

**Philippe COLIN, Laurence VIENNOT**

Laboratoire de Didactique des Sciences Physiques  
Université Denis Diderot - Paris 7  
Case 7086  
2, Place Jussieu  
75251 Paris cedex 05

Contacts

[colin.didac@wanadoo.fr](mailto:colin.didac@wanadoo.fr)

[viennotl@moka.ccr.jussieu.fr](mailto:viennotl@moka.ccr.jussieu.fr)

**Géométrie, phase, cohérence : questions d'optique****Introduction**

Au moment où se discutent les raisons du dépeuplement des cursus universitaires classiques en physique, et où l'objectif prioritaire pourrait bien être de motiver les étudiants, on peut se demander s'il y a place pour des réflexions serrées sur tel ou tel point d'enseignement particulier. Le lecteur persuadé du contraire se dispensera de lire les lignes qui suivent. Le parti pris qui les inspire, en effet, est que la motivation des étudiants a quelque chose à voir avec la recherche de cohérence, dans le détail, et une vision de la science qui ne soit pas complètement éclatée, écartelée entre ses divers secteurs, voire chapitres. Si tel est bien le cas, il faut bien sûr se donner les meilleures chances de satisfaire ces attentes, ce qui est loin d'aller de soi. Prenons l'exemple de l'optique, à un niveau inférieur ou égal à celui de la licence.

Il est de tradition d'y découper l'enseignement de l'optique en deux domaines, souvent présentés comme disjoints, optique géométrique et optique ondulatoire. Comme le soulignait Lord Rayleigh (cité par Goodmann [1]), ce strict cloisonnement n'est pas de nature à construire une vision unifiée du domaine: *It is not to be denied that the too rigid separation of optics into geometrical and physical has done a good deal of harm, much that is essential to a proper comprehension of the subject having fallen between the two stools.* Les difficultés de conciliation repérées chez les élèves ou étudiants ont déjà fait l'objet de recherches en didactique, il est vrai peu nombreuses ([2 – 9]). Il en ressort que, le plus souvent, les étudiants, voire les enseignants, font une analyse de la situation en termes d'« onde » ou de « rayon », ces concepts conservant la signification attribuée en optique géométrique : notamment, le concept de phase est en quelque sorte gommé. Ces résultats, complétés par l'analyse d'extraits de manuels, seront rappelés dans une première partie.

Vient ensuite la question : Comment aider ceux qui apprennent à mieux concilier optique géométrique et optique ondulatoire ? Certes, tout le monde s'accorde sur le fait que l'optique géométrique n'est qu'une version limite de l'optique ondulatoire et que, par conséquent, toute situation d'optique géométrique peut faire l'objet d'une analyse ondulatoire. Mais, cela dit, il apparaît souhaitable de souligner le bon usage de résultats d'optique géométrique dans des situations ondulatoires, pour éviter la pure et simple incohérence. En effet, si l'on peut tracer des trajets suivis par la lumière dans une situation ondulatoire, une expérience de fentes d'Young par exemple, c'est bien encore en s'appuyant sur des résultats d'optique géométrique. Cela impose notamment d'éviter l'association bi-univoque souvent observée : lentille alors optique géométrique, dispositif diffractant alors optique ondulatoire. En effet,

une même lentille peut aussi bien donner naissance à l'image stigmatique d'un objet, - le modèle géométrique peut alors suffire -, qu'à une figure de diffraction pour laquelle un modèle ondulatoire s'impose. De même, dans l'analyse d'une situation interférentielle, la présence des lentilles amène souvent à mettre en œuvre leurs propriétés classiquement utilisées en optique géométrique. Et toute la difficulté est de ne pas aller trop loin en donnant à certains tracés un sens qu'ils ont perdu dans la situation ondulatoire considérée.

Dans cet article, les quelques propositions faites engagent à une plus forte prise en compte du principe de superposition, via, en particulier, une analyse « par l'aval » des situations. Il s'agit de quelques guides et garde-fous suggérés pour faciliter la construction d'une progression conceptuelle qui prenne en compte les difficultés des différents acteurs et vise la cohérence, à un niveau d'enseignement inférieur ou égal à la licence.

Ainsi, observant la tendance forte des étudiants à effectuer une lecture « géométrique » des situations, nous soulignons ici, d'une part, les risques potentiels de la construction d'Huygens pour l'introduction de la diffraction et, d'autre part, les difficultés de mise en œuvre du principe d'Huygens-Fresnel, pour ce qui concerne le statut des sources dites « secondaires » et l'analyse de la formation d'images en optique de Fourier<sup>1</sup>.

## 1. Difficultés de mise en œuvre du principe de superposition

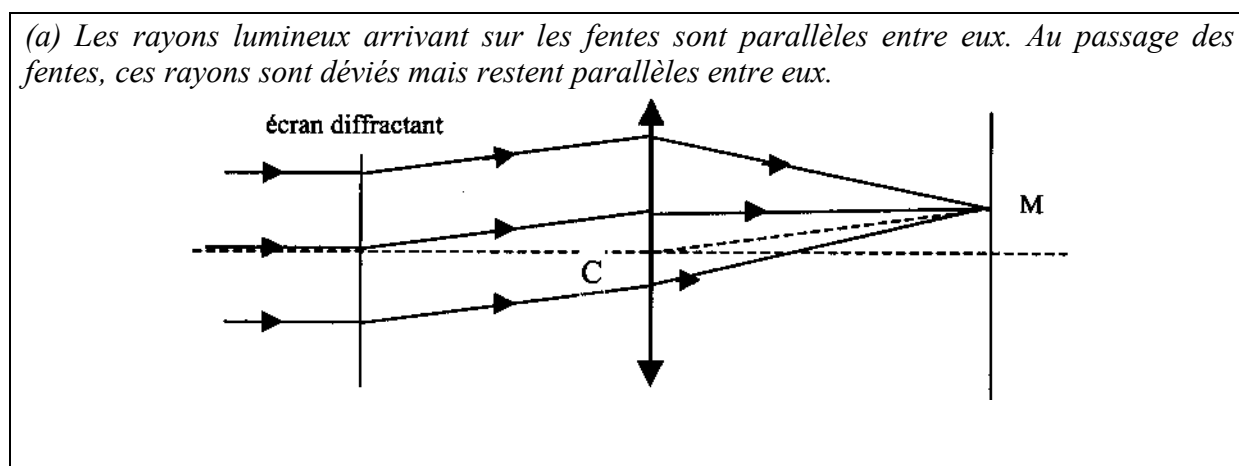
Nous rappelons, en guise d'entrée en matière, les résultats marquants issus d'enquêtes menées auprès d'étudiants (2<sup>ème</sup> et 3<sup>ème</sup> année universitaires) et d'enseignants, le tout étayé par quelques extraits de manuels ([2 - 6])<sup>2</sup>. Les points de convergence observés font penser que certaines idées, qui nous semblent mériter discussion, sont très répandues et résistantes.

### 1.1. Du côté des étudiants

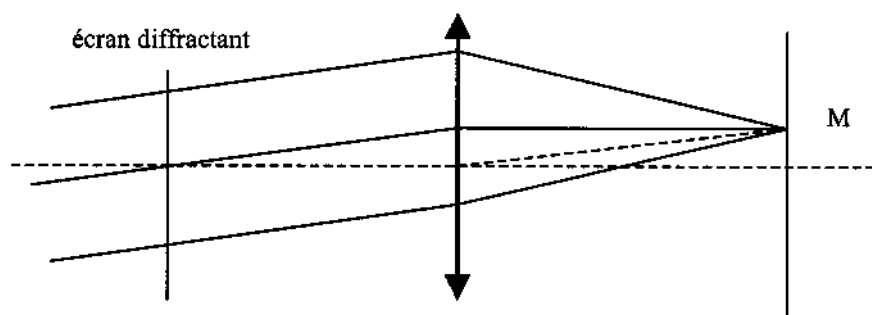
Deux réponses d'étudiants (encadré 1) plantent le décor. Il s'agit d'une question de partiel de licence<sup>3</sup> dans laquelle il était demandé de justifier, d'une part, la construction des chemins suivis par la lumière après trois fentes d'Young<sup>4</sup> pour atteindre un point M du plan focal image d'une lentille et, d'autre part, la possibilité, pour la lumière, de suivre ces trajets.

#### ENCADRE 1

Diffraction d'une onde plane par trois fentes d'Young : des réponses d'étudiants marquées par une analyse « géométrique ».



(b) L'écran  $E$  est dans le plan focal image de la lentille  $L$ . Donc le point  $M$  est l'image d'un objet venant de l'infini. (...)



La première de ces réponses (encadré 1a) emprunte, pour décrire ce qui se passe au passage d'une fente d'Young, un vocabulaire explicitement géométrique : chaque rayon serait « dévié » comme une entité dont n'aurait changé que la direction de propagation, le parallélisme des rayons incidents se trouvant maintenu dans cette opération de « déviation ». Rien n'indique, dans cette réponse, que c'est le point  $M$  choisi dans le plan focal qui, en fait, a déterminé la sélection de ces trajets inclinés parallèlement à la direction  $CM$ , où  $C$  est le centre optique de la lentille. L'histoire des « rayons » au passage des fentes semble ne rien devoir à ce qui est disposé au-delà.

La seconde réponse (encadré 1b) va un peu plus loin. Le point  $M$  est envisagé cette fois comme « image » d'un point à l'infini. La vision de trois lignes parallèles convergeant au-delà de la lentille en un point du plan focal déclenche manifestement l'association classique d'optique géométrique : point à l'infini, image au plan focal. Les trous, eux, ont perdu toute fonction. Ces trois trajets, où rien n'indique la phase, font figure, implicitement, de représentants d'une onde plane. L'idée de superposition d'ondelettes cohérentes a fait place à une lecture purement géométrique de la situation, où la lentille joue son rôle imageur de manière on ne peut plus classique.

Chacun des aspects relevés dans ces deux réponses n'a rien d'anecdotique. Une enquête auprès d'étudiants de Mathématiques Spéciales et de Licence ([4]) en démontre l'importance déterminante dans les réactions d'étudiants de ces niveaux. Nos résultats à propos de la diffraction par trois fentes d'Young montrent par exemple que 80% des étudiants consultés effectuent un calcul correct de l'amplitude au point  $M$  alors que moins de 20% d'entre eux fournissent une justification de ce qui se produit au passage des fentes évoquant la diffraction.

## 1.2. Du côté des enseignants

Les difficultés relevées chez des étudiants peuvent être rapprochées, tout au moins de façon partielle, du discours de certains enseignants, lesquels étaient consultés sur des propositions de stratégie d'enseignement ([3], [6]).

Ainsi, ce commentaire, à propos de la situation précédente des trois fentes d'Young.

*Moi, j'accepterais de considérer que la perpendiculaire à des rayons parallèles entre eux, même si ce sont des rayons pris comme ça dans la masse d'un tas de rayons divergents, (...) (comme) une sorte de plan d'onde, qui deviendra une surface d'onde qui convergerait ici (au point  $M$ ).*

Ce commentaire exprime bien l'idée de sélection, celle que les trajets envisagés sont « pris dans la masse d'un tas de rayons divergents ». Mais l'association des trajets sélectionnés est malgré tout présentée par l'enseignant comme une « sorte » d'onde transformée en onde sphérique par la lentille. Cette argumentation, qui ne dit rien de la phase associée à chaque trajet, s'apparente à une analyse typique d'optique géométrique où il s'agit de suivre le parcours d'un objet identifié, une onde. Ceci pourrait bien traduire l'unicité du rôle attribué à la lentille, à savoir celui de système imageur.

### 1.3. Dans les manuels

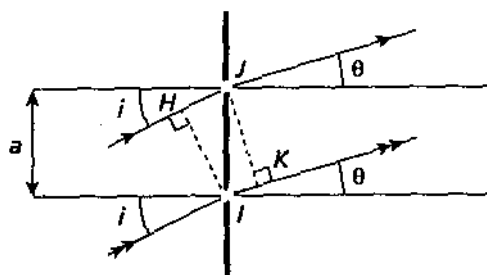
Nous retrouvons dans les manuels des approches analogues à celles commentées ci-dessus et qui, selon nous, posent un problème de cohérence. Un exemple illustre toute la difficulté d'y voir clair, toujours à propos d'une figure de diffraction dans le plan focal d'une lentille.

Il s'agit d'un réseau de fentes (Encadré 2). Dans cet extrait [10], certes hors contexte, tout ce qui pourrait amener à différencier la situation de superposition présentée de celle d'une simple réfraction de l'onde plane au passage des fentes se trouve gommé tant au niveau de la schématisation<sup>5</sup> qu'au niveau des commentaires. A considérer les « surfaces équiphasés » évoquées, on en oublierait presque qu'il s'agit tout de même de calculer des différences de marche pour appliquer le principe de superposition sur l'écran d'observation. Tout laisse penser ici qu'il s'agit de suivre le parcours d'un même « rayon » depuis la source jusqu'à l'écran d'observation : même symbolisation avant et après le réseau, représentation des seuls trajets « utiles », aspects graphiques renforcés par le commentaire « le rayon marqué d'une flèche (...) alors que celui marqué de deux flèches (...) », analyse identique des deux côtés du réseau avec plans d'onde et théorème de Malus à l'appui<sup>6</sup>.

#### ENCADRE 2

Calcul de la différence de marche à l'infini entre deux trajets correspondant à deux fentes successives d'un réseau (extrait de [10]) : même statut des tracés avant et après le réseau ?

*Pour le faisceau incident comme pour le faisceau diffracté, les surfaces d'onde sont des plans perpendiculaires à la direction des rayons.(...) D'après le théorème de Malus, les surfaces d'onde ou surfaces équiphasés, sont perpendiculaires aux rayons lumineux<sup>7</sup> ; les traces de ces surfaces d'onde sont représentées par IH et JK. Ainsi, le rayon marqué d'une flèche sur le schéma parcourt le trajet supplémentaire HJ, alors que celui marqué de deux flèches parcourt le trajet supplémentaire IK.*



#### 1.4. Une expérience très classique : vers un nouvel éclairage du contenu ?

L'articulation des points de vue géométrique et ondulatoire à ce niveau, hors optique de Fourier généralisée, ne va donc pas de soi. Ce premier tour d'horizon permet d'illustrer des points sensibles: lecture géométrique des schémas avec oubli de la phase, association automatique d'un dispositif à l'usage d'un modèle, non prise en compte de la multiplicité des trajets envisageables à la sortie d'un dispositif diffractant. Un dernier exemple fournit maintenant non seulement une confirmation de l'importance de ces divers aspects, mais aussi l'occasion d'introduire puis d'illustrer une proposition de clarification. Il s'agit d'une expérience qui fait souvent partie des séances de travaux pratiques : l'« agrandissement » de franges d'Young à l'aide d'une lentille<sup>8</sup>.

Le schéma donné en figure 1 a été produit par un étudiant pour expliciter la situation.

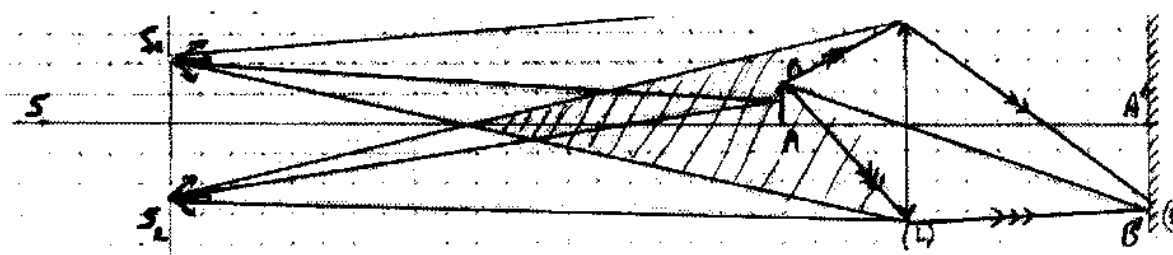


FIGURE 1

« Agrandissement » de franges d'interférences à l'aide d'une lentille :

Un schéma d'étudiant illustrant un cloisonnement des domaines géométrique et ondulatoire.

Ce schéma est établi sur un cloisonnement : on fait tout d'abord de l'optique ondulatoire pour obtenir des franges d'interférences puis de l'optique géométrique pour expliquer la formation de leur image. Or, pour pouvoir considérer les franges d'interférences comme un objet dont la lentille forme l'image, le principe d'Huygens doit être mis en œuvre. Mais ce n'est que sous certaines conditions que les sources constituant cet « objet lumineux »<sup>9</sup> peuvent être considérées isolément, comme en optique géométrique. Le statut des sources est ici un point critique engageant à donner un nouvel éclairage à cette situation. Il se trouve qu'on y trouvera un accès simplifié à la solution de questions pour lesquelles le schéma commun (fig. 1) se révèle une entrave [3, 5]. Ainsi ce schéma suggère à tort que l'effet d'un cache sur la lentille est une atténuation d'ensemble de la luminosité des franges observées sur l'écran comme dans une correspondance classique d'optique géométrique. En fait, cacher la moitié de la lentille conduit à l'obscurité sur une moitié de l'écran.

## 2. Un nouvel éclairage du contenu : la sélection par l'aval

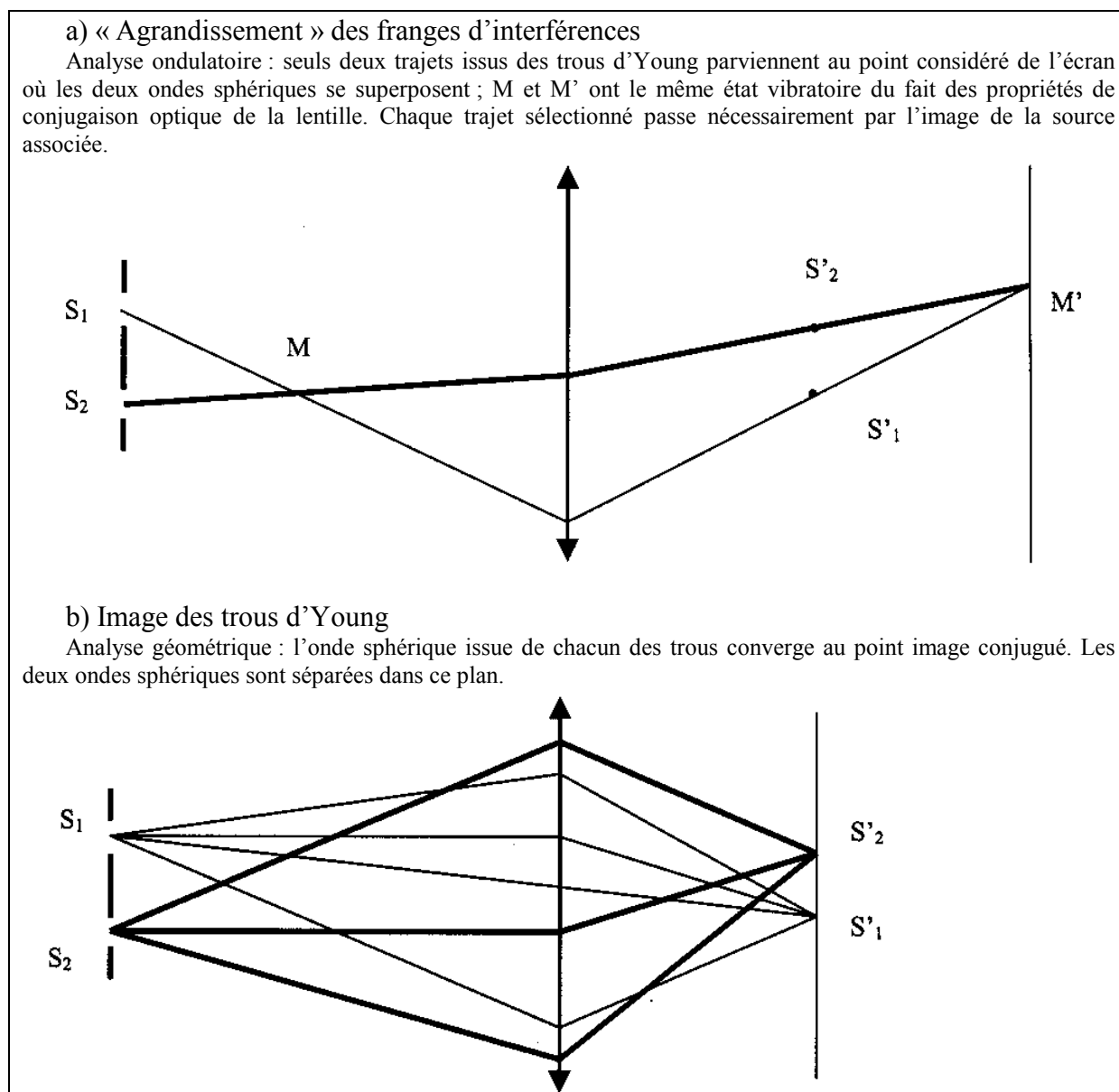
Pour clarifier l'analyse des situations impliquant imagerie optique et diffraction et notamment celle d'« agrandissement » des franges d'interférences, nous proposons un éclairage du contenu de la physique qui accentue l'idée de sélection par l'aval (voir [2 - 6]). Ceci consiste à souligner que c'est le point d'arrivée qui sélectionne les trajets de lumière<sup>10</sup>. Il s'agit en quelque sorte d'une analyse à « rebrousse-lumière » [12]. Les schémas de l'encadré 5 présentent cette analyse par l'aval pour la situation d'« agrandissement » de franges d'interférences. Le principe de superposition est mis sur le devant de la scène puisque l'on est amené à s'interroger sur le statut des groupements de trajets sélectionnés par le point

d'arrivée : s'agit-il d'une onde unique à structure simple (plane ou sphérique) ? La réponse est contrastée selon le point d'arrivée, et n'est positive que dans le cas où l'écran est à la position conjuguée des sources (encadré 3b). Pour toute autre position de l'écran, c'est en terme de superposition d'ondes qu'il faut penser la situation, et la sélection des deux seuls trajets pertinents se fait très simplement en partant de l'aval (voir encadré 3a).

### ENCADRE 3

#### Sélection par l'aval des trajets et statut des tracés, pour deux trous d'Young (« ponctuels »)

(on néglige ici la diffraction par la lentille, on ne fait pas usage du principe d'Huygens entre les trous d'Young et l'écran d'observation)



Cette analyse à « rebrousse-lumière » n'est que rarement explicitée dans l'enseignement<sup>11</sup>, probablement à cause de la faveur dont jouit, chez les enseignants comme chez les étudiants, une vision historique des événements, la lumière, ou l'onde, ou le rayon, vivant traditionnellement ses aventures séquentiellement, préférablement de gauche à droite. La mécanique quantique nous dit pourtant tout ce que détermine le récepteur !

Bien sûr, la situation se complique dans le cas où le stigmatisme du système optique n'est pas suffisant. L'analyse nécessite alors classiquement, au niveau de la Licence, une nouvelle mise en œuvre du principe d'Huygens-Fresnel quelque part entre les trous d'Young et l'écran.

C'est sur cette mise en œuvre du principe d'Huygens-Fresnel dans l'enseignement que se centre la suite de cet article. Il ne sera fait mention du modèle du « spectre d'ondes planes » (voir l'annexe pour quelques précisions sur ce modèle) que pour signaler sa difficile mise en œuvre et de possibles confusions.

### 3. Enseignement du principe d'Huygens-Fresnel : quelles difficultés ?

C'est sur le principe d'Huygens-Fresnel que s'appuie la première interprétation de la diffraction présentée au niveau universitaire. Ce principe permet de modéliser un objet diffractant comme un ensemble de sources d'ondes sphériques, et nous évoquerons des situations où ces sources sont cohérentes.

#### 3.1 Rappel sur le principe d'Huygens-Fresnel

Ce principe consiste à remplacer la situation complexe résultant de la superposition entre onde incidente et onde ré-émise par l'écran diffractant par une situation équivalente plus simple<sup>12</sup>. Il peut s'énoncer de la manière suivante :

- la vibration lumineuse en un point P situé après une surface diffractante atteinte par une onde monochromatique incidente est la somme des vibrations lumineuses en P des ondelettes à surface d'onde sphérique qui seraient émises par chaque élément de la surface diffractante ;
- l'ondelette fictive due à un élément infinitésimal de surface a une amplitude proportionnelle à l'aire de cette surface élémentaire et à l'amplitude de l'onde incidente sur cette surface<sup>13</sup>.

Il ne s'agit plus aujourd'hui d'un principe puisque moyennant certaines hypothèses, on peut très bien le déduire de la théorie de Maxwell (voir par exemple [15]). Il faut noter le caractère fictif des sources dites secondaires - interprétation du résultat d'un calcul fort complexe faisant appel à une analyse globale de la situation – ainsi que l'intervention simultanée de toutes les sources, à l'opposé d'une vision de la diffraction comme un effet de bord. Dans la superposition des ondelettes, leur phase est un aspect essentiel.

Les conditions de validité de ce principe sont les suivantes : les ouvertures sont grandes par rapport à la longueur d'onde, on ne prend pas en compte les sources d'Huygens-Fresnel situées trop près des bords, l'observation s'effectue suffisamment loin de l'ouverture et dans des directions voisines de l'onde incidente<sup>14</sup>.

Pour introduire cette analyse de la diffraction, la construction d'Huygens décrite ci-dessous est souvent utilisée. A la lumière des questions soulevées plus haut, nous nous intéressons maintenant aux bénéfices que peuvent retirer les étudiants d'une telle construction mais également aux risques qu'elle comporte.

### 3.2 La construction d'Huygens : facteur favorable à la compréhension du principe d'Huygens-Fresnel ?

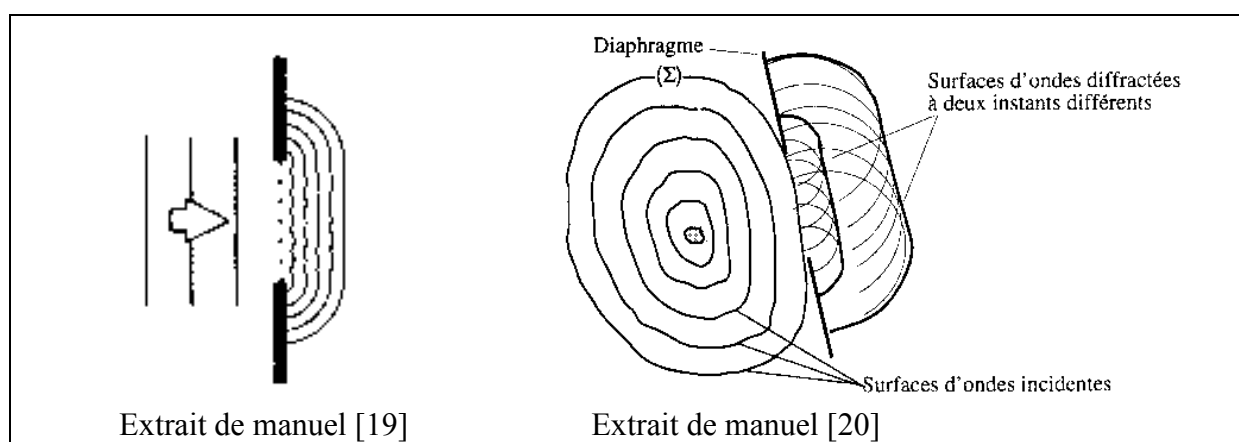
Cette construction s'appuie sur le principe du même nom<sup>15</sup>. Il s'agit à partir des sources d'Huygens ou d'une surface d'onde quelconque<sup>16</sup> de construire une nouvelle surface d'onde comme surface enveloppe des ondelettes. Une passerelle serait ainsi jetée entre optiques géométrique et ondulatoire<sup>17</sup>.

S'agissant de la présentation de la diffraction, cette construction semble intéressante dans la mesure où elle met l'accent sur la multiplicité des ondelettes issues des sources secondaires.

Toutefois, certaines réserves peuvent être faites sur son usage en enseignement.

#### ENCADRE 4

Construction d'Huygens pour illustrer la diffraction par une ouverture : Aide à la compréhension du principe d'Huygens-Fresnel ?



Ainsi, sur les figures de l'encadré 4, rien ne met garde sur les conditions de validité du principe d'Huygens-Fresnel que la construction est censée illustrer. Surtout, plutôt qu'à une superposition de *toutes* les ondelettes émises par l'ouverture, cette schématisation pourrait faire penser à la progression d'une onde par action de proche en proche entre sources voisines un peu à la manière dont Huygens lui-même semblait envisager le phénomène [16]. Ces schémas risquent également de renforcer l'idée que les bords d'une ouverture soient les seuls à déterminer la modification de l'onde incidente<sup>18</sup>, une idée opposée à l'analyse d'Huygens-Fresnel mais souvent rencontrée chez les étudiants (voir [7], [9]).

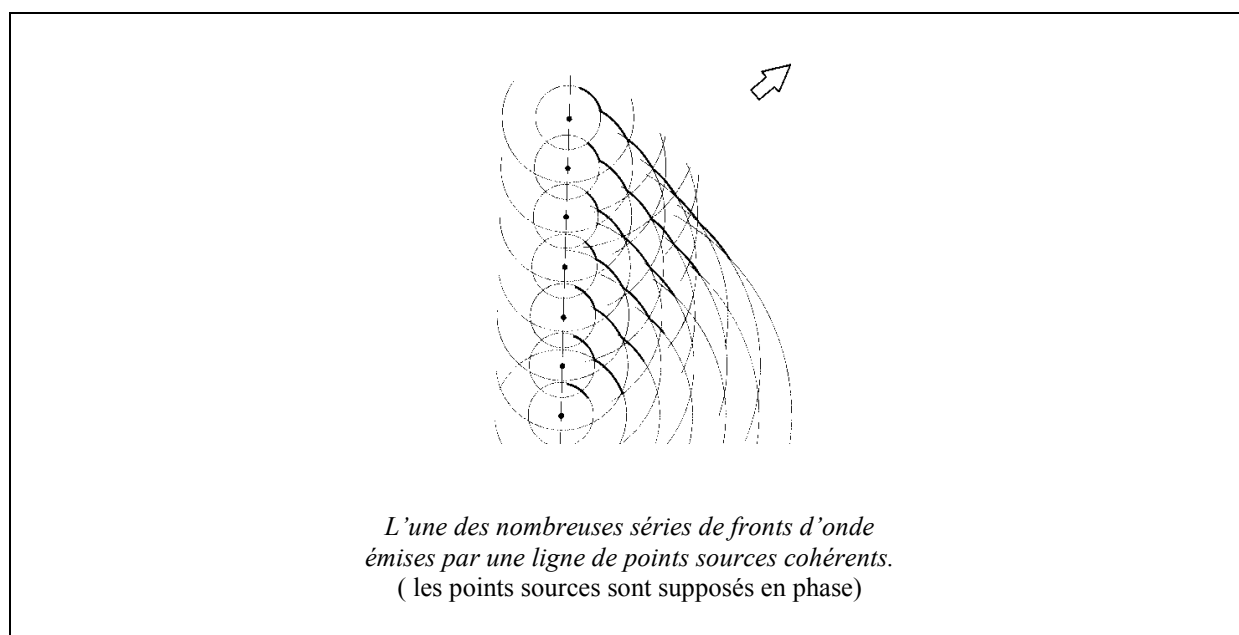
La construction d'Huygens, à elle seule, ne permet pas de présenter la modulation d'amplitude sur une surface d'onde et donc fait disparaître l'importance de leur phase dans la superposition des ondelettes. Ce gommage de la superposition peut amener à penser le phénomène plus en termes d'« accumulation de lumière » qu'en termes de superposition de *toutes* les ondelettes concernées, ainsi ce commentaire d'Huygens (cité dans Ronchi [21]) : *Les ondes sont sensibles seulement là où beaucoup* (c'est nous qui soulignons) *d'ondes élémentaires se superposent*. Assez ironiquement, on pourrait conclure que la construction proposée en encadré 4 convient d'autant mieux que l'on se rapproche du cas d'ouverture très large, où aucun obstacle ne vient sérieusement perturber l'onde étudiée<sup>19</sup>.



Ces difficultés de prise en compte de la superposition des ondelettes peuvent encore s'aggraver avec l'utilisation de pseudo-construction d'Huygens (voir encadré 5). Quelle signification donner à ces « fronts d'onde » le long desquels toutes les ondelettes sont déphasées, certes d'un nombre entier de fois  $2\pi$ ? L'idée, graphiquement suggérée, est que ces fronts d'onde proches de l'objet diffractant résultent certes d'ondelettes, mais par assemblage de morceaux dont chacun est attribuable à une portion différente de cet objet. Que dire, en outre, du fait que cette construction soit insensible au nombre total de sources ? Tout ceci interdit de voir dans l'onde ainsi bricolée une composante de Fourier, que ce soit dans l'approche d'Huygens-Fresnel ou de celle du « spectre d'ondes planes » (voir annexe).

#### ENCADRE 5

Une construction contestable (extrait de [19])



Au vu de ces réserves, l'intérêt pédagogique de la construction d'Huygens pour introduire la diffraction apparaît mince. Cette approche risque plutôt de desservir la compréhension du principe d'Huygens-Fresnel<sup>20</sup> et celle de l'idée, indissociable, que le champ au delà de l'ouverture la « connaît » tout entière.

### 3.3. Mise en œuvre du principe d'Huygens-Fresnel

Nous nous intéressons maintenant à la mise en œuvre proprement dite de ce principe. Envisageons de ce point de vue la modélisation d'un objet diffractant dont on veut former l'image à l'aide d'un système optique, une lentille convergente par exemple. De façon prévisible, des difficultés révélées par une situation aussi simple que celle des trous d'Young réapparaissent ici.

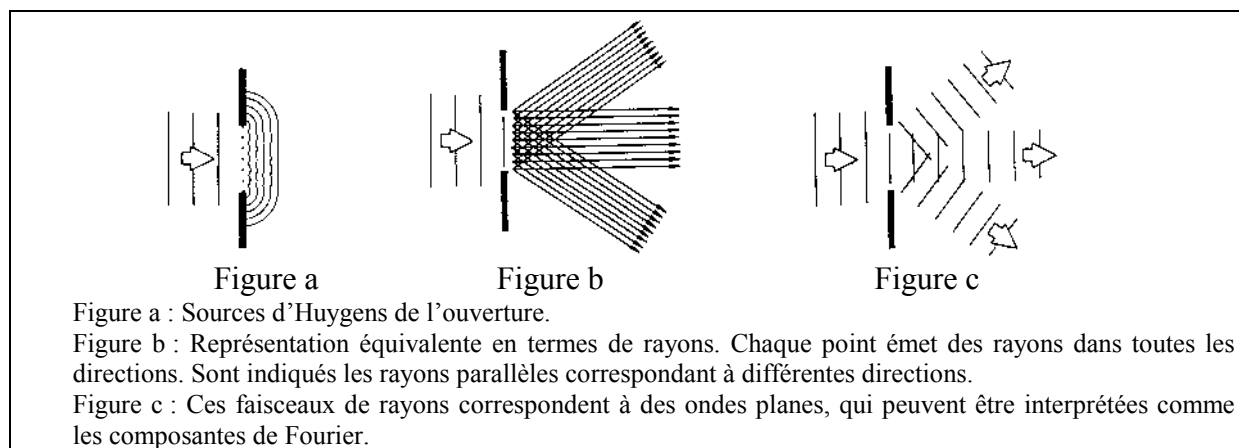
- *Cohérence de la présentation : cas d'une ouverture diffractante.*

L'objet dont on souhaite former l'image peut être une ouverture diffractante éclairée par une onde plane ([3], [10]). Les figures de l'encadré 6 illustrent les problèmes de cohérence – intellectuelle<sup>-21</sup> qui peuvent alors se présenter.

Les figures (a) et (b) (encadré 6) s'appuient très clairement sur le principe d'Huygens-Fresnel. Même si la figure (c) peut être relative, dans l'esprit de l'auteur, à un modèle de décomposition en ondes planes (voir annexe), le commentaire n'affiche en rien le soudain basculement de l'approche Huygens-Fresnel vers un autre modèle, et laisse planer le doute sur cette « correspondance » entre les faisceaux de rayons de la figure (b) et les ondes planes de la figure (c), une remarque qui rejoint notre discussion précédente sur les "ondes planes" issues de deux ou trois trous. Cette confusion peut encore s'accroître lorsqu'il est dit que la figure (b) est une « représentation équivalente en termes de rayons » de la figure (a), laquelle illustre la progression d'enveloppes typique de la construction d'Huygens. Ce raccourci passe sous silence qu'il s'agit, en figure b, de la localisation à l'infini de la superposition des ondelettes du cadre Huygens-Fresnel, et donc de trajets sélectionnés « par l'aval », tandis que la figure a se constitue, elle, entièrement par « l'amont » du flux lumineux.

#### ENCADRE 6

Un document sur la diffraction d'une onde plane par une ouverture : Présentation cohérente ?  
( extrait de [19])



Nous poursuivons cette analyse de cohérence en abordant le statut des sources d'Huygens-Fresnel. Il s'agit ici encore de souligner les risques potentiels d'incompréhension, compte tenu de la tendance commune à effectuer une lecture « géométrique » des situations.

- *Statut des sources d'Huygens-Fresnel*

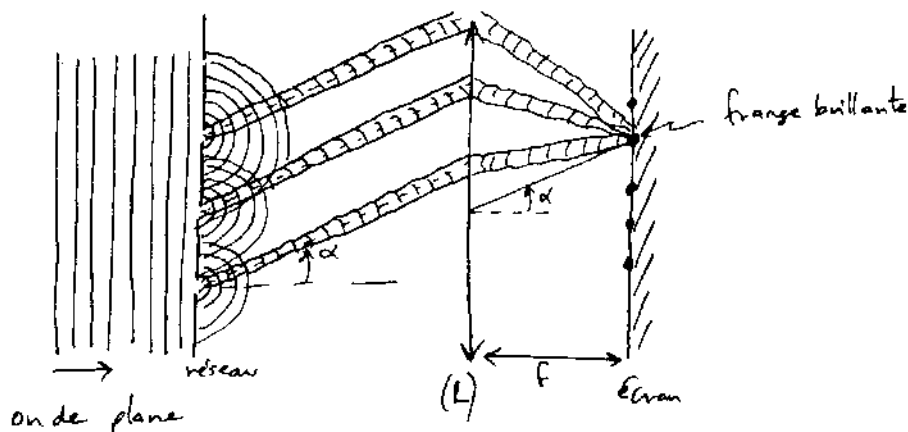
Considérons le commentaire et le schéma de l'encadré 7. Ceux-ci ont été fournis par un enseignant en réponse à un questionnaire [3] sur le statut des tracés représentés lorsqu'il s'agit d'obtenir une figure de diffraction d'un réseau dans le plan focal d'une lentille.

## ENCADRE 7

Diffraction d'une onde plane par un réseau : De l'énergie sur des chemins de phase<sup>22</sup>

Commentaire et schéma d'un enseignant :

Chaque fente du réseau rayonne une onde cylindrique. Avant ( $L$ ), la portion du champ lumineux qui converge vers la frange brillante repérée par  $\alpha$  est formée des secteurs de direction  $\alpha$  issus de chaque fente.



Dans cette situation de superposition, les trajets pertinents n'ont de sens que comme trajet de phase : on dit bien, rituellement, que « les énergies ne s'ajoutent pas ». Or ce qui semble dominer l'analyse discutée ici, à en juger par l'extension spatiale des tracés, c'est l'idée d'une propagation de l'énergie. Ce que ce dessin associe à une direction émergente, c'est bien plus une partie constituée du flux lumineux qu'un élément d'analyse d'une superposition locale à l'aide de chemins de phase. La superposition constructive *en certains points du plan focal* de toutes les ondelettes issues des fentes du réseau semble se trouver ramenée sur ces mêmes fentes, via les « secteurs » représentés. De là à penser que chacune de ces fentes se comporte comme une source émettant isolément de l'énergie dans des directions particulières, il n'y a qu'un pas.

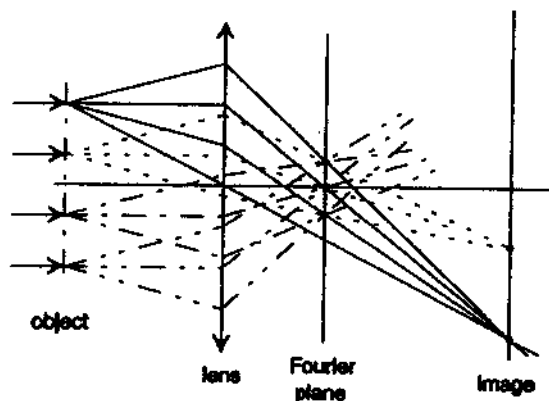
On retrouve nettement dans des extraits de manuels cette tendance à attribuer une propriété d'ensemble attachée à la structure spatiale périodique de l'objet à des zones particulières de cet objet (encadré 8).

## ENCADRE 8

Diffraction d'une onde plane par un objet diffractant de structure périodique : un extrait de manuel qui engage à une « relocalisation-amont » de la superposition.

a) Extrait de [23] (p250)

*The rays from a point have the directions of the diffracted waves, which may be restricted to particular directions, imposed by the object structure and illumination wave front. In this case, therefore, each object point is defined by a limited number of rays, which indicate the outgoing directions of energy propagation.*



Le commentaire cité (encadré 8) est très explicite sur le point de vue de l'auteur : c'est la structure de l'objet cohérent qui impose la propagation de l'énergie dans un nombre limité de directions à *partir de chaque point objet*. Ceci engage fortement à attribuer aux points de l'objet des propriétés intrinsèques, comme si cela résumait tout ce qui pouvait se passer au-delà de l'objet. On est alors bien loin de l'idée d'une détermination locale, par l'aval, des trajets pertinents pour l'analyse de la superposition.

Le risque de « relocalisation-amont » de la superposition illustré ici apparaît souvent dans des situations où diffraction et interférence se combinent. Des investigations ([7], [8]) ont déjà été menées auprès d'étudiants pour repérer certaines de leurs difficultés sur ce terrain. Pour une expérience de fentes d'Young par exemple, une majorité des étudiants consultés (60%, N=600, après un cours sur les interférences) indique que l'on verra encore tout ou partie des franges d'interférences après avoir masqué une des fentes. En outre, ne plus retenir, dans la situation, que les « directions de propagation de l'énergie » n'incite guère à réaliser l'importance de la phase de l'amplitude résultante *au point d'arrivée considéré*. Or cette phase est une signature, invisible dans l'éclairement observé, de la position de la fente. Remarquons au passage que les exercices classiques, qui proposent d'évaluer des largeurs de fentes à partir de différentes figures de diffraction, ne préparent pas véritablement à une réflexion sur ce point.

Il nous semble qu'il faudrait attirer l'attention des étudiants sur ce facteur de phase, « invisible » sur un écran mais essentiel à la compréhension de la superposition des figures de diffraction, et ceci *avant* de les amener à distinguer ce qui relève du phénomène d'interférences entre motifs de ce qui tient à la diffraction par un motif.

Cet accent fort mis sur la phase d'une amplitude résultante est selon nous particulièrement nécessaire si l'on veut espérer une compréhension du processus de formation des images<sup>23</sup> dans le cadre de l'optique de Fourier.

- *Formation des images en éclairage cohérent : l'importance de la phase dans le plan de Fourier.*

L'approche de la formation des images, initiée par les travaux d'Abbe (1873) et souvent dénommée optique de Fourier<sup>24</sup>, s'effectue suivant deux étapes. La figure de diffraction obtenue dans le plan de Fourier<sup>25</sup>, résultat de la superposition des ondelettes émises par chaque point de l'objet, constitue la première étape du processus<sup>26</sup> (voir figure 2).

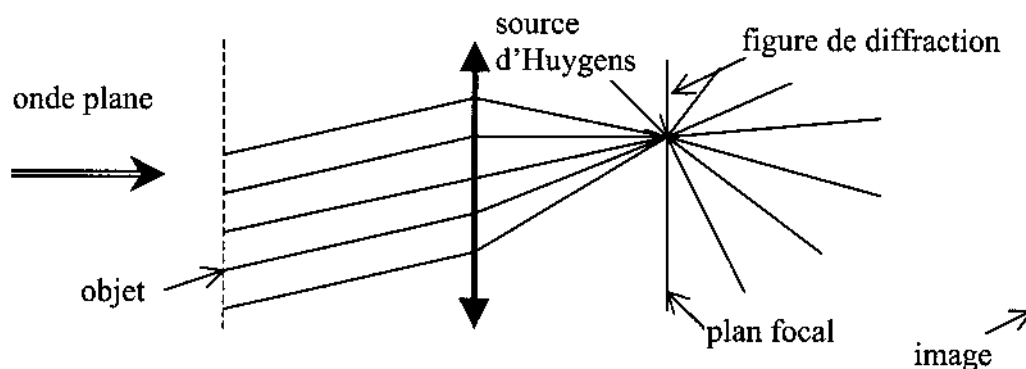


FIGURE 2

Processus de la formation d'image dans le cadre de l'optique de Fourier avec onde plane incidente : plan focal et plan de Fourier coïncident ici.

Dans une deuxième étape, on applique le principe d'Huygens à cette figure de diffraction. Il suffit alors de superposer en chaque point du plan conjugué de l'objet les ondelettes issues du plan de Fourier pour obtenir l'image de l'objet.

Il nous paraît important de souligner que c'est la phase attribuée à chacune des sources d'Huygens du plan de Fourier qui contient à elle seule l'information sur la position des plans objet et image. Ainsi, une translation de l'objet, ne conduisant qu'à changer la phase de l'amplitude en tout point du plan focal, ne modifie en rien l'éclairage d'un écran placé dans ce plan alors que la localisation de l'image change. Une telle observation peut paraître pour le moins surprenante pour des étudiants qui, oubliant la phase, auraient conservé une analyse « géométrique » de la situation en suivant les différentes étapes du processus comme les épisodes d'une histoire simplifiée : comment un même éclairage dans un plan intermédiaire entre plans conjugués pourrait-il conduire à une position différente de l'image ? Cette prise en compte de la phase ne va pas de soi, en particulier lorsque des spectres discrets obtenus à partir d'objets de structure périodique sont utilisés. Les trois points lumineux constituant le spectre d'un réseau sinusoïdal (si l'on ne tient compte ni des dimensions réduites du réseau, ni de celles de la lentille) peuvent facilement faire oublier d'une part, la superposition dont ces points sont le résultat et d'autre part, la phase respective qui doit leur être attribuée.

Il faut probablement admettre que la mise en œuvre dans l'enseignement du principe d'Huygens-Fresnel, concernant notamment le statut attribué aux sources et trajets de lumière, chemin de phase ou d'énergie, nécessite sa lecture stricte et son illustration précautionneuse. La sélection des trajets d'ondelettes pertinents – par l'aval – et l'évitement d'une lecture exclusivement géométrique des schémas ainsi obtenus semblent des ingrédients essentiels d'une analyse cohérente avec ce principe.

- *Le cas de la strioscopie*

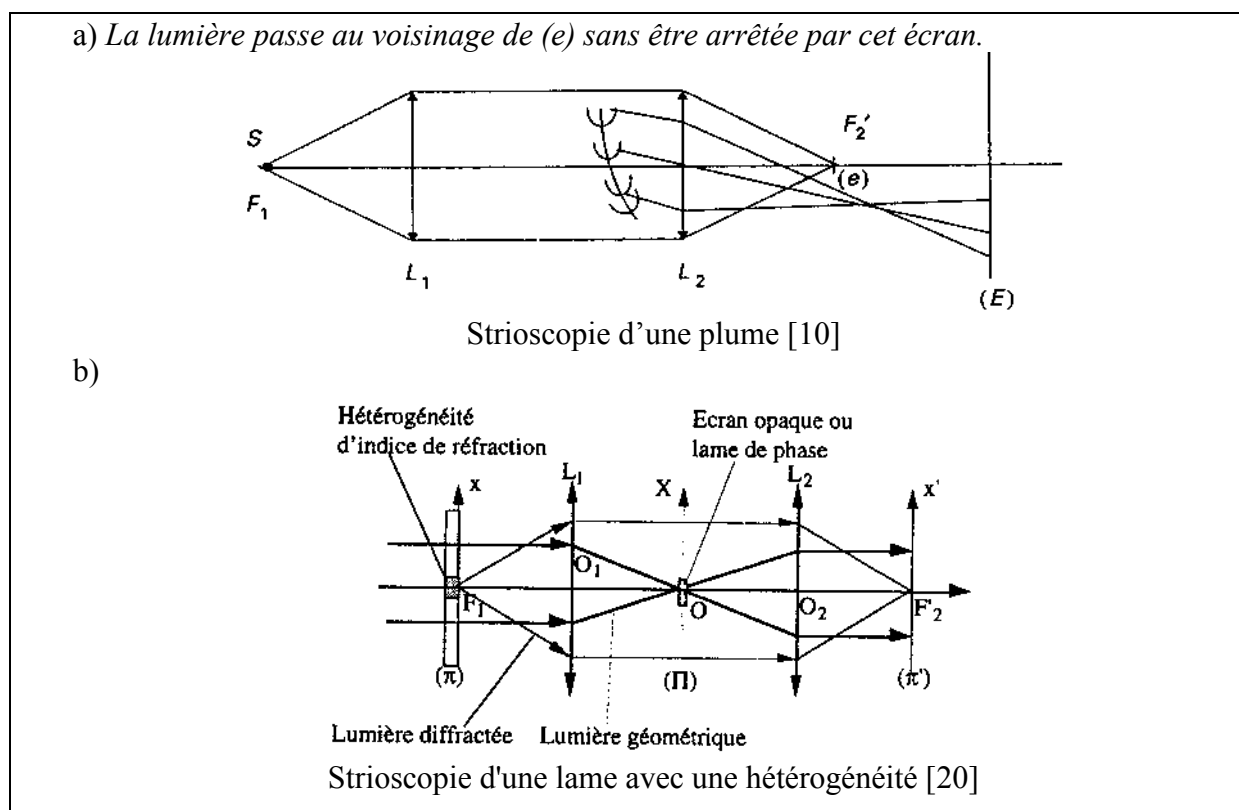
Dans un dispositif de strioscopie, la prise en compte de l'ensemble des phases dans le plan de Fourier est également tout à fait critique pour l'analyse de ce qui se passe au delà de ce plan. Or ce n'est pas ce que suggère un certain nombre de présentations où les trajets de lumière issus de l'objet diffractant sont présentés comme contournant de manière tout à fait géométrique le filtre situé dans le plan de Fourier. Ainsi, on peut lire dans l'encadré 9a cette légende pour une figure de manuel : "la lumière passe (...) sans être arrêtée" où toute idée d'application du principe d'Huygens-Fresnel au delà du plan du filtre est abandonnée.

Avec cette seule explication, on en dirait trop ou trop peu. Voir une image de la plume sur l'écran en présence du filtre alors qu'en l'absence de cette dernière, aucun éclairciment de l'écran n'est observé, suffit, nous semble-t-il, à affirmer que l'objet envoie de la lumière dans des directions autres que la lumière incidente. Si l'on veut aller plus loin, il faut être prudent pour ne pas introduire de confusion entre les rayons lumineux du champ résultant, qui peuvent effectivement passer autour du filtre, et les chemins de phase partant des sources d'Huygens-Fresnel modélisant la plume, pour lesquels le traitement peut difficilement être mis en jeu à un stade très précoce de l'étude de la diffraction.

Le fait que les schémas de ce type (voir aussi encadré 9b) permette de fait de prévoir la réponse correcte, ne dispense pas de s'interroger sur les risques qu'ils présentent en termes de compréhension pour les étudiants qui n'ont pas encore l'appui de l'optique de Fourier.

## ENCADRE 9

Strioscopie : Des extraits de manuels peu explicites sur la mise en œuvre du principe d'Huygens-Fresnel



#### 4. Conclusion

Cet article souligne les difficultés attachées à une mise en œuvre cohérente de démarches classiquement qualifiées respectivement de géométrique et d'ondulatoire, tout spécialement lorsque diffraction et imagerie se conjuguent dans une même situation. Pour dire vite, l'importance cruciale de la phase et de la superposition d'onde cohérentes est souvent masquée. Les discours – d'étudiants comme d'enseignants – sont alors exclusivement centrés sur les tracés géométriques, les fonctions traditionnellement prévalentes des dispositifs - imagerie pour les lentilles, diffraction pour un réseau -, et parfois la ré-attribution à chaque point source de l'objet diffractant de propriétés en fait attachées à un lieu d'observation.

La préoccupation qui inspire nos propositions est celle de cohérence intellectuelle, à ce niveau intermédiaire - typiquement la Licence – qui précède un traitement complet et intégré en optique de Fourier. Ces propositions, appuyées sur la connaissance des obstacles attendus, comprennent la suggestion de mettre en relief la multiplicité des trajets *a priori* envisageables après un objet diffractant, et d'accentuer l'idée de sélection par l'aval : c'est le point d'arrivée qui sélectionne les trajets de lumière pertinents pour l'analyse de l'amplitude lumineuse en ce point. Se trouve ainsi introduit un questionnement critique sur la nature des regroupements de tracés et par conséquent sur le statut de ces derniers : représentants d'une onde unique ou trajets de phase issus de points différents.

Ces propositions s'accompagnent de mises en garde sur les effets suggestifs de la construction d'Huygens appliquée à une ouverture diffractante, et plus généralement de schémas réputés efficacement illustratifs.

Au-delà des suggestions précises de dispositifs pédagogiques, tel l'usage que nous proposons du dispositif d'Young, c'est l'importance d'associer objectifs majeurs et détails critiques de pratique enseignante qui est au cœur de notre argumentation. A quoi bon, en effet, considérer que l'enseignant doit s'appuyer sur une analyse approfondie du contenu, développer la rigueur (entre autres choses), éventuellement tenir compte de telle ou telle grande théorie ou conviction sur l'enseignement, si c'est pour violer la simple cohérence de façon majeure, et sans prévenir, au détour d'un détail de pratique ([26], [27]). Il n'y a pas, derrière cette question, de point de vue maximaliste, ni de suggestions que l'on ne peut enseigner des théories que dans leur forme la plus complète et aboutie. C'est bien de la gestion de compromis qu'il s'agit et d'y éviter, autant que faire se peut, des sacrifices de cohérence inutiles.

## ANNEXE

### **A propos de la séparation des composantes du "spectre d'ondes planes" de l'onde diffractée.**

L'optique de Fourier peut s'appuyer, outre sur le principe d'Huygens-Fresnel, sur un modèle baptisé « spectre d'ondes planes » (voir par exemple [15] p45, [28] p301). Il s'agit, comme son nom l'indique, de décomposer l'onde diffractée par l'objet sur une base d'ondes planes solutions de l'équation de propagation. Le champ dans le plan de l'objet diffractant constitue alors la condition aux limites qui permet de déterminer les amplitudes à attribuer à chaque composante. Celles-ci sont, dans le plan de l'objet diffractant, les composantes de Fourier du spectre spatial de l'objet.

Dans le principe de cette approche, en tout point sur et au delà de l'objet, toutes les composantes apportent leur contribution au champ puisque toutes sont susceptibles d'avoir un plan d'onde contenant ce point. Les phases et même les amplitudes (dans le cas des très hautes fréquences spatiales) qui sont à prendre en compte pour chaque composante, varient pour différentes valeurs de la distance au plan de l'objet diffractant.

La question de la séparation spatiale de ces composantes à l'infini n'apparaît pas aussi évidente qu'on le laisse souvent entendre. En revanche, on voit bien qu'au plan focal d'une lentille convergente, pourvu que l'objet soit éclairé par une onde plane et que la diffraction par la lentille puisse ne pas être prise en compte, ces composantes se séparent spatialement, rejoignant en cela l'approche Huygens-Fresnel.



## NOTES

1 - Nous supposons que les étudiants ne disposent que du principe d'Huygens-Fresnel pour analyser les situations, ce qui est en général le cas pour le niveau universitaire considéré.

2 - Les résultats de [7], [8], [9] concernant les étudiants sont en accord avec les nôtres.

3 - Partiel de mai 1996 (Université Paris 7 Denis Diderot).

4 - Dans un premier temps, on indique aux étudiants que l'on se place dans une situation plus simple où chacune des fentes est remplacée par un trou très fin situé au milieu de chacune d'entre elles, trou assimilé à une source ponctuelle. La diffraction par les fentes sera prise en compte dans la deuxième partie du partiel.

5 - Pour plus de précisions sur les difficultés de lecture des schémas, voir [11].

6 - L'usage traditionnel du terme « déviation » pour l'étude des spectromètres qu'ils soient à prisme ou à réseau s'inscrit en fait dans le même registre d'ambiguïté [2].

7 - Ce théorème ne s'applique que dans le cas d'un faisceau lumineux isogène traversant un milieu isotrope.

8 - Situation ayant fait l'objet de nombreuses investigations de notre part auprès des étudiants comme des enseignants (voir [3], [4], [5], [6]).

9 - C'est le terme habituellement employé.

10 - Cette idée est particulièrement présente chez Feynman [13]. Il s'agit pour chaque situation de prendre en compte, dans une première étape, l'ensemble des trajets de lumière aboutissant en un point donné, tous ces trajets étant équiprobables.

11 - Voir nos résultats de recherche ([3], [6]).

12 - Pour une présentation simplifiée du rôle actif de l'écran, voir [14] p478.

13 - Rappelons que l'ondelette n'est pas émise de manière isotrope et que sa phase est en quadrature avance par rapport à l'onde incidente.

14 - Hors de ces limites, d'autres modèles (voir par exemple [15] p44) sont utilisés et permettent de présenter une carte du champ résultant notamment au niveau de l'ouverture.

15 - Le principe d'Huygens préfigure le principe d'Huygens-Fresnel mais ne s'identifie pas à celui-ci [16].

16 - Si cette surface d'onde existe dans la zone considérée, ce qui n'est pas le cas en des points de convergence de faisceau ou d'annulation du champ, limites de zone d'Airy ([17], p445) ou zone d'interférences destructives ([1], p1.9). Voir également [18], p111.

17 - On peut à partir du principe et de la construction d'Huygens retrouver les lois de Descartes dans des situations relativement simples. Il est en effet important de souligner l'équivalence entre différence de chemin optique le long des trajets et différence de phase, c'est-à-dire entre surface d'onde géométrique et surface équiphasé.

18 - Depuis Young (1802) qui eut l'idée de situer l'origine d'une onde diffractée au bord de l'ouverture, des modèles basés sur cette approche ont été proposés ([15], p44) mais ces derniers doivent bien être distingués du modèle de Huygens-Fresnel pour lequel il s'agit plus d'une limitation de l'extension de l'onde incidente que d'une action des bords de l'ouverture. La distinction entre ceux deux approches n'apparaît guère quand, lors de l'introduction de la diffraction à partir du principe d'Huygens-Fresnel, on trouve le commentaire suivant [10] : *La lumière est diffractée par le bord de l'écran.*

19 - Voir aussi [12].

20 - Ce point de vue ne fait pas l'objet d'un consensus. Ainsi, Maurines ([22], p190) regrette que le principe d'Huygens, construction de la surface enveloppe des ondelettes, ne serve pas davantage d'appui pour « reconstruire l'onde du niveau macroscopique à l'aide d'ondes élémentaires » en particulier pour « des situations ondulatoires de propagation d'une onde derrière une ouverture ».

21 - Voir toutes les difficultés rencontrées pour tenter de préciser les modèles utilisés [9].

22 - Les expressions "chemin de phase" et "chemin d'énergie" ont été introduites [12] pour clarifier ce que les tracés ne discriminent pas.

23 - Il s'avère relativement difficile de donner une définition claire de ce que l'on entend par image si on ne se limite pas au cas d'un système optique parfaitement stigmatique. Pour rejoindre l'usage courant, nous reprenons ici celle donnée par Goodman ([15], p84) : *distribution d'intensité lumineuse qui ressemble étroitement à l'objet*, en y ajoutant le maintien de la relation de conjugaison d'optique géométrique fixant les positions de l'objet et de son image. Cette acception permet d'éviter, d'une part, de considérer qu'il suffit que des plans soient optiquement conjugués pour que l'on puisse parler d'image et d'autre part, d'appeler « image » toute distribution d'intensité ressemblant à l'objet (ainsi tout disque lumineux observé sur un écran situé au delà d'une lentille n'est pas l'image d'un diaphragme circulaire éclairé par une onde plane).

24 - Elle s'appuie en effet sur deux transformations de Fourier successives, la figure de diffraction obtenue dans le plan focal d'une lentille étant la transformée de Fourier de la répartition d'amplitude complexe de l'objet à un facteur de phase près. A chaque point du plan focal sont associées des fréquences spatiales correspondant à la structure de l'objet. Les détails fins de l'objet correspondent à des fréquences spatiales élevées, c'est-à-dire à des points éloignés de l'axe optique. Pour plus de précision voir par exemple [15], [24]. Pour une approche simplifiée, voir [3] (annexe 1), [25].

25 - Le plan de Fourier s'identifie au plan conjugué du plan où se situe(nt) la (les) source(s) éclairant l'objet. Par exemple pour la situation d'« agrandissement » des franges (voir encadré 6), le plan de Fourier des franges est celui contenant l'image des trous d'Young. Plan de Fourier et plan focal de la lentille ne coïncident que si l'objet est éclairé par une (ou plusieurs) onde(s) plane(s).

26 - Nous rappelons qu'il ne s'agit pas ici du modèle du « spectre d'ondes planes ».

## BIBLIOGRAPHIE

- [1] Goodman, D. S. (1995) General principles of geometric optics, in *Handbook of Optics* (M. Bass (Ed), McGraw-Hill, USA) Vol I, 3-109.
- [2] Colin, P. (1997), Passage de l'optique géométrique à l'optique ondulatoire : l'idée de sélection par l'aval de l'information, Mémoire de tutorat du DEA de Didactique des Disciplines, Université Paris 7-Denis Diderot (disponible au LDSP).
- [3] Colin, P. (1999) Deux modèles dans une situation de physique : le cas de l'optique. Difficultés des étudiants, points de vue des enseignants et propositions pour structurer des séquences d'enseignement, thèse de Doctorat, LDSP, Université Paris 7 Denis Diderot.
- [4] Colin, P. & Viennot, L. (2000). Les difficultés d'étudiants post-bac pour une conceptualisation cohérente de la diffraction et de l'image optique, *Didaskalia*, 17, 29-54.
- [5] Colin, P. & Viennot, L. (2001a). Using two models in optics. Students' difficulties and suggestions for teaching, *Phys. Educ. Res. Suppl., Am. J. Phys.*, 69 (7), 36-44.
- [6] Colin, P. & Viennot, L. (2001b). Two models in optics : anticipating teachers' reactions. In R. Pinto & S. Surinach (Eds): *Physics Teacher Education Beyond 2000*, selected contributions of the GIREP Conference in Barcelona, Elsevier, 197-200.
- [7] Ambrose, B. S., Shaffer, P. S., Steinberg, R. N. & McDermott, L. (1999), An investigation of student understanding of single-slit diffraction and double-slit interference, *Am. J. Phys.*, 67 (2), 146-155.
- [8] Wosilait, K., Heron, P.R.L., Shaffer, P.S., & McDermott, L. C. (1999), Addressing student difficulties in applying a wave model to the interference and diffraction of light, *Phys. Educ. Res. Suppl., Am. J. Phys.*, 67 (7), 5-15.
- [9] Maurines, L. (2000), Les étudiants, la diffraction de Fraunhofer et la formation des images en éclairage cohérent, *Didaskalia*, 17, 55-99.
- [10] Faroux, J.-P. et Renault, J. (1998) *Optique*, Dunod, Paris.
- [11] Colin, P., Chauvet, F. & Viennot, L. (2002). Reading images in optics : students' difficulties and teachers' views. *International Journal of Science Education*, 24 (3), 313-332.
- [12] Viennot, L. (1996). *Le rayon lumineux en optique géométrique et en optique ondulatoire*, rapport interne LDPEs, Université Paris 7. (reproduit in Colin 1997)
- [13] Feynman, R. (1987) *Lumière et matière. Une étrange histoire*, InterEditions, Paris.
- [14] Crawford, F. S. Jr. (1968) *Waves, Berkeley physics course – volume 3*, McGraw-Hill, New-York.
- [15] Goodman, J. W. (1972) *Introduction à l'optique de Fourier et à l'holographie*, Masson & Cie, Paris.
- [16] Giancoli, D. C. (1993) *Physique générale 3. Ondes, optique et physique moderne*, De Boeck Université, Bruxelles, Belgique.
- [17] Born, M. & Wolf, E. (1980). *Principles of Optics. Electromagnetic Theory of Propagation, Interference and Diffraction of Light*, Sixth Edition, Pergamon Press, Oxford.
- [18] Dettwiller, L. (1990) *Qu'est-ce que l'optique géométrique ? Fondements et applications*, Collection Dunod Université, Bordas, Paris.
- [19] Hecht, E. (1987) *Optics*, 2<sup>ème</sup> édition, Addison-Wesley.
- [20] Chartier, G. (1997) *Manuel d'optique*, Hermès, Paris.
- [21] Ronchi, V. (1956) *Histoire de la lumière*, Armand Colin, Paris.
- [22] Maurines, L. (2001) Le raisonnement géométrique en termes d'objet dans la physique des ondes, Note de synthèse pour l'habilitation à diriger des recherches.
- [23] Bernardo, L. M. et Soares, O. D. D. (1993) Ray tracing analysis of imaging and Fourier transform, in L. C. Pereira et al. (Eds), *Proceedings of the GIREP Conference, Light and information*, Braga, Portugal, 250-254.
- [24] Duffieux, P.M. (1970) *L'intégrale de Fourier et ses applications à l'optique*, Masson, Paris.
- [25] Steward, E. G. (1987) *Fourier optics : an introduction*, 2<sup>nd</sup> edition, Ellis Horwood limited, Chichester, England.
- [26] Viennot, L. (2001) Relating research in didactics and actual teaching practice: impact and virtues of critical details, Selected contributions of the third meeting of ESERA in Thessaloniki, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, The Netherlands.
- [27] Viennot, L., Chauvet, F., Colin, P. & Rebmann, G. Designing strategies and tools for teacher training. The part of critical details, examples in optics. (soumis en février 2002 à *Science Education*).
- [28] Reynaud, F. et Bouchareine, P. (1997) Rappels d'optique physique : interférences et diffraction, in P. Bouchareine (Ed) *Optique instrumentale*, Les éditions de la physique, Paris.