

Diffraction instrumentale dite
"de Fresnel"

Les phénomènes de diffraction intéressent à la fois : les émissions de TSF, le Radar, les spectroscopies infra-rouge, visible, X, par réseaux tracés ou naturels ; les structures des cristaux, des corps amorphes ; l'émission des ultra-sons et les sondages maritimes ; les sondages de recherche des pétroles, la diffraction des électrons et des protons, l'hologramme (le nouveau grand espoir de l'Optique). On les rencontre partout dès qu'il s'agit de radiations électromagnétiques ou corpusculaires, des ondes de toutes origines. Nous ne pouvons plus identifier ce que j'appelle la diffraction instrumentale avec ce que l'on a désigné sous ce nom dans les traités d'Optique Instrumentale. Je joins au contenu ancien du terme tout ce qui exige du matériel de Laboratoire.

L'oeuvre de Fresnel. - Fresnel est le véritable initiateur de l'étude scientifique de la diffraction de la lumière par des obstacles. Ses travaux commencent avec le XIX^e siècle et l'on peut dire que les travaux modernes d'Optique tels que l'Holographie, la continuent encore. On y pose, comme base des théories, que la lumière se propage par ondes, hypothèse qui reste féconde. Elle est due à Huyghens (1660) mais les difficultés expérimentales et mathématiques en ont reculé les conséquences utiles jusqu'au début du XIX^e siècle. Ces difficultés sont les suivantes :

1° - Cohérence spectrale. - Les sources naturelles et techniques ordinaires : soleil, flammes, décharges électriques, donnent de la lumière complexe que Newton a décomposée en couleurs simples et que la spectroscopie moderne classe par longueurs d'ondes λ ou par fréquences $\nu = c/\lambda$, c étant la vitesse de la lumière. Ces longueurs d'ondes sont très petites pour la lumière visible, de 0,7 à 0,4 microns. L'unité habituelle est l'Angström : 10^{-4} microns = 10^{-8} cm. Les rayons X et γ descendent à $1/10000$ d'Angström. On n'observe complètement les conséquences de la propagation par ondes que si la radiation est monochromatique c'est à dire est limitée à une longueur d'onde λ . Pratiquement une raie spectrale fine a toujours une certaine largeur spectrale $\Delta\lambda$ qu'il est souvent difficile, aujourd'hui de mesurer. Les lasers à gaz donnent les radiations les plus monochromatiques.

2° - Amplitude et énergie. - Un mouvement vibratoire : $a \cos(2\pi\nu t + \phi)$ est caractérisé, outre sa fréquence ν , par son amplitude a et son angle de calage ou phase de référence ϕ . On ne peut atteindre directement que le carré de l'amplitude, a^2 qui est identique à la puissance débitée. La fréquence est donnée par des mesures indépendantes de c et de λ . La phase peut être mesurée par des phénomènes d'interférence avec un autre groupe d'ondes de même fréquence : c'est le principe du contraste de phase, des hologrammes modernes. On ne voit, photographie ou enregistre jamais que des distributions d'énergie

3° - Difficultés dans les calculs. - Le problème posé par les physiciens aux mathématiciens est le suivant : un faisceau de lumière de fréquence ν entretient, en régime permanent, une certaine distribution d'amplitude et de phase que l'on appelle depuis Schrodinger une fonction d'onde que j'appelle symboliquement ψ . On interpose sur son trajet des obstacles matériels connus et l'on voudrait calculer à l'avance qu'elle est la nouvelle fonction d'onde ψ , soit pour la vérification expérimentale, soit pour des constructions d'appareils. Ceci exige une définition très précise des obstacles et la connaissance de leurs propriétés vis à vis de la lumière. Il y a des domaines de fréquences où la chose est relativement facile :

- Dans le domaine hertzien, jusqu'à l'infra rouge, les corps sont décrits par leurs propriétés électromagnétiques, et les ondes électromagnétiques de Maxwell décrivent très suffisamment les phénomènes.

- Dans le domaine des rayons X : les atomes sont connus et bien définis : la diffraction apparaît comme résultant de chocs de photons sans changement de fréquence, c'est à dire sans perte d'énergie. La mécanique ondulatoire utilise l'onde et la fonction d'onde comme méthode de calcul statistique des distributions de photons.

- Dans le domaine moyen de ce que l'on appelle la lumière, ce sont les propriétés de la matière à la fois statistiques et atomiques qui rendent l'étude des interactions matière-lumière compliquées ; le grand mérite de Fresnel est d'avoir sélectionné instinctivement le type d'interaction qui a sa forme la plus simple dans la diffraction des rayons X : c'est l'onde lumineuse qui est responsable des phénomènes, et la matière, comme dans les rayons X, est passive ; elle donne une forme aux faisceaux et aux trajectoires elle n'est qu'un obstacle avec des propriétés superficielles simples : opacité, chocs élastiques ou absorption. La méthode de calcul, simple en principe, est fondée :

A - Sur le principe de Huyghens-Fresnel qui consiste à substituer à la source primaire cohérente une source secondaire qui est en état vibratoire sur une surface arbitraire commode, état entretenu par le régime permanent de propagation.

B - Sur le principe des interférences : les différentes parties de cette source secondaire agissent postérieurement en chaque point de l'espace en y composant leurs mouvements transmis. La seule différence entre les Interférences et la Diffraction réside donc dans le fait que la diffraction oblige à du calcul intégral. Nous verrons que Fresnel a, dans certains cas simples, pu simplifier les intégrations. Mais dans le cas le plus simple, Fresnel est déjà obligé d'introduire dans la solution des fonctions transcendentes dont il a heureusement calculé les tables. Naturellement dans ces feuilles d'initiation je ne développerai pas de calculs, qui se trouvent d'ailleurs dans tous les cours d'enseignement supérieur traitant ces questions.

CAS PARTICULIERS

Ecran mince plan opaque à bord rectiligne . - C'est un cas fondamental. Figure 1 j'ai représenté une coupe perpendiculaire à ce bord et passant par la source ponctuelle S. Je l'ai supposée dans un plan perpendiculaire à celui de l'écran, pour simplifier la figure. Au delà de l'écran ce plan O tracé en pointillé, est la limite de l'ombre géométrique. On observe dans un plan P normal à cette ombre. Les observations et les calculs de Fresnel ne se rapportent qu'à un domaine étroit de part et d'autre du plan O, d'autant plus étroit que l'on est plus près de l'arête A.

Sur le plan O l'amplitude est réduite à la moitié de sa valeur sans l'écran, ce qui est assez naturel par raison de symétrie : elle ne reçoit de lumière que de la moitié de l'onde. L'éclairement est donc réduit au 1/4.

Côté ombre il n'y a pas de frange mais l'éclairement diminue très vite quand on s'éloigne de O (fig.2). Si on place l'oeil dans cette ombre on voit un liseré le long de l'arête. J'ai donné un profil du liseré calculé et vérifié par moi-même. Il est donné en amplitude non en énergie. C'est ce liseré que projette la Méthode des stries ; ce n'est qu'une apparence qui dépend de la diffraction par la pupille de l'oeil : ce liseré est symétrique par la vertu des interférences, mais Fresnel en a lui-même retenu que l'onde n'était efficace qu'au voisinage du trajet direct.

Côté éclairé, il y a des franges dites de diffraction (fig.3), ce qui ne change pas leur nature interférentielle. La première est la plus forte et la plus large. La visibilité et la largeur des autres décroissent de plus en plus lentement. Les opticiens de Salt Lake City ont enregistré, il y a trois ans, quantitativement ces franges produites par une source ponctuelle à 20 m en avant de l'écran, P étant à 40 m en arrière. Ils en ont compté plus de 200. Leurs positions sont conformes aux calculs de Fresnel mais les éclairements diffèrent légèrement. Cela peut provenir de la nature de l'écran et aussi de celle de la source. Les dernières franges disparaissent dans les "bruits" du matériel électronique d'enregistrement.

Fente libre et bande opaque à bords minces rectilignes et parallèles . - Leur dessin en plan et coupe normale est donné figure 4. Je les suppose exactement de mêmes largeurs et placés successivement et parallèlement dans le même plan face au faisceau que j'ai supposé parallèle et normal à leur plan. Ces deux obstacles sont complémentaires. Superposés ils arrêtent toute la lumière ; en additionnant leurs parties libres ils laissent tout passer. Les distributions d'amplitude derrière ces deux écrans pris séparément donnent des diffractions dites complémentaires qui additionnées en amplitude doivent redonner l'éclairement uniforme. Cela nous permettra de raisonner un peu les faits observés et calculés.

Prenons d'abord l'ombre géométrique de la bande. Chaque bord donne lieu à des distributions identiques, au bord d'écran. Mais ici les rayons venus des deux bords interfèrent. Il n'est donc pas étonnant que dans le plan P nous ayons des franges de largeurs sensiblement égales analogues aux franges de 2 fentes parallèles ; nous donnons une photographie figure 5.

Ces franges deviennent plus larges quand on s'éloigne de l'écran, elles sont donc de moins en moins nombreuses et finissent par se fondre avec les franges de diffraction extérieures à l'ombre. Il en subsiste longtemps un résidu, complément de la figure de diffraction à l'infini de la fente et c'est à ce résidu que l'on doit d'apercevoir les fils électriques aériens beaucoup plus loin que ne le permettrait le pouvoir séparateur de l'oeil.

Ces franges sont donc en nombre variable, elles sont plus nettes quand leur nombre est entier. Ce nombre est pair ou impair et par conséquent la frange centrale est, suivant les cas noire ou claire. C'est une nouveauté. Deux sources linéaires synchrones placées à la place des deux bords donneraient constamment une frange centrale claire. Le liseré de la méthode des stries est beaucoup moins simple qu'il paraissait au début. Young qui chercha à l'utiliser pour expliquer les franges observées par le P. Grimaldi échoua sur l'explication de cette frange centrale et de son évolution que Fresnel expliqua définitivement.

Regardons maintenant la fente. Naturellement, dans le faisceau qui passe, on observe des franges de diffraction analogues à celles d'un bord d'écran solitaire. Naturellement la lumière qui passe au delà de la fente forme des franges analogues mais extérieurement, dans l'ombre, d'autres franges d'autant plus étalées en éventail que la fente est plus étroite. Une fente "fine" a au plus 50 microns. Au

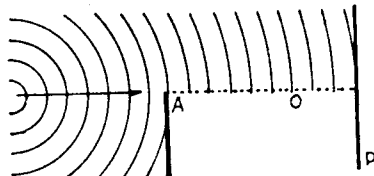


Fig. : 1

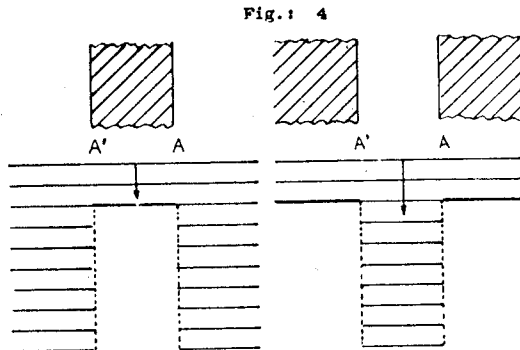


Fig. : 2
Lisé

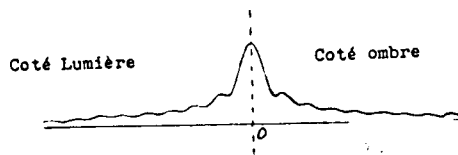


Fig. : 3

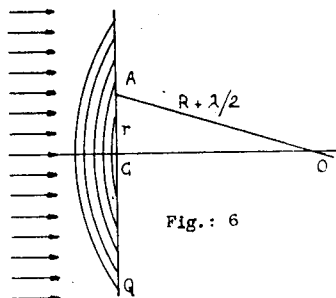


Fig. : 6

dessous de 2 ou 3 microns, l'éventail occupe tout l'espace derrière la fente. Pour les amateurs je signale que l'on peut obtenir de bonnes fentes en coupant au rasoir comme avec un tire ligne une émulsion photographique sur plaque encore humide. Lipmann a pu ainsi photographier le système de franges en plaçant dans l'éventail une plaque photographique longue un peu inclinée.

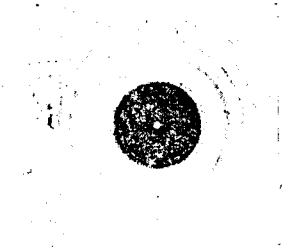
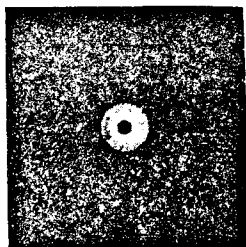
Trou rond et disque complémentaire - Méthodes des zones de Fresnel. - Ce fut le premier mode d'intégration de Fresnel et il est simple et suffisamment approché des calculs exacts (qui ne sont en fait que plus approchés). Regardons la figure 6.

Soit Q le plan de l'écran C le centre du futur trou CO la perpendiculaire à Q en C qui perce en O le plan P d'observation. Je suppose que la source est très loin sur la droite OC prolongée et que les ondes qui arrivent sur Q dans le sens CO sont planes et parallèles à WQ et P. Je ne figure pas encore le trou dont le centre sera en C. De O comme centre je décris des sphères dont je trace les grands cercles et qui ont pour rayons successifs : $R = OC$, $R + \lambda/2$, $R + \lambda$, $R + 3\lambda/2$, etc.

Ces sphères coupent le plan Q suivant des cercles qui le découpent en zones que je numérote à partir de la première 1, 2, 3 etc. Ces zones ont à très peu près la même aire. Ce sont donc des sources secondaires d'intensités à peu près égales. Mais les mouvements que O reçoit d'elles sont en moyenne décalés l'un de l'autre d'une demi longueur d'onde : la zone 3 détruit l'éclairement donné par la zone 2. Si le trou ne laisse passer que les deux zones 1 et 2, leurs mouvements se détruisent et O restera obscur. Si le trou ne laisse passer que la zone 1, nous aurons un maximum de lumière. Calculons le rayon r de cette zone pour $R = 50$ cm et $\lambda = 0,50$ microns. Dans le triangle OCA le théorème de Pythagore donne :

$$R^2 + r^2 = (R + \lambda/2)^2 \text{ ou : } r^2 = R \lambda + \lambda^2/4 \text{ ou sensiblement } r = \sqrt{R \lambda} = 0,5 \text{ mm}$$

Un trou de 1 mm de diamètre pour $\lambda = 0,50 \mu$, de 1,1 mm pour le jaune solaire $\lambda = 0,55 \mu$ nous donnera donc une frange brillante à 50 cm sur l'axe du faisceau. Son diamètre est sensiblement plus petit que celui du trou : c'est un véritable foyer du trou. La tache serait élargie si on plaçait sur le trou une lentille de focale 50 cm. On peut faire ainsi des photographies sans objectif ; à 50 cm le champ est celui d'une plaque 9 x 12. Les temps de pose sont longs. S'il y a des arbres dans le paysage il faut opérer par temps calme.



Ombre d'un disque Ombre d'un trou



Franges d'un bord d'écran

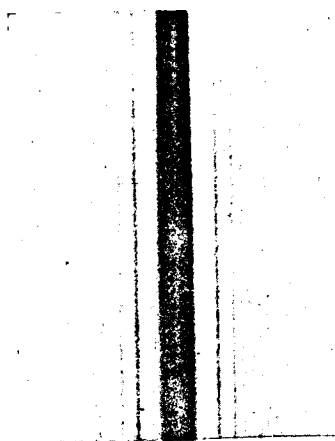


Fig. 5. Frange dans la lumière d'une bande opaque - Une frange claire au centre de l'ombre.

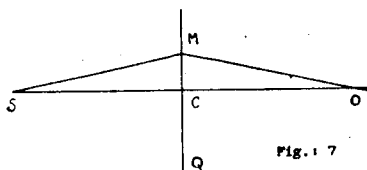
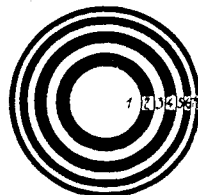


Fig. 1 7

Réseau zoné



Les réseaux zonés. - Soit S une source ponctuelle, et O un point où l'on veut en obtenir une image par diffraction. Entre les deux un plan Q normal à SO et soit M un point du plan Q. Nous pouvons déterminer M tel que $SM + MO = SO + n \lambda / 2$. On découpe ainsi le plan en zones ayant les mêmes propriétés que les zones précédentes. Toutes les zones impaires additionnent leurs mouvements en O et toutes les zones paires aussi, mais ces deux sommes sont en opposition et se détruisaient. On supprime donc toutes les zones paires en plaçant dessus des zones absorbantes. On a un réseau zoné qui donne de S une image excellente en O. Le champ de cette lentille par diffraction est convenable. Ces lentilles ont été souvent fabriquées et le spécialiste européen actuel est le professeur Fragstein (Université de la Saxe). Leur pouvoir résolvant est celui d'une lentille de même diamètre. Elles ont une grande profondeur de champ. Elles ne sont pas achromatiques. Il ne faut pas les confondre avec les lentilles de Fresnel qui travaillent par réfraction. Chose curieuse malgré les zones absorbantes la luminosité est la même que celle d'une lentille équivalente.

Ces réseaux sont généralement tracés sur une lame de verre à faces parallèles. Il faut tenir compte de cette lame, ce qui complique évidemment les calculs.