollar qui permet de prendre vingt photos, chacune revenant à 25 cents. Le marché se transporte de l'appareil photo au film : le consommable est le moteur du marché.

Néanmoins, pour la plupart des appareils photo, surtout ceux de qualité, les surfaces sensibles sont encore de grande taille, de l'ordre de 10 cm de côté. Il faudra attendre le Leica, en 1925, pour que le petit format se généralise, rendant populaire pour l'occasion le 24 × 36 mm.

La photographie couleur demeure cependant à perfectionner. Le procédé « autochrome » des Frères Auguste et Louis Lumière, breveté en 1903 et commercialisé en

6. L'iode avait été découvert en 1811 par Bernard Courtois.

1907, en est le point de départ. L'autochrome utilise la fécule de pomme de terre dont les grains colorés noyés dans du noir de fumée servent comme support sensible. La sensibilité est cependant très faible (on dirait aujourd'hui quelques ISO) et le procédé de développement complexe. La qualité de l'image est néanmoins exceptionnelle et n'aurait rien à envier à nos meilleures émulsions comme l'attestent les clichés encore disponibles cent ans plus tard.

Les émulsions couleur Kodacolor (1935) puis Agfacolor (1936) parviendront nettement plus tard sur le marché et s'imposeront à leur tour par la simplicité de leur utilisation et la qualité des images qu'elles procurent.

En 1948 Edwin Land met au point un procédé qui permet le développement instantané d'un positif, le Polaroid, qui dispose d'une version couleur en 1963. Malgré ses succès, il ne concurrence jamais vraiment les émulsions développables en laboratoire qui disposent alors d'un réseau extrêmement dense de distributeurs.

En ce qui concerne le cinéma, c'est Thomas Edison qui tourne les premiers films de 1891 à 1894 avec le kinétographe, qui utilise le film souple juste inventé par Eastman qu'il dote de perforations latérales pour l'entraînement (il impose ainsi le format de 35 mm de côté qui sera à la base du succès du 24 × 36 mm). Dès 1895, les Frères Lumière améliorent le kinétographe par de très nombreux brevets et lui donnent l'essor populaire que l'on connaît.

Dans le domaine de la transmission des images (l'ancêtre de la vidéo), l'ingénieur allemand Paul Nipkow le premier étudie le procédé d'analyse d'une scène par un disque percé. Ses travaux commencés en 1884 ne seront cependant présentés au public qu'en 1928. Edouard Belin présente une transmission de photographies par câble tout d'abord, en 1908, puis par téléphonie, en 1920 : le bélinographe. Entre temps, le Russe Vladimir Zvorykine dépose le brevet de l'iconoscope en 1923, fondé sur le principe du disque de Nipkow. En 1925, John Logie Baird procède à la première expérimentation de transmission d'images animées à Londres.

Les premiers appareils photo numériques sont nés au début en 1975 au sein des laboratoires de Kodak. Diffusés tout d'abord de façon très confidentielle et plutôt comme instruments de laboratoire, ils ont trouvé une première diffusion professionnelle dans des secteurs très éloignés de la photographie professionnelle : l'assurance, les agences immobilières, etc. Ils ne sont alors pas vraiment des concurrents des appareils argentiques qui donnent des images de bien meilleure qualité. Le marché grand public est cependant très vite conquis, puis, progressivement, le marché professionnel. Dès les années 1990, le marché des appareils numériques est plus important que le marché de l'argentique et les sociétés s'appuyant sur le film disparaissent l'une après l'autre (AgfaPhoto fait faillite en 2005, Eastman Kodak est amené à déposer un bilan en 2012) ou se reconvertissent au numérique (Fujifilm).

1.2. Pourquoi cet ouvrage

Au cours de ces récentes années, l'évolution du matériel photographique numérique a été considérable. Elle a affecté des composants de première importance de l'appareil (comme le capteur par exemple) et la presse spécialisée s'est largement faite l'écho des progrès obtenus, mais l'évolution s'est également portée sur des aspects beaucoup moins accessibles au public, soit parce qu'ils sont trop techniques ou qu'ils apparaissent accessoires en première analyse, soit, souvent, parce qu'ils sont dissimulés au sein des produits et relèvent des secrets des fabricants. Ces progrès se rattachent à des domaines scientifiques très divers : l'optique, l'électronique, la mécanique, les sciences des matériaux, l'informatique et de ce fait trouvent mal leur place dans des revues techniques spécialisées. Ils nécessitent souvent, pour être utilisés par les photographes, de longues remises en contexte qui expliquent leur rôle et les principes de leur fonctionnement. C'est dans cet esprit qu'a été rédigé ce texte qui passe en revue toutes les fonctions indispensables au bon fonctionnement de l'appareil photo et explique les solutions proposées pour les résoudre.

Mais avant d'aborder ces grandes fonctions de l'appareil photographique, nous allons, à grands traits, situer la photographie dans le champ des sciences, présenter quelques fonctions-clés, particulièrement importantes pour la formation de l'image et introduire un peu de vocabulaire et de formalisme qui nous accompagneront tout au long du livre. Nous profiterons de cette description accélérée pour donner un aperçu des divers chapitres qui suivront et pour indiquer de quelle façon nous avons choisi d'aborder chaque problème.

1.3. Principe physique de formation de l'image

La photographie est une affaire de lumière et nous serons donc amenés à beaucoup parler d'optique, la science de la lumière. Les ouvrages qui couvrent ce domaine sont nombreux et souvent excellents quand bien même ils sont un peu anciens [BOR 70, CHA 97, PER 94]. Rappelons quelques éléments importants concernant la lumière, sa nature et sa propagation qui nous permettront de situer la photographie au sein des grands chapitres de la physique.

1.3.1. La lumière

La lumière est un rayonnement électromagnétique dans une fenêtre étroite de fréquences. Aujourd'hui, elle est susceptible d'être traitée par des formalismes de la physique classique ou par des approches quantiques ou semi-quantiques. La photographie s'explique très majoritairement à l'aide des approches classiques : la formation de l'image se décrit très bien en termes d'optique géométrique, les phénomènes fins concernant la résolution s'expliquent par la théorie de la diffraction,

en représentation scalaire le plus souvent, éventuellement vectorielle. La théorie de la diffraction prend toute sa place lorsque l'on aborde les limites ultimes de résolution, l'un des problèmes-clés de la photographie. La polarisation de la lumière intervient en de rares points précis que nous prendrons soin de signaler. La notion de cohérence est l'une des subtilités délicates de la photographie, en particulier dans le champ de la microphotographie.

Seul le phénomène fondamental de la transformation du photon en électron au sein du photodétecteur fait appel à des théories plus avancées puisqu'il ressort de l'effet photo-électrique⁷ qui ne peut s'expliquer qu'à l'aide de la théorie quantique⁸. Nous n'aurons cependant pas besoin de la théorie quantique dans cet ouvrage, une fois le résultat fondamental de l'effet photo-électrique admis : l'échange d'énergie entre un photon corpusculaire et un électron, si le photon dispose au moins de l'énergie nécessaire à faire changer l'électron d'état.

1.3.2. *Le rayonnement électromagnétique : onde et particule*

La lumière est le rayonnement électromagnétique perçu par le système visuel humain. Elle couvre une plage de longueurs d'onde de 400 à 800 nm environ⁹ et donc une plage de fréquences de $7,5 \cdot 10^{14}$ à $3,75 \cdot 10^{14}$ Hz qui correspond à une fenêtre de transmission de l'atmosphère, d'une part, et au maximum de l'émission solaire, d'autre part.

Dans sa représentation ondulatoire, la lumière est une superposition A d'ondes planes monochromatiques, idéales, caractérisées par leur fréquence ν , leur direction de propagation \mathbf{k} et leur phase ϕ [PER 94]. En un point \mathbf{x} de l'espace, et à l'instant t , nous la représenterons par la suite par une formule du type :

$$A(\mathbf{x}, t) = \sum_i a_i \cos(2\pi\nu_i t - \mathbf{k}_i \cdot \mathbf{x} + \phi_i) \quad [1.1]$$

Dans sa représentation particulaire, un photon de fréquence ν (et donc de longueur d'onde $\lambda = c/\nu$, avec $c = 299\,800\,000 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, la vitesse de la lumière) porte une

7. L'effet photo-électrique, expliqué par A. Einstein en 1905, lui valut le prix Nobel en 1921.

8. En fait, ce n'est pas le seul cas, car comme nous l'évoquerons rapidement à la section 5.1.1, de nombreux aspects de l'apparence des objets, et en particulier leur couleur, ne pourraient se justifier sans une interprétation quantique de l'interaction matière-lumière.

9. Il n'y a pas consensus sur l'étendue du domaine visible. Nous avons choisi ici une octave (de 400 à 800 nm) pour la simplicité des chiffres. Mais on trouve souvent dans la littérature des limites différentes plus étroites : [420-750] ou [450-720]. Si ces valeurs exactes ne sont pas très importantes pour l'observateur humain puisque la réponse de son capteur est quasiment nulle aux bornes, ce n'est pas le cas pour l'appareil photographique dont le capteur est potentiellement sensible au-delà.

énergie $h\nu$, où h est la constante de Planck ($h = 6,626.10^{-34}$ J.s), soit entre $2,5.10^{-19}$ et 5.10^{-19} J, ou, dans une unité plus commode, entre 1,55 eV et 3,1 eV environ [BOR 70, MAT 09].

Un photon porte donc une très faible énergie et une scène normalement éclairée met en jeu un très grand nombre de photons¹⁰. Il est important pour la formation de l'image d'examiner quelle relation ces photons ont les uns par rapport aux autres : ce sont les aspects de cohérence qui seront discutés à la section 2.6. Retenons dès à présent que la photographie est avant tout concernée par l'optique incohérente. Nous examinerons également à la section 9.7 les propriétés de polarisation des ondes, mais ces propriétés n'interviennent que marginalement en photographie.

La couleur est l'une des manifestations les plus frappantes de la diversité du contenu fréquentiel de l'onde électromagnétique. C'est aussi l'un des enjeux les plus complexes de la photographie. Un chapitre lui sera consacré, le chapitre 5 où nous serons amenés à introduire de nombreuses notions d'optique physiologique pour tenir compte de la richesse de la perception humaine qui *in fine* gouverne les choix en matière de qualité d'image.

Les aspects corpusculaires du photon seront au cœur du chapitre consacré au photodétecteur (chapitre 3) ainsi que de celui concernant le bruit affectant le signal d'image (chapitre 7). Les aspects ondulatoires seront utilisés pour traiter des propriétés de la propagation à travers l'objectif (chapitre 2), de qualité d'image (chapitre 6) et d'aspects très prospectifs liés à l'amélioration des images, que nous verrons au chapitre 10.

L'onde est soit émise, soit réfléchiée par l'objet d'intérêt pour le photographe. Elle se propage ensuite librement dans l'espace, puis de façon guidée par le système optique qui en fait une image sur le capteur. L'instrument le plus simple pour réaliser une image est le sténopé (ou chambre obscure), connu depuis l'antiquité comme système (discret) d'observation, qui n'utilise pas d'optique, mais un simple trou en guise de système de formation d'image. Nous examinerons l'image construite par le sténopé car c'est un modèle très commode qui permet de traiter simplement nombre de problèmes de vision par ordinateur et qui demeure encore beaucoup utilisé (en particulier sous le nom anglo-saxon de *pinhole camera*).

1.3.3. Le sténopé

La chambre obscure (ou *camera obscura*, ou sténopé) est une boîte percée d'un petit trou (de diamètre d) placé au centre d'une face et dotée d'un écran dépoli¹¹ sur la

10. Nous serons cependant amenés à traiter d'imagerie à très faible niveau lumineux, la photo à un seul photon étant aujourd'hui l'enjeu de nombreuses recherches.

11. Écran dépoli que l'on pourra remplacer par un film, ou un capteur photo numérique.

face opposée (figure 1.3). Le principe du sténopé s'explique bien dans l'approximation de l'optique géométrique. Des analyses détaillées du sténopé sont disponibles dans [CAR 05, LAV 03]. Dans cette approximation, la lumière se propage en ligne droite sans diffraction. Une image inversée d'un objet placé devant la chambre se forme sur l'écran, à l'échelle du rapport entre la profondeur p' de la boîte et la distance p de l'objet au trou. Si l'objet est à une grande distance p par rapport à la profondeur p' de la boîte, chacun de ses points donne naissance à une petite tache homothétique du trou (de diamètre $\varepsilon = (p + p')d/p \approx d$). On a donc intérêt à maintenir ce trou petit pour assurer une image nette. Mais l'énergie qui frappe l'écran est directement proportionnelle à la surface du trou et pour avoir un sténopé lumineux on souhaiterait donc que ce trou soit large. Notons que tout objet placé dans « l'espace objet » sera imagé de façon identique quelle que soit sa distance à la face percée dès lors que $p \gg p'$. Il n'y a donc pas de notion de mise au point avec un sténopé sauf pour les points très proches ($p' \simeq p$) qui seront proportionnellement affectés d'un flou plus important.

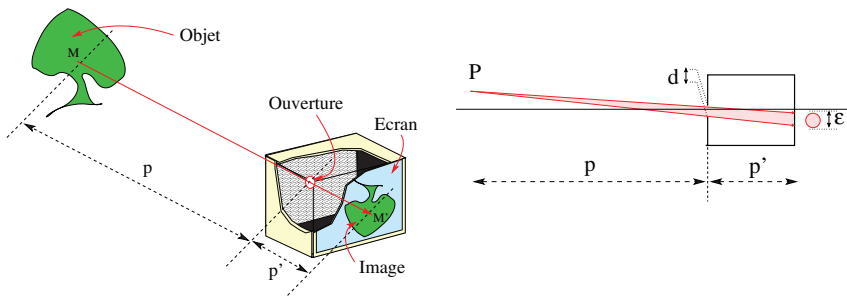


Figure 1.3. Sténopé : à gauche, schéma de la formation de l'image dans un sténopé ; à droite, si le point objet M est loin de l'appareil ($p' \ll p$), son image M' est un cercle de diamètre à peu près égal à celui de l'ouverture : $\varepsilon = d$

A quelles conditions peut-on appliquer au sténopé la propagation rectiligne de la lumière de l'optique géométrique ? Il faut que les phénomènes de diffraction, qui sont observables dès que les dimensions des ouvertures sont petites devant la longueur d'onde, soient négligeables. Calculons, pour une longueur d'onde λ , le diamètre de la figure de diffraction d'une ouverture circulaire d observée sur l'écran (donc à distance p'). Ce diamètre ε' , limité au premier anneau de la tache d'Airy (figure de diffraction d'une ouverture circulaire, ce point sera étudié en détail à la section 2.6), vaut $\varepsilon' = 1,22 \lambda d/p'$ et la figure de diffraction aura la même étendue que la tache géométrique calculée précédemment si $d = \sqrt{1,22 \lambda p'}$. Pour une longueur d'onde verte ($\lambda = 0,5 \cdot 10^{-6}$ m) et une chambre de profondeur $p' = 10$ cm, la diffraction donne une tache égale à l'optique géométrique pour un trou de l'ordre de 0,2 mm, bien inférieur

à ce qui est utilisé en pratique. Nous sommes donc généralement en droit d'ignorer la diffraction dans l'analyse d'une image de sténopé¹².

1.3.4. Du sténopé à l'appareil photo

1.3.4.1. Le rôle de la lentille

Afin d'accroître la quantité de lumière reçue sur l'écran, remplaçons dans le sténopé l'ouverture par une lentille. Nous fabriquons un appareil photo. Entre des plans conjugués de la lentille, tous les rayons issus d'un point objet M convergent en un point image M' (stigmatisme approché des lentilles sous les conditions de Gauss). Cela résout donc le problème de l'énergie puisque toute l'ouverture de la lentille est maintenant utilisée pour capter la lumière issue de M . On paie ce gain par une sélectivité des plans objets qui sont vus nets : seuls ceux qui sont voisins du plan conjugué de l'écran sont nets, les autres seront plus ou moins flous. Il faudra donc prévoir un mécanisme permettant d'assurer cette mise au point.

1.3.4.2. Formation de l'image

On détermine le plan de mise au point dans un appareil photo en translatant la lentille sur son axe optique de façon à faire varier sa distance au plan image. Ce déplacement peut être automatisé si l'appareil dispose d'une fonction de télémétrie qui mesure la distance à l'objet (section 9.5). Les points M et M' sont conjugués s'ils vérifient les relations de conjugaison. Rappelons-les. Ce sont les relations de Descartes (avec origine au centre optique) ou celles de Newton (avec origine aux foyers) [CHA 97]¹³. Si $s = p - f$ et $s' = p' - f$ (figure 1.4) :

$$1/p' + 1/p = 1/f \quad (\text{Descartes}) \qquad ss' = f^2 \quad (\text{Newton}) \qquad [1.2]$$

Rappelons également les relations de grandissement. Le grandissement transversal G et le grandissement longitudinal Γ de l'image, qui nous seront utiles par la suite, valent :

$$G = -f/s = -s'/f, \qquad \Gamma = p'/p = G^2 \qquad [1.3]$$

12. Le lecteur intéressé par le sténopé trouvera dans [CAR 05] des calculs plus exacts sur la formation de l'image et sa résolution. Dans ces calculs, la diffraction à l'infini utilisée ci-dessus est remplacée par la diffraction à distance finie plus appropriée, mais d'expression plus complexe.

13. En photographie, l'objet et l'image sont par nature toujours réels et jamais virtuels (voir [CHA 97]), l'objet est donc « à gauche » du foyer objet et l'image « à droite » du foyer image. De plus, le milieu objet et le milieu image sont (généralement) l'air, d'indice $n = 1$. Pour simplifier les équations, nous donnerons à p , p' , σ et σ' des valeurs positives et adaptons en conséquence les équations de conjugaison : $1/p + 1/p' = 1/f$.

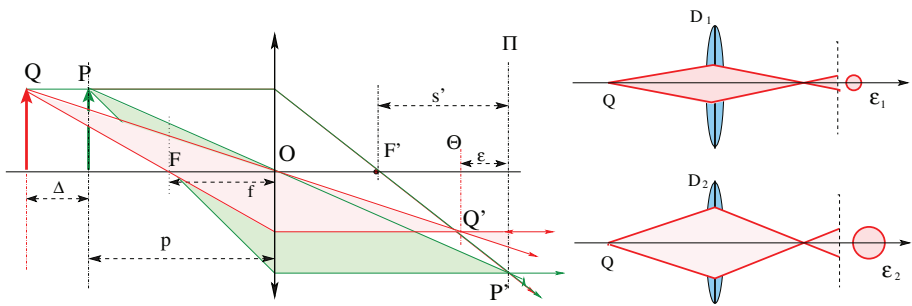


Figure 1.4. Appareil photo. A gauche : on fait la mise au point sur l'image de P , dans le plan Π en faisant varier le « tirage » de l'optique (s'). Un point Q donne une image Q' nette dans un plan Θ mais dans le plan Π il donne une image floue. A droite : l'importance du flou dépend directement de la taille du diaphragme qui limite l'inclinaison des rayons sur l'axe. Une faible ouverture permet de réduire le flou.



Figure 1.5. La profondeur de champ est limitée : la netteté des détails décroît régulièrement en amont et en aval du plan choisi pour la mise au point

Le signe « - » rappelle que l'image est inversée. Les autres plans sont de plus en plus flous au fur et à mesure que l'on s'éloigne de P , en amont comme en aval. C'est un défaut bien connu de tout photographe (voir la figure 1.5).

Nous voyons sur la figure 1.4, à gauche, ce qui se passe pour un point Q qui se trouve dans un plan à distance $q \neq p$ de la lentille. Son image converge en Q' , dans un plan Θ différent de Π . La tache image de Q sur Π est d'autant plus grande que l'ouverture de l'optique est importante et que le point Q est éloigné du plan de mise au point. L'ouverture de l'optique est en pratique contrôlée par un diaphragme (figure 1.4 à droite).

On trouvera à la section 2.2 le calcul de la profondeur de champ d'un objectif photographique¹⁴. Si, avec un objectif de focale f , muni d'un diaphragme de diamètre D , observant un objet à la distance p (voir la figure 1.4), on tolère une tache image de diamètre ε , alors, en notant Δ la profondeur de champ, distance entre les deux points extrêmes de mise au point, en amont et en aval de P , Q_1 et Q_2 , et dans l'hypothèse d'un objet lointain ($p \gg f$) et d'un flou faible (ε petit), il vient :

$$\Delta \approx \frac{2\varepsilon p^2}{fD} \quad [1.4]$$

exprimant que la profondeur de champ varie de façon inverse à l'ouverture du diaphragme D et à la focale f , mais croît très vite lorsque l'objet recule à l'infini (p grand).

1.3.4.3. Position de l'objet et de l'image

Dans la pratique, on cherche à faire l'image d'un objet à la distance L de l'observateur, avec un appareil de focale f . On dispose donc de deux équations : $s + s' + 2f = L$ et $ss' = f^2$ qui conduisent à une équation du second degré, et, sous la contrainte (image et objets réels) que $L > 4f$, à deux solutions :

$$\begin{aligned} s_1 &= 1/2(L - 2f + \sqrt{L^2 - 4fL}) \\ s_2 &= 1/2(L - 2f - \sqrt{L^2 - 4fL}) \end{aligned} \quad [1.5]$$

Ces deux solutions correspondent à des dispositions symétriques où l'objet de l'une devient l'image de l'autre et réciproquement (figure 1.6). Le plus souvent, en photographie, on choisit une focale f (de quelques centimètres) petite devant L (de quelques mètres) et on observe un objet lointain. On adopte alors la solution s_1 qui conduit à un grandissement très inférieur à 1 : $G = f/s_1$. L'objet est alors à la position $s \approx L$, le plan image étant pratiquement confondu avec le plan focal image : $p' \approx f$.

Dans le cas d'une macro-photographie (photographie où l'on souhaite agrandir fortement un objet petit), et de façon que le grandissement $G = s'/f$ soit maximum, on s'attache à approcher l'objet du foyer objet de façon à ce que s' soit le plus grand possible. On adopte alors la configuration de droite de la figure 1.6.

1.3.4.4. Ouverture de l'optique

Le rôle du diaphragme D sur la qualité de l'image apparaît clairement dans la relation [1.4], quoiqu'il ait été introduit pour contrôler le flux d'énergie. C'est donc un élément-clé du réglage d'un système photographique, généralement contrôlé au moyen d'une bague sur l'objectif (voir figure 1.7).

14. La profondeur de champ est la distance sur l'axe optique qui sépare l'objet le plus proche considéré comme au point de l'objet le plus éloigné également considéré au point.

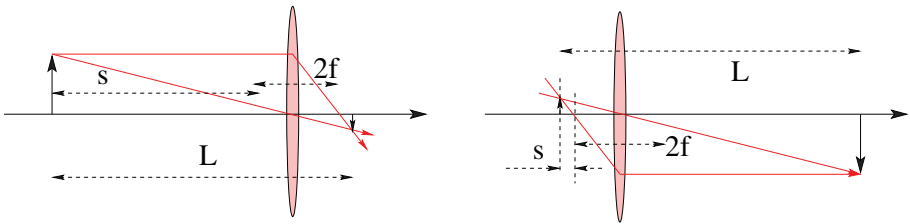


Figure 1.6. Les deux solutions pour conjuguer deux plans distants de L avec une lentille de focale f sont symétriques. Lorsque $L \gg f$ on est dans la situation de la photographie ordinaire, le plan image est pratiquement dans le plan focal (situation de gauche); l'autre solution (situation de droite) est le cas de la macrophotographie où l'on obtient un fort grandissement pour de petits objets.



Figure 1.7. La bague des diaphragmes sur un objectif photo

On a l'habitude d'appeler ouverture de l'optique le diamètre D du diaphragme et nombre d'ouverture N le rapport de la distance focale f au diamètre physique D : $N = f/D$. Ainsi, un objectif de 50 mm , avec un nombre d'ouverture de $N = 4$, a un diaphragme ouvert à un diamètre de $D = 12,5\text{ mm}$. Il est donc bien équivalent de parler d'un nombre d'ouverture de N ou d'une ouverture de f/N .

Par ailleurs, le diaphragme contrôle l'énergie reçue par le capteur. Celle-ci est proportionnelle à la surface libre du diaphragme, donc au carré de D . Il est donc commode de proposer une échelle des ouvertures selon une progression géométrique de raison $\sqrt{2}$, de façon à diviser par deux l'énergie reçue à chaque pas.

Les ouvertures proposées le plus couramment sont ainsi :

$$f/1 \quad f/1,4 \quad f/2 \quad f/2,8 \quad f/4 \quad f/5,6 \quad f/8 \quad f/11 \quad f/16 \quad f/22 \quad f/32 \quad f/45 \quad f/64$$

Les ouvertures les plus fortes ($1/1$, $1/1,4$) sont réservées aux optiques de grande qualité car, travaillant très loin de l'axe optique, elles doivent compenser les diverses aberrations (voir section 2.8). Les ouvertures les plus faibles (de $1/32$ à $1/64$) ne peuvent être utilisées que dans les conditions de très forte luminosité ou avec des temps de pose très longs.

Nous aurons l'occasion de revenir sur ces définitions de l'ouverture à la section 2.4.4.2, où nous apporterons quelques précisions à ces formes simples.

1.3.4.5. Photographie et énergie

L'ouverture du diaphragme D contrôle le flux de lumière arrivant sur le photo-détecteur. La relation entre l'énergie reçue et l'ouverture est quadratique. L'obturateur intervient également pour déterminer la quantité d'énergie qui construit l'image en contrôlant la durée de l'exposition. Pour faire un bilan énergétique, il faudrait également tenir compte de la qualité des composants optiques qui constituent les lentilles, mais leur contribution au flux d'énergie est le plus souvent négligeable car les objectifs sont aujourd'hui traités avec soin de façon qu'il n'y ait que très peu de réflexions parasites.

Enfin, le dernier élément qu'il faut prendre en compte pour traduire la relation entre l'énergie incidente et la valeur de l'image résultante est le bilan de la conversion des photons en signal. Ce bilan est très complexe et sera examiné en détail au chapitre 4. Evoquons ici très rapidement ce problème.

En photographie argentique, le bilan de la conversion des photons en image sur film, passe par les diverses étapes de la photochimie de l'exposition tout d'abord, puis de la révélation et de la fixation ensuite. Afin de réduire les nombreux paramètres de ces étapes, des conditions normalisées de traitement étaient disponibles qui permettaient, pour un usage courant, d'attacher un seul nombre à un produit commercial précis, le film, et de définir ce qui rendait entièrement compte du bilan de conversion : la sensibilité du film.

Quoique le processus de conversion soit dorénavant très différent en photographie numérique, puisqu'il fait intervenir des étapes d'amplification électronique que nous examinerons en détail au chapitre 3, la notion de sensibilité, très proche de celle définie pour le film argentique a été reconduite pour les capteurs solides. Elle exprime là encore la capacité du détecteur à délivrer un signal en fonction du flux de lumière incident et, comme pour la photo argentique, on paiera à priori une plus grande sensibilité par une qualité moindre de l'image.

Cette sensibilité, telle qu'elle a été définie par l'instance de normalisation, l'ISO¹⁵, varie généralement entre des valeurs de 25 et 3 000 ISO (soit de 0,4 à 0,003 lux seconde) pour les films et entre des valeurs de 100 à 100 000 ISO pour les capteurs solides.

Dénotons par N le nombre d'ouverture, par τ le temps d'exposition et par \mathcal{S} la sensibilité du récepteur.

15. ISO = *International Standard Organization*, la normalisation de la sensibilité fait l'objet du document [ISO 06a].

S'appuyant sur les trois grandeurs ci-dessus, la formule qui assure un bilan énergétique correct est de la forme :

$$\frac{\mathcal{S}\tau}{N^2} = \frac{\mathcal{S}\tau f^2}{D^2} = cste \quad [1.6]$$

Si les trois termes \mathcal{S} , τ et N semblent pouvoir se compenser les uns les autres, ils contrôlent cependant de façon particulière la qualité de l'image :

- la sensibilité \mathcal{S} , comme nous l'avons dit, est responsable notamment du bruit qui affecte l'image et on aura intérêt à la choisir aussi faible que possible ;
- le temps de pose τ contrôle le flou de bougé et devra être adapté à la fois aux déplacements des objets de la scène et aux mouvements de l'appareil ;
- le nombre d'ouverture N contrôle la profondeur de champ : si N est faible (un diaphragme largement ouvert), la profondeur de champ sera réduite (relation [1.4]).

C'est l'art du photographe d'équilibrer ces termes pour traduire un effet particulier qu'il souhaite rendre. Des règles d'usage et de bon sens, associées à une classification grossière de la scène exprimée par un choix en termes de priorité (priorité « ouverture » ou « vitesse ») ou en termes de thématique (« Sport », « Paysage » ou « Portrait », par exemple), permettent de proposer des réglages à partir des conditions mesurées (luminosité moyenne et distance de mise au point) dans des modes plus ou moins automatiques.

1.3.4.6. *Et la couleur*

On ne saurait traiter de la photographie sans aborder le délicat problème de la couleur, à mi-chemin de la physique d'une part et de la perception humaine d'autre part. Nous le ferons au chapitre 5. Nous montrerons la complexité de toute représentation d'un signal chromatique et la difficulté de définir des espaces de couleurs qui soient simultanément fidèles aux stimulus observés et suffisamment généraux pour que toute image puisse être échangée et retouchée sans trahir la perception qu'en avait le photographe. Nous verrons que la technologie propose plusieurs solutions qui ne sont pas du tout équivalentes et qui conduisent chacune à des compromis difficiles. Nous verrons également pourquoi le photographe doit impérativement se préoccuper de la balance des blancs.

1.4. Bloc-diagramme de l'appareil photo

L'appareil photo ne saurait cependant se réduire à ces grands domaines de la physique, aussi importants qu'ils soient. L'appareil photo est un instrument technologique très complexe qui assemble des composants élémentaires multiples en charge de fonctions précises : mesurer la distance à la cible, mesurer la répartition de

l'énergie, assurer la conversion du signal optique, sélectionner les composantes chromatiques, archiver le signal sur une mémoire, stabiliser le capteur pendant la prise de vue, etc. C'est à travers ces fonctionnalités qu'il faut aussi étudier l'appareil photo et c'est selon ce schéma qu'est organisée une partie de cet ouvrage.

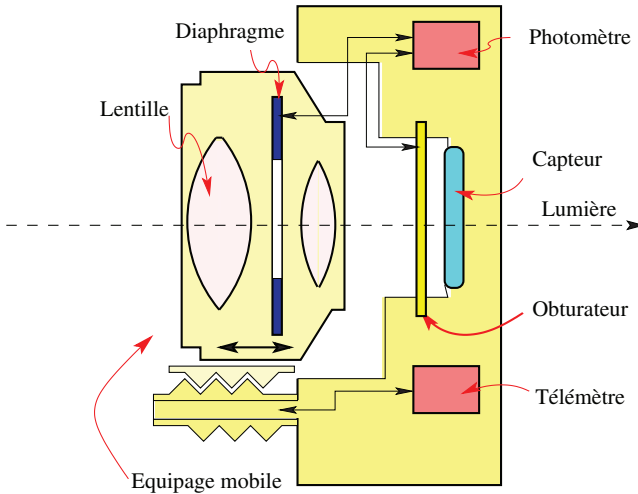


Figure 1.8. Schéma de principe d'un appareil photographique, qu'il soit analogique (capture par film) ou numérique (capteur solide)

Les fonctions élémentaires sont regroupées sur le schéma de la figure 1.8. On y reconnaît :

- le bloc optique, une lentille ou le plus souvent un objectif composé de plusieurs lentilles. Il est en charge de faire l'image réduite de la scène. Son rôle est primordial pour la qualité de l'image et toutes les fonctions de l'appareil visent à exploiter au mieux ses capacités. Nous examinerons son fonctionnement au chapitre 2 ;
- un capteur, cœur de l'acquisition. Dans les technologies argentiques, c'était un film, mais pour cet ouvrage ce sera, bien sûr, une matrice de semiconducteur, CCD ou CMOS. Nous lui consacrerons le chapitre 3 ;
- le télémètre mesure la distance des objets de la scène. On déduit de ses mesures la distance de mise au point. Il a considérablement évolué depuis l'ère de l'argentique. Nous en traiterons à la section 2.2, puis nous reviendrons sur ce point à la section 9.5 ;
- le photomètre : il mesure l'éclairement reçu de la scène (section 4.4.1). On le confond parfois avec le télémètre car dans certains systèmes ces deux capteurs fonctionnent de façon couplée (on mesure le contraste là où l'on fait la mise au point). Il a évolué comme lui ces dernières années ;

- l’obturateur règle la durée de l’exposition. Il sera mécanique, électro-mécanique ou électronique. C’est un accessoire fonctionnellement indispensable, mais qui fait peu parler de lui. Nous aborderons ce point à la section 9.4 ;
- le diaphragme, souvent associé à l’obturateur, contrôle la quantité de lumière reçue par le capteur pendant l’exposition. Il n’a guère évolué ces dernières années ;
- un équipage mobile assure la conjugaison optique entre le plan de l’objet visé et celui de l’image faite sur le capteur conformément aux instructions fournies par le télémètre (section 2.2).

D’autres accessoires optiques sont traditionnellement associés à la formation de l’image. Nous serons amenés à les étudier également. Nous verrons ainsi :

- les filtres optiques (infrarouge et ultraviolet) et anti-aliasing, placés devant le capteur (section 3.3.2) ;
- les objectifs additionnels ou les montages qui modifient les propriétés de l’objectif pour les adapter à un usage particulier : multiplicateurs de focale, macro-photographie, etc. (section 9.7.1).

Cette description fonctionnelle, vue avec l’œil du photographe, doit être complétée des composants nouveaux introduits par le capteur numérique. En tout premier lieu, nous nous attarderons sur le processeur qui contrôle toutes les fonctions de l’appareil : il gère les informations issues des divers capteurs (télémètres, photomètres), il commande les réglages (mise au point, ouverture, temps d’exposition), il garantit le bon fonctionnement du photodétecteur et assure le dialogue avec l’utilisateur. Il est enfin en charge de récupérer le signal issu de la mesure, de le mettre en forme d’image en assurant sa compatibilité avec les systèmes de stockage, de transmission, d’affichage et d’archivage. D’une part, il gère les informations issues des divers capteurs (télémètres, photomètres), d’autre part, il commande les réglages : mise au point, ouverture temps d’exposition. Enfin, il assure le bon fonctionnement du capteur et le dialogue avec l’utilisateur. Sa fonction majeure est de récupérer le signal issu de la mesure, de le mettre en forme comme une image en assurant en particulier sa compatibilité avec les systèmes de stockage, de transmission et d’archivage. Le processeur numérique fera l’objet de la section 9.1.

Accompagnant le processeur, de nombreuses fonctions auxiliaires méritent notre attention : la source d’énergie, l’écran d’affichage, la mémoire. Ils trouveront aussi leur place dans le chapitre 9.

Enfin, nous ne pourrions conclure cet ouvrage sans aborder les algorithmes et les logiciels qui mettent en forme l’image. Nous le ferons au chapitre 10. Nous examinerons ceux qui créent l’image au sein du boîtier, mais aussi ceux qui sont déportés dans l’ordinateur-hôte et qui permettent d’améliorer la qualité des images ou d’accroître les fonctionnalités de l’appareil. Ce chapitre fait une large place à des

développements très prospectifs qui explorent des champs d'application nouveaux pour la photographie, champs d'application rendus possibles par l'utilisation intensive du calcul pour obtenir des images que le capteur seul ne suffit pas à nous donner : images à résolution ou dynamique étendue, images à mise au point exacte à toute distance, images corrigeant les effets de bougé. Ce chapitre est une porte ouverte sur le domaine nouveau de l'imagerie computationnelle qui préfigure l'appareil du futur.