

## Présentation simulée de la diffraction par un édifice atomique monocristallin

---

Les ondes mécaniques, ou vagues, qui se propagent à la surface d'un liquide ont été, depuis longtemps, utilisées pour présenter différents phénomènes ondulatoires ; nous les avons employées pour simuler la diffraction des ondes (électromagnétiques ou non) par un édifice atomique monocristallin et mettre en évidence la loi de Bragg.

### I. DIFFRACTION PAR UN RESEAU TRIPLEMENT PERIODIQUE - LOI DE BRAGG.

En 1912, Friedrich, Knipping et Laue découvrirent la diffraction des rayons X par des cristaux. La même année, leurs diagrammes furent interprétés, sur des bases ondulatoires, par la loi de Bragg. Plus tard, Davisson et Germer (1927) mirent en évidence un phénomène analogue : la diffraction des électrons par un cristal. Ces découvertes furent comprises grâce aux travaux sur la mécanique ondulatoire de Louis de Broglie (1923). Une des premières conséquences de l'aspect ondulatoire des électrons en mouvement, a été l'application immédiate de la loi de Bragg au cas des faisceaux d'électrons.

Cette loi, dont une démonstration rigoureuse se fait par une étude interférentielle classique à l'aide des équations de Laue et du réseau réciproque, peut avoir une présentation très pratique, qui en fait un outil utilisé de façon permanente dans toute l'imagerie électromagnétique (rayons X, électrons, neutrons, photons..). D'une manière peu rigoureuse, cette loi peut être présentée comme une « réflexion » conditionnelle.

En effet, soit un objet cristallin ; il est constitué d'atomes rangés périodiquement selon trois directions. Une autre représentation d'un tel objet peut être une superposition de plans d'atomes, ou plans réticulaires, parallèles, équidistants les uns des autres d'une distance  $d$ , appelée distance réticulaire (fig. 1).

Un objet monocristallin peut être décrit ainsi de différentes manières, car il existe un grand nombre de familles de plans réticulaires pouvant représenter le cristal (parallèles au plan OYZ ou OXY ou OXZ ou d'orientation quelconque). Plus les plans réticulaires de la famille considérée ont une forte densité d'atomes, plus la distance réticulaire est grande.

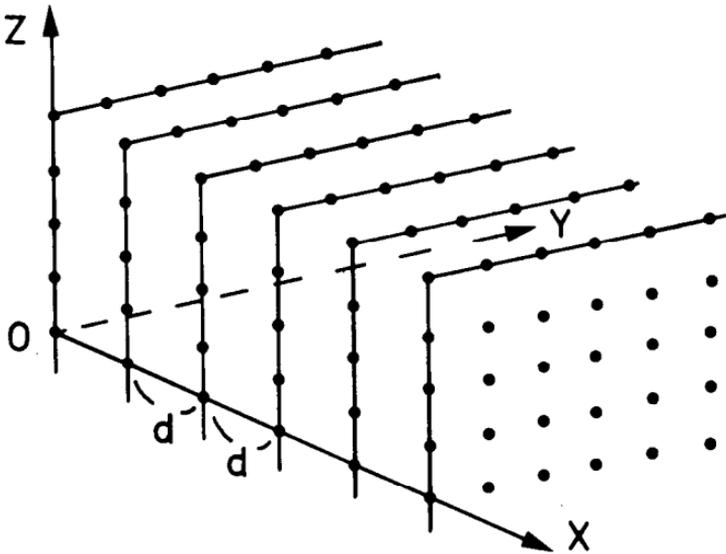


Fig. 1

Soit un objet monocristallin d'épaisseur  $e$  (fig. 2), considérons une famille de plans réticulaires pratiquement verticaux et normaux au plan de la figure ; soit une onde plane incidente qui se propage selon la direction I.

Après la traversée de l'édifice atomique, où chaque atome est considéré comme un centre diffuseur, nous pouvons observer un faisceau transmis T qui se propage dans la direction incidente I, et parfois un faisceau diffracté qui se propage dans une direction D (fig. 2).

Le faisceau diffracté par la famille de plans réticulaires a une intensité maximum quand les directions I et D sont telles que la loi de Bragg est vérifiée ; soit quand :

- I, D et  $\vec{n}$ , la normale aux plans, sont dans un même plan.
- Les angles que font I et D avec les plans réticulaires sont égaux, ils sont représentés par  $\vartheta$ .
- De plus,  $\vartheta$  doit satisfaire la relation :

$$2 d \sin \vartheta = k \lambda$$

où  $k$  est un nombre entier et  $\lambda$  la longueur d'onde de l'onde incidente.

Cette relation impose aux différences de chemins optiques, parcourus par les ondes élémentaires, de compter un nombre entier de longueurs d'onde.

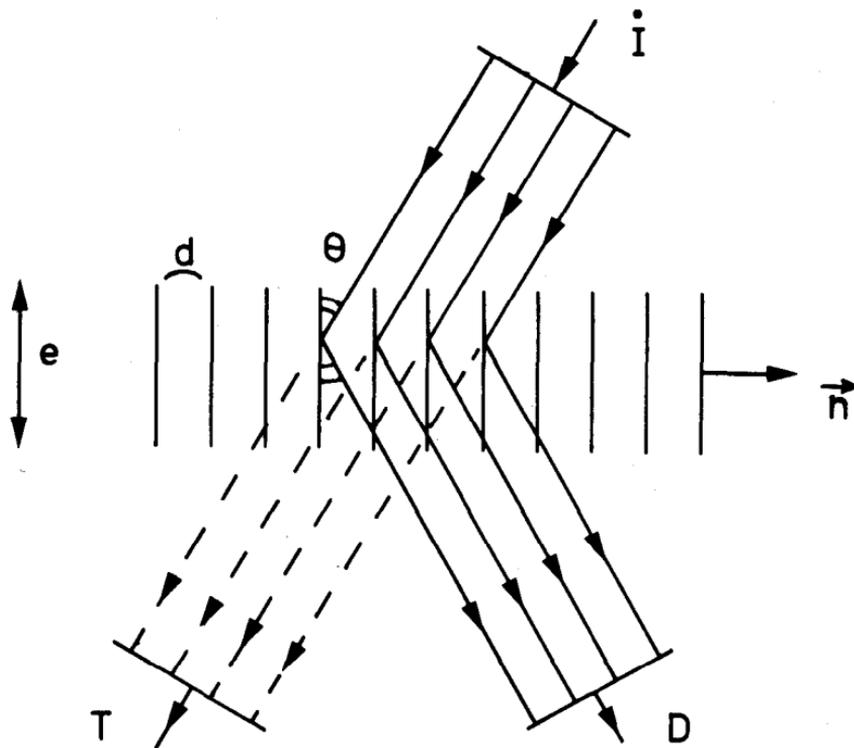


Fig. 2

Pour une famille de plans, soit pour une valeur de  $d$ , il existe autant d'angles d'incidence  $\theta$  provoquant un maximum d'intensité diffractée qu'il existe de valeurs de  $k$  telles que :

$$\frac{k \lambda}{2 d} \leq 1.$$

Pour un monocristal (Al ou Au, par exemple) et pour une direction incidente  $I$ , il existe toujours plusieurs familles de plans réticulaires pour lesquelles la loi de Bragg est vérifiée ; il y a donc plusieurs faisceaux diffractés.

On sait que la loi de Bragg donne accès à l'interprétation rapide des diagrammes de diffraction et des images, obtenus avec des faisceaux de rayons X, d'électrons et de neutrons.

### Quelques ordres de grandeur.

Dans un monocristal d'aluminium, la famille de plans réticulaires la plus dense a une distance réticulaire :  $d = 2,333 \text{ \AA}$ .

— Pour un microscope électronique commercial qui utilise une tension accélératrice  $V = 100 \text{ kV}$ , la longueur d'onde  $\lambda = 0,037 \text{ \AA}$  pour  $k = 1$   $\theta = 0,45^\circ$ .

— Pour le microscope électronique à très haute tension de Toulouse  $V = 3 \text{ MV}$   $\lambda = 0,00357 \text{ \AA}$   $\theta = 0,0438^\circ$ .

Pour présenter cette loi de Bragg, nous avons simulé ce phénomène de diffraction électronique en utilisant des vagues qui se propagent à la surface de l'eau, les atomes étant simulés par une planchette de fakir.

## II. SIMULATION DES PHENOMENES DE DIFFRACTION ELECTRONIQUE OU LA LOI DE BRAGG APPLIQUEE A UNE ONDE MECANIQUE.

### Dispositif expérimental.

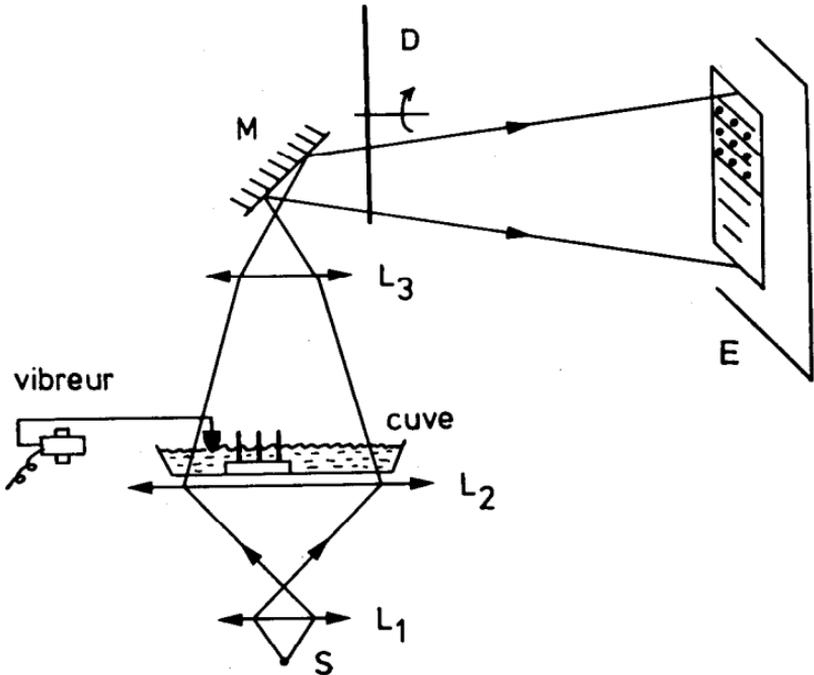


Fig. 3

Une source de lumière blanche S crée, à l'aide d'une lentille  $L_1$ , un faisceau de grande section pour éclairer une cuve transparente remplie d'eau. Elle est posée sur une deuxième lentille  $L_2$  qui focalise le faisceau au niveau d'une lentille  $L_3$ . Cette dernière lentille forme, à l'aide d'un miroir M, l'image de la surface de l'eau sur l'écran d'observation E.

Un rétroprojecteur habituel, sur lequel on pose une cuve transparente, possède tous les éléments optiques de ce montage.

Un vibreur terminé par une règle, crée à la surface de l'eau une vague rectiligne qui se propage vers le fond de la cuve. Un disque D, percé de trous, qui tourne à une vitesse réglable, est placé après le miroir et permet de stroboscooper le phénomène. Ainsi, à volonté, il est possible d'observer la vague descendre lentement l'écran d'observation.

L'édifice atomique est simulé en submergeant une plaque de plexiglas transparente qui maintient verticales des petites tiges d'acier inoxydable réparties périodiquement sur la plaque. Ces tiges ont une partie non immergée et sont des centres diffuseurs pour la vague. Ils jouent le rôle des atomes dans les édifices atomiques pour l'onde électromagnétique.

### Résultats.

Ils sont présentés ci-après. La photographie de la fig. 4 représente l'onde produite par le vibreur. Nous l'avons « immobilisée » à l'aide du stroboscope pour des nécessités photographiques. Chaque frange, claire ou sombre, est une droite équiphase, d'amplitude constante, donnant ainsi la concrétisation, à l'instant  $t$ , d'une section plane verticale d'une onde plane incidente.

La distance entre deux franges brillantes (ou sombres) correspond à la longueur d'onde  $\lambda$  de l'onde incidente. Elle est égale dans ce cas, à :  $\lambda = 6$  mm.

La photographie de la fig. 5 reproduit l'image de l'objet : les tiges d'acier sont placées sur le « faisceau » incident. Chaque répartition rectiligne verticale de tiges simule la trace d'un plan réticulaire ; l'ensemble de ces répartitions verticales constitue la famille de plans réticulaires que nous envisageons. Ces « plans » sont distants les uns des autres d'une distance réticulaire  $d = 5$  mm. Sur ce cliché, l'angle entre la direction de propagation de l'onde incidente et les plans réticulaires est nul, seule l'onde plane transmise apparaît après la traversée de l'objet.

Si nous inclinons « l'édifice atomique » par rapport à la direction incidente, le phénomène reste inchangé tant que l'angle  $\theta$

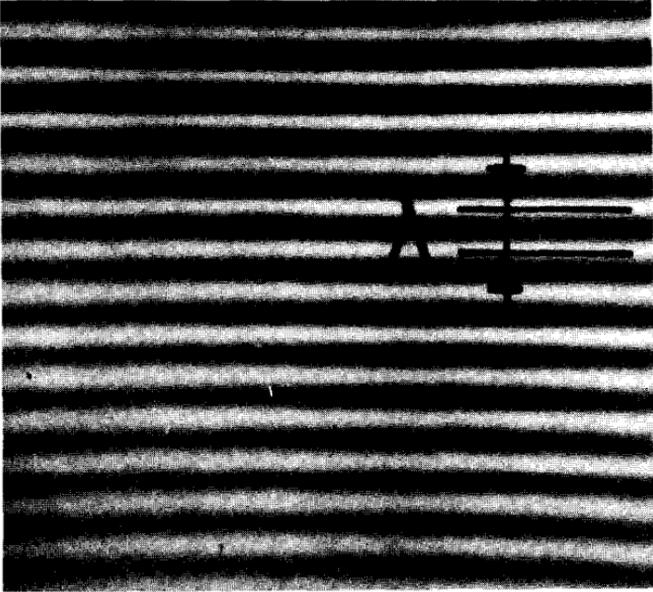


Fig. 4

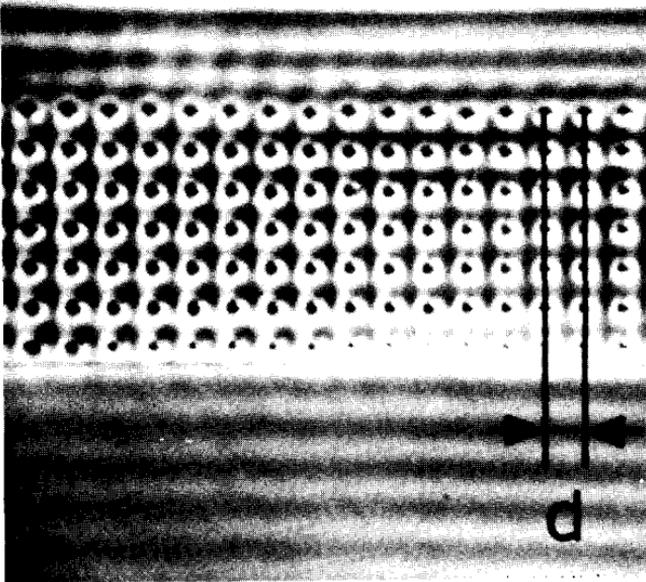


Fig. 5

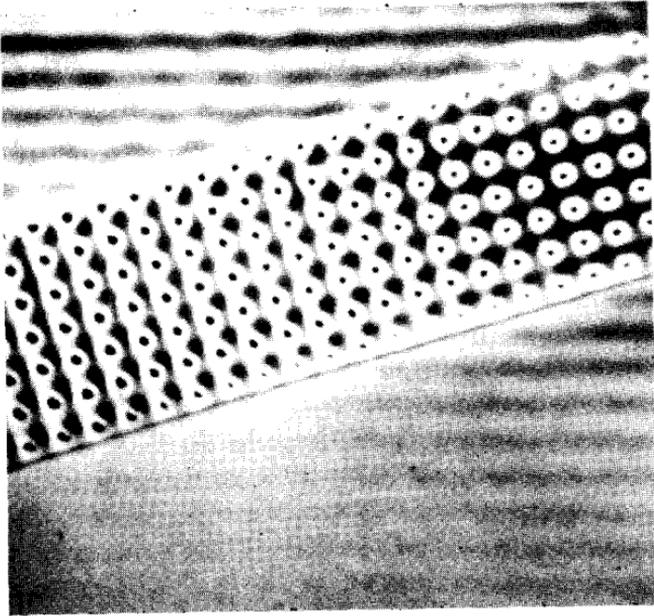


Fig. 6

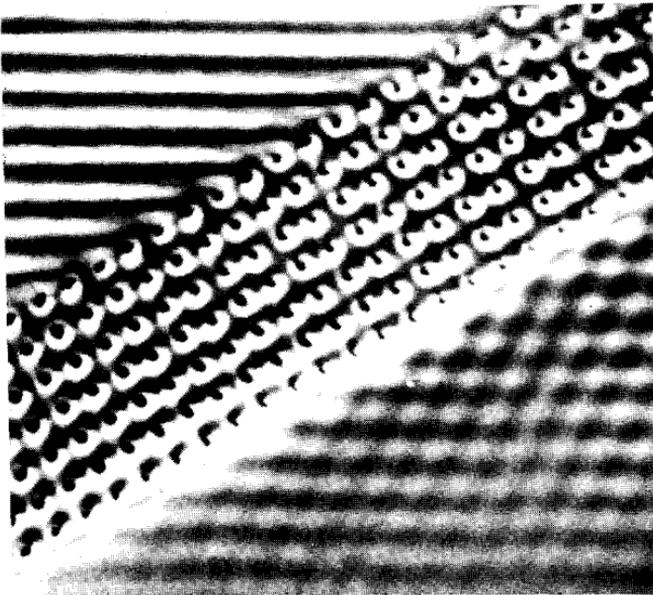


Fig. 7

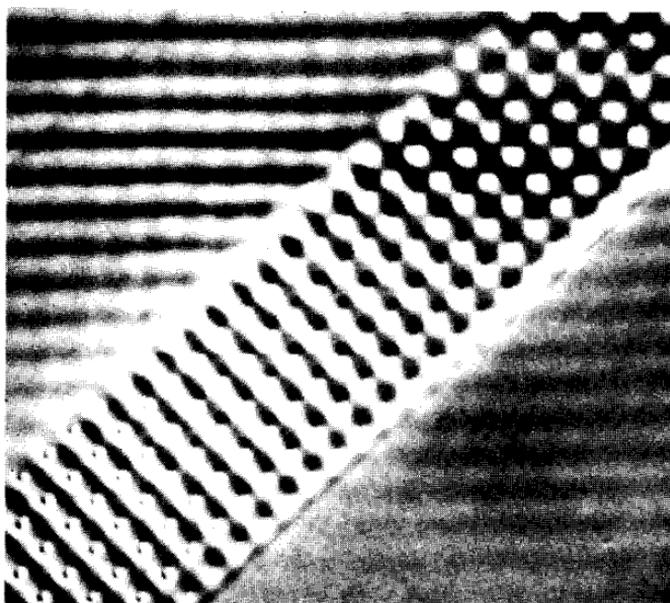


Fig. 8

ne vérifie pas la loi de Bragg (fig. 6). Pour un angle d'incidence tel que  $2d \sin \theta = \lambda$  ( $k = 1$ ) soit  $\theta = 36,8^\circ$ , il doit apparaître un faisceau diffracté intense. C'est ce que nous observons sur photographie de la fig. 7, où pour une inclinaison du réseau de tiges voisines de  $36^\circ$  nous observons à la sortie de « l'objet » non plus une onde plane transmise mais la superposition de deux ondes planes qui se propagent, l'une toujours dans la direction transmise T, l'autre dans une direction D qui fait, avec la direction incidente I, un angle égal à  $2\theta = 73,6^\circ$ . Pour cette inclinaison, l'onde diffractée apparaît. Inclignons davantage le réseau de tiges (fig. 8), l'onde diffractée disparaît, seule, se maintient l'onde transmise.

Ainsi, nous vérifions bien que l'onde diffractée n'apparaît que pour l'angle  $\theta = 36,8^\circ$  qui est la condition de la loi de Bragg.

#### Remarques.

— Les franges brillantes et sombres que nous observons sur ces photographies reproduisent les maximums et minimums d'amplitude de la vague, car le contraste blanc-noir vient d'un effet de lentille convergente ou divergente suivant que l'on se

place au sommet ou au creux de la vague. Les clichés que nous obtenons sont donc des représentations de la variation d'amplitude de l'onde et non d'intensité.

— Il y a une onde dont nous n'avons pas parlé et qui existe, quelle que soit l'incidence  $\theta$ , c'est une onde plane réfléchie par la surface supérieure de l'objet. Elle apparaît faiblement sur les différents clichés. Il en est de même avec un édifice cristallin et une onde électromagnétique.

— Cette expérience peut être présentée avec différents « objets ». Une seule rangée de tiges permet de simuler la diffraction par un réseau plan et vérifier la loi des réseaux :

$$\sin i \pm \sin \theta = \frac{k \lambda}{e}$$

Nous avons aussi utilisé un « cristal » dont la distance interatomique est le double de celle présentée ici. Cela nous a permis de faire apparaître les trois ondes diffractées correspondant à  $k = 1, 2$  et  $3$ . Avec ce réseau de tiges, nous avons pu aussi approcher le phénomène de canalisation des électrons qui apparaît surtout dans le cas où la longueur d'onde est très faible par rapport aux distances interatomiques : on observe clairement, surtout avec le mouvement, des ondes se propageant entre les divers plans atomiques.

Cette expérience que nous avons montée à l'occasion de « Journées portes ouvertes » au Laboratoire d'Optique Electronique du C.N.R.S. de Toulouse nous a permis de présenter la loi de Bragg et le phénomène de diffraction en microscopie électronique à un très large public.

Bernard JOUFFREY et Jacques BEAUVILLAIN,

*Laboratoire d'Optique Electronique*

*(Laboratoire propre du C.N.R.S.*

*associé à l'Université Paul-Sabatier - Toulouse).*

---