

# Photons et dualité onde-corpuscule

Les documents proposés dans ce dossier ont pour but de montrer comment la distinction naturelle entre les ondes d'une part et les particules matérielles, les « corpuscules », d'autre part est remise en cause par plusieurs expériences.

L'analyse de chaque expérience consiste à identifier le résultat prédit par un modèle purement ondulatoire ou purement corpusculaire, et à mettre en évidence ce qui, parmi les résultats de l'expérience, contredit ce modèle. Les questions sont destinées à vous guider dans votre analyse. Je vous recommande de travailler par groupe de deux ou trois.

L'analyse de ces documents constitue une partie du cours du chapitre O3 « Modéliser la lumière ». Ils seront largement commentés en classe, mais une préparation préalable est plus que recommandée.

Le dossier s'appuie notamment sur une vidéo : un lien direct est donné sur le site de la classe.

- ▷ Le **document 1** est une introduction.
- ▷ Analyse du **document 2** :
  - En modélisant la lumière par une onde, de quoi devrait dépendre l'intensité du courant parcourant le circuit ?
  - Indiquer avec précision ce qui contredit ce modèle dans les résultats de l'expérience.
  - Expliquer avec vos propres mots l'interprétation d'Einstein.
  - Conclure : que montre l'expérience ? que ne montre-t-elle pas ?
- ▷ Analyse du **document 3** :
  - Déterminer la valeur attendue de  $g^{(2)}$  dans les modélisations ondulatoire puis corpusculaire.
  - Expliciter pourquoi le résultat de l'expérience est incompatible avec le modèle ondulatoire mais compatible avec le modèle corpusculaire.
  - Conclure : que montre l'expérience ? que ne dit-elle pas ?
- ▷ Analyse du **document 4** :
  - Expliquer avec vos propres mots ce que signifie la dualité onde-corpuscule de la lumière.
  - On considère un laser rouge de longueur d'onde  $\lambda \sim 600 \text{ nm}$  et de puissance  $P = 1 \text{ mW}$ . Calculer l'ordre de grandeur du nombre de photons qu'il envoie en  $\Delta t = 1 \cdot 10^{-2} \text{ s}$ , c'est-à-dire moins que la persistance rétinienne.
  - En déduire comment retrouver le résultat de l'expérience avec un laser à partir des résultats de l'expérience avec photons uniques.

## Document 1 : Ondes et matière en physique classique

La physique classique fait une distinction stricte entre la matière d'une part et les ondes d'autre part.

### La matière :

- ▷ Elle est localisée précisément, c'est-à-dire que sa position peut être mesurée avec une précision infinie à condition de disposer d'instruments de mesure infiniment précis.
- ▷ Elle peut se déplacer, et sa vitesse peut également être mesurée avec une précision infinie.
- ▷ Elle peut être porteuse d'énergie mécanique, qui peut prendre des valeurs quelconques et surtout continues.

### Les ondes :

- ▷ Elles ne sont pas localisées : dire où se trouve une onde n'a pas de sens.
- ▷ Elles se propagent avec une certaine célérité, qu'on peut mesurer avec une précision infinie.
- ▷ Elles transportent de l'énergie, qui peut prendre n'importe quelle valeur.

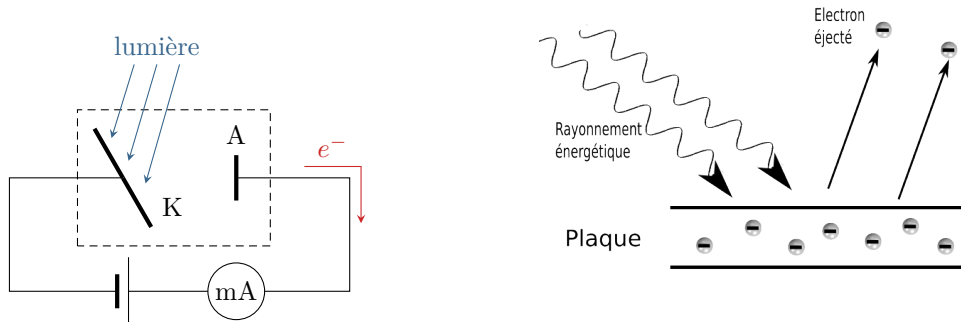
Les ondes possèdent des propriétés fondamentales que la matière ne possède pas : la capacité d'interférer et de se diffracter.

- ▷ Interférences : si deux ondes de même fréquences se superposent, alors l'amplitude de l'onde résultante dépend du déphasage entre les deux ondes.
- ▷ Diffraction : si le passage d'une onde est restreint spatialement par un obstacle, alors l'onde s'élargit derrière l'obstacle.

## Document 2 : Effet photoélectrique

L'expérience des fentes d'Young, réalisée par Thomas Young en 1802, et analysée en détail dans le document 4, a contribué à imposer le modèle ondulatoire de la lumière au XIX<sup>e</sup> siècle. La question était de savoir si la lumière était un ensemble de corpuscules, comme le soutenait par exemple Newton, ou bien une onde. La conclusion de l'expérience de Young était formelle : la lumière est une onde. Ce document présente une première expérience datant de la fin du XIX<sup>e</sup> siècle qui laisse entendre que la réalité pourrait ne pas être aussi simple.

On peut observer expérimentalement<sup>1</sup> qu'une plaque de zinc initialement chargée négativement se décharge lorsqu'elle est éclairée par un rayonnement ultraviolet. Ce document propose une interprétation simplifiée de cet effet, découvert en 1887 par Heinrich Hertz.



**Figure 1 – Expérience d'effet photoélectrique.** Figure de gauche extraite de l'encyclopédie Larousse en ligne, figure de droite extraite de Wikipedia.

On réalise l'expérience schématisée figure 1. La plaque métallique K est enfermée dans une cellule à vide et soumise à un rayonnement de fréquence  $\nu$  (longueur d'onde  $c/\nu$ ). Le milliampèremètre permet de mettre en évidence la présence d'un éventuel courant électrique parcourant le circuit. Si un courant est observé, cela signifie que des électrons sont arrachés à la plaque K par le rayonnement, et sont capturés par l'électrode A qui leur permet de « rejoindre » le circuit. Le générateur a pour rôle de polariser l'électrode A à un potentiel positif et donc d'y attirer les électrons éventuellement issus de la plaque K, qui sont a priori émis dans toutes les directions. Les résultats observés sont les suivants :

- ▷ si la plaque est éclairée par un rayonnement du domaine visible, aucun courant n'est observable, et ce quelle que soit l'intensité lumineuse émise par la lampe ;
- ▷ si la plaque est éclairée par un rayonnement ultra-violet, donc de fréquence plus élevée, alors un courant est systématiquement observé dans le circuit, et son intensité est d'autant plus élevée que l'intensité lumineuse de la lampe est élevée.

Un modèle ondulatoire de la lumière permet d'expliquer pourquoi des électrons sont arrachés à la plaque K, mais prédit qu'il y a d'autant plus d'électrons arrachés que la lampe envoie d'énergie sur la plaque, indépendamment de la fréquence du rayonnement : cette prévision n'est pas en accord avec les résultats de l'expérience.

Einstein interprète cette expérience en 1905 en postulant que les échanges d'énergie sont quantifiés. Cela signifie que les échanges d'énergie entre l'onde lumineuse et les électrons du métal ne se font que par absorption de « paquets élémentaires » d'énergie  $\varepsilon = h\nu$  où  $h = 6,62 \cdot 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$  est la constante de Planck et  $\nu$  la fréquence du rayonnement. L'interprétation d'Einstein repose sur une description de la lumière incidente comme un ensemble de particules qu'il appelle « Lichten Quanten » et qui seront baptisés plus tard photons : un photon d'un rayonnement de fréquence  $\nu$  transporte une quantité d'énergie  $\varepsilon$ . L'absorption de lumière par la plaque est modélisée par une « collision » entre un photon et un électron, qui permet d'éjecter l'électron hors de la plaque si le photon a suffisamment d'énergie, c'est-à-dire si sa fréquence est suffisamment élevée.

L'existence d'une énergie minimale que doit posséder un photon pour arracher un électron peut se comprendre qualitativement en remarquant que l'électron est a priori empêché de sortir du métal à cause des forces d'attraction exercées par les protons. Pour l'arracher, il faut lui fournir une énergie minimale  $W$  appelée travail d'extraction. Si  $h\nu < W$ , un photon n'a pas assez d'énergie pour arracher un électron. Au contraire, si  $h\nu > W$ , alors l'électron peut être arraché du métal, l'excédent d'énergie lui donnant une énergie cinétique

$$E_c = h\nu - W.$$

Des travaux expérimentaux très soignés de Robert Millikan publiés en 1916 ont permis de confirmer cette théorie. Son travail a consisté à mesurer l'énergie cinétique maximale d'électrons issus d'une plaque de sodium éclairée par des

1. Si cela vous intéresse, une vidéo de l'expérience très bien commentée (en anglais) a été réalisée par le STEM National Center : <https://www.youtube.com/watch?v=v-1zjdUTu0o>.

rayonnements de différentes fréquences, comme représenté figure 2. Pour l’anecdote, il semblait tellement inconcevable à Millikan que la lumière puisse être constituée de corpuscules qu’il cherchait en fait à mettre la théorie d’Einstein en défaut ... c’est finalement la confirmation de Millikan qui permit à Einstein d’être récompensé du prix Nobel en 1921.

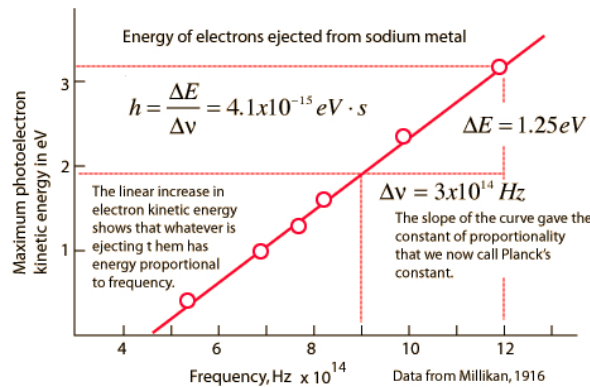


Figure 2 – Résultats expérimentaux de R. Millikan. Figure extraite d’un cours en ligne de l’université du Tennessee.

Cependant, cette expérience ne permet « que » de conclure à la quantification des échanges d’énergie, mais ne permet pas de dire si cette quantification provient du rayonnement (ce que postule Einstein) ou de la matière. En d’autres termes, elle ne permet pas de conclure sans ambiguïté à l’existence du photon.

### Document 3 : Preuve du caractère corpusculaire de la lumière, un photon sur une lame semi-réfléchissante

Il a fallu attendre 1977 pour que l’existence du photon soit prouvée sans ambiguïté par H. Kimble, M. Dagenais et L. Mandel. Leur expérience a consisté à envoyer de la lumière issue d’une source de faible intensité sur une lame semi-réfléchissante et à mesurer l’intensité lumineuse dans les deux voies de sortie de la lame par deux détecteurs, comme représenté figure 3. Une lame semi-réfléchissante, aussi appelée lame séparatrice, est un composant optique qui divise un faisceau de lumière en deux parties d’intensité égale : la moitié du rayonnement traverse la lame, alors que l’autre moitié est réfléchiée.

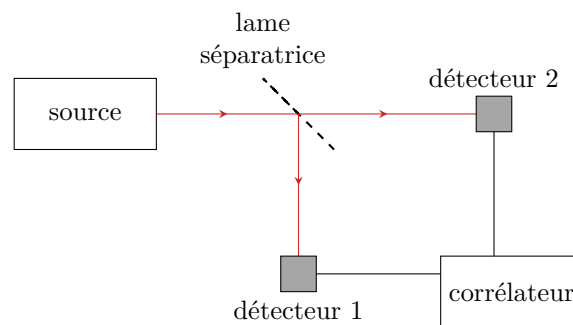


Figure 3 – Expérience de Mandel.

Sans s’attarder sur les détails techniques complexes, on admettra d’une part que les détecteurs 1 et 2 envoient un signal proportionnel à l’intensité lumineuse  $I_1$  ou  $I_2$  qu’ils reçoivent pendant une durée  $\Delta t$ ; d’autre part que le rayonnement émis par la source est tel que, si la lumière se compose de photons, alors il ne peut y avoir que zéro ou un photon qui voyage de la source aux détecteurs pendant la durée  $\Delta t$ . Le corrélateur est un dispositif électronique complexe dont le signal de sortie  $s$  est proportionnel à une quantité  $g^{(2)}$  appelée paramètre de corrélation entre ses deux voies d’entrée,

$$s \propto g^{(2)} = \frac{\langle I_1 I_2 \rangle}{\langle I_1 \rangle \langle I_2 \rangle}.$$

La notation  $\langle I_i \rangle$ ,  $i = 1$  ou  $2$ , désigne la moyenne de l’intensité lumineuse  $I_i$  lorsque l’expérience « est recommencée de nombreuses fois », c’est-à-dire lorsqu’elle dure pendant un temps total  $T$  beaucoup plus grand que  $\Delta t$ .

Dans un modèle ondulatoire, la lame semi-réfléchissante divise par deux l’intensité lumineuse du faisceau : on a tout au long de l’expérience  $I_1 = I_2$ , et donc

$$\langle I_1 I_2 \rangle = \langle I_1^2 \rangle = \langle I_1 \rangle^2 \quad \text{d'où} \quad g^{(2)} = 1.$$

Au contraire, dans un modèle corpusculaire, un photon ne peut pas être divisé par la lame semi-réfléchissante : ou bien il est réfléchi, ou bien il est transmis, avec à chaque fois une probabilité  $1/2$ . Compte tenu du fonctionnement de la source, on a donc tout au long de l'expérience ou bien  $I_1 \neq 0$  et  $I_2 = 0$  si le photon est réfléchi, ou bien  $I_1 = 0$  et  $I_2 \neq 0$  si le photon est transmis. Par conséquent, à tout instant  $I_1 I_2 = 0$  et le paramètre de corrélation vaut donc  $g^{(2)} = 0$ .

En tenant compte des imperfections dans le fonctionnement de la source et des détecteurs pour estimer les incertitudes de mesure, Mandel et ses collaborateurs ont obtenu

$$g^{(2)} = 0,2 \pm 0,3$$

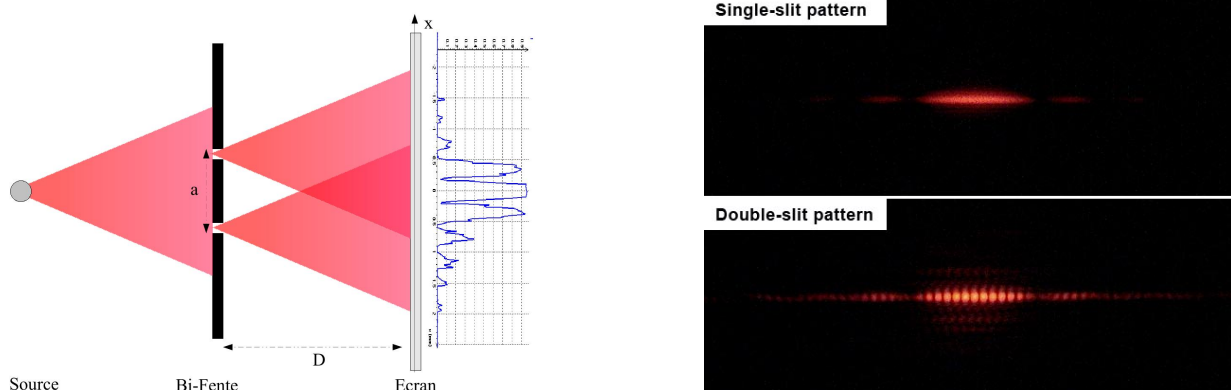
valeur compatible seulement avec le modèle corpusculaire : l'existence du photon est ainsi établie. D'autres expériences, menées en particulier en France par Alain Aspect et Philippe Grangier, ont permis de confirmer cette nature corpusculaire de la lumière.

## Document 4 : Fentes d'Young optiques

Comme mentionné précédemment, l'expérience des fentes d'Young a contribué à imposer le modèle ondulatoire de la lumière au XIX<sup>e</sup> siècle. Ce document propose d'interpréter cette expérience en termes de photons.

### Réalisation avec une source lumineuse intense

L'expérience consiste à éclairer une double fente par un laser monochromatique. Chaque fente diffracte la lumière incidente et émet ainsi un faisceau secondaire de lumière. On observe la lumière sur un écran plan situé à une distance  $D$  de la double fente. Si l'une des fentes est fermée, on observe une figure de diffraction par l'autre fente, comme représenté figure 4 « single-slit pattern ». Cette figure de diffraction peut s'interpréter ou bien par un modèle ondulatoire, ou bien par un modèle corpusculaire : on peut comprendre le phénomène en imaginant des rebonds des particules sur le bord de la fente.



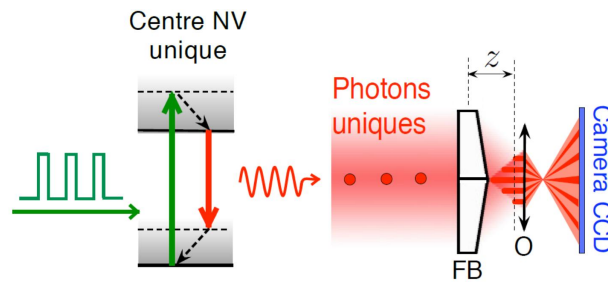
**Figure 4 – Expérience des fentes d'Young.** Figure de gauche extraite du cours en ligne de D. Malka, figure de droite extraite de la version anglaise de Wikipedia.

Ouvrons les deux fentes simultanément. La théorie corpusculaire classique prédit que l'intensité lumineuse totale est la somme des intensités lumineuses observées en ouvrant simultanément l'une et l'autre fente : une « bille de lumière » passe par l'une ou l'autre fente, mais ne peut pas passer par les deux fentes à la fois. Au contraire, la théorie ondulatoire prédit des interférences entre la lumière issue de la fente gauche et la lumière issue de la fente droite. Cela se traduit notamment par la nullité de l'intensité lumineuse en certains points de la zone de recouvrement des deux faisceaux, lorsque les interférences sont destructives. Expérimentalement, on observe la distribution spatiale de l'intensité lumineuse représentée figure 4, mettant en évidence des zones sombres. Ainsi, l'expérience confirme la théorie ondulatoire mais contredit un modèle corpusculaire. Cela veut-il dire qu'il faut renoncer à la notion de photon ? Certainement pas, mais seulement que le comprendre comme une « bille de lumière » est trop naïf.

### Réalisation avec une source de photons uniques

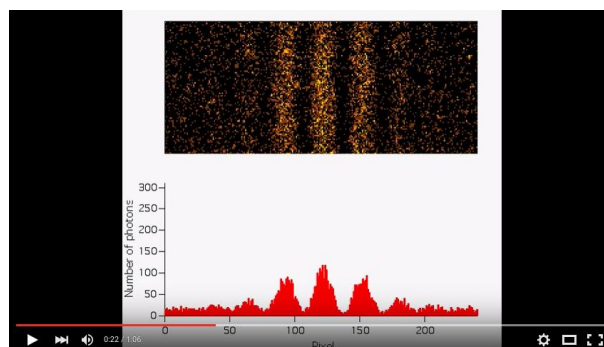
Pour aller plus loin, étudions une expérience analogue où le laser, source intense, est remplacé par une source de photons uniques du même type que celle utilisée par Mandel et ses collaborateurs pour l'expérience décrite document 3. Pour des raisons pratiques, le dispositif expérimental doit être profondément modifié pour permettre l'utilisation d'une telle source, et n'utilise plus de « fentes » au sens propre du terme. On se concentre dans ce document sur une expérience analogue, décrite dans la thèse de V. Jacques.

Des photons, émis par un « centre NV », sont envoyés en incidence normale sur un biprisme de Fresnel. Une caméra CCD est positionnée dans la zone de recouvrement des deux fronts d'onde déviés par le biprisme, comme représenté figure 5. Le dispositif est réglé de façon à ce qu'il existe au plus un seul photon dans l'appareil de mesure durant la fenêtre de détection de la caméra. On admettra que ce dispositif est exactement équivalent à celui des fentes d'Young éclairées par une source de photons uniques, le biprisme jouant le rôle de la double fente.



**Figure 5 – Fentes d'Young avec une source à photons uniques.** Figure extraite de la thèse de V. Jacques.

Le résultat de l'expérience est donné sous forme de 2000 clichés, équivalents à la détection d'environ 200 000 photons. Ces clichés accumulés ont été mis bout à bout sous forme d'un film, figure 6, qui permet de visualiser très clairement la construction photon par photon de franges d'interférences. On observe sur cette vidéo que la détection d'un photon se traduit par l'apparition d'un point lumineux sur l'écran : en ce qui concerne la détection, tout se passe comme si la lumière était composée d'objets matériels dont on repérerait les points d'impact sur l'écran. En revanche, décrire la répartition de ces points d'impacts nécessite le modèle ondulatoire, puisque cette répartition est celle d'une figure d'interférences telle qu'elle est observée avec un laser intense. Ainsi, la lumière présente une nature mixte, ni complètement ondulatoire, ni totalement corpusculaire : on parle de dualité onde-corpuscule.



**Figure 6 – Capture d'écran de la vidéo de l'expérience.** Vidéo réalisée par V. Jacques, à consulter sur <https://www.youtube.com/watch?v=NaEo517NDXo>.