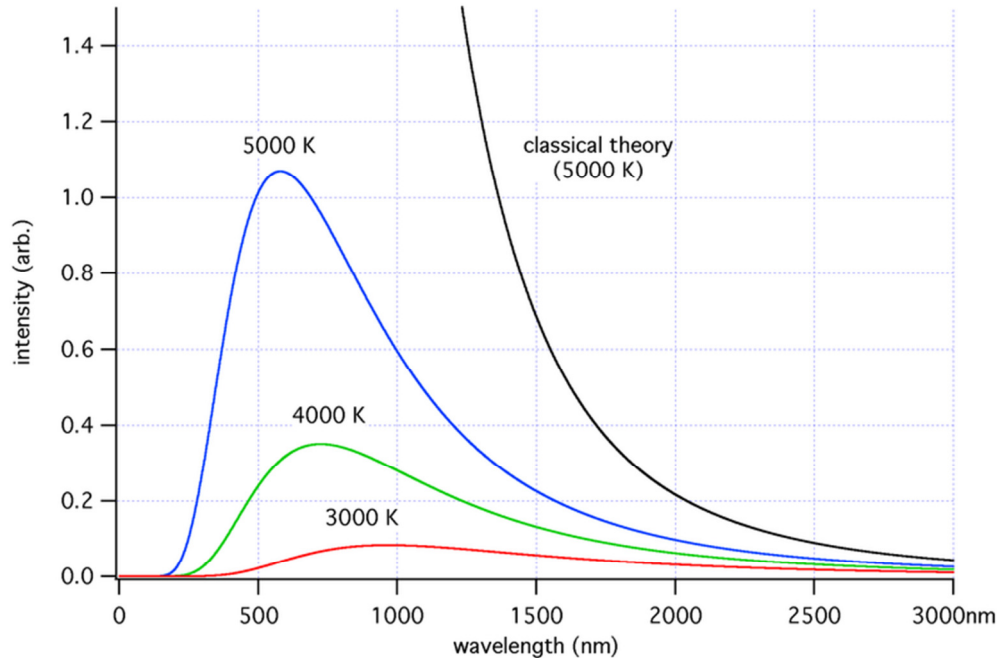


## Genèse de la notion de photon.

### a) Le rayonnement thermique : le corps noir : théorie de Planck.



#### Loi de Wien

$$\lambda_{max} = \frac{hc}{4,965 \cdot k_B \cdot T} = \frac{2,898 \cdot 10^{-3}}{T} \quad (\text{en mètres})$$

#### Distribution de l'énergie :

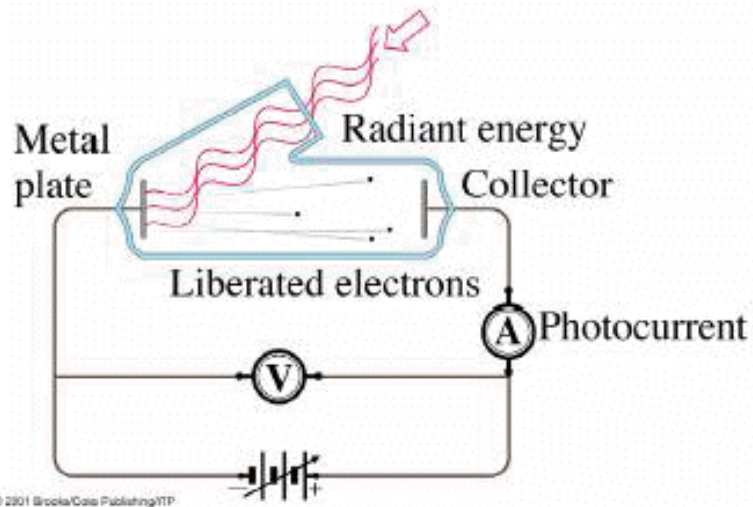
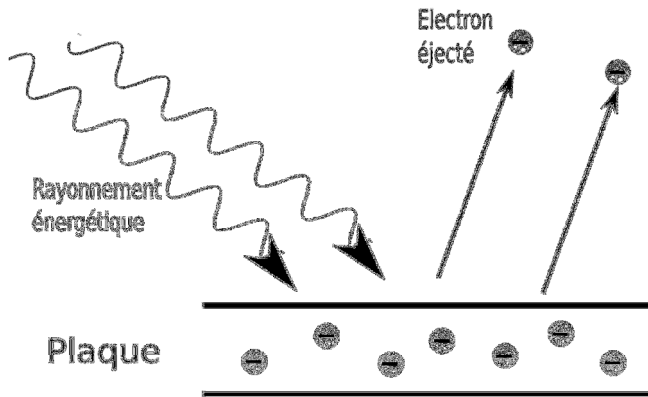
$$\frac{dE}{d\lambda} = \frac{8\pi hc}{\lambda^5} \cdot \frac{1}{\exp\left(\frac{hc}{\lambda \cdot k_B T}\right) - 1}$$

Loi basée sur la quantification de l'énergie en des **quanta de valeur  $E = hc/\lambda$** , nécessaire pour que la quantité d'énergie émise par le corps noir, selon le modèle théorique, ne diverge pas.

Dans la théorie classique, la quantité d'énergie serait infinie, la courbe d'intensité diverge vers les courtes longueurs d'onde (catastrophe ultraviolette).

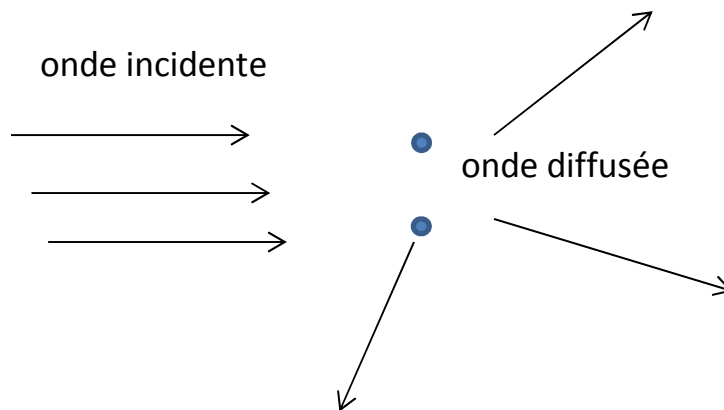
## b) l'effet photoélectrique

Emission d'électron à partir d'une électrode métallique éclairée par un rayonnement ultra-violet ou du domaine visible.



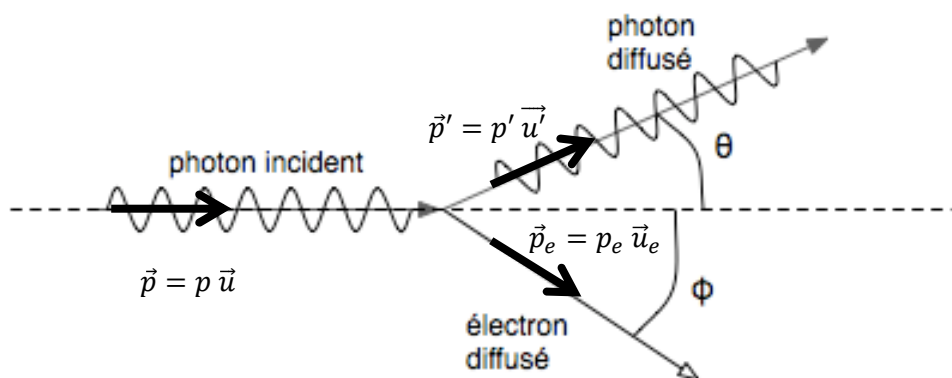
### c) l'effet Compton

Diffusion lumineuse classique : rayonnement de même fréquence que l'onde incidente



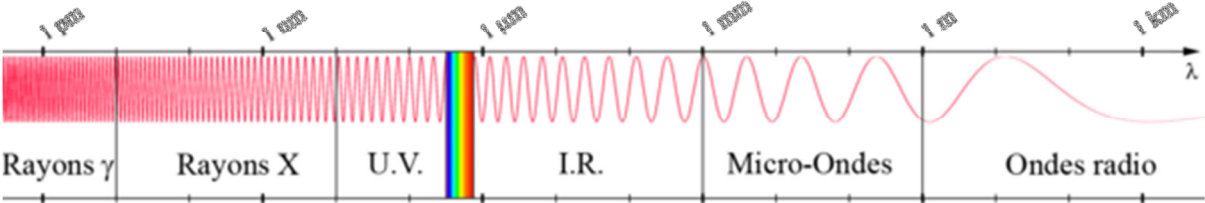
Effet Compton :

un rayonnement diffusé, mais avec une fréquence différente de celle de l'onde incidente.

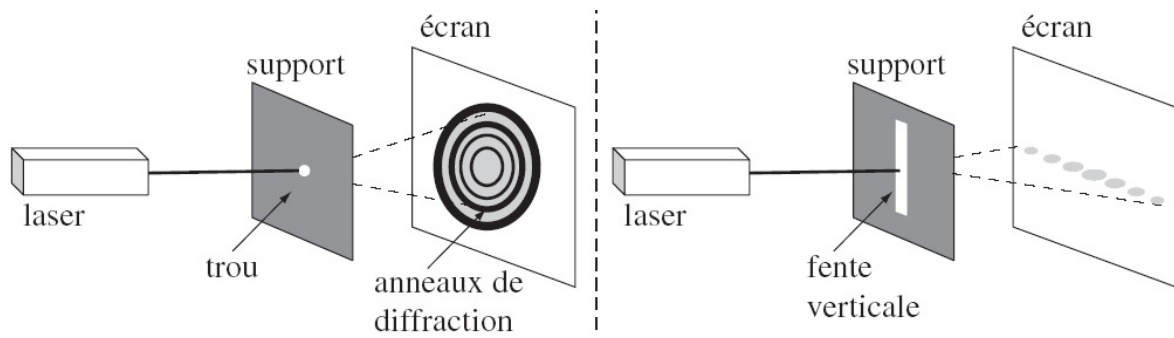


Diffusion Compton: Collision d'un photon avec un électron au repos

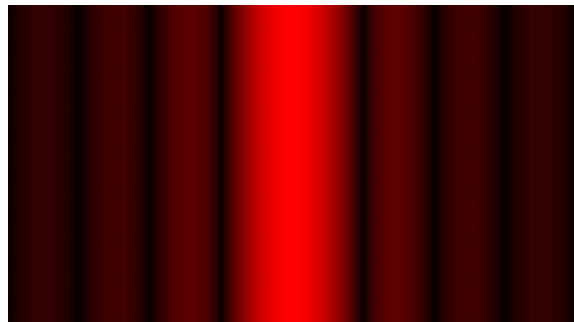
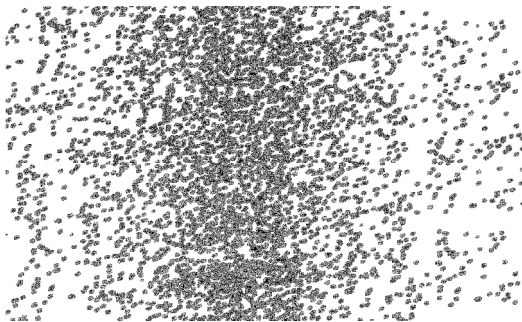
Spectre des ondes électromagnétiques (échelle logarithmique, en longueur d'onde)



## ***Diffraction.***

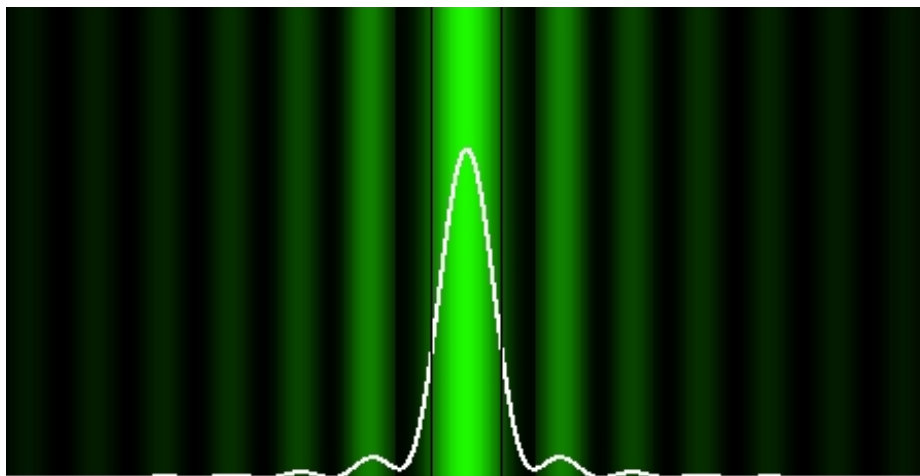


## ***Diffraction par une fente :***



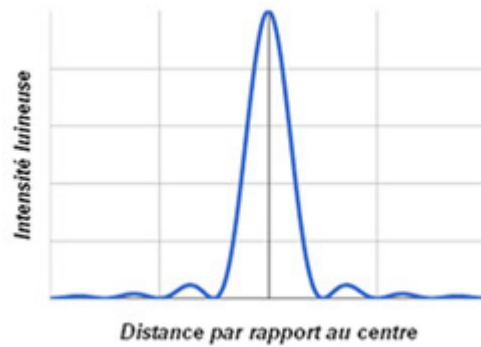
*à gauche : répartition des impacts de photons uniques après traversée d'une fente (simulation)*

*à droite : répartition de l'éclairement simulé à partir du modèle ondulatoire (simulation)*



*La courbe tracée sur l'image représente la répartition de l'intensité lumineuse*

### *Diffraction par une ouverture circulaire :*



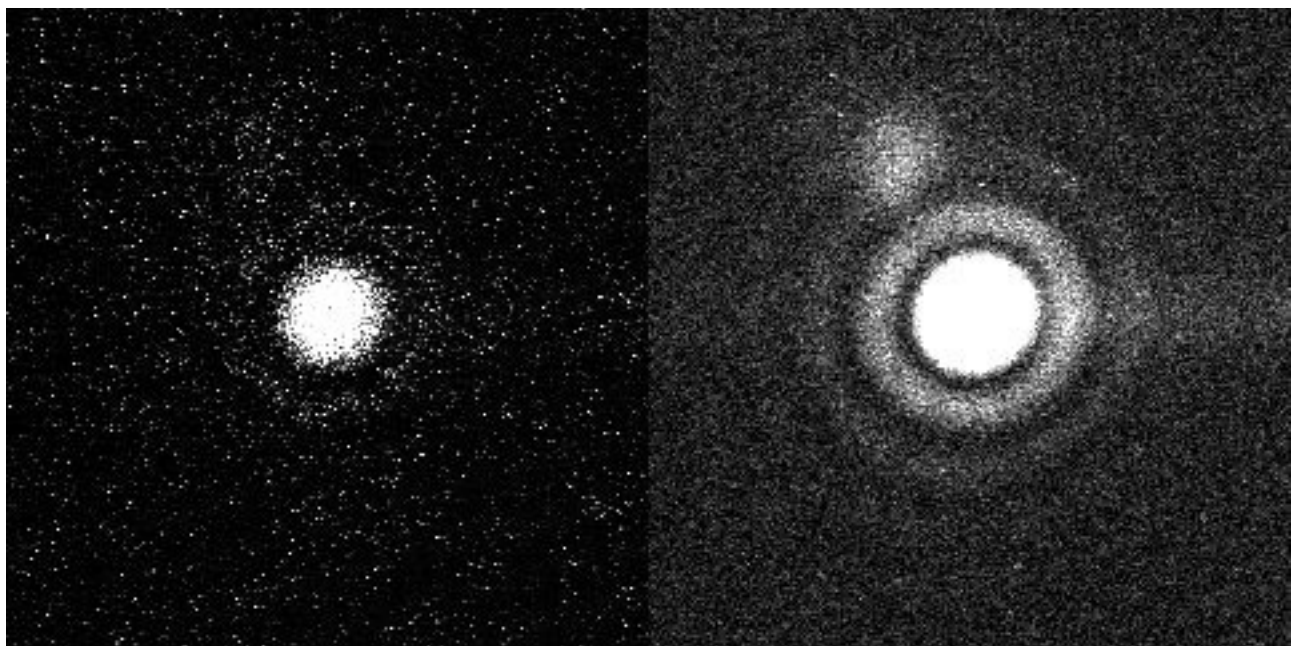
### *Diffraction par une ouverture circulaire : expérience avec photons uniques.*

Cette propriété est observable dans le cas de photons uniques, émis successivement et indépendamment les uns des autres.

L'exemple ci-dessous est démonstratif.

Chaque point lumineux des images ci-dessous correspond à l'enregistrement d'un photon unique.

L'image de droite est la somme de 50 expositions très faibles d'un trou circulaire éclairé par des photons uniques monochromes. On observe la structure classique de la tache d'Airy, telle qu'elle apparaît pour une exposition de la même pupille circulaire à un flux lumineux.



## Interférences.

### Interférences par les fentes d'Young.

Expérience classique. Les fentes sont éclairées par un laser hélium-néon ( $\lambda = 633 \text{ nm}$ ).

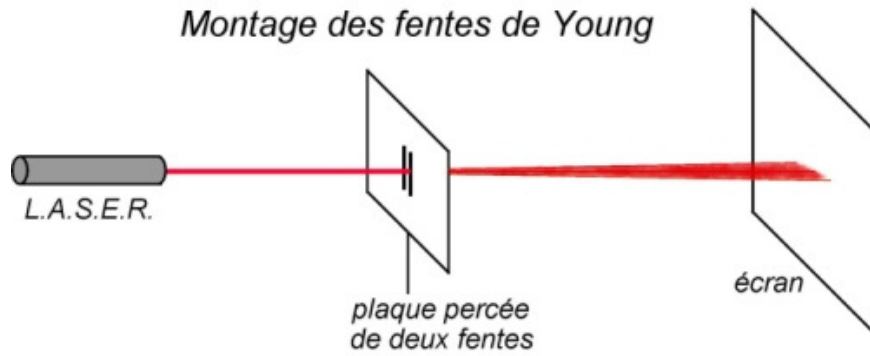
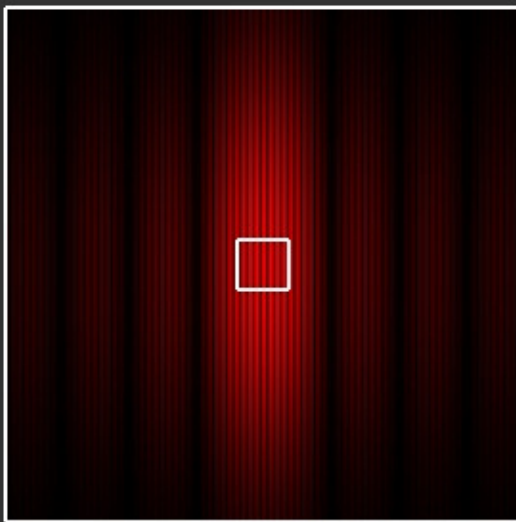
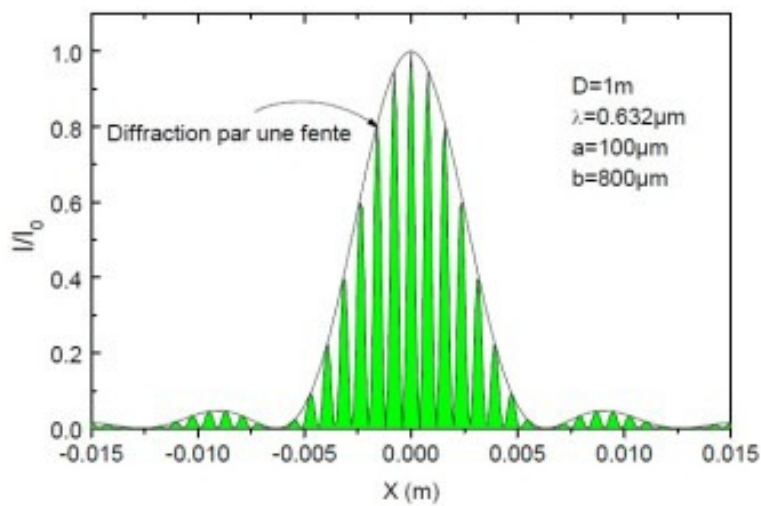
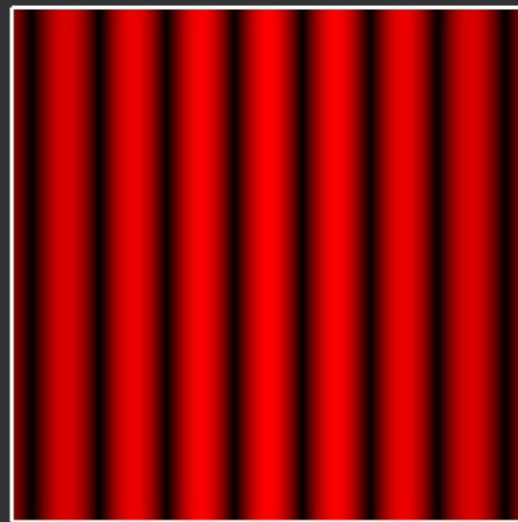


Figure d'interférences par fentes de Young

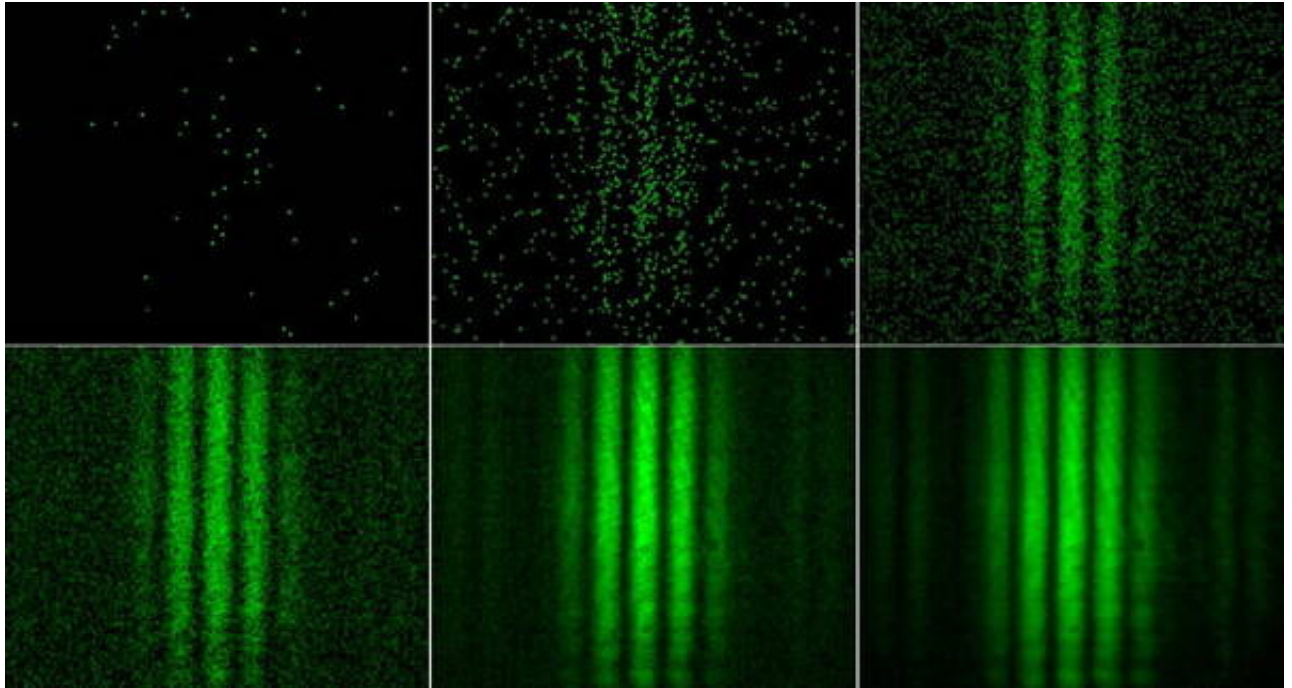


Grossissement de la figure (carré blanc)



## Expérience d'interférences à partir d'une source de photons uniques.

Voir fichier animation (film en format .avi)



Le film montre la diffraction des photons individuels d'une double fente enregistrée par une seule caméra d'imagerie photonique (intensificateur d'image + caméra CCD).

Les événements des particules individuelles, émis par une source de photons uniques, s'accumulent pour obtenir finalement la figure d'interférence que l'on obtient usuellement sur l'expérience des fentes de Young.

(Enregistrement par A. Weis, Université de Fribourg).



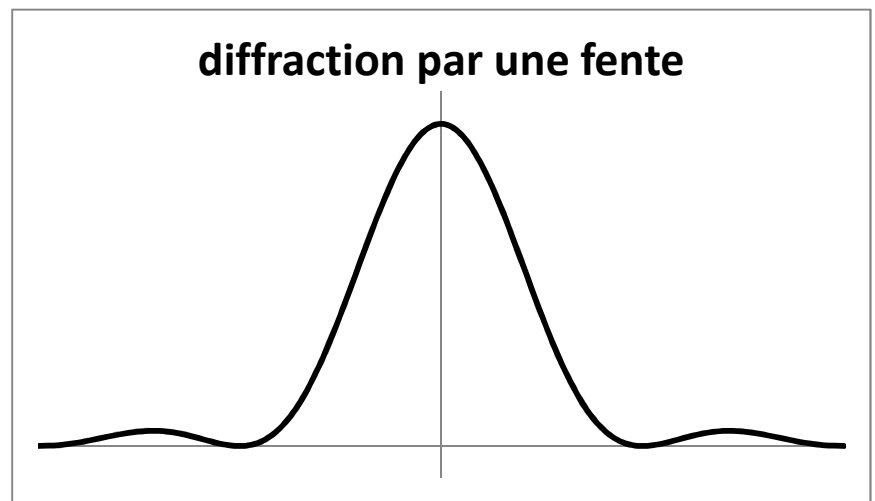
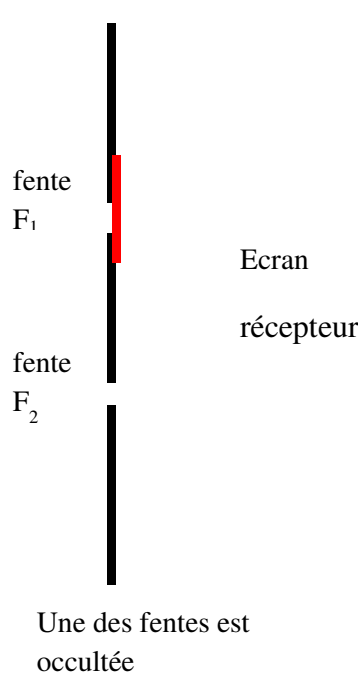
## Diffraction par une seule fente :

**modèle ondulatoire** : diffraction de l'onde lumineuse, répartition de l'intensité sur l'écran.

**modèle corpusculaire** : l'onde de probabilité est diffractée  $p(M) = |\psi_1(M,t)|^2$  (fente 1) ou  $p(M) = |\psi_2(M,t)|^2$  (fente 2).

Chaque photon est enregistré avec une distribution de probabilité déterminée par la diffraction par la fente concernée.

L'intensité lumineuse observée résulte de l'accumulation des photons en les différents points du capteur.



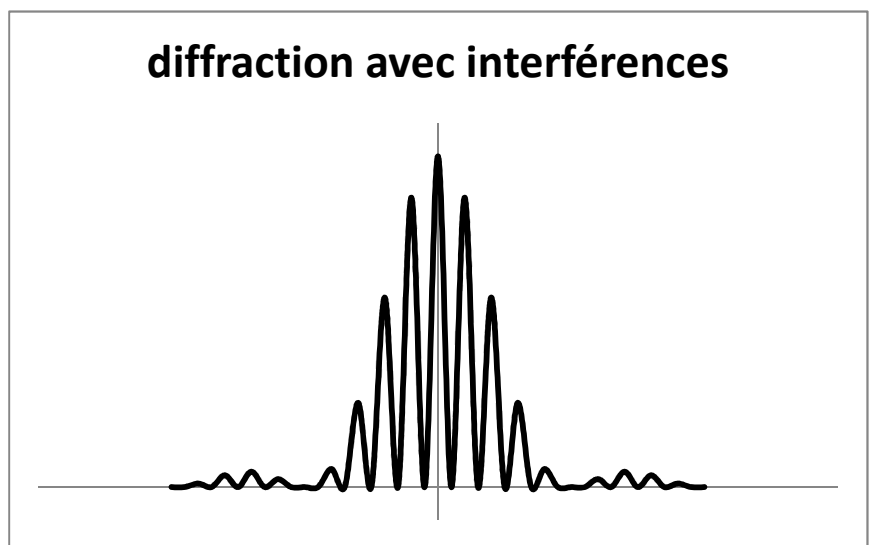
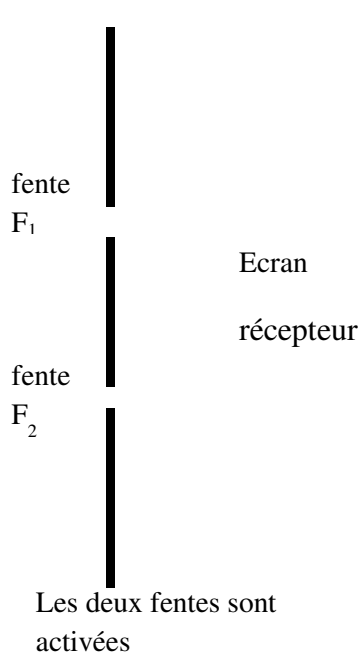
## Diffraction par deux fentes :

**modèle ondulatoire :** diffraction de l'onde lumineuse par chacune des fentes, avec superposition des ondes issues de chacune d'elle. Répartition de l'intensité sur l'écran présentant des minima (franges sombres) et des maxima (franges brillantes).

### modèle corpusculaire :

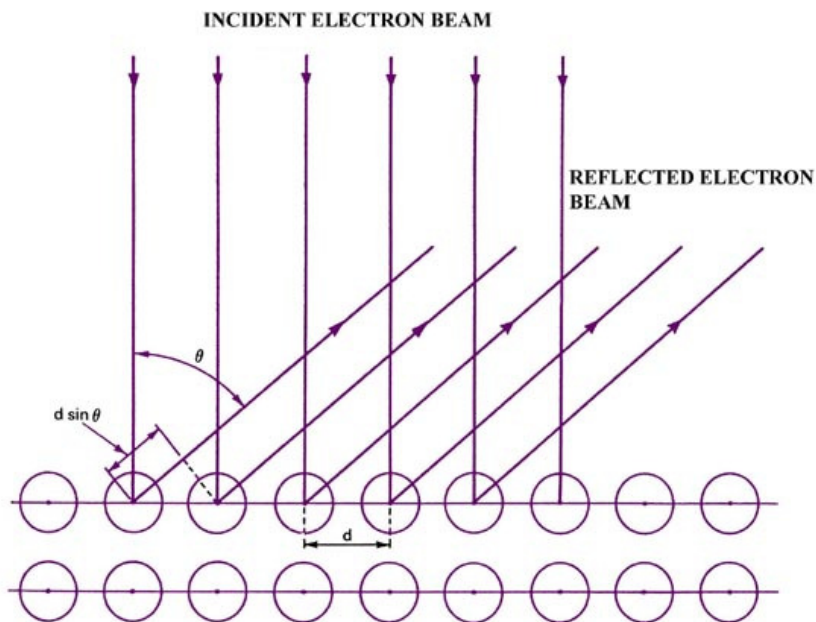
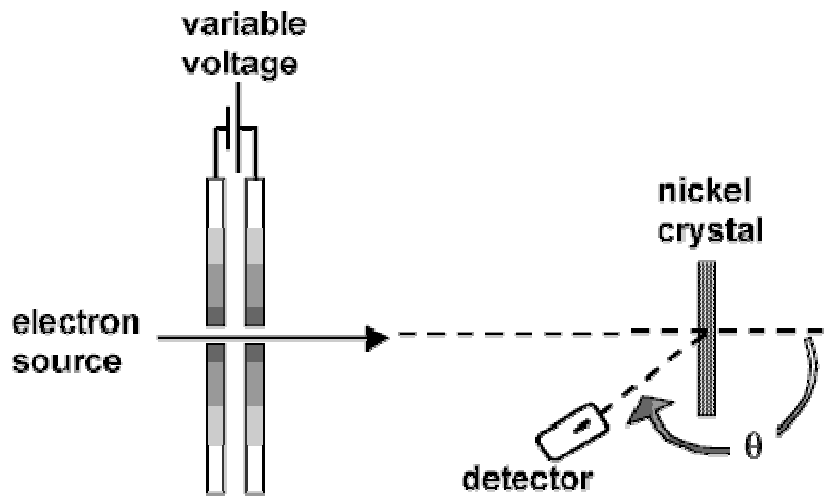
l'onde de probabilité est diffractée par les deux fentes et les ondes de probabilité viennent interférer entre elles sur l'écran.

$$p(M) = |\psi_1(M,t) + \psi_2(M,t)|^2 \neq |\psi_1(M,t)|^2 + |\psi_2(M,t)|^2 \quad \text{soit : } p(M) \neq p_1(M) + p_2(M)$$



## Interférences pour des ondes de matière :

### *Expérience de Davisson et Germer (1927)*



Trois ans après que de Broglie ait affirmé que les particules de matière pourraient posséder des propriétés ondulatoires, la diffraction des électrons de la surface d'un cristal solide a été observé expérimentalement par CJ Davisson et LH Germer du Laboratoire de l'entreprise Bell.

En 1927, ils publient leurs recherches sur la distribution angulaire des électrons diffusés à partir de nickel. Avec une analyse minutieuse, ils ont montré que le faisceau d'électrons a été diffusé par les atomes de surface sur le nickel dans les angles exacts prévus pour la diffraction de rayons X selon la formule de Bragg (« formule des réseaux »), avec une longueur d'onde donnée par l'équation de Broglie,  $\lambda = h / mv$ .



La figure de diffraction obtenue a des proportions identiques à celle formée par une exposition du même monocristal à des rayons X.

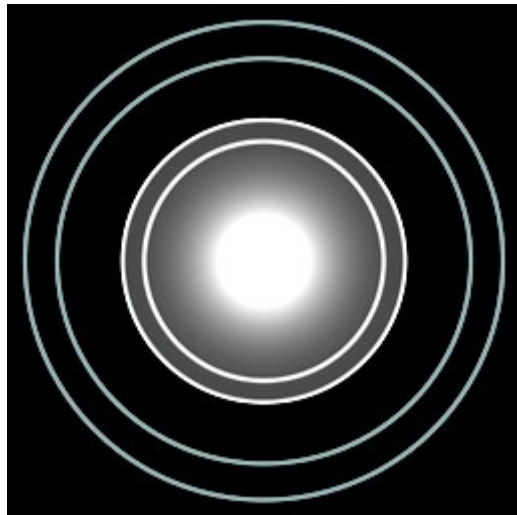
L'expérience a permis de conclure quant à l'existence d'onde de matières. Elle a aussi permis de mesurer la longueur d'onde des rayons X, par comparaison.

### ***Expérience de GP Thomson (1927)***

Toujours en 1927, GP Thomson, le fils de J.J. Thomson , publie le résultat d' expériences dans lequel un faisceau d'électrons énergétiques a été diffractée par une feuille mince .

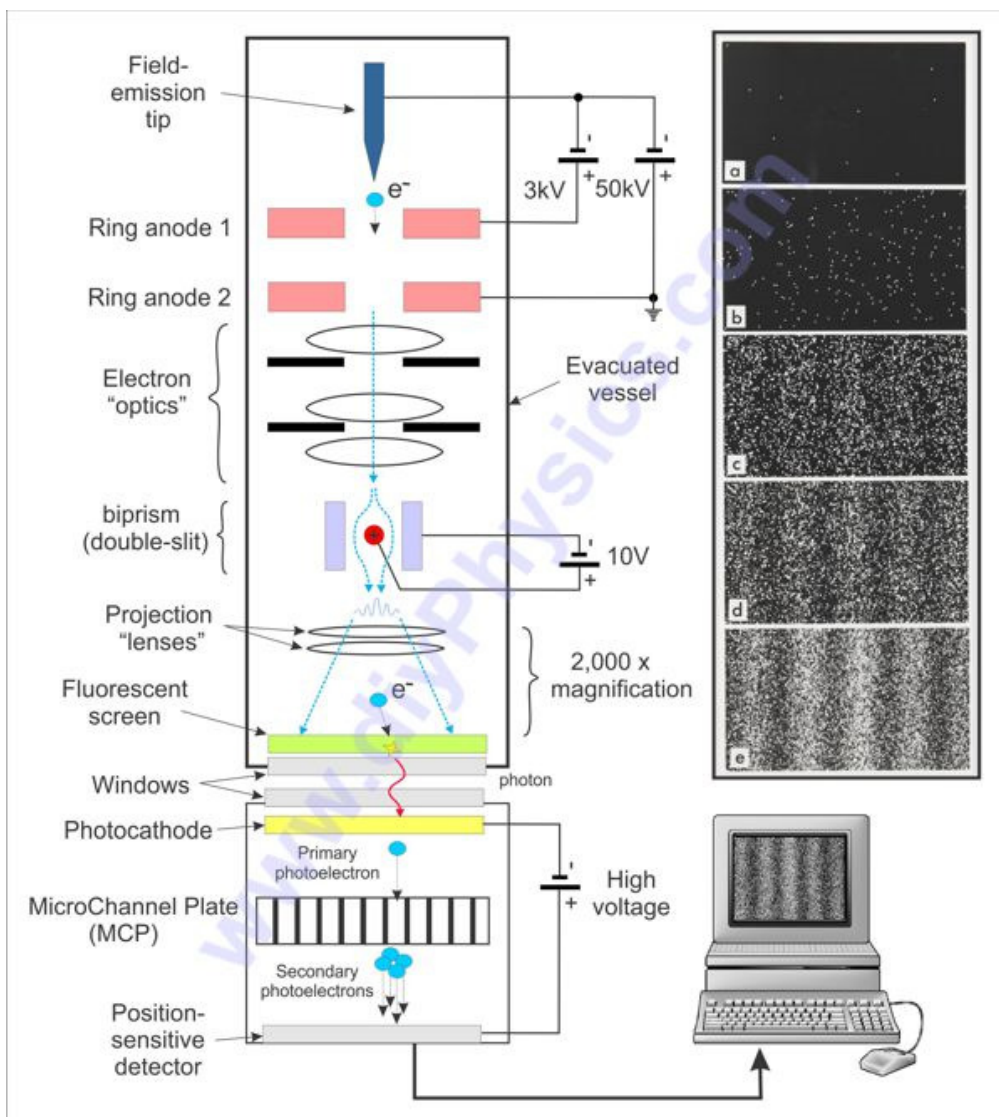
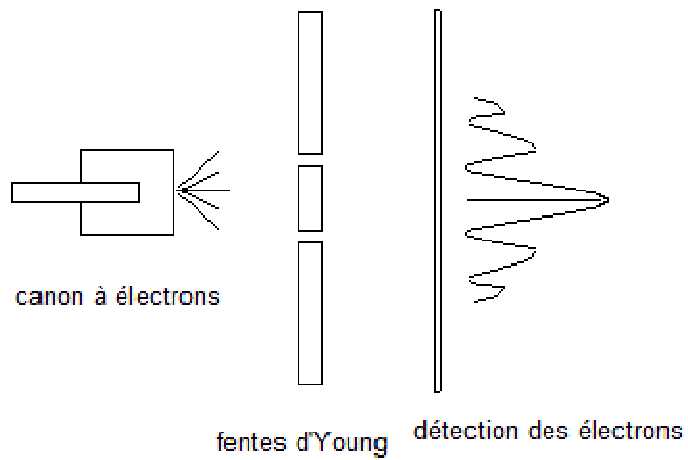
Thomson a obtenu des images qui ressemblent à celles réalisée par la diffraction de rayons X sur des échantillons à base de poudre (poly-cristallins). Ce genre de diffraction, par de nombreux grains cristallins orientés au hasard, produit des anneaux, du fait de la symétrie de révolution.

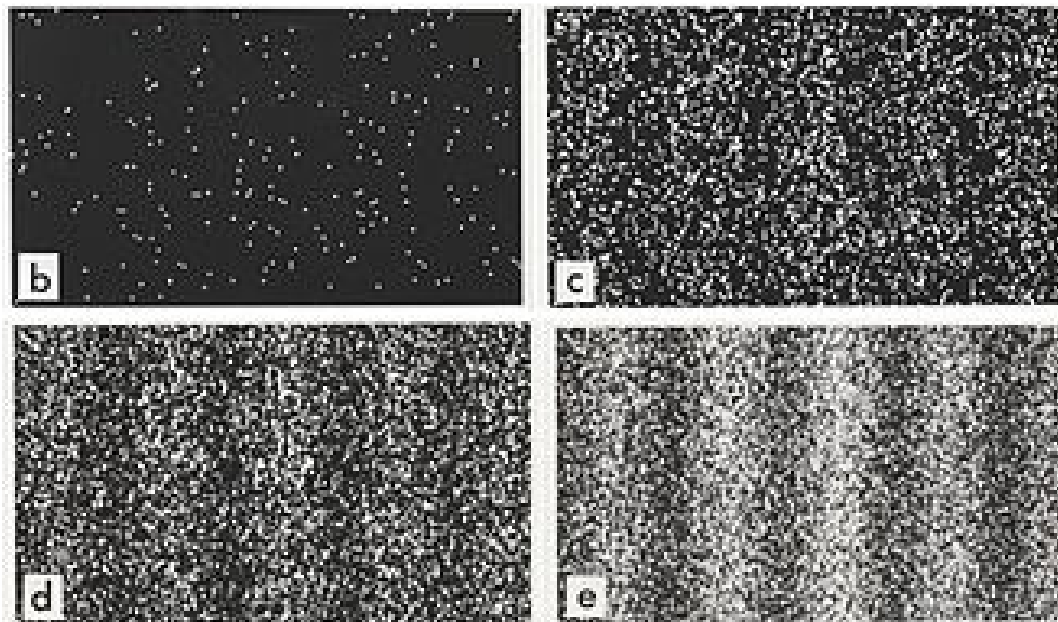
Si la longueur d'onde des électrons est modifiée en changeant leur énergie incidente, les diamètres des anneaux de diffraction changent proportionnellement à celle-ci, comme prévu à partir de la relation de Bragg et en accord avec la relation de de Broglie.



## Interférence pour des électrons uniques :

expérience de Tonomura (1989)





Résultats d'une expérience montrant à la fois la nature corpusculaire et ondulatoire des électrons grâce à un instrument équivalent aux fentes de Young.

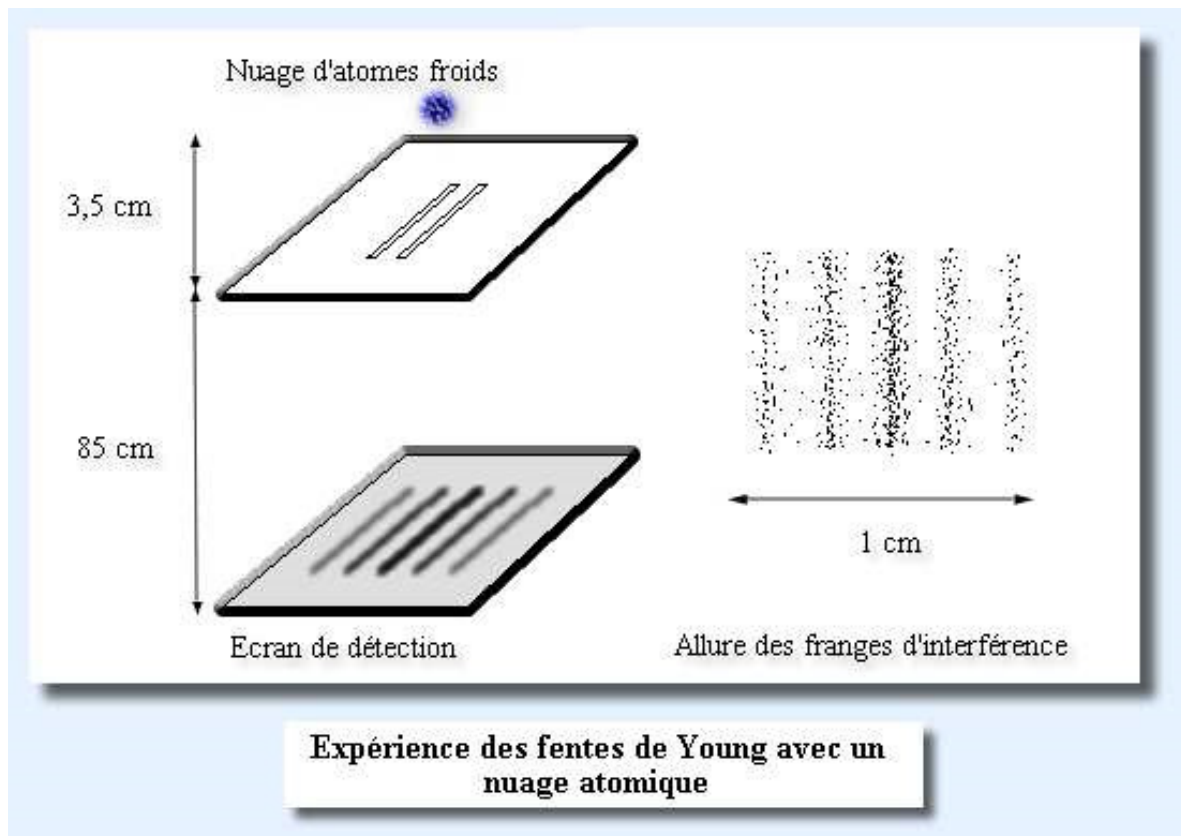
Au début de l'expérience (b), des petites taches montrent les endroits où des électrons ont frappé l'écran noir.

Lorsque le nombre d'électrons est suffisamment élevé (d et e), les franges apparaissent.

Le nombre d'électrons dans les photos est d'environ :

(b) 200,                    (c) 6 000,                    (d) 40 000                    (e) 140 000

## Interférences d'atomes :



Expérience d'interférences atomiques réalisée en 1992 par une équipe japonaise de l'université de Tokyo (Shimizu et collaborateurs).

Les atomes, immobilisés et refroidis, sont lâchés au-dessus des fentes ; ils tombent jusqu'à l'écran de détection, où chaque point noir correspond à l'impact d'un atome.

La densité des impacts dessine une alternance de bandes sombres et claires : les franges d'interférence.

La densité en un point de l'écran est proportionnelle à la probabilité qu'un atome se retrouve en ce point.

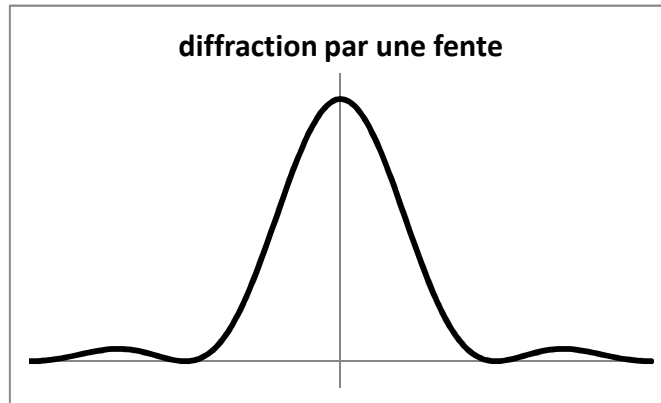
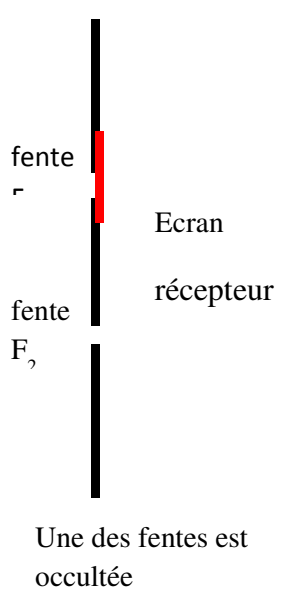
Cette probabilité est elle-même proportionnelle au module carré  $|A_1 + A_2|^2$  de la somme des amplitudes  $A_1$  et  $A_2$  des deux ondes atomiques évaluées en ce point.



### Diffraction par une seule fente :

l'onde de probabilité est diffractée

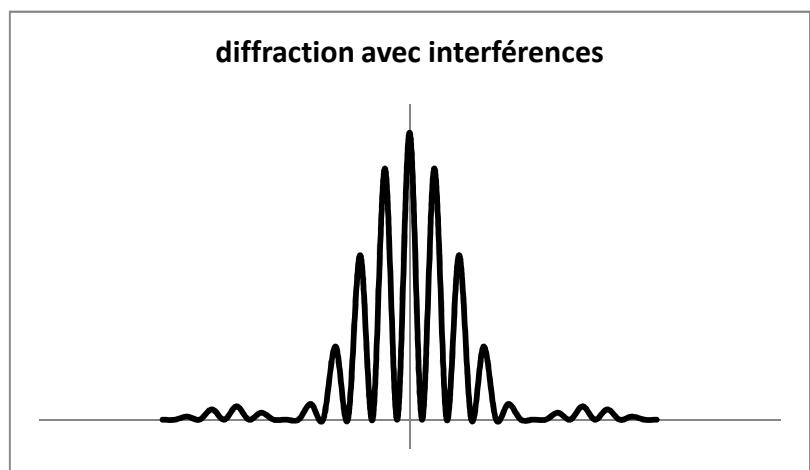
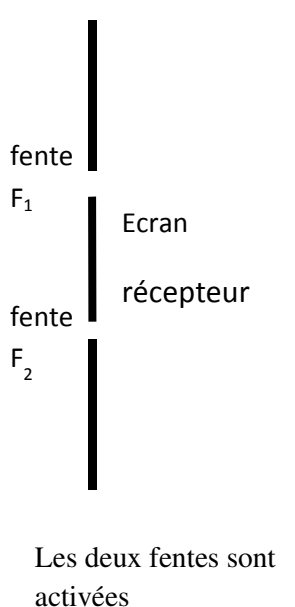
$$p(M) = |\psi_1(M,t)|^2 \text{ (fente 1) ou } p(M) = |\psi_2(M,t)|^2 \text{ (fente 2)}$$



### Diffraction par deux fentes :

l'onde de probabilité est diffractée par les deux fentes et les ondes viennent **interférer** entre elles sur l'écran.

$$p(M) = |\psi_1(M,t) + \psi_2(M,t)|^2 \neq |\psi_1(M,t)|^2 + |\psi_2(M,t)|^2$$



Le résultat assez interpellant en termes de probabilité, est que la juxtaposition des deux fentes, et l'interférence qui en résulte, amène l'annulation de la probabilité d'enregistrer une interaction avec un photon ou une particule sur le récepteur en certains endroits.