

Chapitre I

LA LUMIÈRE

La lumière est un phénomène de transport d'énergie et d'information entre deux points de l'espace. De tout temps, les physiciens ont tenté de rendre compte des propriétés de la lumière, des observations réalisées grâce à un modèle fondé sur les mathématiques. Lorsque le modèle utilisé ne permet pas d'expliquer une observation, un autre modèle est recherché. Il se pose alors la question de la remise en cause du modèle utilisé ou de la précision des limites d'utilisation du modèle.

Le modèle le plus ancien est celui du rayon lumineux ou modèle géométrique. Il résulte de l'observation des ombres portées et prévoit la formation d'une image, par exemple, dans un appareil photographique.

Le deuxième modèle est le modèle ondulatoire. Il s'est imposé au XIX^{ième} siècle. Il explique la diffraction, les interférences, la polarisation.

Le modèle corpusculaire est le troisième modèle. Einstein a expliqué, notamment, les spectres lumineux de lampes à vapeur atomique grâce à ce modèle au XX^{ième} siècle.

Un quatrième modèle, datant du milieu du XX^{ième} siècle, rend compte de toutes les propriétés de la lumière, de son interaction avec la matière : il s'agit de l'électrodynamique quantique, modèle initié par Dirac puis repris et développé par Feynman. Ce modèle considère la lumière faite de particules dont la position ne peut être estimée que par une probabilité liée à une fonction appelée fonction d'onde.

Seuls les trois premiers modèles seront considérés ici. Après avoir précisé les principales caractéristiques de ces modèles, on verra ce qui dicte le choix du modèle à utiliser.

On terminera ce premier chapitre en s'intéressant aux sources lumineuses naturelles ou artificielles. Aussi, il sera nécessaire de préciser quelques notions sur la matière, ses états et ses propriétés notamment électriques.

1. MODÈLE GÉOMÉTRIQUE

Ce modèle est le plus ancien et ne s'intéresse pas à la nature de la lumière mais décrit et anticipe, grâce à la géométrie, le chemin qu'elle suit. En optique géométrique, on peut considérer le rayon lumineux comme la trajectoire des particules de lumière ou comme la direction de propagation de l'onde lumineuse. La notion de rayon est théorique : en pratique, on ne peut pas isoler un rayon lumineux mais il est possible d'expliquer ou d'anticiper l'évolution d'un rayon grâce à la géométrie. Expérimentalement, on génère et on suit l'évolution de faisceaux lumineux. Un faisceau est considéré comme un ensemble de rayons lumineux indépendants les uns des autres.

Un milieu diélectrique est un milieu non conducteur électrique (il ne possède pas d'électrons libres), constitué d'atomes ou de molécules polarisables (susceptibles de former des dipôles électriques). Dans des milieux diélectriques transparents, homogènes et isotropes (t.h.i.), la lumière se propage en ligne droite. Les lois de Snell-Descartes rendent compte du changement de direction de la lumière à l'interface de deux milieux (t.h.i.) différents. Cette interface s'appelle un dioptre. Ainsi, lorsqu'un faisceau lumineux se propage dans un milieu

d'indice n_1 et arrive au niveau de l'interface, il existe toujours un faisceau réfléchi, se propageant dans le milieu d'indice n_1 et, selon les situations, il peut exister un faisceau réfracté qui se propage dans le milieu d'indice n_2 . Les lois de Snell-Descartes permettent de déterminer les directions suivies par le faisceau réfléchi et par le faisceau réfracté lorsqu'il existe à partir du faisceau incident. (Figure I.1)

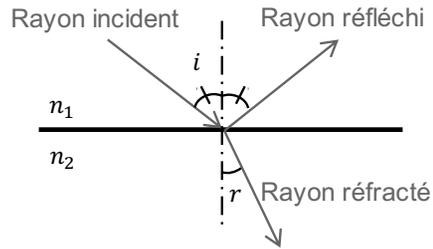


Figure I.1 : Dioptré éclairé sous une incidence i (cas où $n_1 < n_2$)

Ces lois sont :

- Les rayons incident, réfléchi et réfracté appartiennent à un même plan, appelé le plan d'incidence.
 - Les rayons incident et réfléchi sont symétriques l'un de l'autre par rapport à la normale au dioptré.
 - Les angles d'incidence i et de réfraction r sont liés par la relation : $n_1 \sin i = n_2 \sin r$
- L'existence du rayon réfracté dépend des indices n_1 , n_2 et de l'angle i .

Si la lumière incidente arrive sur une surface métallique (miroir), on parle de réflexion métallique (à distinguer de la réflexion vitreuse de la situation précédente). De ce cas, il n'y a pas de réfraction.

Trois types de systèmes optiques peuvent être considérés : systèmes dioptriques (uniquement des dioptrés), systèmes catadioptriques (dioptrés et miroirs) et systèmes catoptriques (uniquement des miroirs).

L'optique géométrique permet de déterminer à partir des éléments caractéristiques, sur l'axe optique, d'un système dioptrique (S) (foyers F , F' , plans principaux H , H' et points nodaux N , N') la position et la dimension d'une image $A'B'$ lorsque la position et la dimension de l'objet AB sont connues. On dit que le système (S) conjugue l'objet AB avec l'image $A'B'$ et les formules de conjugaison de Newton ou de Descartes positionnent l'image $A'B'$ soit par rapport à F' soit par rapport à H' .

$$A \xrightarrow{\text{système } (S)} A'$$

Formule de Newton : $\overline{FA} \cdot \overline{F'A'} = f \cdot f'$ où $f' = \overline{H'F'}$ est la distance focale image de (S) et $f = \overline{HF}$ est la distance focale objet de (S).

Formule de Descartes : $\frac{n'}{H'A'} - \frac{n}{HA} = \frac{n'}{H'F'}$ où n et n' sont les milieux incident et émergent du système (S).

La dimension de l'image $A'B'$ se détermine grâce au grandissement transversal, $g_y = \frac{\overline{A'B'}}{\overline{AB}} = \frac{\overline{F'A'}}{\overline{F'H'}} = \frac{\overline{FH}}{\overline{FA}} = \frac{n}{n'} \frac{\overline{H'A'}}{\overline{HA}}$.

En optique géométrique, la connaissance de la position et de la dimension d'une image ne suffit pas. Il faut s'assurer de la qualité de cette image : elle doit être entière et suffisamment lumineuse. Certains éléments (diaphragmes, montures de lentilles, capteurs, ...) du système limitent l'ouverture des faisceaux ; ils ont une influence sur le champ de l'image (portion de l'image visible) et son éclaircissement. On distingue parmi ces éléments, le diaphragme d'ouverture (D.O.) qui agit sur la quantité de lumière qui traverse le système et le diaphragme de champ (D.C.) qui agit sur le champ de l'image. Le terme de pupille se rapporte au diaphragme d'ouverture : la pupille d'entrée est le conjugué, dans l'espace objet, du diaphragme d'ouverture et la pupille de sortie est son conjugué, dans l'espace image.

Le modèle géométrique ne se préoccupe pas de la nature de la lumière mais il est insuffisant pour expliquer certaines observations, comme par exemple, les interférences.

2. MODÈLE ONDULATOIRE

Huygens est à l'origine du concept d'onde au XVII^{ième} siècle. Cette notion d'onde se retrouve dans différents domaines de la physique et Huygens a eu l'idée de l'appliquer à la lumière. À cette époque, cette idée n'a pas rencontré son public mais au XIX^{ième} elle a été reprise par, notamment, Malus, Young, Fresnel pour expliquer les phénomènes de polarisation, d'interférences, de diffraction.

2.1. Concept d'onde

Une onde est un phénomène physique variable au cours du temps et qui se propage. Une onde dépend du temps et de l'espace. Sa propagation correspond à un transfert d'énergie entre une source qui l'émet et un récepteur qui l'enregistre.

Une onde, émise à un instant t_0 en un point S, se propageant à une vitesse finie V , atteindra un point M distant de S de d à un instant t_1 . Le décalage (ou retard) horaire $\theta = t_1 - t_0$ s'écrit :

$$\theta = \frac{d}{V}.$$

On ne considérera que des ondes de forme sinusoïdale.

La source S génère un phénomène vibratoire entretenu (oscillatoire périodique).

La période T (unité : s) est la durée d'une oscillation.

La fréquence ν (ou f) (unité : Hz) est l'inverse de la période. La fréquence correspond au nombre d'oscillations par seconde.

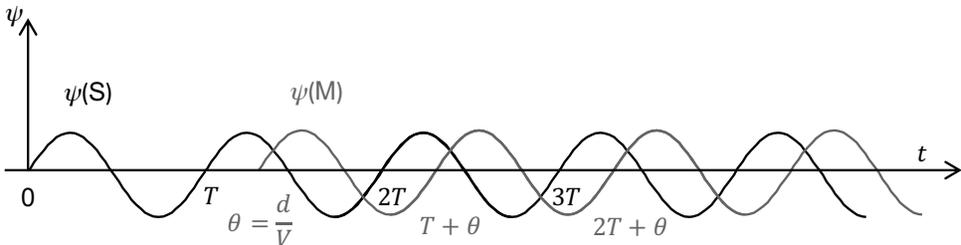


Figure I.2 : Émission d'une vibration ψ , en S à l'instant $t_0 = 0$.

La vibration $\psi(S)$ est progressive (qui se propage à la vitesse V), périodique, de période T (Figure I.2). À $t_1 = \theta + t_0 = \frac{d}{V}$, la vibration atteint M. Le point M est alors animé du même mouvement vibratoire $\psi(M)$.

Tout point M atteint par l'onde progressive est animé d'un mouvement vibratoire de même période T que celui émis par la source (S). Si le milieu est non absorbant, l'amplitude est, aussi, conservée.

La longueur d'onde λ (unité : m) est la distance parcourue par l'onde pendant une durée égale à la période de la source des vibrations.

$$\lambda = VT$$

On parle d'un mouvement caractérisé par une double périodicité :

- période temporelle T
- période spatiale λ .

On définit la surface d'onde (Σ) comme l'ensemble des points d'un milieu propagateur atteints à la même date t , par une onde émise par une source S .

Si l'onde émise par S se propage dans toutes les directions de l'espace avec la même vitesse, les surfaces d'onde sont sphériques. (Figure I.3)

Une onde sphérique émise par S peut être considérée localement comme plane dans une région limitée, très éloignée de S . L'observation se fait sous un angle α petit. On peut alors confondre localement la surface sphérique avec son plan tangent (Figures I.3 et I.4). On obtient des surfaces d'onde plane.

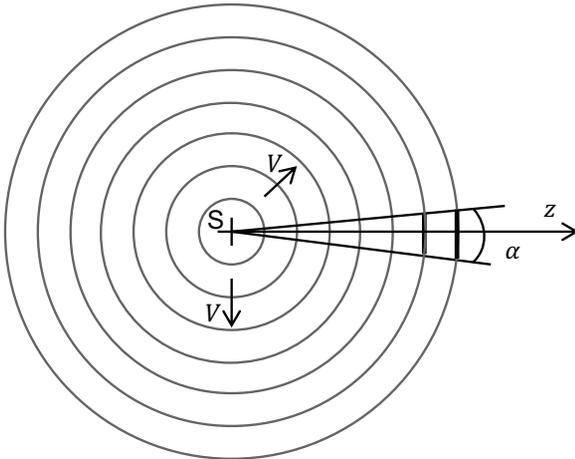


Figure I.3 : Surfaces d'onde sphérique

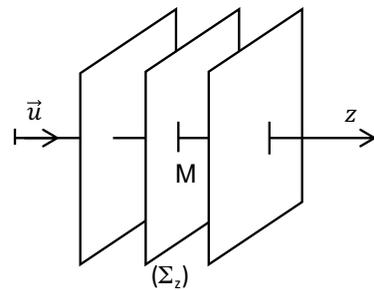


Figure I.4 : Surfaces d'onde plane

Une onde plane est une onde dont toutes les surfaces d'onde sont planes et parallèles (Figure I.4).

On peut écrire l'équation horaire d'une onde plane sinusoïdale en tenant compte des conditions initiales. Si à $t = 0$, l'amplitude est maximale (ψ_0), alors $\psi(S,t) = \psi_0 \cos(\omega t)$ où ω (unité: rad s^{-1}) est la pulsation de l'onde : $\omega = \frac{2\pi}{T}$.

Cette onde se propage selon un axe z , de vecteur unitaire \vec{u} , à la vitesse V . Le plan d'onde (Σ_z) coupe l'axe z en M de cote z . Tous les points appartenant à ce plan vibrent en phase, celle de M . L'onde arrive en M avec un retard $\theta = z/V$.

L'équation horaire s'écrit alors : $\psi(z,t) = \psi_0 \cos[\omega(t - z/V)]$ (atténuation négligée).

2.2. La lumière, onde électromagnétique

Une onde électromagnétique est constituée d'un champ électrique \vec{E} et d'un champ magnétique \vec{B} qui varient dans le temps et dans l'espace. Un champ est représenté par un vecteur rendant compte de la direction, du sens et de la norme du champ. \vec{E} et \vec{B} sont transversaux : ils sont perpendiculaires à la direction de propagation de l'onde, portée par le vecteur d'onde \vec{k} . (Figure I.5)

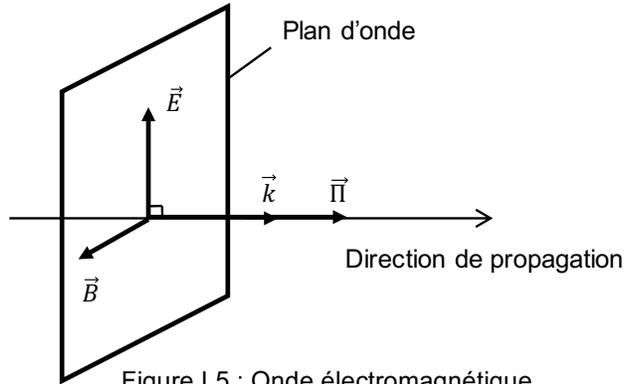


Figure I.5 : Onde électromagnétique

Ces champs en régime variable sont décrits par les équations de Maxwell. Les ondes électromagnétiques se propagent dans toutes les directions de l'espace, dans le vide ou dans un milieu matériel. Elles sont caractérisées par leur fréquence ν .

Les ondes électromagnétiques peuvent se propager dans le vide avec une vitesse indépendante de leur fréquence qui constitue la constante universelle : $c = 299\,792\,458 \text{ m s}^{-1}$ (valeur approchée avec 1 chiffre significatif : $c = 3 \cdot 10^8 \text{ m s}^{-1}$). Ainsi, la longueur d'onde dans le vide λ peut s'écrire : $\lambda = cT = \frac{c}{\nu}$. Le débit d'énergie d'une onde électromagnétique, par unité de temps, est le flux énergétique qui correspond au flux du vecteur de Poynting $\vec{\Pi}$, orthogonal à \vec{E} et \vec{B} (Figure I.5).

L'onde est électromagnétique, la vibration ψ peut être remplacée soit par \vec{B} soit par \vec{E} . L'onde est émise en S et arrive en M avec un retard horaire z/c .

En posant, $k = \omega/c$, on peut écrire l'équation horaire qui régit l'évolution de la norme de \vec{E} en fonction du temps t et de l'espace z :

$$E(z, t) = E_0 \cos(\omega t - kz)$$

où E_0 est l'amplitude maximale de E , ω est la pulsation et k (unité : rad.m^{-1}) est la norme du vecteur d'onde \vec{k} . La direction de \vec{k} donne la direction de propagation de l'onde (vecteur unitaire \vec{u}) :

$$\vec{k} = \frac{2\pi}{\lambda} \vec{u}$$

Dans un milieu transparent, homogène et isotrope, l'énergie lumineuse se propage selon la direction du vecteur d'onde \vec{k} .

Il est parfois intéressant d'écrire $E(z, t)$ sous forme complexe : $\underline{E}(z, t) = E_0 e^{-j(\omega t - kz)}$ où j est le nombre complexe tel que $j^2 = -1$ (souvent préféré en optique à i pour éviter les confusions avec l'angle d'incidence). En effet, la fonction exponentielle présente des propriétés mathématiques appréciables pour les calculs. Comme $e^{-jx} = \cos x - j \sin x$, le cosinus est la partie réelle de l'exponentielle complexe : $E(z, t) = \text{Re}(E_0 e^{-j(\omega t - kz)}) = E_0 \cos(\omega t - kz)$.

La quantité $(\omega t - kz)$ est la phase de l'onde au point M et à l'instant t ; (kz) est le déphasage de l'onde entre M et l'origine S au même instant t . Ainsi, les surfaces d'onde sont constituées de points M de même phase.

L'onde plane, progressive de pulsation ω , se propage à la vitesse c dans tout l'espace, la variable z prenant toutes les valeurs depuis $-\infty$ jusque $+\infty$. Elle est solution mathématique de l'équation de propagation des ondes.

La lumière occupe une petite fraction de l'ensemble des ondes électromagnétiques. Dans ce modèle ondulatoire, on distingue différents domaines selon la fréquence (ou la longueur d'onde dans le vide) :

Gamme de fréquence (Hz)	Domaine
$10 - 3 \cdot 10^{11}$	Ondes radio
$3 \cdot 10^{12} - 3,8 \cdot 10^{14}$	Infrarouge
$3,8 \cdot 10^{14} - 7,5 \cdot 10^{14}$	Visible
$7,5 \cdot 10^{14} - 3 \cdot 10^{16}$	Ultraviolet
$3 \cdot 10^{16} - 3 \cdot 10^{19}$	Rayons X
$> 3 \cdot 10^{19}$	Rayons gamma

Le rayonnement visible correspond aux longueurs d'onde dans le vide comprises entre 380 nm et 780 nm. La notion de couleur est subjective, néanmoins, on fait correspondre fréquence et couleur. La sensibilité maximale de l'œil en vision photopique correspond à une longueur d'onde de 555 nm (jaune-vert).

Propagation de la lumière dans un milieu matériel

La lumière peut se propager de certains milieux dits transparents. La vitesse de propagation V est alors plus faible que dans le vide. On appelle n , l'indice optique du milieu ; il dépend de la fréquence.

$$V = \frac{c}{n}$$

n est supérieur ou égal à 1 pour les milieux transparents.

La réfringence d'un milieu transparent est une caractéristique liée à la valeur de l'indice n de celui-ci : plus l'indice est élevé, plus le milieu est dit réfringent.

Quelques valeurs d'indice n de milieu transparent

L'indice de l'air est, dans les conditions normales de température et de pression (0°C et 1 atm), de 1,000 293 (pour $\lambda = 589$ nm). On assimile, en général, l'air au vide ($n = 1$).

$$n(\lambda) = \frac{c}{V}$$

Pour un verre ordinaire (type BK7) :

$n = 1,5224$	$\lambda = 486$ nm
$n = 1,5167$	$\lambda = 589$ nm
$n = 1,5143$	$\lambda = 656$ nm.

Pour la raie D du sodium, $\lambda_D = 589$ nm :

eau	$n = 1,3330$
diamant	$n = 2,4173$
verre crown BK7	$n = 1,5167$
verre flint SF11	$n = 1,7845$.

On peut retenir que plus un milieu est dense, plus l'indice n qui le caractérise est élevé. De plus, pour un même milieu, l'indice diminue lorsque la longueur d'onde augmente.

3. MODÈLE CORPUSCULAIRE

À la fin du XIX^{ième} siècle, Planck ne parvient à rendre compte du rayonnement du corps pour toutes les fréquences qu'en procédant à un artifice mathématique : les échanges d'énergie se font par paquets d'énergie et pas de manière continue comme l'impose la théorie ondulatoire.

À la suite en affinant cette idée, Einstein explique notamment l'effet photoélectrique ce qui lui vaut un prix Nobel. Selon le postulat d'Einstein (1905), les échanges d'énergie entre la matière

et le rayonnement lumineux s'effectuent par quantités discrètes ou paquets d'énergie. Les échanges sont donc discontinus.

Un rayonnement de fréquence ν est constitué de 'grains d'énergie' (quanta de lumière) transportant chacun l'énergie $E_\nu = h\nu$ où h est la constante de Planck ($h = 6,6260755 \cdot 10^{-34}$ J s).

Ces quanta de lumière sont appelés photons (Lewis en 1926).

Caractéristiques des photons :

- Vitesse : $c = 299\,792\,458$ m s⁻¹

- Masse nulle

- À une lumière monochromatique de fréquence ν (longueur d'onde dans le vide : $\lambda = c/\nu$), on associe des photons d'énergie $E_\nu = h\nu$. L'énergie des photons est souvent exprimée en électronvolt. Un électronvolt (eV) correspond à l'énergie cinétique acquise par un électron de charge $q = 1,602 \cdot 10^{-19}$ C après la traversée d'une différence de potentiel de 1 volt dans le vide. Donc, $1 \text{ eV} = 1,602 \cdot 10^{-19}$ J.

La puissance P_ν d'un faisceau lumineux monochromatique dépend de sa fréquence et du nombre N de photons transportés par seconde : $P_\nu = Nh\nu$.

Ainsi, les rayonnements peuvent être considérés comme des ondes ou comme des particules : il y a coexistence entre les ondes et les particules.

Louis De Broglie (1923) a l'idée de généraliser cette coexistence à toutes les particules et suggère de faire diffracter les électrons.

Ces travaux mènent à l'avènement de la physique quantique à partir de 1925 et au quatrième modèle qui ne sera ni décrit, ni utilisé ici.

4. CHOIX DU MODÈLE

On vient d'appréhender plusieurs modèles de la lumière. Le modèle géométrique prédit la direction suivie par la lumière indépendamment de sa nature. Le modèle ondulatoire considère la lumière comme une onde et le modèle corpusculaire considère la lumière comme un ensemble de particules.

Pour choisir le modèle adéquat, il faut s'intéresser, d'une part à la dimension caractéristique du système interagissant avec la lumière, et d'autre part à la puissance lumineuse du faisceau. La dimension caractéristique D du système s'estime en considérant la dimension des composants optiques (montures de lentilles, diaphragmes, obstacles, ...). Ensuite, cette dimension D est à comparer à la longueur d'onde λ de la lumière utilisée.

La puissance du faisceau lumineux fait intervenir soit un très grand nombre de photons, soit un nombre restreint qu'il est possible de compter (grâce à un détecteur de type photomultiplicateur).

Ainsi, on peut consigner dans le tableau ci-dessous le modèle à utiliser selon la dimension caractéristique D du système et le nombre N de photons (par seconde) interagissant avec celui-ci.

	$N \gg 1$	N faible
$D \gg \lambda$	Modèle géométrique	Modèle corpusculaire
D comparable à λ	Modèle ondulatoire	Modèle corpusculaire

Dans cet ouvrage, on développera essentiellement le modèle ondulatoire mais on pourra être amené à utiliser les modèles géométrique et corpusculaire.

5. SOURCES LUMINEUSES

On distingue usuellement les sources primaires des sources secondaires :

- Les sources primaires génèrent un rayonnement optique à partir d'une énergie, par exemple, électrique ou thermique. Leur émission lumineuse les caractérise. On parle d'émission par incandescence lorsqu'un corps chauffé émet un rayonnement (fonction de la température). On parle de luminescence pour une émission sélective de lumière par des atomes, molécules d'une substance précédemment excités.
- Les sources secondaires émettent de la lumière après réflexion ou diffusion de l'énergie optique provenant d'une autre source. Les propriétés d'émission de ces sources sont fonction de l'éclairage incident mais aussi de l'environnement ou encore de la géométrie, structure, état de surface.

On va s'intéresser à l'émission de rayonnement optique des sources primaires. La lumière est générée à partir de la matière que ce soit à l'état gazeux, liquide ou solide.

5.1. Émission de rayonnement par incandescence

L'émission d'un rayonnement par incandescence (ou rayonnement thermique) est due à l'agitation thermique des atomes et des molécules ($T \neq 0$ K) qui est fonction de la température. Une ampoule à filament, une lampe halogène, le soleil, un être vivant sont des exemples de source thermique.

5.1.1. Corps noir

Le corps noir est le modèle théorique décrivant l'émission lumineuse d'une source à incandescence parfaite. Cette émission ne dépend que de la température.

Un corps noir est un corps constitué d'un matériau idéal, absorbant totalement tout rayonnement incident, quelles que soient sa longueur d'onde et sa direction d'incidence. Un tel corps apparaît noir dans le visible, à température ambiante. Ainsi, le coefficient d'absorption est :

$$A(\lambda) = 1$$

5.1.2. Lois régissant l'émission du corps noir : Planck, Wien, Stefan

Le rayonnement du corps noir est lambertien ; en effet, sa luminance L qui correspond à l'intensité I par unité de surface apparente de la source dans une direction donnée (chapitre II) est uniforme dans toutes les directions.

En 1900, s'appuyant sur la théorie ondulatoire de la lumière, Rayleigh et Jeans ont réussi à rendre compte de l'émission d'un corps noir considéré comme une cavité absorbante pour les grandes longueurs d'onde mais pas pour les plus courtes (rayonnement ultraviolet). Planck reprend alors l'idée de la cavité absorbante et a recouru à une hypothèse mathématique pour modéliser l'émission du corps noir sur tout le domaine spectral. Il suppose que les échanges énergétiques du corps noir sont discrets, il introduit alors une constante : la constante h qui porte son nom. Cette hypothèse purement mathématique est à la base de la physique quantique qui sera largement développée au XX^{ième} siècle. Elle mène à la formulation de la loi de Planck donnant la luminance spectrique (ici, 'e' pour énergétique) d'un corps noir :

$$\frac{dL_e}{d\lambda} = \frac{2hc^2}{\lambda^5} \cdot \frac{1}{e^{hc/kT\lambda} - 1}$$