

UN FORMALISME UNIQUE PEUT-IL DÉCRIRE LES PHÉNOMÈNES ACOUSTIQUES ET LUMINEUX ?

J.J.EMBRECHTS

Chercheur Qualifié du Fonds National de la Recherche Scientifique

Leçon donnée en séance publique et solennelle en la salle académique de l'Université de Liège, le 21 juin 1994, dans le cadre de la Thèse d'Agrégation de l'Enseignement Supérieur déposée par l'auteur.

1. Introduction

La question posée dans le titre pourrait, à première vue, recevoir une réponse immédiate.

En effet, si la nature du son est, sans conteste, ondulatoire, celle de la lumière, par contre, est encore controversée. La théorie ondulatoire, peaufinée par Huygens, Fresnel et Maxwell, s'oppose toujours à la théorie corpusculaire, introduite par Newton, et prolongée par la Mécanique Quantique au début de ce siècle.

Onde lumineuse ou photons ? Onde lumineuse ou corpuscules ? L'avenir tranchera peut-être dans ce débat historique. Mais l'on admet aujourd'hui la dualité, la complémentarité des deux théories qui, chacune, ont leur champ d'application.

A la question du début, la réponse pourrait donc être que, d'un point de vue fondamental, une seule théorie ne peut déjà, à elle seule, décrire tous les phénomènes lumineux, et la dissertation s'arrêterait ici. Cette manière d'éluder la question n'est cependant pas très constructive, et nous allons par la suite y répondre en nous confinant dans le cadre des phénomènes ondulatoires, c'est-à-dire finalement, ceux qui sont communs aux deux disciplines, l'Optique et l'Acoustique.

Nous nous placerons, en outre, dans le domaine des sciences de l'ingénieur et nous insisterons plus sur les principes physiques des phénomènes rencontrés, que sur les longs développements mathématiques, qui n'ont pas leur place dans un exposé aussi court.

Avant d'entrer dans le vif du sujet, il n'est pas inutile de présenter au moins une application où se pose la question du traitement simultanément de la lumière et du son. Imaginons un espace intérieur, soit une salle de spectacle ou un hall

industriel. Cet espace est étudié par l'acousticien et l'éclairagiste, et chacun mène son étude à l'aide d'un logiciel de simulation propre à sa discipline. Ces deux logiciels ont, en général, des parties fort semblables : le module de description de la salle, par exemple, ou encore le module de présentation des résultats.

Si nous montrons qu'il est possible de traiter simultanément la propagation des ondes sonores et lumineuses, il est alors envisageable de concevoir un logiciel de simulation unique, pluridisciplinaire, qui puisse, en une seule opération, assister les études d'Acoustique et d'Éclairage, d'où l'intérêt pratique de répondre à notre question du début.

2. Nature ondulatoire du son et de la lumière

Le son et la lumière ont donc tous deux la nature d'une onde. La lumière est une onde électromagnétique transversale, c'est-à-dire que les vibrations associées à l'onde sont perpendiculaires à la direction de propagation. La figure 1 illustre l'orientation des vecteurs champ électrique (E) et champ magnétique (H) : la direction de vibration est souvent associée à celle du champ électrique.

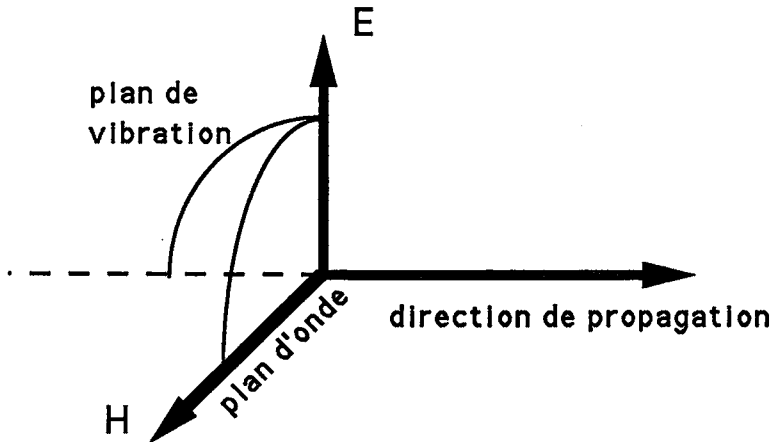


Figure 1 : La lumière est une onde électromagnétique.

La conséquence majeure est que l'on peut, à l'aide de dispositifs spéciaux, orienter cette direction de vibration : la lumière est alors dite polarisée, et les dispositifs sont appelés polariseurs. Sur la figure 2, l'onde lumineuse naturelle n'est, au départ, pas polarisée, c'est-à-dire que la direction de vibration est aléatoire dans le plan perpendiculaire à la direction de propagation et, de plus, qu'elle varie continuellement. Après passage dans un polariseur, la vibration est orientée. Le passage de cette lumière polarisée dans un polariseur orienté en quadrature avec le précédent (décalage de 90°) atténue complètement l'onde.

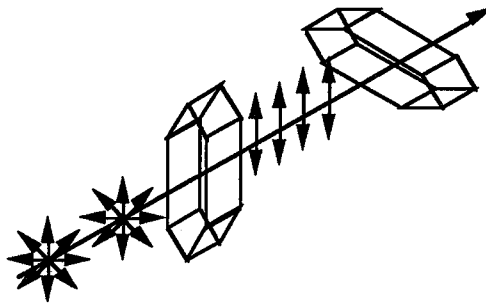


Figure 2 : Polarisation de la lumière.

Pas de phénomène de polarisation, par contre, pour le son qui est une onde mécanique se propageant dans un milieu matériel : dans l'air (les gaz en général), les molécules vibrent dans la direction de propagation.

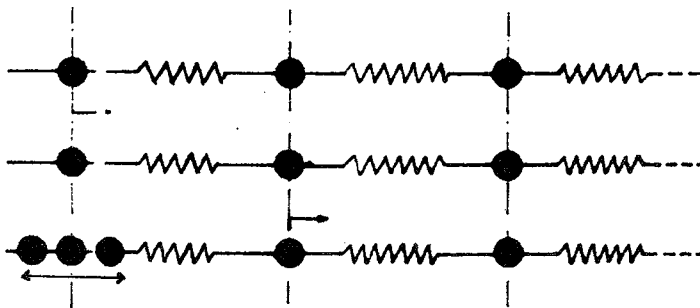


Figure 3 : Propagation de l'onde sonore : la vibration d'une molécule se transmet mécaniquement à ses voisines.

3. Différence fondamentale entre le son et la lumière

Si formalisme commun il y a, il doit donc découler de la théorie ondulatoire. Mais il n'est pas évident a priori qu'un tel formalisme existe. Car au-delà de leur ressemblance ondulatoire, la lumière et le son présentent une différence tout à fait fondamentale. Cette différence, il faut la chercher, non pas dans la nature même de l'onde, non pas dans le phénomène de polarisation, mais dans l'ordre de grandeur de deux paramètres : la longueur d'onde et la vitesse de propagation.

La longueur d'onde sonore varie, dans le domaine des fréquences audibles, entre 17mm et 17m, dans l'air. Par contre, celle de la lumière atteint à peine le micron !

Or, la longueur d'onde conditionne, entre autres, l'étendue spatiale de certains phénomènes et, par là, elle influence indirectement le formalisme qui permet de les décrire. Pour mieux comprendre cette influence, considérons trois exemples de phénomènes où la longueur d'onde joue un rôle déterminant : ce sont les interférences, la diffraction et la diffusion associée à la réflexion de surface.

Le phénomène d'interférences met en cause l'interaction de plusieurs ondes se propageant dans un même milieu. L'interférence typique est réalisée avec deux ondes de même fréquence et de phase stable. La figure 4 illustre l'interaction de deux ondes au point P appartenant au milieu de propagation : la première, en provenance de la source S₁, a parcouru le chemin x₁ et la seconde, en provenance de S₂, a parcouru le chemin x₂. Pour simplifier le raisonnement, nous supposons ici que l'amplitude maximale (A) des deux ondes est la même au point P. L'amplitude de chaque onde s'écrit :

$$A_1(t) = A \cos (\omega t - k x_1)$$

$$A_2(t) = A \cos (\omega t - k x_2) \quad (1)$$

où $\omega = 2\pi f$ est la pulsation de l'onde, de fréquence f et de longueur d'onde λ , et $k = \frac{2\pi}{\lambda}$ est le nombre d'onde. L'amplitude résultante est donnée par la somme des deux contributions :

$$A(t) = A_1(t) + A_2(t) = 2 A \cos \left(\frac{\pi \Delta x}{\lambda} \right) \cos (\omega t - k x_m)$$

$$\Delta x = (x_2 - x_1) \quad x_m = \frac{x_1 + x_2}{2} \quad (2)$$

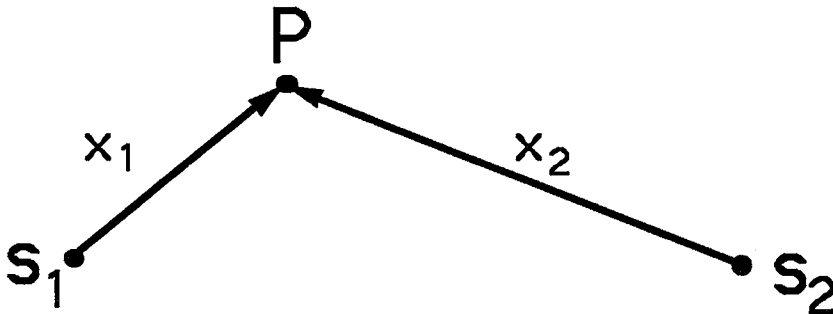


Figure 4 : Interférences entre deux ondes au point P.

Remarquons que, pour une différence de chemin parcouru égale à un multiple entier de la longueur d'onde, les deux ondes arrivent en phase et

l'amplitude résultante est maximale. Par contre, lorsque cette différence est un multiple impair de la demi-longueur d'onde, les deux ondes se détruisent l'une l'autre (annulation du premier facteur en cosinus).

Le phénomène d'interférences se manifeste donc par une succession dans l'espace de zones où l'amplitude de l'onde est renforcée et de zones où les deux ondes s'annulent mutuellement. La période d'apparition de ces zones est de l'ordre de grandeur de la longueur d'onde.

En ce qui concerne la lumière, le phénomène d'interférences peut, dans certaines situations, être assez spectaculaire. C'est lui, par exemple, qui est à l'origine des reflets irisés d'une tache d'huile sur un plan d'eau. Mais, dans la plupart des cas, les variations spatiales qui lui sont associées sont très localisées, puisque de l'ordre de grandeur de la longueur d'onde. Par contre, en Acoustique, ce phénomène peut avoir un impact considérable, principalement aux basses fréquences où la longueur d'onde peut atteindre plusieurs mètres.

Cet exemple nous montre qu'un formalisme qui néglige les interférences peut être envisagé pour décrire la propagation lumineuse, mais qu'il ne conviendra pas en Acoustique, lorsque l'on traite des sons purs de basse fréquence.

Un phénomène similaire est celui de la diffraction : lorsque l'onde rencontre un obstacle matériel de dimensions finies, sa progression est arrêtée, mais les frontières de l'obstacle deviennent sources à leur tour et transmettent, derrière l'obstacle, une partie de l'énergie.

Il s'agit de nouveau d'un phénomène local pour la propagation lumineuse, mais très important en Acoustique. C'est lui qui limite, par exemple, l'efficacité d'un écran routier : si l'écran peut être entièrement opaque à la lumière et cacher la vue des véhicules, il ne peut cependant empêcher totalement la transmission des bruits de circulation. C'est ce qu'on appelle, en Acoustique, l'effet d'écran. On montre que cet effet dépend de la longueur d'onde : plus elle est grande, plus la diffraction est importante et plus l'atténuation de l'écran est mauvaise.



Figure 5 : Diffraction et effet d'écran en Acoustique.

Un troisième phénomène est, à ce propos, celui de la réflexion des ondes sur les frontières du milieu de propagation. Lorsque l'onde atteint une surface parfaitement plane, elle s'y réfléchit de manière spéculaire, c'est-à-dire "comme sur un miroir" (du latin speculum : miroir). La surface renvoie donc l'image de la source. Ce phénomène est observé aussi bien pour les ondes lumineuses (cas du miroir) que pour les ondes sonores (phénomènes d'échos créés par les parois d'un tunnel en béton).

Par contre, lorsque la surface n'est plus plane, mais rugueuse, l'onde incidente donne naissance, non plus à une seule, mais à une multitude d'ondes réfléchies qui se propagent dans toutes les directions à partir de la surface : c'est le phénomène de diffusion ou de réflexion diffuse.

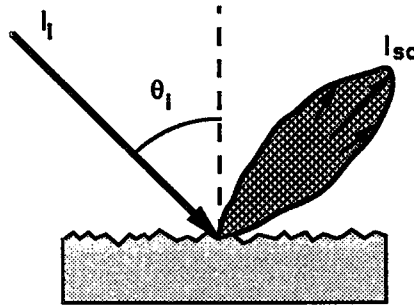


Figure 6 : Réflexion diffuse sur une surface rugueuse. I_i est l'intensité incidente, θ_i l'angle d'incidence et I_{sc} l'intensité diffusée (*scattering*).

La diffusion est d'autant plus importante que l'amplitude de la rugosité est comparable à la longueur d'onde, d'où de nouveau une grande différence entre les deux types d'ondes :

- la lumière, avec sa longueur d'onde inférieure au micron, diffuse, en général. La réflexion spéculaire est ici plutôt l'exception;
- Les parois du tunnel, dont on vient de parler, et qui créent les échos, ne sont manifestement pas parfaitement planes, mais leur rugosité est faible par rapport à la longueur d'onde : pour la réflexion sonore, le cas spéculaire est le plus fréquent.

Par conséquent, les phénomènes d'interférences, de diffraction et de réflexion diffuse, ont une importance tout à fait différente, selon que l'on se place dans le domaine sonore ou dans le domaine lumineux. Le formalisme qui les décrira pourra donc, lui aussi, être différent.

Outre la longueur d'onde, un autre paramètre présente des ordres de grandeur très dissemblables : il s'agit de la vitesse de propagation; 340 m/sec pour le son dans l'air à 20°C, 300000 km/sec pour la lumière : un rapport de grandeurs de 1 à un million, qui se marque dans la manière de considérer les phénomènes

d'échos et de réverbération. S'ils sont très étudiés en Acoustique, et notamment en Acoustique des salles, ces deux phénomènes ne trouvent pas d'équivalents en Optique ou en Eclairage, car la transmission des signaux lumineux est quasiment instantanée.

La conclusion de cette première partie de l'exposé est donc la suivante : selon les phénomènes qu'il peut décrire, un formalisme peut très bien être valable pour l'Acoustique, et non pour l'Optique, et vice-versa. Et il n'est pas évident, a priori, qu'un formalisme unique existe.

4. Les formalismes possibles

Voyons à présent quels sont ces formalismes. Le premier auquel pense le théoricien, c'est la résolution des équations de propagation.

Pour les ondes sonores, ces équations expriment la variation temporelle et spatiale de la pression du milieu :

$$\nabla^2 p = \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 p}{\partial t^2} \quad (3)$$

Pour la lumière, elles dérivent des équations de Maxwell et expriment la variation du champ électrique et du champ magnétique :

$$\nabla^2 \vec{E} = \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2} \quad (4)$$

Ces équations aux dérivées partielles doivent bien entendu être accompagnées de conditions aux frontières du milieu.

S'il était praticable, ce formalisme serait le formalisme idéal, car les équations de propagation peuvent, a priori, décrire tous les phénomènes ondulatoires. Elles sont, de plus, identiques pour la lumière et le son, hormis le fait que l'équation est scalaire pour l'un, et vectorielle pour l'autre.

Malheureusement, ce formalisme idéal est limité aux cas simples, car les conditions aux frontières compliquent notablement la résolution des équations d'onde. Même si l'on fait appel à la notion d'impédance de surface, la complexité de la géométrie des frontières du milieu est souvent telle qu'elle rende impossible la recherche de la solution exacte du problème. Il suffit, pour s'en rendre compte, d'imaginer la description géométrique des parois d'une salle de spectacle, ou encore celle de l'encombrement d'un hall industriel.

Le passage aux éléments finis n'améliore pas de beaucoup la situation. Ce formalisme consiste à discrétiser le milieu de propagation en petits éléments de volume de dimensions finies et à exprimer les relations qui existent entre chaque élément et ses voisins. Or, les grandeurs fondamentales utilisées (pression sonore ou champ électrique) sont susceptibles de varier sur des zones de l'ordre de grandeur de la longueur d'onde. Pour le son à 1 kHz, par exemple, c'est-à-dire au milieu du spectre de la parole, la longueur d'onde est de 34 cm. Pour une bonne

résolution, la taille de l'élément fini devrait être fixée à moins de 10 cm, soit au moins un millier d'éléments finis par mètre cube ! Que l'on s'imagine la taille du problème pour des salles de spectacle qui font plusieurs centaines de mètres cubes !

La résolution des équations de propagation par éléments finis a néanmoins été réalisée dans certaines situations : par exemple, pour étudier l'atténuation de certains silencieux acoustiques [1]. La complexité du problème a, dans cette étude, limité pratiquement la fréquence du son à 1000 Hz, malgré le caractère exigü de l'espace. Ce formalisme semble donc réservé à l'Acoustique, aux basses fréquences et pour les espaces réduits.

Nous nous trouvons à présent placés devant un dilemme, à savoir que le formalisme unique permettant de décrire tous les phénomènes ondulatoires existe, en principe, mais qu'il n'est pas applicable, hormis quelques exceptions. Une des raisons pour laquelle il n'est pas applicable, c'est que les grandeurs fondamentales utilisées, pression sonore ou champ électromagnétique, sont susceptibles de varier sur des distances très courtes, de l'ordre de grandeur de la longueur d'onde.

Or, ces variations sont souvent peu significatives et, pour résoudre ce dilemme, il faut considérer le cas limite où la longueur d'onde tend vers zéro. On entre ainsi dans le domaine de l'Acoustique géométrique et de l'Optique géométrique, dont les hypothèses principales sont :

- que l'onde se propage en ligne droite dans le milieu de propagation;
- que l'énergie est transportée, à partir de la source, par une infinité de rayons (sonores ou lumineux);
- et que deux contributions énergétiques en un point de l'espace s'ajoutent.

On néglige donc (du moins provisoirement) les phénomènes de diffraction et d'interférences. En effet, la diffraction s'accommode mal avec la première hypothèse ci-dessus. Comment, alors, expliquer que l'énergie est transmise derrière l'écran ? Les interférences s'opposent, quant à elles, à la troisième hypothèse, puisque l'on a vu que deux contributions lumineuses pouvaient créer l'obscurité, que deux contributions sonores pouvaient créer le silence.

Nous reviendrons par après sur ces deux phénomènes.

Dans le cadre de l'Optique et de l'Acoustique géométriques, trois formalismes sont envisageables :

- la technique des rayons;
- celle des sources images;
- la méthode des radiosités.

Nous rejetons les deux derniers comme formalismes uniques.

La technique des sources images consiste à remplacer la réflexion de l'onde sur les frontières du milieu par des sources fictives, les sources images. Ce formalisme, fréquemment utilisé en Acoustique, a l'inconvénient majeur de ne

pouvoir décrire que la réflexion spéculaire et, à ce titre, il ne peut valablement rendre compte des phénomènes lumineux.

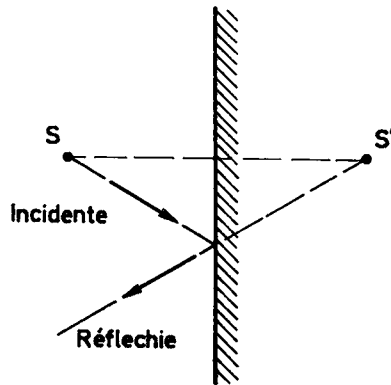


Figure 7: Technique des sources images.

La méthode des radiosités [2] consiste à discrétiser toutes les surfaces frontières du milieu de propagation en petites facettes, et à étudier les transferts d'énergie entre ces facettes. Ce formalisme, utilisé surtout pour la simulation d'éclairages, ne se prête pas à décrire les phénomènes acoustiques, car, d'une part, il s'adapte mal à la réflexion spéculaire et, d'autre part, il ne peut faire intervenir l'aspect temporel (échos, réverbération) car toutes les réflexions sont traitées en une seule opération.

Par conséquent, il ne nous reste comme possibilité que le formalisme des rayons [3,4,5]. Voyons tout d'abord en quoi il consiste.

5. La technique des rayons (sonores ou lumineux)

On appelle "rayon", un pinceau infiniment fin d'énergie émis au départ de la source (sonore ou lumineuse), et qui se propage en ligne droite dans un milieu homogène. L'énergie de départ est donnée par la source : elle est la même pour tous les rayons si la source est isotrope. Sinon, cette énergie dépend de la direction d'émission du rayon : elle est alors déterminée par la distribution spatiale de l'intensité de la source.

Soit dit entre parenthèses, il est amusant de constater que ce formalisme présente quelques ressemblances avec la théorie corpusculaire, qui a été écartée au début de l'exposé. En effet, certains auteurs considèrent que la source émet, non pas des rayons, mais des "pseudo-quanta" d'énergie ou des "particules énergétiques" [6,7], et que c'est le nombre de quanta ou de particules émis dans une direction donnée qui varie en fonction de la distribution spatiale d'intensité de la source. Ces auteurs arrivent au même résultat que la technique des rayons, mais on peut se demander ce que représenteraient, en Acoustique, des quanta d'énergie sonore. Ceci étant un autre débat, fermons ici la parenthèse.

Reprenons les rayons là où nous les avons laissés, c'est-à-dire à l'émission, au départ de la source. Lorsqu'un rayon atteint la frontière du milieu de propagation, plusieurs phénomènes peuvent être modélisés :

- la réflexion spéculaire : le rayon est dévié par la surface (loi de Descartes) , en perdant éventuellement une partie de son énergie. Un rayon incident d'énergie E donne naissance à un rayon réfléchi d'énergie $(1 - \alpha) E$, où α est le facteur d'absorption de la surface;
- la réflexion mixte ou diffuse : un rayon (E) donne naissance à plusieurs rayons ($a_i E$), dont la répartition épouse au mieux la distribution spatiale réelle de l'énergie après réflexion. Le coefficient a_i est précisément déterminé, pour chaque rayon, par l'indicatrice de réflexion de la surface;
- la réfraction : le rayon pénètre dans le second milieu et y est dévié (loi de Snell). Si ce second milieu est transparent, le rayon peut alors éventuellement en sortir pour revenir dans le milieu de départ : c'est le cas d'une onde lumineuse traversant un vitrage ou une lentille convergente. Un rayon incident d'énergie E donne alors naissance à un rayon transmis d'énergie τE , où τ est le facteur de transmission du milieu matériel.

Le temps de parcours des rayons peut être calculé, connaissant la vitesse de propagation, ce qui permet d'aborder les phénomènes d'échos et de réverbération : l'échogramme peut être construit. Ce diagramme représente, en Acoustique des salles, la répartition énergétique des échos au récepteur, en fonction du temps.

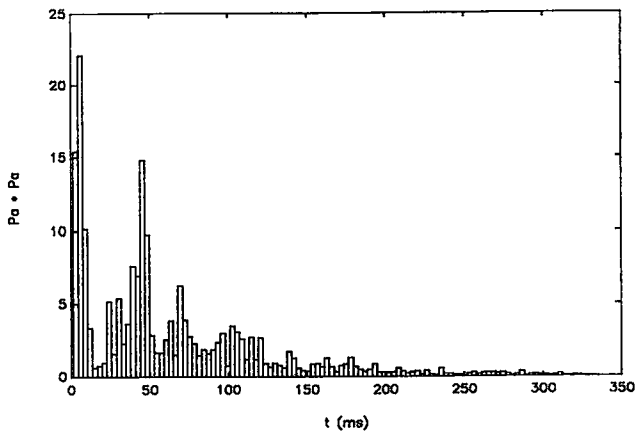


Figure 8: Echogramme calculé par la technique des rayons.

La diffusion et l'absorption atmosphériques peuvent être également simulées. Dans le cas du brouillard, par exemple, ou d'un espace rempli de fumées, le rayon lumineux perd progressivement de l'énergie, celle-ci étant ré-émise, en tout ou en partie, par diffusion, selon d'autres rayons qui divergent à partir du trajet principal.

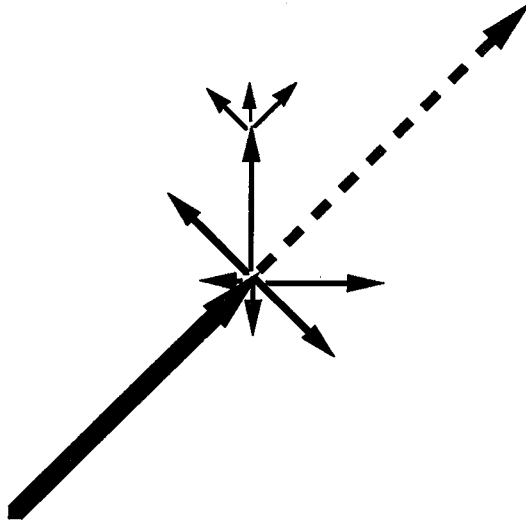


Figure 9: Diffusion atmosphérique par la technique des rayons.

En Acoustique, la diffusion du milieu est souvent négligée, car il faudrait des particules de l'ordre de grandeur de la longueur d'onde. On a néanmoins vu apparaître des expériences intéressantes, comme celle qui consiste à considérer l'encombrement d'un hall industriel comme un milieu diffusant les rayons sonores [8]. Ce que l'on modélise en Acoustique, par contre, c'est l'absorption atmosphérique : progressivement, au cours de sa propagation, le rayon sonore perd de l'énergie. L'énergie de départ est progressivement atténuée selon une loi exponentielle :

$$E \rightarrow 10^{-ax} E \quad (5)$$

où "a" est le coefficient d'absorption atmosphérique et "x", le chemin parcouru.

Le phénomène de réfraction atmosphérique peut être également décrit par le formalisme des rayons [9]. Ici, ce n'est plus l'énergie, mais la direction de propagation du rayon qui est modifiée graduellement, sous l'effet, soit des gradients de température, soit des gradients de vent en ce qui concerne les ondes sonores.

La polarisation de l'onde lumineuse peut être simulée en accordant au rayon, non pas une valeur énergétique, mais deux, c'est-à-dire une dans chaque plan principal de polarisation.

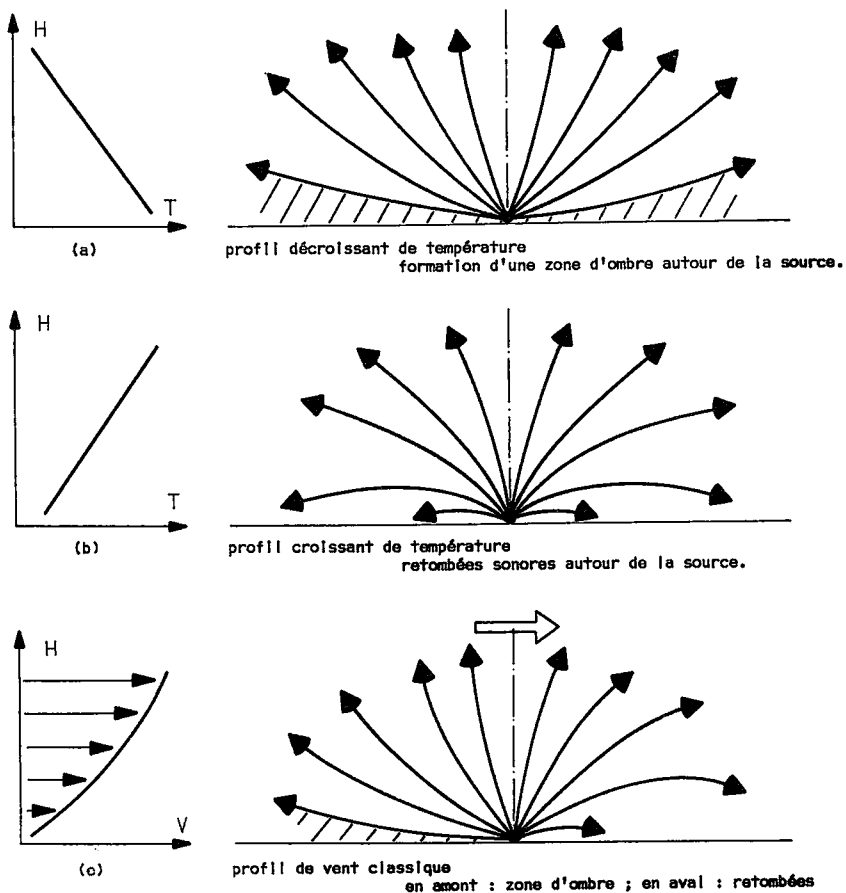


Figure 10 : Réfraction atmosphérique
(H : hauteur au-dessus du sol, T : température)

Jusqu'à présent, nous n'avons pas encore abordé les phénomènes fréquentiels, ces phénomènes qui sont associés à la couleur de la lumière ou à la tonalité du son. La question est de savoir si le formalisme des rayons peut aussi rendre compte de cet aspect qualitatif. Et nous allons voir que la réponse est positive.

Rappelons qu'un bruit, un son complexe ou la lumière blanche sont composés de plusieurs ondes élémentaires de fréquences ou de longueurs d'onde différentes. Le théorème bien connu de Fourier permet de décomposer un bruit ou une lumière en ses composantes fréquentielles. Le rayon, qu'il soit sonore ou lumineux, ne transportera plus une énergie, mais une valeur énergétique par fréquence de travail.

On ne peut évidemment étendre la résolution fréquentielle à l'infini. Pour les ondes sonores, par exemple, les fréquences voisines sont regroupées en intervalles que l'on appelle "bandes" : le domaine audible est partagé en 10 bandes d'octave ou 30 bandes de tiers d'octave, dont les fréquences centrales sont normalisées. Pour les ondes lumineuses, la décomposition n'est pas normalisée, mais on peut considérer, par exemple, 40 bandes de 10 nm pour couvrir le domaine visible (de 380 à 780 nanomètres). Le rayon transportera donc 10, 30 ou 40 valeurs énergétiques, qui seront modifiées au cours de la propagation, par réflexion, absorption, ...et qui seront finalement recomposées au récepteur.

La difficulté ne réside donc plus tellement ici dans la formulation du problème, mais dans la quantité de données à traiter. Pour le phénomène de réflexion, par exemple, chaque paroi doit être caractérisée par autant de paramètres qu'il y a de bandes fréquentielles de travail !

Cette énumération, qui n'est pas exhaustive, montre à suffisance que la technique des rayons, sonores ou lumineux, peut représenter un grand nombre de phénomènes ondulatoires, communs à la lumière et au son. Restent les phénomènes de diffraction et d'interférences. Comment en tenir compte dans le cadre du formalisme des rayons qui, conceptuellement, les a écartés au départ ?

Pour modéliser le phénomène de diffraction, il faudrait que chaque bord d'obstacle, chaque arête atteinte par un rayon, devienne source de rayonnement. Cela nous conduit déjà à un paradoxe, car en envoyant un nombre fini de rayons à partir de la source, la probabilité de tomber exactement sur une arête est nulle. D'où, il faut définir, autour de chaque arête, une zone d'influence de l'obstacle qui puisse dévier les rayons derrière celui-ci.

Cette démarche est, nous l'avons vu, principalement utile en Acoustique car, pour les ondes lumineuses, ce phénomène est tellement local qu'il peut être négligé la plupart du temps. Et pour les ondes sonores, des recherches sont en cours actuellement, qui visent à définir quelle serait la dimension de cette zone d'influence vis-à-vis de la longueur d'onde, et quelle serait la loi de déviation ou de redistribution des rayons sonores derrière l'écran [6]. On peut estimer que, d'ici quelques années, ces recherches auront déterminé une technique de rayons capable de décrire correctement le phénomène de diffraction.

Quant aux phénomènes d'interférences des ondes sonores, ils ne peuvent pratiquement pas être mis en évidence par le formalisme des rayons. Quelques tentatives ont été mises au point [10], en accordant au rayon une variable de départ qui n'est pas énergétique, mais une pression, en module et phase. En théorie, la recombinaison de la phase des rayons au récepteur doit permettre de retrouver le phénomène d'interférences. En pratique, cela est limité aux basses fréquences et, même alors, le temps de calcul devient vraiment prohibitif.

6. Conclusion

La recherche d'un formalisme unique permettant de décrire les phénomènes acoustiques et lumineux a mis en évidence deux candidats:

- la résolution des équations de propagation, éventuellement associée à la méthode des éléments finis, mais qui n'est applicable que dans un nombre limité de cas;
- la méthode des rayons qui, au contraire de la précédente, peut être mise en œuvre dans la plupart des cas.

Le meilleur candidat est la méthode des rayons. Il s'agit du seul formalisme pouvant pratiquement être mis en œuvre, et qui décrit la majorité des phénomènes ondulatoires, qu'ils soient liés à la lumière ou au son.

A l'exception du phénomène d'interférences, mais il s'agit là d'un phénomène tout à fait exceptionnel, car il est peu significatif pour les signaux à large bande fréquentielle, c'est-à-dire la majorité des signaux sonores rencontrés en pratique. Il ne justifie pas, en tout cas, que l'on complique le formalisme pour en rendre compte.

La question de départ a donc reçu sa réponse, qui est une réponse de principe. Quant à la réalisation pratique, elle risque d'être assez complexe, car outre la quantité de données à traiter, au-delà de l'importance des temps de calcul, il faudra s'interroger sur la gestion simultanée du rayon sonore et du rayon lumineux. Ces problèmes pratiques ne doivent pas être négligés, mais ils pourraient nous entraîner dans un débat tout aussi long.

7. Références

- [1] KAISER, X., Application d'une méthode d'éléments finis au calcul de l'atténuation des silencieux réactifs, *Bulletin d'Acoustique*, n°11, décembre 1991, pp. 9-55.
- [2] DI LAURA, D.L., On a new technique for interreflected component calculations, *Jnl. Illuminating Engng. Soc. of North America*, 9(1), october 1979, pp. 53-59.
- [3] EMBRECHTS, J.J., Sound field distribution using randomly traced sound ray techniques, *Acustica*, 51(6), 1982, pp.288-295.
- [4] JURICIC, H. et SANTON, F., Images et rayons sonores dans le calcul numérique des échogrammes, *Acustica*, 28(2), 1973, pp.77-89.
- [5] WARD, G.J. and RUBINSTEIN, F.M., A new technique for computer simulation of illuminated spaces, *Jnl. Illuminating Engng. Soc. of North America*, 17(1), winter 1988, pp. 80-91.
- [6] STEPHENSON, U.M. and MECHEL, F.P., The sound particle simulation technique applied to problems of sound propagation from power plants, *Fraunhofer-Institut für Bauphysik*, Stuttgart, 1986.

- [7] DECLAYE, P., Application des méthodes de Monte-Carlo à la prévision des niveaux d'éclairement dans un espace clos, *Mémoire de fin d'études, Faculté des Sciences Appliquées*, Université de Liège (1988).
- [8] ONDET, A.M. et BARBRY, J.L., Prévision des niveaux sonores dans les locaux encombrés, *Les notes scientifiques et techniques de l'I.N.R.S.*, n°52, Nancy - France (octobre 1984).
- [9] NOEL, P., Prédiction des niveaux sonores en espace ouvert. Application des méthodes de tir, *Mémoire de fin d'études, Faculté des Sciences Appliquées*, Université de Liège (1986).
- [10] EMBRECHTS, J.J., Répartition du champ sonore par une méthode de tir aléatoire, *Mémoire de fin d'études, Faculté des Sciences Appliquées*, Université de Liège (1981).