

1. L'OPTIQUE

L'optique est la branche de la physique qui traite de la lumière, de son comportement et de ses propriétés, du rayonnement électromagnétique à la vision en passant par les systèmes utilisant ou émettant de la lumière. Du fait de ses propriétés ondulatoires, le domaine de la lumière peut couvrir le lointain UV jusqu'au lointain IR en passant par les longueurs d'onde visibles. Ces propriétés recouvrent alors le domaine des ondes radio, micro-ondes, des rayons X et des radiations électromagnétiques.

La plupart des phénomènes optiques peuvent être expliqués en utilisant la description électromagnétique classique. Cependant, cette description, bien que complète, est souvent difficile à appliquer en pratique : on utilise plus souvent des modèles simplifiés. Le plus commun d'entre eux, l'optique géométrique, considère la lumière comme un ensemble de rayons voyageant en ligne droite et qui s'incurvent quand ils traversent ou se réfléchissent sur des surfaces. L'optique physique est un modèle plus complet, incluant les effets ondulatoires comme la diffraction et les interférences, qui ne sont pas prises en compte dans le modèle géométrique. Historiquement, le modèle basé sur les rayons a été développé en premier, suivi par le modèle ondulatoire. Des progrès dans la théorie électromagnétique au cours du XIX^e siècle ont conduit à la découverte du fait que la lumière est un rayonnement électromagnétique.

Certains phénomènes dépendent du fait que la lumière possède à la fois des propriétés corpusculaires et des propriétés ondulatoires. L'explication de ces effets est possible grâce à la mécanique quantique. Lorsqu'on considère la lumière comme une particule, on peut la modéliser comme un ensemble de photons. L'optique quantique traite de l'application de la mécanique quantique aux systèmes optiques.

L'optique trouve des applications et est étudiée dans beaucoup de domaines, incluant l'astronomie, différents champs de l'ingénierie, la photographie ou encore la médecine. Les applications pratiques de l'optique peuvent se retrouver dans un grand nombre de technologies et d'objets du quotidien comme les miroirs, les lentilles, les lasers, la fibre optique, les microscopes ou encore les télescopes optiques.

2. Introduction

Le premier traité d'optique par Johannes Kepler, *Ad Vitellionem paralipomena quibus astronomiae pars optica traditur*, 1604, Historiquement, l'optique apparaît dès l'Antiquité, puis est développée par les érudits musulmans dont des Perses. Elle est d'abord géométrique. Ibn al-Haytham (965-1039), scientifique perse, connu par les occidentaux sous le nom d'Alhazen est considéré comme le père de l'optique moderne, de la physique expérimentale et de la méthode scientifique. Une traduction latine d'une partie de ses travaux, le *Traité d'optique*, a exercé une grande influence sur la science occidentale.



Le premier traité d'optique par Johannes Kepler, *Ad Vitellionem paralipomena quibus astronomiae pars optica traditur*, 1604

L'optique géométrique propose une analyse de la propagation de la lumière basée sur des principes simples : la propagation rectiligne et le retour inverse. Elle a pu expliquer les phénomènes de la réflexion et de la réfraction. Elle s'est perfectionnée jusqu'au XVIII^e siècle, où la découverte de nouveaux phénomènes, tels que la déformation de la lumière au voisinage d'obstacles ou le dédoublement de la lumière lors de la traversée de certains cristaux, a conduit au XIX^e siècle au développement de l'optique physique ou ondulatoire.

L'optique physique considère la lumière comme une onde ; elle prend en compte les phénomènes d'interférence, de diffraction et de polarisation.

Au début du XX^e siècle les théories d'Einstein sur la nature corpusculaire de la lumière donneront naissance au photon et à l'optique quantique. Les physiciens sont alors contraints d'admettre que la lumière présente à la fois les propriétés d'une onde et d'un corpuscule. À partir de là, Louis de Broglie considère, au travers de la mécanique ondulatoire, que si le photon peut se comporter comme un corpuscule, alors, à l'inverse, les corpuscules tels que les électrons ou les protons peuvent se comporter comme des ondes.

3. Optique géométrique

L'optique géométrique introduite par Alhazen s'est développée sur la base d'observations simples et repose sur des lois empiriques :

- la propagation rectiligne dans un milieu homogène et isotrope ;
- le principe du retour inverse qui exprime la réciprocité du trajet lumineux entre source et destination ;
- les lois de Snell-Descartes pour la réflexion et la réfraction.

L'optique géométrique permet de retrouver la quasi-totalité des résultats concernant les miroirs, les dioptries et les lentilles ou leurs combinaisons en doublet et les systèmes optiques constituant notamment les instruments d'optique.

De plus, dans le cadre de l'approximation de Gauss, l'optique géométrique donne des relations mathématiques linéaires permettant l'usage d'outils mathématiques tels que les matrices et la systématisation des calculs par ordinateur.

4. Optique ondulatoire ou optique physique

Alors que l'optique géométrique est une optique purement phénoménologique et ne fait pas d'hypothèse sur la nature de la lumière, hormis éventuellement qu'elle transporte de l'énergie, l'optique ondulatoire (parfois appelée « optique physique ») modélise la lumière par une onde.

Le modèle de l'onde scalaire (principe de Huygens-Fresnel) permet d'interpréter les phénomènes de diffraction (lors du passage par un trou, une fente étroite, près d'un bord...) et d'interférences. Les calculs reposent alors sur la somme des amplitudes d'ondes sinusoïdales qui se superposent, somme qui, suivant le déphasage, peut conduire à un résultat nul. La superposition de deux faisceaux peut ainsi donner l'obscurité. C'est ce qu'on observe au niveau des zones sombres des figures d'interférence ou de diffraction.

L'optique physique est le nom d'une approximation haute fréquence (petite longueur d'onde) couramment utilisée en optique, en physique appliquée ou en ingénierie électrique. Dans ces contextes, c'est une méthode intermédiaire entre l'optique géométrique, qui ignore les effets ondulatoires, et l'optique ondulatoire qui est une théorie physique exacte.

5. Optique quantique

Les problèmes liés au rayonnement du corps noir et à l'effet photoélectrique ont amené à considérer que la lumière était composée de *paquets d'énergie* (*licht quanta*, en allemand, d'après Einstein).

Plus tard, l'effet Compton a conduit à considérer la lumière comme constituée de particules à part entière : les photons. Ceux-ci sont caractérisés par une masse nulle, une vitesse égale à c (célérité de la lumière), une énergie $k = E\nu$, où ν est la fréquence de l'onde électromagnétique associée, et

une quantité de mouvement $p=\hbar/k$ avec $\hbar=h/2\pi$ où h désigne la constante de Planck et k le vecteur d'onde.

La théorie optique quantique a été créée pour concilier les deux aspects apparemment incompatibles de la lumière, l'aspect ondulatoire (phénomènes d'interférence, de diffraction...) et l'aspect corpusculaire (effet photoélectrique, émission spontanée...). L'optique quantique est essentiellement une reformulation de l'optique ondulatoire dans laquelle le champ électromagnétique est quantifié.

Avec l'optique quantique on abandonne toute certitude, on raisonne uniquement en termes de probabilités :

- probabilité qu'un photon soit émis ou absorbé par un atome ;
- probabilité qu'un photon émis par un atome ait une énergie donnée ;
- probabilité qu'un photon se désintègre ;

6. Optique et la biologie

La lumière joue un rôle fondamental dans le Vivant, qui a développé de nombreux moyens de l'utiliser. La bio-optique utilise la lumière et son absorption par le vivant étudié les milieux, aquatiques notamment.

Les écologues et les biologistes étudient la manière dont les organismes vivant ont appris au cours de l'évolution à utiliser et manipuler à leur profit l'absorption de lumière (la photosynthèse, la vision), la transparence, la diffraction, l'interférence, la réflexion et l'antireflet, la diffusion, le guidage optique, et la lentille, le camouflage dynamique (chez le caméléon, la pieuvre et la seiche notamment) ou encore la bioluminescence...

Ces « solutions » développées par le vivant pour utiliser la lumière (ou en produire via la bioluminescence) intéressent aussi la biomimétique (toutes les ingénieries inspirées du vivant).

7. Optique moderne

L'optique moderne englobe les éléments de l'optique (en tant que science mais aussi de l'ingénierie liée) qui sont devenus populaires au cours du XX^e siècle. Ces domaines sont typiquement reliés aux propriétés électromagnétiques et quantiques de la lumière mais incluent d'autres sujets. Un sous-champ de l'optique moderne, l'optique quantique, traite spécialement des propriétés quantiques de la lumière. L'optique quantique n'est pas seulement théorique : certains appareils modernes, tels que les lasers, ont des principes opératoires qui relèvent justement de la mécanique quantique. Les détecteurs de la lumière, comme les photomultiplicateurs ou les Channeltrons. Des capteurs d'image électroniques, comme les capteurs CCD (*Charge-Coupled Device, ou dispositif à transfert de charges*). Les diodes électroluminescentes (LED) et les panneaux photovoltaïques, eux aussi, ne pourraient être compris sans la mécanique quantique. Lorsqu'on étudie ces dispositifs, il arrive souvent que l'optique quantique se chevauche avec l'électronique quantique.

Les champs de recherche spécialisée en optique incluent l'étude de l'interaction lumière-matière, mais aussi l'optique non imageante, l'optique non linéaire, l'optique statistique et la radiométrie. En outre, les ingénieurs informatiques ont pris un intérêt dans l'optique intégrée, la vision industrielle, et l'ordinateur optique en tant que qu'éléments possibles inclus dans la «prochaine génération» d'ordinateurs.

Les sous-champs éminents de l'ingénierie optique comprennent l'ingénierie d'éclairage, la photonique et l'optoélectronique avec des applications pratiques telles que la conception de lentilles, la fabrication et les tests de composants optiques et le traitement d'image. Certains de ces champs se chevauchent, avec des frontières floues. Une communauté professionnelle des chercheurs en optique non linéaire s'est développée au cours des dernières décennies, en raison des progrès de la technologie laser.

8. Lasers

Un laser est un appareil qui émet de la lumière (rayonnement électromagnétique) par un processus appelé l'émission stimulée. Le terme laser est un acronyme pour *Light Amplification by Stimulated*

Emission of Radiation. La lumière laser est généralement cohérente dans l'espace, ce qui signifie que la lumière est soit émise dans un faisceau étroit à faible divergence, soit que l'on peut la convertir en un tel faisceau à l'aide de composants optiques tels que des lentilles.

Le premier laser fonctionnel a été réalisé le 16 mai 1960 par Théodore Maiman au sein des Hughes Research Laboratories (HLR, appartient à GMC et Boeing). Lors de leur invention, ils étaient surnommés la « solution à la recherche d'un problème », depuis lors, les lasers sont devenus une industrie de plusieurs milliards de dollars, trouvant une utilité dans des milliers d'applications très variées. La première application des lasers visibles dans la vie quotidienne était le scanner de code-barres dans les supermarchés, introduit en 1974. Le C.D. (disque compact) a été le premier dispositif de stockage fonctionnant grâce au laser qui se soit largement diffusé dans les foyers des consommateurs, à partir de 1982. Ces dispositifs de stockage optique utilisent un laser ayant un faisceau de beaucoup moins d'un millimètre de diamètre du spot (environ 1,04 μm) pour balayer la surface du disque, afin de récupérer les données inscrites à sa surface. La communication à fibre optique repose aussi sur les lasers pour transmettre de grandes quantités d'informations à la vitesse de la lumière. D'autres applications courantes de lasers comprennent les imprimantes laser et les pointeurs laser. Ils sont aussi utilisés en médecine dans des domaines tels que la chirurgie oculaire au laser, et dans des applications militaires telles que les systèmes de défense anti-missiles, les contre-mesures électro-optiques (EOCM) et le lidar (*laser detection and ranging*). Les lasers sont également utilisés dans les hologrammes (*photographie en relief*), la gravure 3D dans du verre, les shows laser et l'épilation au laser.

9. Optique appliquée

Les restrictions propres au domaine d'application vont modifier la manière d'utiliser les lois de l'optique, les notations, les approximations utilisées, etc.

Non exhaustivement, on retrouve les grands domaines suivants :

9.1 Optique physiologique

L'optique physiologique, définie comme la « science de la vision », fait appel à l'[anatomie](#), pour la disposition matérielle de l'œil ; à la physiologie, pour son fonctionnement ; à la médecine, quant à ses maladies ; aux différentes spécialités de l'optique physique pour la propagation dans le globe oculaire des rayons lumineux ; à la chimie, pour l'étude des colorants et l'élucidation de la conversion de l'énergie lumineuse en influx nerveux ; à la psychologie expérimentale pour l'étude de l'appareil visuel globalement, et à la psychologie cognitive pour l'étude de son éducation, amenant les individus à la capacité de voir.

9.2 Optique photographique

Domaine très similaire à l'optique géométrique, l'optique appliquée à la photographie diffère par sa terminologie et par le fait qu'elle peut lire aussi des notions d'électronique du fait de l'existence d'un capteur dans l'appareil photographique, ou d'une pellicule.

L'optique géométrique demeure un domaine général tournant autour d'une certaine idée de la propagation de la lumière, là où l'optique photographique va s'intéresser de manière très poussée à la qualité de l'image, aux aberrations et à la luminosité, donc inclure des notions importantes de radiométrie.

9.3 Optronique

L'optronique est une technique permettant de mettre en œuvre des équipements ou des systèmes utilisant à la fois l'optique et l'électronique. Elle associe généralement un capteur optique, un système de traitement d'images et un système d'affichage ou de mémorisation.

9.4 Optique atmosphérique

Les propriétés optiques uniques de l'atmosphère provoquent une large gamme de phénomènes optiques spectaculaires. La couleur bleue du ciel est le résultat direct de la diffusion de Rayleigh* (1842-1919, est un physicien anglais), qui redirige la lumière du soleil de haute fréquence (bleue) dans le champ de

vision de l'observateur. Parce que la lumière bleue est plus facilement dispersée que la lumière rouge, le soleil prend une teinte rougeâtre lorsqu'il est observé dans une atmosphère épaisse, comme au lever ou au coucher du soleil. Des particules supplémentaires dans le ciel peuvent disperser différentes couleurs sous différents angles créant un ciel rougeoyant coloré au crépuscule الغسق et à l'aube. La diffusion des cristaux de glace et d'autres particules dans l'atmosphère sont responsables des halos, des rémanences الشفق, des couronnes, des rayons du soleil. La variation de ces types de phénomènes est due à différentes tailles de particules et à différentes géométries.

Les mirages sont des phénomènes optiques dans lesquels les rayons lumineux sont courbés en raison des variations thermiques de l'indice de réfraction de l'air, produisant des images déplacées ou fortement déformées d'objets éloignés. D'autres phénomènes optiques associés, comme l'effet Novaya Zemlya où le soleil semble se lever plus tôt que prévu avec une forme déformée. Une forme spectaculaire de réfraction se produit avec une inversion de température appelée Fata Morgana, où les objets à l'horizon, ou même au-delà de l'horizon, comme les îles, les falaises, les navires ou les icebergs, semblent allongés et élevés.

Les arcs-en-ciel sont le résultat d'une combinaison de réflexion interne et de réfraction dispersive de la lumière dans les gouttes de pluie. Une seule réflexion sur une série de gouttes de pluie, produit un arc-en-ciel avec une taille angulaire* sur le ciel qui varie de 40° à 42° avec du rouge à l'extérieur. Les arcs-en-ciel doubles sont produits par deux réflexions internes avec une taille angulaire de 50,5 ° à 54°, avec du violet à l'extérieur.

La taille apparente, ou taille angulaire ou diamètre apparent ou diamètre angulaire d'un objet vu à distance est la distance angulaire entre ses points extrêmes au point d'observation, c'est-à-dire l'angle entre les droites qui relient les extrémités de l'objet et l'observateur. Wikipédia

***La diffusion de Rayleigh**

La diffusion de Rayleigh est due aux molécules gazeuses présentes dans l'atmosphère (O₂, N₂, CO₂, vapeur d'eau, etc.) ou aux fines particules de poussière. Elle se produit lorsque la taille des molécules diffusantes est très inférieure à la longueur d'onde du rayonnement. L'intensité diffusée est alors inversement proportionnelle à la puissance 4 de la longueur d'onde du rayonnement incident. La diffusion de Rayleigh est par conséquent un phénomène sélectif qui se produit surtout pour les longueurs d'onde les plus courtes du spectre (violet, bleu). Elle affecte les hautes couches de l'atmosphère et c'est elle qui explique la couleur bleue du ciel pendant la journée. Les longueurs d'ondes les plus courtes (bleu) du rayonnement solaire sont davantage diffusées que les longueurs d'onde plus grandes (rouge), aussi le ciel apparaît bleu à l'observateur. A l'aube ou au crépuscule, en revanche, lorsque le soleil est bas sur l'horizon, l'épaisseur de la couche atmosphérique traversée par le rayonnement est bien plus importante que pendant la journée. Les courtes longueurs d'onde sont totalement diffusées, on ne voit alors plus que les longueurs d'onde les plus grandes (rouge) et le ciel apparaît rouge orangé dans la direction du soleil

II : Tri Optique des déchets

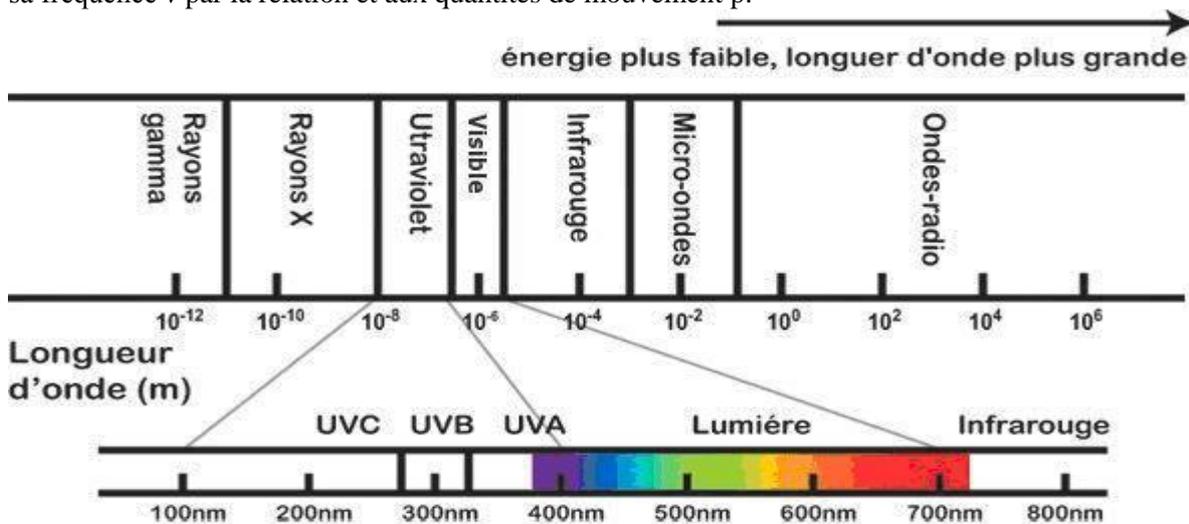
Cette technique repose sur l'examen, au moyen de caméras, de la surface d'un produit particulière circulant, éclairé dans des conditions contrôlées. Les critères examinés sont la forme, la taille des particules, et la couleur au sens large : spectre de la lumière réfléchiée par l'objet dans le visible, l'infrarouge (IR) ou l'ultraviolet (UV). L'éclairage des produits est assuré par des lampes délivrant le spectre requis : néons à haute fréquence, lampes à incandescence (visible ou IR), diodes électroluminescentes (LED : Light Emitting Diode) de puissance.

II.1 Quelques notions de base sur la couleur

La couleur d'un objet résulte de l'interaction de la lumière avec cet objet. La lumière est composée de rayonnements électromagnétiques dans une gamme relativement étroite de longueur d'onde sensiblement comprise entre 380 et 780 nm. La lumière blanche naturelle est composée de l'ensemble du spectre comme on le voit sur la figure 15. S'il manque une ou plusieurs bandes de longueur d'onde, l'œil interprète les longueurs d'onde restant en termes de couleur (teinte). Lorsque la lumière pénètre dans un objet, plusieurs cas de figure peuvent se présenter :

1. La lumière est totalement absorbée, et l'objet est noir.
2. La lumière est partiellement absorbée. Les longueurs d'onde non absorbées donnent la couleur de l'objet.
3. La lumière n'est pas absorbée et l'objet est transparent

Le rayonnement par les molécules est une onde électromagnétique qui transporte de l'énergie E liée à sa fréquence ν par la relation et aux quantités de mouvement p .



Ce rayonnement absorbe dans plusieurs domaines (figure III.15) à savoir :

- Le domaine du rayon X
- Le domaine des rayons gamma
- Les domaines allant de 190 à 800 nm, qui correspondent à l'ultra- violet (190-400 nm) et au visible (400-800 nm).
- Les domaines couvrant l'infra-rouge et le proche infrarouge (2500-3000 nm)
- Le domaine du micro- ondes
- Le domaine des ondes radio

II.2 Sources artificielles de lumière

La source artificielle de lumière peut être de deux principes :

- Incandescence
- Luminescence

a) Incandescence

C'est la production de la lumière par élévation de la température d'un corps solide, liquide ou gazeux. Dans une lampe à incandescence, l'électricité porte à haute température un filament de tungstène enfermé dans une ampoule en verre vide d'air ou remplie de gaz inertes. Les radiations thermiques obtenues émettent alors un spectre continu de lumière visible.

b) Luminescence

La luminescence est le rayonnement non thermique, émis par un gaz ou une vapeur métallique (mercure) soumis à des décharges électriques. Ce rayonnement ne couvre pas forcément tout le spectre visible. Ces décharges sont irrégulières, la lumière émise également à la fréquence des décharges (par exemple à la fréquence du courant alternatif). Ce principe a donné le jour à toutes les lampes à décharge basse et haute pression actuelles.

Les objets que nous voyons sont colorés parce qu'ils absorbent certaines longueurs d'ondes et en réfléchissent d'autres. Les objets blancs réfléchissent toutes les longueurs d'onde de la lumière, et les objets noirs les absorbent toutes. De même, une pomme rouge réfléchit principalement de la lumière rouge, et l'herbe réfléchit principalement de la lumière verte.

Tableau III.2 : Longueurs d'onde des principales couleurs

Couleurs	Longueur d'onde (nm)	Intervalle de longueur d'onde (nm)
Violet	400	380-450
Bleu	470	450-495
Vert	530	495-570
Jaune	580	570-590
Orange	600	590-620
rouge	650	620-750
IR proche	880	750-3000

Couleur		longueur d'onde (1 nm = 10 ⁻⁹ m)	Fréquence (103 GHz = 10 ¹² Hz)
violet		380 à 450 nm	725
bleu		450 à 490 nm	640
vert		490 à 570 nm	565
jaune		570 à 585 nm	520
orange		585 à 620 nm	500
rouge		620 à 670 nm	465

II.3 Principe de fonctionnement du tri optique

La technologie de tri optique se base sur le principe de détection des couleurs dans le domaine du visible où la longueur d'onde λ est située entre 400 et 800 nm (figure III.16). L'objet est éclairé par des lampes halogènes (Iode et Brome) et réfléchit une certaine quantité de lumière (figure III.17).

Cette lumière réfléchie est relevée par un capteur (camera ou Spectrocolorimètre : *Appareil permettant de mesurer la couleur d'un matériau et de définir ses paramètres trichromatiques (teinte, luminance, réflectance et saturation)*) situé dans la tête de lecture. Ces informations sont ensuite envoyées à l'unité de traitement qui analyse l'information et commande les électrovannes. Ces dernières éjectent alors les objets qui se retrouvent en deux ou trois catégories, par familles de couleurs. On distingue deux technologies différentes de capteurs :

1. Le système de camera couleur couplée à un prisme, qui effectue des mesures sur les couleurs primaires (rouge, vert et bleu) en fonction de leur intensités ;
2. La Spectrocolorimétrie, qui analyse la totalité du spectre visible et permet d'obtenir des résultats plus sélectifs et plus précis que la caméra couleur.

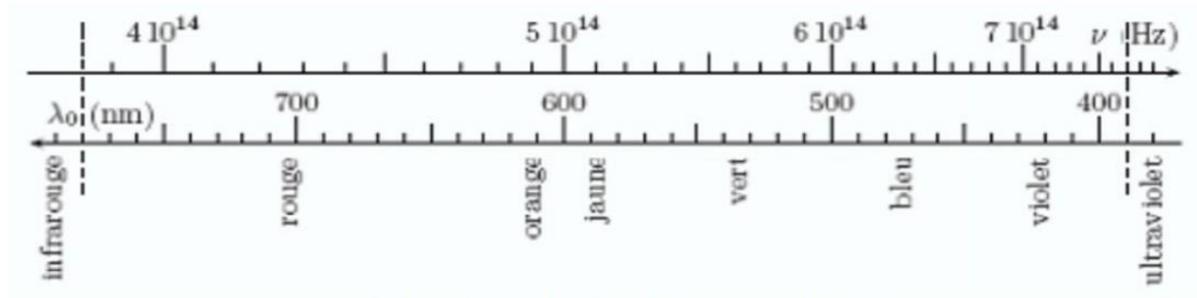


Figure III.16 : Plage de longueur d'onde.

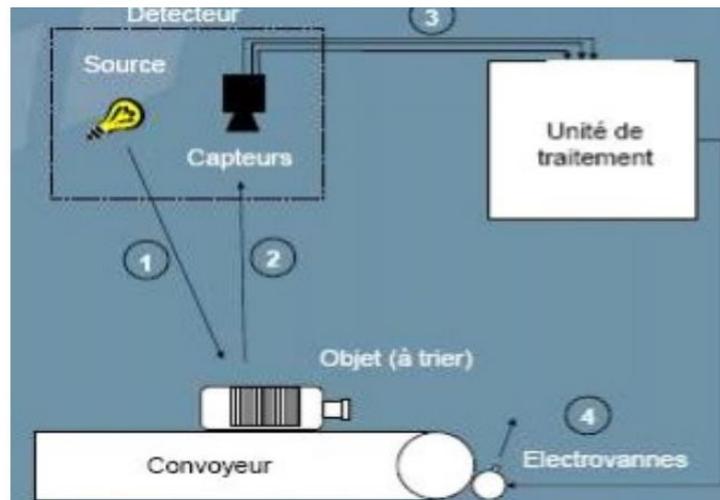


Figure III.17 : Principe de base d'un séparateur de déchet par tri optique.

II.4 Principe de construction et de détection

Les systèmes de détection par analyse d'image dans le visible ont été mis au point pour le triage de tous produits particuliers, transportés en vrac par bandes convoyeuses: déchets, légumes et fruits frais ou blanchis destinés à l'appertisation (التعليب) ou à la congélation, pommes de terre, frites, céréales, fruits secs fruits et légumes déshydratés, biscuits, olives, crevettes, produits de la mer, etc. Il s'agit le plus souvent de « petit produit ». On distingue les systèmes dits a « chute gravitaire» et les dispositifs horizontaux dits « balistiques ».

Dans un **système gravitaire** (figure 15) le produit est alimenté et réparti sur toute la largeur d'un vibreur, puis tombe spontanément dans un espace libre ou le long d'une glissière si une orientation préférentielle est souhaitée.

La zone de tri est un espace de chute libre qui regroupe :

- l'éclairage adapté à la caméra utilisée et au produit, pour obtenir un bon contraste;
- un fond de référence pour le réglage de zéro de la caméra ;
- le dispositif d'éjection: en général, rampes de 20 à 100 fines fentes d'éjecteurs pneumatiques ultrarapides côte à côte, commandées par solénoïdes (bobines).

La ou les caméras CCD (charge-coupled device, dispositif à charge couplée : assure la conversion d'un signal lumineux en un signal électrique) matricielles 2D de haute résolution sont disposées pour observer la largeur de cet espace de tri. Chaque particule présente dans l'image est examinée et simultanément repérée spatialement au moment où elle traverse en chute libre l'espace de tri et juste avant qu'elle ne passe devant l'éjecteur pneumatique.

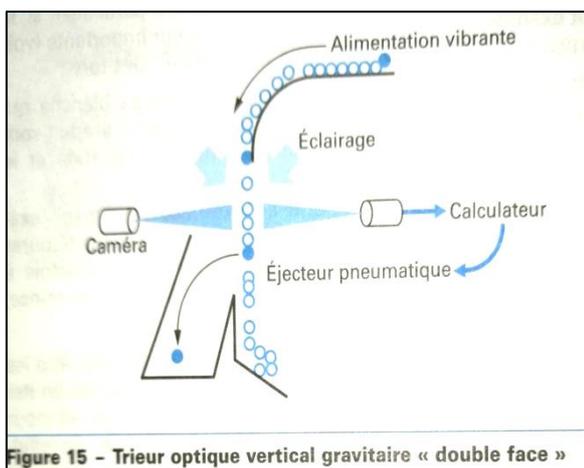


Figure 15 - Trieur optique vertical gravitaire « double face »

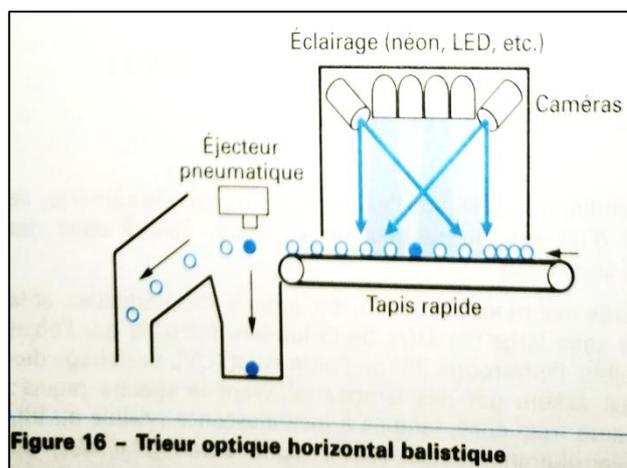


Figure 16 - Trieur optique horizontal balistique

L'injection est réalisée horizontalement, c'est-à-dire transversalement à la circulation du produit. Certaines machines peuvent éjecter d'un côté ou de l'autre, ce qui permet deux critères de tri très distincts (couleur et forme par exemple).

Dans les équipements **horizontaux** à mouvement balistique (figure 16), une monocouche uniforme de produit est répartie sur toute la largeur du tapis convoyeur qui défile à vitesse assez rapide. Une couleur claire et mate du tapis est généralement choisie pour ne pas interférer avec l'analyse de l'image du produit. A l'extrémité du tapis, le produit est projeté horizontalement par sa propre énergie cinétique au-dessus d'un espace vide de quelques centimètres de large, avant d'être collecté par une goulotte de récupération, vers un tapis de sortie.

L'examen du produit peut être réalisé durant son séjour sur le tapis: examen de la face supérieure seulement des particules constituant la monocouche défilant sur le tapis, ou au dernier moment, lors de son transfert balistique dans l'espace de tri, ce qui autorise un examen sur les deux faces.

En multipliant le nombre de caméras et leur angle de vue du produit, la performance de détection et de localisation augmente en général : un dispositif à quatre caméras, deux dessus et deux dessous, est très performant.

Au-dessus de l'espace de tri, les éjecteurs pneumatiques sont disposés en ligne pour souffler vers le bas des particules reconnues non conformes, avec une définition de quelques centimètres de largeur par éjecteur. Par construction, l'éjection pneumatique est assez peu sélective; une petite fraction de bon produit se situant immédiatement autour de la zone où le corps étranger a été détecté, est éjectée en même temps. Plus l'éjecteur dispose de fentes fines et rapprochées, meilleure est la précision d'éjection, et moindre la freinte. Une distance réduite entre la zone d'examen et l'éjecteur est favorable à la qualité du tri. Cela implique une vitesse de calcul élevée.

II.5 Traitement d'image en tri optique

La détection proprement dite fait appel à l'analyse d'images 2D acquises et traitées très rapidement. Chaque image n'a pas à être reconstituée ligne par ligne et la cadence d'examen peut être élevée mais cette technologie fait appel à de plus importantes puissances de calcul et mémoire informatique, pour y stocker les images. Pour les très petites particules, une caméra linéaire haute résolution, avec une seule ligne de pixels, peut être utilisée.

Les matériels les plus courants utilisent des caméras très sensibles et munies de filtres, générant une image en noir et blanc, l'image étant ainsi analysée en termes de très fins niveaux de gris. Il existe également des caméras trichromatiques plus performantes, permettant un examen simultané des niveaux de gris suivant trois spectres (bleu, rouge et vert). Des caméras infrarouges ou multi-spectrales peuvent servir à des applications spéciales.

Par conception, ce matériel de tri optique opère la détection des corps étrangers et des particules non conformes essentiellement sur des critères de contraste de couleur, plus exactement sur des critères de niveaux de gris dans la gamme des longueurs d'onde examinées.

Dans tous les cas difficiles, une mesure spectrographique préalable en réflexion et en transmission du produit peut aider à définir la zone spectrale dans laquelle ces contrastes sont les meilleurs.

Les principes de l'analyse d'image sont globalement les mêmes qu'en Imagerie par rayons X.

Dans le cas d'un produit dont les particules ne sont pas homogènes en couleur (c'est pratiquement toujours le cas), le fonctionnement s'accompagne toujours de l'éjection d'une petite fraction du produit, rarement inférieure à 1 à 5 % en masse, contenant, par exemple, majoritairement les particules les plus sombres.

Chaque particule examinée étant individualisée, il est par ailleurs possible avec les moyens informatiques modernes de déterminer son contour, de calculer son orientation (petit axe/grand axe) et de calculer certains paramètres de taille, forme, calibre, en utilisant un masque de référence assorti de tolérances, et cela particule par particule. Cela permet de réaliser en même temps:

- la détection des corps étrangers sur des critères de couleur;
- la détection des corps étrangers ou des MEV sur des critères de forme ;
- un tri qualité du produit sur ces deux critères.

Les performances de cette technologie sont celles des caméras CCD utilisées. La résolution (taille minimale d'un pixel «produit» examiné ; $0,4 \times 0,4 \text{ mm}^2$ par exemple) détermine le plus petit corps étranger pouvant théoriquement être détecté. La sensibilité des capteurs CCD (possibilité de traiter des images faiblement lumineuses) s'est considérablement accrue au cours des dix dernières années. Cela permet d'éloigner au maximum les caméras, munies d'un zoom, de mettre ainsi les lentilles à l'abri des projections, des poussières, et de croiser au maximum les angles de vue pour examiner au mieux le produit. Enfin, le nombre d'images traitées par seconde détermine la cadence de tri.

II.6 Tri optique par vision en transmission : mirage

Cette technique exploite le caractère transparent ou translucide du produit, éventuellement conditionné dans un emballage transparent. Le caractère « transparente » doit être compris relativement au spectre lumineux utilisé (visible, IR, UV), le produit est examiné au moyen d'une puissante source lumineuse, en transmission. L'image du produit est comparée par le ordinateur avec celle du produit de référence mémorisée. L'analyse d'image peut être assimilée à celle utilisée pour la technologie par rayon X.

Les applications sont les suivantes

- détection des noyaux dans les fruits confits (cerise), contrôle des œufs ;
- détection du niveau de remplissage des bouteilles;
- détection des corps étrangers dans des emballages ou des produits transparents ;
- contrôle des bords en verre avant remplissage.

Ces techniques sont surtout répandues dans l'industrie des boissons.

II.7 Tri optique par balayage laser

Dans sa conception mécanique et ses applications, la détection per laser est très voisine de l'analyse d'image dans le visible, et elle est proposée dans les deux géométries décrites au paragraphe 61.

Lauminauon du produit circulant est assurée par le balayage ligne par ligne de faisceaux laser, à grande vitesse: 100 à 2000 balayages par seconde. La nature même du laser (en général, argon ou hélium-néon), source ponctuelle et cohérente, permet de concentrer l'illumination sur une petite zone à examiner mais requiert donc un balayage pour examiner toute la largeur de la zone de circulation.

Le balayage est assuré par la réflexion du laser sur un miroir à facettes tournant à grande vitesse dans une chambre parfaitement protégée de la poussière et de la condensation.

Le balayage laser est dirigé vers un rouleau tournant réfléchissant servant de fond de référence, de couleur uniforme, choisie en fonction du produit. Une partie de la lumière y est réfléchi suit un petit angle connu, et collectée sur une barrette d'éléments CCD de haute résolution (figure 17). Le produit passant dans le faisceau absorbe et diffuse une partie de la lumière et en réfléchit une autre partie.

Le processeur détermine l'emplacement exact de l'élément illuminé et la réponse spectrale du produit, par une mesure de différence de réflexion entre le cylindre de référence et le produit. La combinaison de deux ou plusieurs lasers (vert, jaune, rouge, bleu, infrarouge, UV) permet de mesurer la réponse spectrale à plusieurs longueurs d'onde simultanément et d'améliorer les performances.

La ligne de base est encore déterminée par l'opérateur au moyen d'un passage à blanc du produit. Les algorithmes de calcul utilisés pour le traitement du signal sont très complexes et font en général appel à des fonctions d'Intelligence artificielle par apprentissage. Le seuil de sensibilité est en général réglé directement par rapport au taux de rejet faux positif » acceptable par l'utilisateur, par essais successifs.

Par rapport au tri optique classique, le tri laser apporte une particularité spécifique de la lumière laser: l'effet scattering. Cet effet supplémentaire est causé par la modification de la lumière réfléchi due à l'état de surface du produit: mat, brillant, réfléchissant.

Techniques de tri par détection et éjection

3.1 Tri

Différentes techniques existent pour réaliser la détection, le repérage spatial et le tri mi vue de l'éjection des corps étrangers éventuellement présents :

- les technologies électromagnétiques (détecteur de métaux) ;
- les technologies utilisant l'imagerie industrielle: soit au moyen de caméras (systèmes de tri optique à longueurs d'onde diverses - visible, UV, infrarouge, multispectrale), soit au moyen d'images • reconstituées informatiquement à partir de balayages rapides du produit (imagerie laser d'examen de surface ou imagerie par rayons X, seule technique permettant la détection en profondeur du produit, et donc le contrôle d'un produit dans son emballage) ;
- les technologies acoustiques: détecteur par émission/ réception d'ultrasons;
- les micro-ondes, et la RMN (résonance magnétique nucléaire), techniques au stade de la recherche;

L'imagerie industrielle a connu en particulier un développement considérable de ses performances au cours des années 2000 par l'accroissement spectaculaire des puissances de calcul informatique, qui autorisent une analyse fine de l'image en temps réel, et aussi par les progrès dans la fabrication de caméras CCD (charge coupled device) et matrices électro-optiques de haute résolution et fiabilité.

3.2 Éjection

Tout système de détection, aussi performant soit-il, ne peut donner de bons résultats qu'avec un système de rejet adapté au produit (masse unitaire, fragilité) et à la cadence industrielle.

On distingue deux situations :

- le produit est emballé et chaque conditionnement unitaire renfermant un corps étranger doit être éjecté individuellement;

- le produit circule en vrac et deux solutions sont alors possibles:
 - la totalité du produit est déroutée vers une zone de récupération, durant un temps court, suffisant pour assurer l'isolement du corps étranger,
 - une fraction du produit contenant le corps étranger est repéré spatialement et éjectée.

Les techniques de séparation et d'éjection les plus courantes sont:

- les pistons éjecteurs ayant une course perpendiculaire au défilement du tapis. Cette technique est adaptée aux produits conditionnés (boîtes, sachets...);
- le soufflage, adapté au tri optique des produits en vrac;
- l'aspiration, préférable pour les produits légers ou pul-vérulents. Cette solution impose de disposer d'une puissance d'aspiration continue mais sécurise au maximum le tri. Elle ne permet pas un repérage spatial spécifique comme dans le cas précédent;
- les trappes et tapis basculants : l'éjection est obtenue par le routage direct d'un tapis articulé, vers le bas. Cette technique est appliquée avec succès aux produits emballés.

3.3 Principes de base et caractérisation des performances de tri

Le principe de base est simple à définir: a priori, 100% du produit circule dans un dispositif qui l'examine, puis le compare avec une référence mémorisée « bon produit », puis détecte et repère dans l'espace et le temps, et enfin sépare du flux principal, une fraction non désirée, qui contient les objets repérés comme non conformes.

On utilise en technologie de tri un certain nombre de définitions caractérisant les performances des dispositifs de détection/éjection.

n La sensibilité de détection peut être définie comme :

- le « plus petit » corps étranger (en dimensions, surface, masse ou volume, suivant la technologie employée), détectable par la machine; pour les rayons X, la dimension est exprimée en surface projetée et en épaisseur traversée par les RX;
- dans un matériau donné (fer, bois, nuance de plastique, verre, etc.) ou d'une couleur donnée, ou d'une forme prédéfinie, etc., suivant la technologie employée;
- avec une probabilité observée élevée (usuellement: 90 à 95%);
- dans un produit donné et à un débit de circulation donné.

Exemple : détection avec une probabilité de 95 % de l'acier inoxydable dans du riz brut circulant à 6 t/h : fragments jusqu'à 0,1 mm².

Par définition, tout corps étranger du même matériau, de taille plus importante, doit donc être détecté dans quasiment 100 % des cas. Inversement, en dessous de cette taille, la probabilité de détection chute mais reste encore non nulle. En dessous de 50 % de chances de détection, on atteint les limites de performance pour ce matériau et la limite d'intérêt technique et économique du détecteur.

Lorsqu'une grande série d'échantillon de produit est testée, on obtient pour une classe de défaut donnée (matériau ou nature du défaut x taille), trois résultats de classement exprimés en fraction du débit entrant:

- le taux de bon classement, qui regroupe les fractions de :
 - u bons produits u détectés comme bons et non éjectés,
 - produits avec défauts détectés comme tels et correctement éjectés ;
- le taux de faux négatifs: fraction de produits avec défaut mais non détectés, ou non éjectés;
- le taux de faux positifs : fraction de bon produit éjecté à tort.

En effet, pour assurer une détection correcte et réduire le plus possible le taux de faux négatif, il faut toujours accepter qu'une petite fraction de produit soit détectée positive à tort. Le produit éjecté, qui contient donc les produits avec défauts, plus une partie de produits sans défaut, peut être tout simplement détruit (freine acceptée) ou à nouveau trié, manuellement ou automatiquement.