

L'air et le son dans l'encyclopédie, un curieux silence

François Baskevitch

▶ **To cite this version:**

François Baskevitch. L'air et le son dans l'encyclopédie, un curieux silence. Recherches sur Diderot et sur l'Encyclopédie, 2009. hal-03806356

HAL Id: hal-03806356

https://univ-montpellier3-paul-valery.hal.science/hal-03806356

Submitted on 7 Oct 2022

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

L'AIR ET LE SON DANS L'*ENCYCLOPEDIE*, UN CURIEUX SILENCE

FRANÇOIS BASKEVITCH

JANVIER 2009

L'AIR ET LE SON DANS L'*ENCYCLOPEDIE*, UN CURIEUX SILENCE

FRANÇOIS BASKEVITCH
François Baskevitch, ingénieur en traitement du signal audio (Télécoms Lille), a effectué une longue carrière dans le domaine de l'électro-acoustique. Il a soutenu en 2008 une thèse de doctorat en Histoire des Sciences à l'Université de Nantes sur l'histoire de l'acoustique physique.

Un air silencieux

Lorsqu'on parcourt l'article 'AIR' dans l'*Encyclopédie*, apparemment très complet si on se réfère à sa longueur (une dizaine de pages d'*Encyclopédie*…), on s'attend à ce qu'il y soit fait allusion à la propagation des sons, au moins lorsqu'on traite de la propriété d'élasticité. L'attente est déçue, et la seule évocation du son se trouve dans l'énonciation du caractère de fluidité de l'air :

> AIR (*Enc.*, I, 225-236)
> (p. 227b) [...] Commençons par la fluidité. Cette propriété de l'air est constante par la facilité qu'ont les corps à le traverser, par la propagation des sons, des odeurs et émanations de toutes sortes qui s'échappent des corps; car ces effets désignent un corps dont les parties cèdent au plus léger effort, et en y cédant, se meuvent elles-mêmes avec beaucoup de facilité: or voilà précisément ce qui constitue le fluide.

Le paragraphe entier est signé M. Formey, toutefois cet extrait est la traduction d'un passage de la *Cyclopedia* de Chambers (1728). Les auteurs renvoient à l'article 'SON'. Une autre référence au son apparaît dans un court article qui suit le principal et traitant de 'l'air inné', traduit également de l'article équivalent de la *Cyclopedia* :

> AIR INNE (*Enc.*, I, 236b), est une substance aérienne extrêmement subtile, que les Anatomistes supposent être enfermée dans le labyrinthe de l'oreille interne, et qui sert selon eux à transmettre les sons au sensorium commune. *Voyez Labyrinthe, Son, Ouie* .
> Mais par les questions agitées dans ces derniers temps au sujet de l'existence de cet air inné, il commence à être fort vraisemblable que cet air n'existe pas réellement [1].

Nous n'en saurons pas plus, et donc nous suivrons le conseil avisé de nous rendre à l'article 'SON'. Un premier article, intitulé 'SON (*phys.*)' présenté comme écrit par d'Alembert, est suivi d'un article 'SON (*en musique*)' écrit par Jean-Jacques Rousseau. Le premier, constitué principalement de la traduction de l'article 'sound' de la *Cyclopedia* de 1728, traite abondamment du processus de génération des sons, ainsi que de la vitesse de propagation, sujet très en vogue chez les savants du XVIIIe siècle. Cependant l'air n'y est pas considéré à sa juste place dans le phénomène acoustique, si ce n'est pour dire qu'il est le milieu approprié à la propagation des sons. Puisque l'air, ce milieu propre au son dit-on depuis toujours, ne nous en parle pas, nous allons ici cheminer à travers l'*Encyclopédie*, à partir de cet air étrangement silencieux, et nous laisser guider par les renvois qui nous mènent à la compréhension du phénomène sonore aérien.

[1] L'article intitulé 'AIR INNE' concerne l'anatomie de l'oreille et la physiologie, et mériterait une étude entière. Nous nous limiterons ici à l'étude de la nature physique des sons.

Une acoustique davantage musicale que physique

Il est significatif d'observer l'évolution de l'emploi du terme 'acoustique' au cours du XVIIIe siècle, et notamment dans l'*Encyclopédie*. En effet, si d'Alembert en fait une branche des 'mathématiques mixtes', d'autres rédacteurs lui accordent une signification plus traditionnelle. Jusqu'alors, on rencontre le terme 'acoustique' ici ou là, surtout dans la littérature anglo-saxonne du XVIIe siècle, il s'écrit alors 'acoustick', et, adjectif devenu substantif, il désigne le cornet d'oreille utilisé par les sourds depuis qu'on en a importé l'usage d'Espagne. Hooke y fait référence, sous le nom 'otocousticon' dans la préface de *Micrographia*. En France, ni le *Dictionnaire des arts et des sciences* de Thomas Corneille de 1694, ni le *Dictionnaire universel* d'Antoine Furetière de 1690, ne mentionne le terme 'acoustique'. Joseph Sauveur, en 1700, s'approprie le mot et le popularise en France, mais de façon restrictive, dans le sens de l'étude des sons harmoniques[2]. L'acception contemporaine du terme 'acoustique' signifiant l''étude de la physique des sons' a une origine germanique et s'affirme au tout début du XIXe siècle, époque de la parution du *Die Akustik* (*Traité d'Acoustique*) de Chladni[3]. Pour sa part, l'*Encyclopédie*, dans le premier volume paru en 1751[4], en donne la définition suivante :

> ACOUSTIQUE (*Enc.*, I, 111a), s. f. est la doctrine ou la théorie des sons. *Voyez* Son. L'*Acoustique* est proprement la partie théorique de la Musique. C'est elle qui donne les raisons plus ou moins satisfaisantes du plaisir que nous fait l'harmonie, qui détermine les affections ou propriétés des cordes vibrantes, etc. *Voyez* Son, Harmonie, Corde .

Ce court article non signé est écrit par Jean-Jacques Rousseau (il est repris dans le *Dictionnaire de musique*), sauf la première phrase qui est directement traduite de la *Cyclopedia*. Il est clair que Rousseau adopte le périmètre conventionnel de l'acoustique, au sens de Sauveur, et n'entreprend pas l'étude physique qu'il renvoie à l'article 'SON'. La physique des sons est encore balbutiante et sa dénomination encore imprécise[5]. On trouve ainsi dans l'*Encyclopédie*, 'phonique' issu de 'phonicks', qui n'a finalement pas été retenu par la communauté savante. On invente également une terminologie homologue à celle de l'optique, comme 'catacoustique', synonyme de 'cataphonique', 'diaphonique' et 'diacoustique', en traduction des termes anglais définis dans la *Cyclopedia* de Chambers et puisés dans un article de Narcissus Marsh dont l'objet était d'établir une analogie parfaite entre le son et la lumière[6]. On trouve également dans l'*Encyclopédie* les mots inusités 'otacoustique' et 'polyacoustique' qui définissent les dispositifs destinés à augmenter les sons tels que cornets et porte-voix.

---

[2] Fontenelle, dans l'*Histoire de l'Académie Royale des Sciences pour l'année 1700*, écrit, au sujet de l'auteur du 'mémoire sur la détermination d'un ton fixe' de Joseph Sauveur : « Aussi M. Sauveur a-t-il pensé que c'était là un pays encore peu connu. Il a trouvé cette science plus vaste, à mesure qu'il y faisait plus de progrès, il a cru qu'elle méritait, aussi bien que l'Optique, un nom particulier, et l'a appelée Acoustique. ».

[3] Ernst Chladni, *Die Akustik*, Leipzig, 1802. Traduction, *Traité d'Acoustique*, Courgier, Paris, 1809. Les premières expériences de Chladni datent de 1785 et ont fait l'objet d'une publication : *Entdeckungen über die Theorie des Klanges*, Leipzig, 1787.

[4] L'article n'est pas repris dans le *Supplément à l'Encyclopédie* de 1776.

[5] Ces raisons nous font préférer la terminologie 'physique des sons' pour 'acoustique' dans cet article.

[6] Narcissus Marsh, *Introductory Essay to the Doctrine of Sounds*, in Phil. Trans. 156, Oxford, 1684.

L'air et la physique des sons avant l'*Encyclopédie*

Avant de tenter une explication satisfaisante de cette absence du phénomène sonore dans l'article 'AIR', il convient d'exposer l'état des connaissances en acoustique physique à l'époque de la rédaction de l'*Encyclopédie*, vers le milieu du XVIIIe siècle[7].

La notion de vibration, l'intensité, la réflexion, la production du son consécutive à un choc, la durée de propagation, tout cela est connu dès la fin du XVIIe siècle. Les propriétés les plus délicates à concevoir sont la conservation du timbre malgré les obstacles, la distance considérable de propagation au regard de l'intensité de l'ébranlement initial, la constance de la vitesse indépendante de la hauteur et de l'intensité, et surtout la capacité de superposition sans perturbation de plusieurs sons simultanés. Tous les savants qui ont sérieusement étudié la nature physique du son ont éprouvé la difficulté d'établir une hypothèse de la propagation qui satisfasse à toutes les propriétés du phénomène sonore.

La physique des sons n'entre pas dans la classification traditionnelle des savoirs. De l'Antiquité au Moyen Age, on en parle peu et en général en introduction aux traités de musique. On en parle également, et d'une façon plus approfondie, lorsqu'on aborde le thème des sensations, en particulier dans les différents commentaires au '*Traité de l'âme*' dont la littérature aristotélicienne a parsemé le cheminement des sciences pendant une vingtaine de siècles.

Pour les Anciens, la production des sons s'explique par des chocs sans lesquels il n'y a que silence. La notion de choc étant liée à celle de mouvement, on l'associe au processus. Tout le monde est alors à peu près d'accord sur la corrélation erronée entre la 'vitesse' (une notion très imprécise) et la hauteur du son. Dans l'incapacité de décrire le mouvement du phénomène sonore sans transport de matière, Aristote éprouve une certaine difficulté à admettre un délai de propagation. Dès lors, jusqu'à la Renaissance, le son est instantané et on attribue le décalage entre perception visuelle et auditive à une moindre sensibilité de l'ouïe sur la vue.

Parallèlement une hypothèse corpusculaire, qui assimile la propagation des sons à un flux de 'grains de son', est développée par Epicure puis par Lucrèce, mais la condamnation de l'atomisme par la pensée dominante ne permet pas à cette théorie de progresser.

Aristote parle du son dans le *Traité de l'Ame*[8], et on a longtemps cru qu'il était également l'auteur d'un *De audibilibus*, plus spécifiquement consacré à l'audition. On sait à présent que ce texte incomplet est nettement postérieur, probablement de Straton. Quant aux *Problemata aristotelis*, dont la section XI est entièrement consacrée à la voix et au son, il est plus tardif encore, et sans doute d'auteurs multiples.

Pour Aristote, l'air est le milieu favorable à la propagation du son, et il l'envisage comme une masse 'une et continue' transmettant de façon instantanée le choc entre le corps sonore et l'oreille. Le choc du corps sonore se communique à l'air qui oppose une résistance si le mouvement à l'origine du choc est suffisamment vif, sinon l'air se disperse et le son ne se produit pas. Par ailleurs l'air mis en mouvement rebondit sur les parois d'une cavité, ce qui

[7] On trouvera toutes les références historiques et bibliographiques dans ma thèse soutenue en octobre 2008 à Nantes : François Baskevitch, *Les représentations de la propagation du son, d'Aristote à l'Encyclopédie*, thèse de doctorat en Histoire des Sciences et des Techniques dirigée par Patrice Bailhache, Université de Nantes, octobre 2008. Le présent article est à considérer comme un des prolongements de cette thèse.
[8] Aristote, *Traité de l'Ame*, livre II, chap. 8.

accroît l'intensité du son, et peut provoquer un écho, sans toutefois qu'Aristote explique le délai.

L'auteur péripatéticien du *De audibilibus* considère, lui, que les mouvements du corps sonore se communiquent aux parties d'air voisines, qui elles-mêmes les propagent aux parties d'air contiguës. On ne sait toujours pas de quel type de mouvement il s'agit, même si on évoque des 'tremblements'. Par ailleurs, on ignore la problématique de la vitesse de propagation, car le dogme aristotélicien est clair : la propagation du son est instantanée. Il faut prendre garde aux traductions complaisantes du XIXe siècle qui attribuent à Aristote, via le *De audibilibus*, l'intuition de la vibration sonore[9]. Une lecture attentive du texte récuse complètement cette hypothèse. Pour simplifier, la théorie du *De audibilibus* dit que le corps sonore tremble et communique instantanément son tremblement à la partie d'air conjointe qui le communique de proche en proche jusqu'à l'oreille. Il s'agit d'un mouvement mécanique, et comme tel, il devrait donc être susceptible de subir un mouvement contraire d'une partie d'air porteuse d'un autre son simultané, avec les conséquences des lois des chocs. Ce type d'évènement qui neutraliserait les sons, est incompatible avec la propriété de superposition sans altération[10]. Cette théorie n'est donc pas si féconde qu'on pourrait le croire, même si elle tient compte de l'observation de tremblements qu'une confusion conceptuelle récente (XIXe siècle) assimile vite à la notion de vibrations. En revanche, venue de la physique stoïcienne, apparaît une modélisation plus élaborée qui permet de rendre compte de la propriété de superposition des sons. Il s'agit de la célèbre analogie des ronds qui se forment dans l'eau lorsque on y jette une pierre[11]. Cette représentation aura un grand succès pendant toute l'histoire de l'acoustique. Développée par Vitruve, reprise par Boèce et sacralisée par Thomas d'Aquin, on la retrouve tout au long de l'étude physique des sons, jusqu'à ce que Claude Perrault la démonte dans son *Traité sur le bruit*[12].

La représentation scolastique de la propagation du son se résume donc à une synthèse confuse de différentes approches. L'essentiel est d'affirmer l'instantanéité du son, sans laquelle on est contraint d'accepter le mouvement de 'quelque chose', ce qui pourrait entraîner la théorie de la matière vers les zones dangereuses de l'atomisme. L'analogie des 'ronds dans l'eau' permet, malgré son insuffisance et son inadaptation, de fermer la porte à toute tentative de questionnement.

Dès la fin du XVIe siècle, avec Benedetti, Vincenzo Galilei puis son fils Galileo, le domaine d'investigation est l'observation des vibrations des cordes. La première partie du XVIIe siècle voit quelques savants s'intéresser à la physique du son dont les plus prolixes sont Francis Bacon et Marin Mersenne.

---

[9] Thomas Young, en 1801, pense redécouvrir le *De audibilibus* qu'on attribue alors à Aristote. Dans une tentative de réhabilitation, il fait une interprétation anachronique du texte, usant notamment du terme 'vibration' dont il fait d'Aristote l'inventeur alors que cette notion est inconcevable dans l'Antiquité. De nombreux traités de physique du XIXe siècle vont dans le même sens. Voir Thomas Young, *Lettre sur les découvertes faites par Aristote sur le son*, in Bibliothèque Britannique, Sciences et Arts, Genève, vol. XVIII, 1801, p 354-357. Voir ma thèse : François Baskevitch, *Les représentations de la propagation du son, d'Aristote à l'Encyclopédie*, o.c., p. 80-88.

[10] En revanche, le mouvement d'ondulation, dont les lois seront mises en évidence après l'étude des cordes vibrantes, est différent : il s'agit du *mouvement de la perturbation*, sans déplacement de matière, qui permet la superposition de plusieurs sons simultanés. La confusion est très fréquente, encore de nos jours, notamment chez beaucoup de musicologues et de vulgarisateurs.

[11] Dans la Science Antique, la seule trace connue de cette modélisation est rapportée par Diogène Laerce qui l'attribue à Chrysippe.

[12] Claude Perrault, *Essais de physique*,1680, tome 2, *Du bruit.*

Francis Bacon remarque que « l'air qui se déploie dans un espace où il est tout à fait libre ne produit aucun son, à moins qu'il ne soit vivement frappé », et prend pour exemples des mouvements silencieux comme le vent, les déplacements de nuages ou de l'eau des fleuves, ou encore les simples mouvements de corps matériels[13]. Par opposition, le son ne trouble pas le mouvement d'une flamme. Il constate ensuite que pour qu'il se produise un son, il est nécessaire qu'il y ait une concavité et un enfermement de l'air. Bacon a, dans le même temps, l'intuition du résonateur et des ondes stationnaires qui se forment dans les tuyaux des flûtes, parce que «l'air y est beaucoup plus comprimé».

Marin Mersenne traite plus profondément du rôle de l'air dans la propagation des sons. Cependant il éprouve une certaine difficulté à envisager un mouvement sans transport de matière[14] : « […] les autres parties de l'air se condensent pour céder à l'impétuosité de la partie agitée, quoiqu'il soit presque impossible de s'imaginer comment se peut faire la compression ou la condensation des parties de l'air, s'il ne contient du vide». Toujours cette question du vide qui imprègnera tout le siècle... Il est dommage que Pascal ne se soit pas intéressé au son[15].

A la même époque on assiste à un bref retour de la conception atomiste de la propagation du son développée par Epicure, avec Isaac Beeckman puis Pierre Gassendi. Cependant la théorie corpusculaire se heurte à l'impossibilité de concilier les paramètres observables de la propagation tels que hauteur, intensité, vitesse et superposition des sons. De plus, cette théorie ne dit rien sur l'accumulation de ces 'grains de son', avant et après la propagation.

La seconde partie du XVIIe siècle sera féconde dans les recherches sur le vide et sur les propriétés de l'air. Avec l'invention de la pompe à air d'Otto von Guericke on peut expérimenter, et Robert Boyle met en évidence l'extinction du son dans un récipient où on a fait le vide[16]. Vers la même époque, en Italie, on mesure la vitesse de propagation du son dans l'air, en comptant les secondes qui s'écoulent, lors d'un tir au canon, entre la perception visuelle de l'éclair à une grande distance, et l'audition du coup[17]. Cette période est également marquée par une tentative de rapprocher la théorie de propagation du son de celle de la lumière. On se fonde dans un premier temps sur l'écho qu'on assimile un peu rapidement à la réflexion lumineuse dans un miroir. Kircher pousse l'analogie très loin et n'hésite pas à créer la 'phonocamptique', homologue de la catoptrique[18]. A Paris, vers 1675, l'Académie Royale des Sciences est le berceau de la théorie des ondes, d'abord sonores, puis lumineuses avec le *Traité de la Lumière* de Christiaan Huygens, écrit vers 1677 mais paru tardivement en 1690. Un jésuite italien, Francesco Grimaldi, avait déjà esquissé la théorie ondulatoire du son vers 1660[19]. Plusieurs savants, dans l'entourage de Huygens, participent à l'élaboration de la notion d'onde. Parmi eux, le jésuite Ignace-Gaston Pardies, mort prématurément en 1673, confie plusieurs de ses écrits à Huygens, notamment un *Traité de mécanique* dont les livres 5 et 6, jamais publiés, concernent les mouvements vibratoires et les ondulations. Pierre Ango en fait état en 1682 dans le livre premier de son *Traité d'optique*[20] où il reprend les thèses de

[13] Francis Bacon, *Sylva Sylvarum*, 1626, centurie II.
[14] Marin Mersenne, *Harmonie Universelle*, Paris, 1637, livre I.
[15] Pourtant, selon sa sœur Gilberte Périer, il aurait écrit à l'âge de 12 ans un petit traité sur le son 'qui fut trouvé tout à fait bien raisonné'. (Gilberte Périer, *Vie de Pascal*, Paris, Vaton, 1845, p. 4)
[16] Robert Boyle, *New experiments*, 1660, in *The works*, London, ed. Th. Birch, 1772, t. III, p. 259-262
[17] *Saggi di naturali esperienze*, Academia del cimento, Florence, Ed. Magalotti, 1666, p. 241-245. Francis Bacon en avait eu l'idée et Mersenne l'avait expérimentée, avec les faibles moyens dont il disposait.
[18] A. Kircher, *Musurgia universalis*, 1650, liber IX, pars IV.
[19] F. M. Grimaldi, *Physicomathesis de lumine*, Bologne, 1666, prop. XLIV, p 370 et suiv.
[20] Pierre Ango, *L'optique*, Paris, E. Michallet, 1682.

Pardies[21]. Le début de l'ouvrage est consacré à la nature ondulatoire du son, et il s'agit ici du premier traité exposant cette théorie, même si les thèses développées ne sont pas l'œuvre de l'auteur.

Claude Perrault, très lié à Huygens qu'il invite souvent dans sa propriété de Viry, est médecin, architecte, naturaliste et physicien. Il est le traducteur du *Traité d'architecture* de Vitruve, et par ailleurs membre très actif de l'Académie des Sciences. Dès 1677 on fait, en séance[22], la lecture d'un long *Traité du bruit* qui trouvera sa place dans ses *Essais de physique* parus en 1680 à la demande de Colbert. Perrault critique l'analogie entre les vibrations sonores et les ondes à la surface de l'eau. Les termes 'onde' et 'ondulation' désignent à l'époque le mouvement circulaire d'une déformation d'un fluide perturbé, ils n'ont pas le caractère général qu'on leur donne de nos jours. A la notion d'ondulation de l'air, Perrault préfère 'l'agitation de l'air qui cause le bruit'. Pour modéliser le phénomène sonore, Perrault fait part de sa théorie de l'air, inspirée de celle de Huygens. L'air est formé de *parties*, dont l'agitation produit le vent, composées de *particules* compressibles et elles-mêmes constituées de *corpuscules*. Il propose alors une hypothèse nouvelle : les *particules* d'air qui font ressort se déplacent dans de très petits espaces et à grande vitesse[23]. Perrault fait la distinction entre cet espace de mouvement et l'espace parcouru par le son. On est donc bien en présence de deux types de mouvements, l'un, alternatif, qui concerne les *particules* d'air autour de leur position de repos, et l'autre, mouvement 'apparent', qui concerne le déplacement du phénomène à vitesse constante[24]. C'est sans doute la première fois que la théorie 'ondulatoire' de la propagation du son, alors affranchie de sa métaphore aquatique, est exprimée de façon aussi claire. Par ailleurs, les *corpuscules* composant les *particules* portent, par leur configuration, l'information de 'forme' (ce qui donne le timbre au son). Le *Traité de la lumière* est rédigé à la même époque que le *Traité du bruit* de Perrault, et Huygens, dans sa démarche d'explication du mouvement ondulatoire de la lumière, prend l'exemple de la propagation du son, et la décrit succinctement d'une façon presque semblable à celle de Perrault[25].

A l'inverse de nombreux de ses prédécesseurs, Newton n'a pas de connaissances musicales et il aborde l'étude du son par une toute autre approche. Vers la fin du livre second (*Du mouvement des corps*), des *Principia*, Newton traite de la propagation des vibrations en général, dans les fluides puis dans les milieux élastiques. Comme Perrault, Newton envisage la propagation des vibrations comme celle de mouvements alternatifs de 'parties' du milieu considéré. « Tout corps vibrant propagera de toutes parts en ligne droite, dans un milieu élastique, le mouvement des pulsions»[26]. Ce mouvement des pulsions est distinct du mouvement de vibration qui le génère. Puis il étudie le mouvement alternatif de l'eau dans un tube en forme de U, et assimile ce mouvement à celui d'un pendule. Enfin Newton analyse le mouvement des ondes formées à la surface d'un fluide, et cherche à en trouver la loi en systématisant la notion de pulsion[27] : « Des pulsions étant propagées dans un fluide, chacune des particules de ce fluide, qui vont et qui viennent par un mouvement réciproque très prompt, sont toujours accélérées et retardées suivant les lois des oscillations des pendules». Dans une longue démonstration, Newton cherche à définir, lors de la propagation d'une onde à la surface de l'eau, la loi de variation de l'amplitude en fonction du temps. Il modélise ensuite

[21] Voir à ce sujet le *Journal de Trévoux*, avril 1726.
[22] *Compte rendus hebdomadaires des séances de l'Académie Royale des Sciences*, année 1678.
[23] Perrault, o.c.., p. 18.
[24] on dit 'célérité', de nos jours, pour éviter la confusion.
[25] C. Huygens, *Traité de la lumière*, in Oeuvre complètes, La Haye, Nijhoff, 1937, t. 19, p. 463.
[26] Newton, *Principia*, trad. Mme Du Châtelet, liv. II, p 398)
[27] id.., Prop. XLVII, p 403.

l'oscillation par un point se déplaçant à vitesse constante sur la circonférence d'un cercle, dont le mouvement est isochrone à celui d'un corps pesant en chute accélérée le long d'une cycloïde, courbe dont la développée est la sinusoïde. Ce qui est remarquable ici, c'est cette représentation de la durée d'une période par la circonférence d'un cercle symbolisant le temps. La représentation du temps de façon géométrique était presque inconcevable avant les *Principia*, seul (ou presque) Galilée l'avait esquissée dans les *Discorsi*, à propos de la chute des corps[28]. Dans la proposition suivante, Newton établit que « les vitesses des pulsions qui se propagent dans un milieu élastique sont en raison composée de la raison sous doublée de la force élastique directement, et de la raison sous doublée de la densité inversement ; en supposant la force élastique du fluide proportionnelle à sa condensation[29] ». La démonstration est complexe, mais elle est une application du principe fondamental de la dynamique, et des lois de la pneumatique récemment énoncées par Boyle et Mariotte. Newton cherche alors à déterminer les distances entre les pulsions. En fait il cherche à déterminer la relation entre la 'largeur de pulsion', la vitesse de propagation de cette pulsion et le nombre de vibrations dans un temps donné. Ce qu'il énonce de cette façon [30]: « Il faut trouver le nombre des vibrations qu'un corps excite par ses trémulations dans un temps donné. Et il faut diviser par ce nombre l'espace que la pulsion peut parcourir dans le même temps, et le quotient sera la largeur d'une pulsion »[31]. Puis le savant entreprend de déterminer la vitesse de propagation du son. Cependant le résultat est différent des observations mesurées et cette contradiction alimente de nombreuses contributions et articles polémiques tout au long du XVIIIe siècle.

Avec Newton on entre dans le siècle des mathématiciens. A l'inverse de ses prédécesseurs, Newton ne cherche pas à représenter le phénomène et n'utilise pas d'analogies destinées à illustrer le phénomène. Le son, c'est le *mouvement d'une perturbation* consistant en une succession de compressions et de détentes de l'air. Son approche est abstraite et analytique, et l'analogie proposée par Newton est celle de ce mouvement des pulsions avec le mouvement d'un point sur un cercle. Il s'agit là d'une démarche typiquement mathématique. Cependant l'étude des sons ne constitue pas pour lui un sujet digne de plus d'intérêt, et il passe à côté d'une étude analytique approfondie des phénomènes périodiques, dont la vibration sonore est l'archétype. La description de la propagation des sons par Newton, d'une apparente simplicité, marque une rupture dans l'histoire de l'acoustique physique. Certes, au XVIIIe siècle, on continue à faire des observations et à entreprendre des expériences, mais la pensée scientifique dans ce domaine est en quelque sorte stérilisée par le respect intellectuel manifesté par l'ensemble des scientifiques envers le savant anglais, et par la cohérence de ses propositions. Les contributions à la physique des sons au cours de la première moitié du XVIIIe siècle sont en définitive peu importantes.

La physique des sons au début du XVIIIème siècle

La physique expérimentale des sons se poursuit dans les voies tracées au siècle précédent. On étudie le comportement du son dans le milieu de propagation, en faisant varier les paramètres de pression et de température de l'air, on observe la propagation dans l'eau, plus tard on

[28] Galilée, *Discorsi*, 3ème journée. Il semble qu'Oresme ait évoqué, dès le XIVème siècle, une représentation du mouvement en fonction du temps.
[29] Newton, o. c., Prop. XLVIII.
[30] Newton, o. c., Prop. L, p 410.
[31] Le 'nombre des vibrations qu'un corps excite par ses trémulations dans un temps donné', c'est bien entendu la fréquence. 'L'espace que la pulsion peut parcourir dans le même temps', c'est la vitesse, ou plutôt la célérité de l'onde. Et enfin 'la largeur d'une pulsion', c'est la longueur d'onde. On trouve donc la relation maintenant bien connue : $\lambda = c / f$, avec λ, la longueur d'onde, c la célérité de l'onde, et f sa fréquence.

l'étudiera dans d'autres gaz puis dans les solides. On poursuit également les expériences de mesure de la vitesse du son, de façon de plus en plus précise et rigoureuse. Ce dernier sujet révèle la nécessaire connexion entre l'expérimentation et la théorisation.

L'auteur anglais de l'article 'sound' de la *Cyclopedia*, sur lequel se fonde l'essentiel de l'article 'SON' de l'*Encyclopédie*, cite à plusieurs reprises les travaux d'Hauksbee, savant anglais et élève de Hooke, qui s'intéresse à la physique de l'air ainsi qu'aux balbutiements de l'électricité. Francis Hauksbee (1666-1713) est membre de la Royal Society et publie plusieurs articles dans les *Philosophical Transactions,* de 1704 à 1715. Ses articles font l'objet d'une première publication en 1709, traduite en italien en 1716. Le jeune François de Brémond (1713-1742), entreprend une traduction en français des expériences de Hauksbee qui paraîtra tardivement, en 1754[32]. Connu surtout pour ses traductions de l'anglais au français d'ouvrages scientifiques, il avait entrepris celle des *Philosophical Transactions* pour les années 1731 à 1736. Admis comme 'adjoint' à l'Académie Royale des Sciences en 1739, Brémond était sous la protection de Dortous de Mairan nommé l'année suivante successeur de Fontenelle comme secrétaire de cette Académie. Cet esprit brillant n'aura pas le temps de se faire connaître ni d'être édité de son vivant, il meurt en 1742 à l'âge de 29 ans.

Hauksbee s'intéresse à la propagation du son dans l'air et fait quelques expériences avec un air raréfié et condensé. Cependant ses textes se limitent à relater les expériences et à énoncer les résultats sans avancer d'hypothèses construites. Les expériences de Hauksbee[33] sur le son ont été réalisée vers 1700, et portent sur trois thèmes : les différences d'intensité selon le niveau de compression de l'air, la propagation dans les liquides, et la nature ondulatoire de la propagation avec l'inévitable modélisation par les ondes à la surface de l'eau.

La première expérience de Hauksbee, la plus importante, concerne l'accroissement de l'intensité sonore avec l'augmentation de la 'condensation' (pression) de l'air dans un récipient en cuivre renfermant le corps sonore, ici une cloche. Des témoins sont placés à distance, à la limite de perception lorsque l'air du récipient est à pression ambiante. On injecte une 'atmosphère' (Hauksbee prend des précautions de langage pour oser ce néologisme) dans le récipient, et on constate une augmentation notable de l'intensité. On réitère l'opération jusqu'à cinq atmosphères, mais cette fois, le résultat n'est pas concluant, l'intensité semble ne plus augmenter, et Hauksbee s'en explique en invoquant les imperfections du matériel et les fuites de la soupape. Brémond, dans son commentaire, suggère l'emploi d'un baromètre, pratique devenue courante lors d'expériences sur l'air à partir des années 1720, grâce aux perfectionnements apportés notamment par Boerhaave, Mairan et Nollet[34].

La seconde expérience, en plein air, abandonne la mesure d'intensité par différence de perception pour adopter la mesure de la distance de perception limite. A pression ambiante on entend la cloche à 15 toises, après injection d'une atmosphère on l'entend à 30 et, après une nouvelle injection, à 45 toises. Au delà le son est d'intensité constante malgré l'augmentation de pression. Le procédé est apparemment plus sûr mais les résultats peu probants, alors on invoque le brouillard, la température, les cloches de l'église voisine... Hauksbee procède ensuite à l'expérience de propagation dans un air raréfié et s'excuse à nouveau des mauvaises conditions matérielles. S'il ne tire aucune conclusion de ses expériences, il semble qu'Hauksbee veuille établir une relation entre le degré de condensation de l'air et l'intensité du

[32] Hauksbee, *Expériences physico mécaniques*, trad. F. Brémond, Paris, 1754, 2 tomes.
[33] Hauksbee, *Expériences physico mécaniques*, o.c. , t. II, p. 307-382.
[34] Voir notamment l'article de Nollet : 'Des instruments qui assortissent la machine pneumatique de raréfaction', dans les *Mémoires de l'Académie Royale des Sciences*, Paris, 1741, p.338-362.

son ou plutôt la distance de perception. Outre cette relation, l'intérêt des expériences d'Hauksbee réside dans la mesure de distance de perception, qui constitue une méthode fiable à une époque où on est incapable d'évaluer l'intensité sonore. Le procédé est acceptable à condition, on le verra, d'en respecter les risques. En effet, dans ses conclusions, Hauksbee insiste surtout sur la proportionnalité entre la densité de l'air et la distance de perception sonore[35], approximation qui ne tient pas compte d'une troisième variable, l'élasticité, ce que Brémond va relever dans son commentaire. Hauksbee reproduit de façon plus efficace l'expérience de Boyle sur la propagation du son dans le vide. Le savant anglais procède ensuite à d'autres expériences, notamment sur la propagation du son dans un tube et sur la propagation dans l'eau, thème qui sera développé peu après par l'abbé Nollet[36]. Il ajoute à ces recherches un long discours sur une question ancienne et souvent débattue, la 'musique des sphères', ce son mystérieusement inouï produit par le mouvement des astres[37]. Mais Hauksbee est un rationaliste, il explique donc que la raréfaction de l'air dans les hautes couches de l'atmosphère fait obstacle à la propagation sonore.

François de Brémond profite de son statut de traducteur pour faire part de ses théories sur la propagation des sons. Il présente les travaux de Francesco-Maria Zanotti (1692-1777), philosophe et physicien de Bologne, qui avait pris connaissance des expériences d'Hauksbee par la traduction italienne de son traité[38]. Dans un long développement, Brémond confronte les deux approches, en introduisant une notion délaissée par le savant anglais, « l'élasticité des parties du milieu », qui constitue, selon le français, « une condition aussi essentielle pour la propagation des sons ». Il étudie alors la relation entre ces deux grandeurs, la densité (liée à la pression) et l'élasticité. L'une est-elle la conséquence de l'autre ou bien concourent-elles ensemble au phénomène ? Zanotti se livre à plusieurs expériences pour établir une relation entre l'intensité du son, la densité et l'élasticité de l'air, en provoquant l'augmentation d'élasticité par l'échauffement d'un air confiné, manipulation qui correspondait aux connaissances du moment. Il vérifie que le son ne change pas d'intensité dans un air chaud libre de s'échapper du récipient. Tout en relatant les expériences de Zanotti, Brémond démontre, en invoquant la nature sphérique de la propagation et la diminution de la densité (pression) avec le volume, que l'atténuation est proportionnelle au carré de la distance, ce que Mersenne avait suggéré et que tous les physicien avaient adopté depuis.

Pour Hauksbee il est normal que la perception du son augmente avec la distance en cas d'augmentation de la densité, car il suppose une influence plus grande de cet accroissement sur l'atténuation due à la distance, et il attribue alors la contradiction des mesures, au delà d'une certaine pression, à l'imperfection du matériel. Brémond relève d'ailleurs que l'augmentation de densité accroît l'intensité du son dans un rapport probablement supérieur à celui des carré des densités, comme semble l'indiquer l'expérience relatée par Sturm d'une cloche immergée dans laquelle un trompettiste joue et déclare être assourdi[39]. Zanotti, quant à lui, pose le problème ainsi : l'intensité est proportionnelle soit au carré de la densité, soit au carré du degré d'élasticité, soit au produit de ces deux grandeurs. Pour ne pas être perturbé par

---

[35] Hauksbee, o..c., p. 340-341.

[36] *Mémoires de l'Académie Royale des Sciences*, Paris, 1743, 'Mémoire sur l'ouïe des poissons et sur la transmission des sons dans l'eau', p.199-224.

[37] Platon, *Timée* ; Cicéron, *La République*, VI, 13 ; Macrobe, *Commentaire du songe de Scipion*, II, 1 ; ainsi que la critique d'Aristote dans le *Traité du Ciel*, II, 9. Plus tard, Kepler, *Harmonice mundi*, 1619.
Voir à ce sujet un ouvrage essentiel : Dominique Proust, *L'harmonie des sphères*, Paris, Seuil, 2001.

[38] Zanotti, Francesco Maria, 'De sono', in *De bononiensi scientiarum et artium Instituto atque Academia commentarii*, t 1, Bologne, 1731, p. 173 - 181.

[39] Brémond, in Hauksbee, o. c.., p. 367. Johann Christoph Sturm, *Collegium experimentale sive curiosum*, Nuremberg, 1685, t. II, tentamen I, p. 1-12.

l'atténuation liée à la distance, il procède autrement. La mesure d'intensité est réalisée par la mesure de durée d'extinction du son, méthode plus pratique que la mesure de distance, mais qui suppose une atténuation proportionnelle au temps, ce qui est loin d'être démontré.

Brémond, à la suite de Zanotti, reprend alors les mesures de Hauksbee, et en appliquant la loi de l'atténuation proportionnelle au carré de la distance, établit que « l'intensité du son à la même distance croît comme les carrés des nombres qui exprimeront les degrés de la densité de l'air dans le récipient »[40]. Cependant c'est ignorer l'influence de l'élasticité, qui suit la même loi de variation que la densité, selon Zanotti. Si on tient compte des mesures faites par Hauksbee, et si on admet l'influence conjointe de la densité et de l'élasticité, alors l'intensité sonore est proportionnelle au produit de la densité par le degré d'élasticité. Et comme l'élasticité croît avec la température, l'intensité du son devrait augmenter dans ce cas, ce que Zanotti va entreprendre de vérifier. Il procède alors à deux expériences.

Tout d'abord Zanotti prend un récipient où l'on peut compresser l'air au moyen d'une valve et dans lequel il place un dispositif sonore. Il plonge le récipient dans l'eau chaude et actionne le dispositif sonore. L'air compressé acquiert un ‘degré de ressort' supplémentaire sous l'action de la chaleur. Zanotti constate alors une augmentation de l'intensité sonore qu'il mesure, à l'aide d'un pendule, par la durée d'extinction du son, comparée à celle correspondant à un air à température ambiante. Comme le constate Brémond, l'augmentation d'intensité n'est donc pas due ici à l'accroissement de densité, constante dans ce cas, mais à l'augmentation du ressort consécutive à l'élévation de la température. Zanotti répète l'expérience à plusieurs reprises avec les mêmes constatations.

Dans une seconde expérience, Zanotti reprend ce même récipient muni d'un dispositif sonore, mais avec des orifices permettant à l'air de s'échapper. Une fois échauffé, l'air conserve son ‘degré de ressort', son élasticité, mais voit sa densité diminuer. Or on constate que l'intensité du son décroît avec l'augmentation de la température, ce qui montre la corrélation entre la force du son et sa densité. Zanotti peut alors énoncer la loi selon laquelle « la force du son suit les produits des degrés de l'élasticité de l'air par ceux de sa densité ». Zanotti invoque alors les expériences d'Hauksbee comme vérification de ses thèses. Cependant, comme le remarque justement Brémond dans son commentaire, « l'élasticité de l'air peut être compensée par sa densité et réciproquement, ce qui s'opposerait à l'augmentation ou à la diminution des son ». Cette belle construction semble donc un peu compromise...

Ces expériences sur le son et l’air, faisant intervenir des modifications de paramètres tels que densité, température et élasticité sont délicates à réaliser sans méthode de mesure précise de l’intensité sonore. Elles précèdent de quelques années la mathématisation de la propagation du son et sont pratiquement abandonnées jusqu’au siècle suivant. Bien plus tard, on redécouvre la propriété d’amplification du son avec l’augmentation de la pression lors des tentatives de sonorisation du cinématographe[41].

François de Brémond s’intéresse également aux variations de la vitesse de propagation en rapport avec la température et l'intensité. Il confronte plusieurs observations, de Derham et de s'Gravesande, selon lesquelles la vitesse de propagation est indépendante de la température, ce que conteste Newton et ce qui sera vérifié en 1737 par Cassini. En revanche, si les variations de vitesse selon l'intensité sont peu observées, elles sont constamment affirmées, et Brémond

[40] Brémond, in Hauksbee, o. c.., p. 319 et suiv.
[41] En 1902, dans les ateliers Gaumont, on invente le ‘mégaphone’, sorte de porte-voix à air comprimé, destiné à diffuser le son de l’ancêtre du cinéma parlant, le ‘chronophone’.

se range à cet avis, partagé par s'Gravesande, allant jusqu'à proposer que la vitesse du son doit être en rapport avec sa force puisque « c'est une plus grande vitesse dans les molécules d'air mises en mouvement qui produit un ton plus fort ». Puis Brémond s'intéresse à la propagation des sons dans les différentes couches de l'atmosphère. Il évacue rapidement la 'musique des sphères' mais s'attarde longuement sur les expériences pratiquées à des altitudes différentes. Ses conclusions sont mathématiquement justes mais contraires à l'expérience. En effet, d'après sa théorie, la conjugaison des lois d'atténuation proportionnelle à la fois au carré de la distance et au carré de la densité entraîne une intensité extrêmement faible pour des sons émis au sommet d'une montagne. Or les récits de nombreux explorateurs contredisent cette théorie.

Parallèlement à ces recherches, s'Gravesande, physicien hollandais, travaille à Leyde sur l'élasticité de l'air et tente de comprendre le phénomène de propagation d'une déformation, le mouvement ondulatoire de l'air, en s'inspirant de la théorie développée par Newton dans les *Principia*[42]. Ses observations sont reprises et largement commentées par son compatriote Musschenbroek dans son *Essai de physique*[43].

Musschenbroek, inspiré par Huygens, esquisse une modélisation assez conventionnelle du mouvement des parties d'air formant les ondes sonores. Une première partie d'air, contiguë avec le corps sonore subit un déplacement forcé qu'elle communique à la partie conjointe, inerte, ce qui la contraint à revenir en arrière, grâce à sa propriété d'élasticité. Le mouvement se communique de proche en proche jusqu'à l'oreille. Ce mouvement ondulatoire se propage de façon sphérique à partir du point d'émission. Musschenbroek ne traite pas le problème sous l'angle mathématique, son ouvrage ne s'adresse pas à des spécialistes mais à un public éclairé. C'est pourquoi il n'énonce pas la loi d'atténuation comme l'avait fait Brémond. En revanche il cite les nombreuses expériences de mesure de la vitesse du son, sujet qui passionne les expérimentateurs, d'autant plus que les savants, depuis Newton, s'obstinent à la calculer avec une différence d'environ 20% inférieure...

Jean-Philippe Rameau est le passeur entre le monde des musiciens et celui des sciences. Dès les années 1720 il entre en contact avec Dortous de Mairan dont il adapte l'hypothèse de la propagation des sons dans son ouvrage théorique, *Génération harmonique*, publié en 1737[44]. L'exposé de cette théorie nécessite quelques explications. Dortous de Mairan, originaire de Béziers, arrive à Paris en 1718, auréolé de trois prix consécutifs proposés annuellement par l'Académie des Sciences de Bordeaux sur divers sujets de physique. Rapidement admis à l'Académie Royale des Sciences de Paris, Mairan y fait une longue carrière et sera nommé secrétaire en remplacement de Fontenelle, en 1740. Peu de temps après son admission, en 1720, Dortous de Mairan propose une théorie de la propagation des sons inspirée de la théorie des couleurs de Newton que Fontenelle expose ainsi[45] :

> Le fluide où se répand la lumière, et qui en est le véhicule pour le porter à nos yeux, est différent de celui qui est le véhicule du son : celui-ci est l'air proprement dit, et l'autre une matière éthérée incomparablement plus subtile. Ce qui doit causer, dans le système de M. Newton, les différentes couleurs et leur différent degré de *réfrangibilité* ce sont des particules, ou si l'on veut, des globules de cet éther, qui, à cause de leur différente consistance ou de leur différente grosseur, se meuvent ou frémissent

[42] Jakob s'Gravesande, *Elements de physique*, Leyde, 1720, trad. Joncourt, Paris, 1746, t. 2, livre IV, chap. 7, p. 51-74.
[43] Musschenbroek, *Essai de physique*, Leyden, Luchtmans, 1751, t. 2, p. 689-711.
[44] J.-P. Rameau, *Génération Harmonique, ou Traité de Musique Théorique et Pratique*, Paris, Prault, 1737.
[45] Fontenelle, Histoire de l'Académie des Sciences, 1720, p. 14-15.

> différemment, et avec des vitesses inégales. De même il y aura dans l'air des particules d'un ressort différent, qui par conséquent feront, en plus ou moins de temps, un même nombre de vibrations. Chacune ne sera donc à l'unisson, qu'avec les corps sonores qui feront leurs vibrations dans le même temps qu'elle et ne frémira que quand elle sera ébranlée par eux. Il y aura dans l'air des particules pour chaque ton, comme il y en a dans l'éther pour chaque couleur, et il ne sera plus étonnant que l'éther transmette en même temps sans confusion, différentes couleurs, ni l'air, différents tons.

Dortous de Mairan y revient longuement en 1737 avec la publication d'un mémoire sur la propagation du son dans lequel il approfondit son hypothèse[46] :

> Je dis que l'air, en tant que véhicule du son, est un assemblage d'une infinité de particules de différente élasticité, dont les vibrations sont analogues par leurs durées à celles des différents tons du corps sonore ; qu'entre toutes ces particules, il n'y a que celles de même espèce, de même durée de vibration, et à l'unisson du corps sonore, qui puissent retenir les vibrations semblables de ce corps, et les transmettre jusqu'à l'oreille ; que la plus petite masse d'air sensible contient plusieurs de ces particules de toute espèce, et que toutes leurs vibrations à la fois, ou les frémissements de la masse dans toutes ses parties, ne peuvent produire que le Son en général, ou le bruit.

Dortous de Mairan réfute, à la suite de nombreux savants comme La Hire, Perrault et Newton, l'analogie avec les ronds dans l'eau, puisque de nombreuses observations ont confirmé la vitesse variable des ondes selon le poids de la pierre et la composition des mouvements lors de la rencontre entre des ondes de fréquences différentes. Pour Mairan, le processus du son est le même que celui d'un ressort dont les vibrations sont 'isochrones à elles-mêmes' et indépendantes de la masse. Son hypothèse, déjà développée dans le *Traité de l'aurore boréale*, lu en séance en 1731, est que l'air est composé de corpuscules d'inégale grosseur, « car en supposant toutes ces particules de même figure et de semblable matière, l'inégalité des vibrations entraîne, comme on voit, l'inégalité des grosseurs »[47]. L'idée de Mairan est d'attribuer la conservation des caractéristiques qualitatives du son, non à la 'figure' des particules, les '*eidola*' des atomistes, mais à leur dimension, caractéristique de leurs vibrations propres. Cependant, la théorie a des conséquences inattendues sur la vitesse, et Mairan affirme qu'il a observé que le son d'une cloche aiguë parvenait plus vite à l'oreille qu'une cloche plus grave, ce qui est pour le moins audacieux[48].

Pourtant la problématique est correctement posée, c'est celle de la superposition et la coexistence simultanée de sons de hauteurs différentes. Mairan se réfère à la proposition développée par Newton, dans l'*Optique*, sur les couleurs[49]. On sait que Newton avait esquissé une théorie brumeuse et risquée sur l'analogie entre les sept couleurs du prisme et les sept tons de la gamme[50]. Elle a été reprises par de nombreux auteurs comme le père Castel qui invente à la même époque le 'clavecin pour les yeux', sorte d'instrument de musique qui

---

[46] *Mémoires de l'Académie Royale des Sciences*, Paris, 1737 : Dortous de Mairan, 'Discours sur la propagation du son', p.1-20 ; puis 'Eclaircissements sur le discours précédent', p. 20-58.
[47] *Mém. Ac. Sc*., 1737, o.c., p. 21.
[48] Idem., p. 18-19. De nombreuses expériences, depuis Gassendi, ont largement montré l'indépendance de la hauteur par rapport à la vitesse du son. (Gassendi, *Animadversiones*…, Lyon, Anisson, 1649, p.279-280).
[49] Dortous de Mairan fait peu référence explicitement à Newton dans son mémoire de 1737, cependant Fontenelle, dans son commentaire sur le travail (semble-t-il non publié) de Mairan de 1720, l'affirme sans ambiguïté. Mairan l'avait d'ailleurs adressé à Newton.
[50] I. Newton, *Optique*, livre II, partie I, obs. XIV.

associait les couleurs aux notes[51]. En revanche elle a été réfutée par d'autres savants comme Buffon[52]. Comme le remarque justement Fontenelle dans son commentaire, « il ne faut user des analogies qu'avec une certaine circonspection, et on ne doit pas croire que pour découvrir ce qui appartient à l'acoustique ou aux tons, on n'ait qu'à recopier ce qui a été découvert sur l'optique ou sur les couleurs. Le parallèle des couleurs et des tons est assez borné » [53].

Curieusement cette théorie est peu contestée dans les publications postérieures de l'Académie Royale des Sciences, alors qu'elle semble bien peu étayée. Cette hypothèse des parties d'air qui entreraient en résonance tandis que d'autres resteraient inertes, introduit une curieuse discrétisation du processus sonore qui semble se référer à l'atomisme du siècle précédent. C'est tout à fait satisfaisant pour un musicien, et pourquoi pas pour un physiologiste[54], mais délicat à défendre pour un physicien qui étudie le phénomène sonore dans son ensemble, alors que depuis quelques décennies on travaille à inventer une physique du continu. C'est pourquoi, si cette théorie est reprise par Jean-Philippe Rameau[55], puis par d'autres théoriciens de l'acoustique musicale comme Pierre Estève (1720-1790)[56], elle est contestée par plusieurs physiciens, parfois inconnus tel Barrigue de Montvallon[57] ou plus célèbres comme Gabriel Cramer qui la réfute courtoisement mais fermement[58], et d'Alembert qui l'écarte, notamment dans l'article 'FONDAMENTAL' (VII, 56b). Il semble pourtant que cette hypothèse ait été assez bien acceptée en France entre 1737, date de publication du mémoire de Mairan, et le début des années 1750, lorsque les physiciens élaborent une théorie mathématique de la vibration. Cependant cette théorie n'est pas évoquée dans l'article 'AIR' de l'*Encyclopédie*, lorsqu'est abordée la structure de l'air, ce qui laisse comprendre qu'elle était un peu dépassée en 1750.

A partir de 1740 environ, un auteur revient souvent sous la plume des savants, et notamment des Encyclopédistes, sans doute parce que son *Programme*, puis ses *Leçons de physique expérimentales* semblent faire consensus, il s'agit de l'abbé Nollet. Jean-Antoine Nollet fait partie, avec Polinière, l'anglais Desaguliers et Musschenbroek des savants expérimentateurs. Ce sont avant tout des artisans, plus souvent à l'atelier qu'à la bibliothèque, mais qui toutefois maîtrisent toutes les connaissances alors disponibles en physique. Nollet donne un cours de physique expérimentale destiné au public éclairé, à partir de 1734. Par la suite, il est surtout réputé pour ses apports dans le domaine de l'électricité. Moins connu comme acousticien, on le présente en général, et notamment dans l'*Encyclopédie*, comme le spécialiste de l'étude de la propagation des sons dans l'eau, après la publication d'un mémoire sur l'ouïe des

---

[51] Père Castel, 'nouvelles expériences d'optique et d'acoustique', in *Journal de Trévoux*, 1735, p. 1444-1482..
[52] *Mémoires de l'Académie Royale des Sciences*, Paris, 1743 : Buffon, 'Sur les couleurs accidentelles', p. 149.
[53] Fontenelle, *Histoire de l'Académie Royale des Sciences*, Paris, 1737, p. 102.
[54] On sait de nos jours que l'oreille réagit selon des bandes de fréquences auxquelles correspondent des 'cellules ciliées' propres à chacune de ces bandes, dans l'organe de Corti (oreille interne).
[55] Jean-Philipe Rameau, *Génération harmonique*, Paris, Prault, 1737, p. 3 : « Nous devons supposer l'air divisé en une infinité de particules, dont chacune est capable d'un Ton particulier; lorsque par exemple, on entend à la fois les deux Sons de la Quinte, dont l'un fait deux vibrations pendant que l'autre en fait trois, on ne conçoit pas comment la même masse d'Air peut fournir dans un même tems ce différent nombre de vibrations; à plus forte raison encore s'il se trouve un plus grand nombre de Sons ensemble, au lieu qu'il est bien plus plausible d'imaginer en ce cas que chacun de ces Sons naît d'une masse d'Air particuliere, dont le nombre des vibrations occasionne le degré du Ton qui nous affecte pour lors. » . Au sujet de l'influence de Dortous de Mairan sur Rameau, voir André Charrak, *Raison ou perception, fonder l'harmonie au XVIIIème siècle*, Paris, Vrin, 2001, p.96 et suiv.
[56] Pierre Estève, *Nouvelle découverte du principe de l'harmonie,* Paris, Jorry, 1752. Sur ce texte d'Estève, voir l'édition qu'en a faite André Charrak, éd. ENS, 2002.
[57] Barrigue de Montvallon, *Nouveau système sur la transmission et les effets des sons, ...*, Paris, Bordelet, 1743.
[58] Gabriel Cramer, lettre de juillet 1740 à M. de Mairan, in *Journal des sçavans*, 1741, p.170-185.

poissons[59]. Ce sujet passionne plusieurs savants à cette époque comme le chirurgien Claude-Nicolas Le Cat[60], le médecin Etienne-Louis Geoffroy[61] ou le naturaliste Jakob Theodor Klein[62], et avait été traité par Aristote dans le *Traité de l'âme* et dans l'*Histoire des animaux*. Pourtant, Nollet parle assez largement de la propagation du son dans l'air, et l'inclut dans son *Programme d'un cours de physique expérimentale*, dès 1738[63]. Nollet, comme Brémond et Le Cat adoptent la représentation de la propagation du son dans l'air proposée par Dortous de Mairan. Pourtant, peu de temps auparavant, la théorie ondulatoire avait été très correctement décrite par Noël Régnault dans les *Entretiens physiques d'Ariste et d'Eudoxe*, ouvrage de vulgarisation, certes, mais rigoureux et documenté. Ce passage introduit la problématique de la propagation du son à vitesse constante[64] :

> Ariste : Une bille porte son impression d'autant plus loin, dans un certain temps, qu'elle a reçu plus de mouvement : pourquoi l'air frappé ne ferait-il pas de même ?
> Eudoxe : Il y a de la différence. Le mouvement de la bille est un mouvement de transport qui ne fait qu'éloigner la bille de l'endroit d'où le mouvement part. Mais le mouvement de l'air est un mouvement de vibration, uniquement employé à faire avancer les extrémités des lames d'air vers un centre commun et à les en éloigner. Or ces extrémités se trouvent également éloignées de ce centre dans un temps déterminé […]

Cette explication est pertinente et elle aurait dû interpeller les partisans des particules différenciées de Mairan. Cependant Régnault est un jésuite, et ceci suffit sans doute à le disqualifier, dans ce XVIIIème siècle où la querelle entre les savants et l'Eglise prend un tour de plus en plus violent. Il semble bien que sur certains sujets secondaires comme celui-ci, l'intransigeance prenait le pas sur la sérénité de la réflexion.

Un autre grand thème, en rapport indirect avec la propagation du son, est l'étude analytique de la vibration des cordes qui donne lieu à la célèbre controverse dite des 'cordes vibrantes', qui s'expose dans les mémoires de l'Académie des Sciences de Berlin, entre 1749 et 1753 et dont les protagonistes sont d'Alembert, Daniel Bernoulli et Leonhardt Euler. Lors de la rédaction de l'article 'FONDAMENTAL, SON FONDAMENTAL'(VII, 54-57) écrit peu de temps après la publication de ses articles sur les cordes vibrantes, d'Alembert reprend en partie, en la complétant, la thèse de Bernoulli, écarte celle d'Euler, et fait un exposé complet de sa propre théorie (VII, 55b-56a) qu'il avait déjà présentée dans l'article CORDES (*vibrations*) (IV, 210-211). C'est peu de temps avant que d'Alembert prenne ses distance avec le projet encyclopédique, et sa contribution à l'article 'SON', rédigé probablement vers 1760, est, dès lors, très succincte.

---

[59] J.-A. Nollet, 'Mémoire sur l'ouïe des poissons et la transmission des sons dans l'eau', in *Mémoires de l'Académie Royale des Sciences*, Paris, 1743, p.199-224.
[60] Claude-Nicolas Le Cat, *Traité des sens,* Rouen, 1740.
[61] Etienne-Louis Geoffroy, 'Premier mémoire sur l'organe de l'ouïe des reptiles et de quelques poissons…' in *Mémoires de divers savants*…t 2, Paris, 1755.
[62] Jakob Theodor Klein, Historiae piscium naturalis, Leipzig, 1740, et Mantissa ichthyologica de sono et auditu piscium…, Leipzig, 1746.
[63] J.-A. Nollet, *Programme ou idée générale d'un cours de physique expérimentale*, Paris, 1738. *Leçons de physique expérimentale*, Paris, Guérin, 1745, t. 3, p. 473-487.
[64] Noël Regnault, *Entretiens physiques d'Ariste et d'Eudoxe ou physique nouvelle en dialogues*, Paris, 1732, 1745, t 3, p. 42.

Le Son dans l'*Encyclopédie*

Il y a deux articles 'SON' dans l'*Encyclopédie* : l'un se rapporte à la physique l'autre à la musique. Ce dernier, 'SON (*en musique*)' est rédigé par Jean Jacques Rousseau, auteur de plus de 300 articles sur la musique. L'article 'SON (*physique*)', signé (O), apparaît comme étant écrit par d'Alembert. Cependant une lecture attentive montre que la plus grande partie est constituée de la traduction de l'article 'Sound' de la *Cyclopedia* (1728) de Chambers.

L'article sur le son en musique, écrit par Rousseau qui parle volontiers à la première personne, s'étend largement sur le rôle de l'air dans le phénomène sonore :

> SON (*en musique*) (*Enc*., XV, 345-348)
> (p. 345a) […] Je suppose d'abord que le véhicule du *son* n'est autre chose que l'air même. Premièrement, parce que l'air est le seul corps intermédiaire de l'existence duquel on soit parfaitement assuré, entre le corps sonore et l'organe auditif, qu'il ne faut pas multiplier les êtres sans nécessité, et que l'air suffit pour expliquer la formation du *son;* et de plus, parce que l'expérience nous apprend qu'un corps sonore ne rend pas de *son* dans un lieu exactement privé d'air. Si l'on veut absolument imaginer un autre fluide, on peut aisément lui appliquer tout ce que nous avons à dire de l'air dans cet article.

Ici Rousseau écarte l'hypothèse d'un milieu plus fluide, sorte d'éther sonore, qui serait commun aux corps sonores, à l'air et à tout autre milieu de propagation.

Rousseau expose ensuite la théorie communément adoptée des vibrations de l'air, analogues à celles du corps sonore, en se référant aux expériences habituellement pratiquées. Le texte est largement inspiré, jusqu'aux exemples proposés, du chapitre consacré au son dans le *Traité de Physique* de Rohault[65] qui, au milieu du XVIIIe siècle, faisait encore autorité comme manuel de physique cartésienne auprès du grand public éclairé. Cependant, comme beaucoup de théoriciens de la musique, Rousseau ne distingue pas ces 'vibrations' aériennes, du mouvement de propagation d'ondes sans transport de matière. Toutefois, alors que Rohault évoque l'obstacle de la superposition sans l'approfondir, Rousseau affronte le problème :

> (p. 346a) […] Une difficulté qui resterait à expliquer est de savoir comment deux ou plusieurs *sons* peuvent être entendus à la fois. Lorsqu'on entend, par exemple, les deux *sons* de la quinte, dont l'un fait deux vibrations, pendant que l'autre en fait trois; on ne conçoit pas comment la même masse d'air peut fournir dans un même temps ces différents nombres de vibrations, et bien moins encore, quand il se trouve plus de deux *sons* ensemble.

Alors Rousseau expose deux des représentations de la propagation du son dans l'air capables de prendre en compte cette exigence, dont celle de Dortous de Mairan :

> (p. 346a) […] L'air, selon lui, est divisé en particules de diverses grandeurs, dont chacune est capable d'un ton particulier, et n'est susceptible d'aucun autre. De sorte qu'à chaque *son* qui se forme, les particules qui y sont analogues s'ébranlent seules, elles et leurs harmoniques, tandis que toutes les autres restent tranquilles jusqu'à ce qu'elles soient émues à leur tour par les *sons* qui leur correspondent. Ce système parait

[65] Jacques Rohault, *Traité de physique*, Paris, 1671, nombreuses rééditions jusqu'à 1750, chap. 26, *du son.*

> très ingénieux; mais l'imagination a quelque peine à se prêter à l'infinité de particules d'air différentes en grandeur et en mobilité, qui devraient être répandues dans chaque point de l'espace, pour être toujours prêtes au besoin à rendre en tout lieu l'infinité de tous les sons possibles. Quand elles sont une fois arrivées au tympan de l'oreille, on conçoit encore moins comment, en les frappant plusieurs ensemble, elles peuvent y produire un ébranlement capable d'envoyer au cerveau la sensation de chacune d'elles en particulier.

Prudent, Rousseau n'adhère pas à l'hypothèse de Mairan et conclut, sans proposer d'autre explication : « Il semble qu'on éloigne la difficulté plutôt qu'on ne la surmonte ».

Quant à l'autre théorie présentée par Rousseau, on lit :

> (p. 346a) […] Mengoli prétendait aller au-devant de cette dernière objection, en disant que les masses d'air, chargées, pour ainsi dire, de différents *sons*, ne frappent le tympan que successivement, alternativement, et chacune à son tour; sans trop songer à quoi cependant il occuperait celles qui sont obligées d'attendre que les premières aient achevé leur office.

L'hypothèse des 'impulsions alternatives' de Pietro Mengoli (1626-1686) est audacieuse[66]. Se basant sur l'existence de deux membranes dans l'oreille, Mengoli réfute la théorie de la 'coïncidence des coups' qui fonde la théorie de la consonance depuis Benedetti et Galilée. Il imagine alors que les sons sont des impulsions successives qui se propagent sans se perturber. Mengoli était plutôt connu comme mathématicien et sa contribution à la physique des sons ne semble pas avoir eu beaucoup de retentissement sauf à Londres où il avait réussi à attirer l'attention d'Oldenburg qui pourtant ne le suit pas dans cette voie originale[67]. On peut s'interroger sur l'importance accordée par Rousseau à ce savant oublié.

Parmi les trois caractéristiques du son, Rousseau relève qu'à côté de la hauteur et de l'intensité, il y a le timbre qui fait que : « Un hautbois aura beau se mettre exactement à l'unisson d'une flûte, il aura beau radoucir le *son* au même degré, le *son* de la flûte aura toujours je ne sais quoi de doux et de moelleux, celui du hautbois je ne sais quoi de sec et d'aigre, qui empêchera qu'on ne puisse jamais les confondre. ». Cependant Rousseau avoue son ignorance, et en reste là pour ce qui concerne la physique des sons : « Il faudra donc trouver dans les corps sonores une troisième modification différente de ces deux, pour expliquer cette dernière propriété; ce qui ne me paraît pas une chose trop aisée; il faut recourir aux *Principes d'acoustique* de M. Diderot, si l'on veut approfondir cette matière. ».

Les *Principes généraux d'acoustique* de Denis Diderot forment le premier des '*Cinq Mémoires de Mathématiques*', un de ses premiers ouvrages paru en 1748. Ce traité peu connu propose un aperçu de l'état des connaissances en acoustique avant l'*Encyclopédie*. Diderot y expose la mathématisation de la vibration des cordes par Brook Taylor, encore peu connue en France[68]. Il donne également une explication de l'échelle logarithmique appliquée à la hauteur du son, et esquisse une étude de la vitesse instantanée de la corde vibrante. Cependant

---

[66] Pietro Mengoli, *Speculationi di musica*, Bologne, 1670. Des courts extraits sont traduits en anglais dans *Philosophical Transactions*, 100, 1674, p. 6194-7000.

[67] Au sujet de cette théorie, voir l'article de Paolo Gozza,'Atomi, spiritus, suoni, le speculationi di musica (1670) del galileano Pietro Mengoli', *Nuncius*, vol. 5, 1991, 75-98.

[68] Brook Taylor, 'De motu nervi tensi', in Phil. Trans. 337, Londres, 1713.
Methodus incrementorum directa et inversa, Londres, Pearson, 1715.

l'acoustique harmonique occupe une place importante, au détriment de l'acoustique physique et de la propagation du son. L'attente de Rousseau sur l'explication physique du timbre est déçue, car Diderot ne traite le sujet que sous l'angle de l'harmonie. Il est vrai qu'aborder la physique des sons par l'étude des cordes vibrantes constitue le paradigme dominant depuis la Renaissance, ce qui conduit à une analyse très partielle du phénomène sonore. En effet, cette approche privilégie la caractéristique de hauteur, liée au nombre de vibrations, au détriment de l'étude de la propagation qui reste bien mystérieuse. Toutefois Diderot esquisse une hypothèse de la structure de l'air, et reprend une audace terminologique qui commence à apparaître autour de ces années, celle de la 'fibre sonore'.

La notion de fibre apparaît à la fin du XVIIème siècle, d'abord dans le monde de la physiologie. Un long article de l'*Encyclopédie* décrit la fibre comme un corps ne possédant qu'une dimension, sa longueur :

> FIBRE, (*Economie anim. Medecine*.) (*Enc.*, VI, 662-675)
> (VI, 664a) […] *Formation des fibres*. Un élément séparé peut être considéré comme un point mathématique, qui n'a ni longueur, ni largeur, ni profondeur; mais dès qu'il est uni à d'autres, selon la direction d'une ligne, avec quelque sorte de résistance à la division des parties du tout qui en est formé, il en résulte une des trois sortes de dimensions, qui est la longueur; c'est un corps composé, étendu seulement selon cette direction; c'est un corps divisible seulement en ce sens - là: c'est ainsi que peut être conçûe la formation de la fibre simple, qui, par rapport à la divisibilité, est censée n'avoir ni longueur, ni épaisseur;

Le paragraphe signé d'Aumont se termine par les propriétés de la fibre, dont l'élasticité:

> (p. 666b) […] Une autre propriété des fibres, qui dérive bien naturellement de la force élastique, c'est la vibratilité; ce seroit ici le lieu d'en traiter aussi; mais elle appartient de trop près au méchanisme de l'ouïe, pour en séparer ce qu'il y a à dire de cette propriété consectaire. *Voyez Son, Ouie, Oreille*

Il semble que la définition et les propriétés des fibres appliquées à l'acoustique soient introduites par Jean Bernoulli (Jean II, 1710-1790) dans son *Mémoire sur la propagation de la lumière* primé par l'Académie Royale des Sciences en 1736[69] :

> Le son, aussi bien que la lumière, prend son origine par la production des fibres qui s'excitent immédiatement à l'endroit où le corps, qu'on appelle sonore, ébranle l'air circonvoisin, lesquelles fibres ensuite s'étendent, en se multipliant, comme je l'expliquerai, à des distances plus ou moins grandes, selon la grandeur de la force avec laquelle le corps sonore frappe l'air qui le touche ; je les appellerai *Fibres sonores*, comme j'ai appelé celles de la lumière *Fibres lumineuses*. Dans l'essentiel, ces deux sortes de fibres ont la même nature : car les unes et les autres demandent un milieu élastique, toujours dans un état de compression, dont les parties s'efforcent sans cesse de s'étendre, mais qui sont toujours contrebalancées par les forces égales des parties voisines.

Selon Jean Bernoulli, ces fibres sont élastiques et subissent des compressions et des détentes dans le sens de leur longueur. Les agitations longitudinales de ces parties d'air rencontrant

[69] Jean Bernoulli, *Recherches physiques et géométriques sur la question: comment se fait la propagation de la lumiere*, Pièce qui a remporté le prix de l'Académie royale des sciences en l'année 1736, Paris, 1737, p. 24-25.

l'opposition des parties conjointes, « ces parties se comprimeront sur la direction de la fibre, et s'étendront par là en largeur sur les deux côtés, ce qui fera naître de nouvelles fibres accessoires qui sortent de la principale comme des branches, et qui peuvent porter aussi le son, quoique plus faiblement, par des voies obliques, et non directement opposées à son origine ». Cette représentation permet de concilier la notion de 'rayon sonore' inadaptée mais très présente dans la littérature, avec celle de propagation d'ondes sonores, développée par Huygens, dans laquelle chaque point de réception d'une onde devient émetteur d'autres ondes[70].

Si d'Alembert est présenté par la signature (O) comme l'auteur de l'article 'SON (*physique*)', celui-ci est constitué en grande partie de la traduction de l'article 'sound' de la *Cyclopedia*. Le physicien français n'en a écrit que le quart environ, dont un paragraphe complet sur la vitesse du son, issu de son *Traité du mouvement des fluides* paru en 1744[71]. L'article 'SON' de l'*Encyclopédie* n'échappe pas à cette problématique de la vitesse du son qui traverse le siècle. La *Cyclopedia* avait déjà largement rapporté les nombreuses expériences anglaises de mesure de la vitesse du son (Francis Roberts, Boyle, Walker, Flamsteed et Halley, Derham). Leonhard Euler écrit en 1727, il a alors 20 ans, une *Dissertatio physica de sono*, son premier travail universitaire dans lequel il tente d'expliquer par un artifice de calcul la différence entre la vitesse mesurée et celle calculée par Newton. Il y reviendra en 1738 à la fin de la *Dissertatio de igne*. Tout au long du XVIIIe siècle cette distorsion plonge les scientifiques dans une grande perplexité, tiraillés entre le respect envers la rigueur de la démonstration du savant anglais, et les mesures de plus en plus précises effectuées dans plusieurs pays, notamment par Cassini de Thury en 1737 à la demande de l'Académie Royale des Sciences. Le problème est repris en 1737 par Jean Bernoulli dans le *Discours sur la propagation de la lumière*. D'Alembert consacre un chapitre du *Traité des fluides* (1744) à cette même question et Lagrange y revient en 1759 dans les *Recherches sur la nature et la propagation du son*.

Après avoir décrit la théorie du son exposée dans les *Principia* de Newton comme le passage « peut-être le plus difficile et le plus obscur de tout l'ouvrage », d'Alembert oppose à cette théorie celle d'un auteur, ici anonyme, qui fait lui aussi référence aux fibres sonores :

> SON (*physique*) (*Enc.*, XV, 343-345)
> (p. 344b) […] Un auteur qui a écrit depuis sur cette matiere, prétend qu'on peut faire contre la théorie de MM. Newton & Bernoully, une objection considérable; savoir, que ces deux auteurs supposent que le *son* se transmet par des fibres longitudinales vibrantes, qui se forment successivement, & qui sont toujours égales entr'elles; or cette hypothèse n'est point démontrée, & ne paroît point même appuyée sur des preuves solides.

Cet auteur encore inconnu n'est autre que Joseph-Louis de Lagrange (1736-1813) qui, à l'âge de 23 ans vient de publier un texte auprès de l'Académie de Turin qu'il venait de créer. Ce

[70] Si on appelle 'rayon sonore' la perpendiculaire au front d'ondes, c'est à dire la direction de propagation de l'énergie sonore, alors ce terme est acceptable. Cependant il est équivoque à cause de l'analogie qu'il induit avec les rayons de lumière, en particulier lors de la réflexion du son qui se produit selon les lois différentes (égalité de l'angle d'incidence et de réflexion pour la lumière ; et pour le son, production d'un champ sonore au point de réflexion qui se propage dans un volume quasi-sphérique, le plus souvent cardioïde). La confusion est fréquente, encore de nos jours.

[71] D'Alembert, Traité de l'équilibre et du mouvement des fluides, Paris, David, 1744, 219, De la vitesse du son, p.181.

mémoire publié en 1759 est intitulé *Recherches sur la nature et la propagation du son*[72]. A cette occasion, le jeune physicien prend contact avec d'Alembert qui l'encourage à poursuivre ses recherches sur la mathématisation de la propagation des ondes. Dans sa première lettre à Lagrange, d'Alembert accuse réception du mémoire sur le son et lui fait cet éloge «[…] vous êtes destiné, si je ne me trompe, à jouer un grand rôle dans les sciences, et j'applaudis d'avance à vos succès… »[73]. A la suite d'une correspondance importante et enrichissante avec Euler, Lagrange publie deux autres mémoires sur le son en 1760 et 1761 qui approfondissent et complètent les différents articles sur les cordes vibrantes publiés dix ans plus tôt par ses aînés.

D'Alembert quitte l'équipe rédactionnelle de l'*Encyclopédie* en 1759 et l'article 'SON (*physique*)', ébauché probablement à cette même époque, semble très incomplet et ne répond pas aux attentes. Il est en effet constitué d'un curieux mélange de théories anciennes et d'autres très avancées. On y côtoie Mersenne, Kircher, Marsh, puis on y lit les théories de Claude Perrault à travers la partie traduite de la *Cyclopedia*, ainsi que, très brièvement, celle de Newton et enfin cette allusion bien courte aux recherches de Lagrange.

Le silence de d'Alembert sur le son dans l'*Encyclopédie*

Si la physique des sons est peu abordée dans le *Discours préliminaire*, elle figure sous la dénomination 'acoustique' dans le *Système figuré*, aux côtés de la mécanique et de l'optique, sans détail il est vrai. L'introduction de cette discipline sous le nom qui désigne généralement la théorie musicale des intervalles et des consonances est réellement une innovation. Désormais le son n'est plus seulement la matière première de la musique, mais c'est également un phénomène naturel dont il est légitime d'entreprendre l'étude. L'acoustique fait partie, dans l'*Explication détaillée du système des connaissances humaines*, des 'mathématiques mixtes' qui comprennent « autant de divisions et de sous-divisions qu'il y a d'êtres réels dans lesquels la quantité peut être considérée ». C'est ainsi que « la quantité considérée dans le son, dans sa véhémence, son mouvement, ses degrés, ses réflexions, sa vitesse, etc., donne l'acoustique ». Pourtant, cette acoustique physique n'est pas traitée en tant que telle dans l'*Encyclopédie* à l'entrée 'ACOUSTIQUE', ni à l'entrée 'AIR', ce qui aurait permis à d'Alembert de développer le sujet, mais renvoyée à l'article 'SON', rédigé bien plus tard, et dont l'insuffisance est sans aucun doute imputable à l'absence du physicien désormais retiré du projet encyclopédique.

Il est alors pertinent d'approfondir, pour le comprendre, ce silence sur le son lors de l'étude de l'air par les Encyclopédistes. Pour expliquer ce silence, on peut formuler l'hypothèse, compte tenu de l'état des connaissances, d'une simple ignorance du mécanisme de la propagation d'une perturbation dans un fluide et, d'une façon générale, de l'évolution d'une transformation physique dans le temps. Plutôt que de s'aventurer dans des conjectures hasardeuses, les Encyclopédistes préfèreraient dans ce cas un silence prudent. Cependant, cette hypothèse du silence par ignorance est peu crédible. Au moment de la rédaction de l'article 'AIR', vers 1750, d'Alembert est engagé, avec son rival Euler et Daniel Bernoulli, dans l'étude analytique des vibrations des cordes. Ces savants éminents sont sur le point de réaliser de grandes avancées dans le domaine du mouvement des ondulations, et d'Alembert n'ignore pas que ces théories nouvelles vont s'appliquer à la propagation des sons.

---

[72] Joseph-Louis de Lagrange, 'Recherches sur la nature et la propagation du son', *Miscellanea Taurinensia*, I, 1759, in *Œuvres de Lagrange*, Paris, Gauthier-Villars, 1868, t 1, p.40-148.
[73] J.-L. Lagrange, *Œuvres*, t. 13, Correspondance, p. 4.

Une autre hypothèse peut être formulée sur l'absence du son dans l'article 'AIR', c'est la conviction maintenant établie, chez d'Alembert et chez d'autres physiciens, de la nature particulière du 'mouvement' sonore, et du simple rôle de milieu de propagation attribué à l'air. Si on parvient à déterminer les lois de propagation de ce type de mouvement, elles seront conservées quel que soit le milieu de propagation, et même, pourquoi pas, quel que soit la nature du phénomène agissant à distance. Une phrase du *Discours préliminaire*, à propos des corps électriques, pourrait s'appliquer aux phénomènes sonores : « [ils] sont peut-être en un sens les corps les moins connus, parce qu'ils paraissent l'être davantage». Les phénomènes sonores sont en effet largement connus, observés, voire mesurés, mais il est encore impossible d'en trouver le principe et les lois. On retrouve d'ailleurs le même type de difficultés au sujet de l'électricité et du magnétisme. Ces trois domaines de la physique, dissemblables et séparés, sont parfois même écartés des classifications des sciences, puisque, si le *Système figuré* introduit discrètement l'acoustique physique, il ne cite ni l'électricité ni le magnétisme[74]. Ces phénomènes ont en commun un mouvement d'une nature particulière, sans transport de matière. Dans le cas du son, il s'agit du mouvement d'une perturbation, en quelque sorte du mouvement d'un mouvement. Déjà vers 1670, Gaston Pardies avait évoqué le mouvement d'ondulation (et non de vibration qu'il distinguait), comme un principe commun à ces phénomènes, mais, avant Newton, cette abstraction rebutait de nombreux savants plus séduits par les représentations que par le raisonnement.

La démarche de d'Alembert est en rupture avec celle des physiciens du XVIIème siècle. Là où, après avoir observé et expérimenté, la plupart des savants proposaient des représentations du mouvement sonore dans l'air, d'Alembert, à la suite de Newton et de Brook Taylor, cherche une loi physique par le recours à la mathématisation du phénomène de vibration. Dès lors, l'air n'intervient pas dans le processus de recherche, il n'est, en quelque sorte, qu'un milieu parmi d'autres, et le son n'est qu'un phénomène vibratoire parmi d'autres. Ces phénomènes physiques provoquant des effets à distance sans transport de matière, s'inscrivent mal dans la physique décrite par d'Alembert, fondée sur 'l'impénétrabilité des corps qui délimitent l'étendue', c'est à dire dans une physique statique et géométrique. Le mathématicien est en train d'élaborer la transition d'une physique de la représentation, dont les lois se construisent à partir de la géométrie, à une physique de la variation, analytique et fondée sur le calcul différentiel.

L'hypothèse la plus probable du silence sur le son dans l'article 'AIR', est donc à rechercher dans l'attente d'une modélisation cohérente et stable du processus de propagation sonore dans l'air, dont les lois seraient celles des vibrations en général. Leur formulation est sur le point d'être exposée, grâce à l'étude des vibrations des cordes que d'Alembert entreprend dès 1747. Est-ce que d'Alembert se réservait en vue de la rédaction de l'article 'SON' ? Celui-ci est rédigé probablement vers 1760, juste après la prise de distance du savant envers le projet éditorial. Il ne fallait pas trop attendre de Rousseau une étude approfondie de l'acoustique physique, et d'Alembert semble d'ailleurs lui laisser le champ libre pour la théorie musicale (articles 'SON, *musique*' et 'ACOUSTIQUE'). D'Alembert est l'auteur de bien peu de lignes de cet article pourtant signé (O), et son contenu, en grande partie traduit de Chambers, se révèle bien faible en raison de son obsolescence. Il est vrai que D'Alembert cite, de façon anonyme, la récente théorie de Lagrange publiée en 1759, mais pas les mémoires parus les années suivantes, ni les trois mémoires sur la propagation des sons d'Euler parus la même année, ni même celui de Daniel Bernoulli paru en 1753. En revanche, les citations de ses propres travaux plus anciens (1744), de ceux d'Euler (1736), de Nollet (1743) et de Jean Bernoulli

[74] L'électricité et le magnétisme sont pourtant largement traités dans l'Encyclopédie.

(1737) laissent comprendre que ces deux paragraphes ont été écrits par d'Alembert avant 1750. Nous ne savons pas si le savant avait laissé des notes concernant l'acoustique physique, et ce silence sur le sujet pendant une décennie est troublant. Pourtant les articles 'CORDES', 'FONDAMENTAL', et 'ONDULATIONS' semblaient prometteurs, et renvoyaient d'ailleurs à l'article 'SON', pas encore écrit.

Elasticité, fluidité, compressibilité, vide et interstices entre particules, la nature physique des sons est intimement liée à la représentation de la nature physique de l'air. L'*Encyclopédie* aurait pu participer à la construction de cette nouvelle science des sons. Néanmoins le processus de propagation des sons dans l'air n'est pas maîtrisé par les Encyclopédistes, et le silence sur ce sujet s'explique par les attentes d'une théorie cohérente des mouvements vibratoires sans transport de matière. Il reste à élaborer une méthode mathématique pour appréhender la notion de vibration en s'affranchissant une fois pour toutes de la géométrisation des trajectoires, de l'approche strictement musicale et de la représentation fondée sur des analogies pas toujours pertinentes.

FRANÇOIS BASKEVITCH,
Centre François Viète, Université de Nantes

Bibliographie principale (première moitié du XVIIIème siècle) :

Les principaux textes traitant de la physique des sons dans la première moitié du XVIIIe siècle, avant la rédaction de l'*Encyclopédie* se résument à une dizaine :

- *Encyclopédie* ou dictionnaire raisonné des sciences, des arts et des métiers, 1751-1765.
- Francis Hauksbee : *Physico-Mechanical Experiments* (1709), ouvrage relatant notamment de nombreuses expériences sur la propagation du son dans l'air. La traduction en français, préfacée par François de Brémond avec d'abondants et pertinents commentaires, parait tardivement, en 1754.
- Jacob's Gravesande : *Physices elementa mathematica*, 1721, ouvrage inspiré de Newton et dont le dernier chapitre du premier volume est consacré au son, en une vingtaine de pages (traduction française de Joncourt en 1746).
- Francesco Maria Zanotti : *De sono* (1731), article paru dans les Commentaires de l'Académie de Bologne, en commentaire aux expériences d'Hauksbee.
- Pierre Van Musschenbroek, *Institutiones physicae* (1734, traduction française de Massuet, *Essai de Physique,* 1751), un long chapitre sur le son dans le tome II.
- Leonhard Euler : *Dissertatio physica de sono* (1727) et deux paragraphes à la fin de la *Dissertatio de igne* (1737).
- Jean Bernoulli (dit Jean II) : une vingtaine de pages du *Discours sur la propagation de la lumière* (1736).
- Jean-Jacques Dortous de Mairan : *Discours sur la propagation des sons* in 'Mémoires de l'Académie Royale des Sciences (1737)'.
- Cassini de Thury, *Sur la propagation du son*, in 'Mémoires de l'Académie Royale des Sciences (1738)', description et analyse des expériences de mesure de la vitesse du son.
- Jean-Antoine Nollet : *Leçons de physique expérimentale*, 1745, tome III.
- Jean le Rond d'Alembert, cinq pages, en réponse au traité de Jean Bernoulli, dans le *Traité de l'équilibre et du mouvement des fluides* (1744).
- Denis Diderot : *Principes généraux d'acoustique* (1748).

Les écrits d'Euler, de Jean Bernoulli, de Cassini et de d'Alembert concernent presque exclusivement la détermination de la vitesse du son.

Bibliographie (sources primaire) :

ALEMBERT (D'), Jean le Rond, *Discours préliminaire de l'Encyclopédie*, 1751, ed. Delagrave Paris, 1893.
ALEMBERT (D'), Jean le Rond, *Opuscules mathématiques (8 tomes),* David, Paris, 1761-1780
ALEMBERT (D'), Jean le Rond, *Traité de l'équilibre et du mouvement des fluides,* David, Paris, 1744
BERNOULLI, Jean (Jean II), *Recherches physiques et géométriques sur la question : comment se fait la propagation de la lumière, proposée par l'Académie royale des sciences pour le sujet du prix de l'année 1736,* Paris, 1737
CASSINI DE THURY, César-François, *'Sur la propagation du son',* in *Mémoires de l'Académie Royale des Sciences, 1738, p.128-146,* Paris, 1738
CHAMBERS, Ephraim, *Cyclopaedia, or Universal Dictionary of Arts and Sciences,* Londres, 1728
CHLADNI, E.-F.-F., *Traité d'Acoustique,* Courcier, Paris, 1809

DESAGULIERS, J.C., *Cours de physique expérimentale t I,* Rollin, Paris, 1751, Traduit de l'anglais par le R.P. Pezenas
DIDEROT, Denis, *Principes généraux d'acoustique,* in *'Cinq Mémoires de Mathématiques' - Oeuvres complètes , t IX,* Garnier, Paris, 1748, 1875
DORTOUS DE MAIRAN, *'Discours dur la propagation du son dans les différents tons qui le modifient'* in *Mémoires de l'Académie Royale des Sciences,* Paris, 1737
EULER, Leonhardt, *Dissertatio physica de sono,* Bâle, 1727
EULER, Leonhardt, *Dissertatio de igne in qua ejus natura & proprietates explicantur,* St Petersbug, 1737
FABRI, Honoré, *Physica, id est, Scientia rerum corporearum,* Anisson, Lyon, 1670
FONTENELLE, *'Sur la propagation du son' in Histoire de l'Académie Royale des Sciences,* Paris, 1737
FABRI, Honoré, *Physica, id est, Scientia rerum corporearum,* Anisson, Lyon, 1670
FONTENELLE, *'Sur la propagation du son'* in *Histoire de l'Académie Royale des Sciences,* Paris, 1737
GALILEE, *Discours concernant deux sciences nouvelles,* Leiden, 1638. Trad. Maurice Clavelin, Presses Universitaires de France, Paris, 1970
GASSENDI, Pierre, *Animadversiones in libri X Diogenis Laertii,* Barbier, Lyon, 1649
GRAVESANDE, Willem-Jacob, *Elémens de Physique démontrez mathématiquement ou introduction à la Physique Newtonienne,* Langerak, Leyde, 1720, trad. Elie de Joncourt, Paris, 1746
GRIMALDI, Francesco-Maria, *Physicomathesis de lumine, coloribus, et iride, aliisque annexis,* Bologne, 1665
HAUKSBEE, Francis, *Expériences physico-mathématiques, t I,* Jombert, Paris, 1719, 1754, Trad. François de Brémond
KIRCHER, Athanase, *Musurgia universalis sive ars magna consoni et dissoni*, Rome, 1650
LAGRANGE, Joseph-Louis, *'recherches sur le son'* in *oeuvres complètes t I,* Gauthier Villars, Paris, 1867
MARSH, Narcissus, *'A doctrine of sounds, , '* in *Philosophical Transactions 156,* Londres, 1684
MERSENNE, Marin, *Harmonie Universelle,* Paris, 1636. Ed. CNRS, édition fac simile en 3 volumes de l'édition de 1636, Paris, 1965.
MUSSCHENBROEK, *Essai de physique,* Luchtmans, Leyde, 1751
NEWTON, Isaac, *Principes mathématiques de la philosophie naturelle,* Paris, 1759, Trad. Madame du Châtelet
NOLLET, J.-P., *Leçons de physique expérimentale,* Guérin, Paris, 1745
PARDIES, Ignace-Gaston, *Oeuvres,* Bruyset, Lyon, 1725
PERRAULT, Claude, *'Du bruit' tome II de l'Essai de Physique,* Coignard, Paris, 1680
ROHAULT, Jacques, *Traité de physique,* Guillemain, Lyon, 1671
SAUVEUR, Joseph, *'Sur la détermination d'un son fixe'* in *Mémoires de l'Académie Royale des Sciences,* Paris, 1700
SCHELHAMMER, Gunther-Christoph, *De auditu,* de Graaf, Leyde, 1684
STURM, Johann-Christoph, *Collegium Experimentale sive Curiosum,* Altdorf, 1685
YOUNG, Thomas, *'Lettre sur les découvertes faites par Aristote sur le son',* in *Bibliothèque Britannique, Sciences et Arts, vol. XVIII, p 354-357,* Genève, 1801
ZANOTTI, Francesco-Maria, *'De sono'* in *De Bononiensi scientarum et artium Instituto atque Academia comentarii,* Bologne, 1731

Bibliographie (sources secondaires) :

BASKEVITCH, François, '*La notion de vibration dans l'histoire de l'acoustique et l'appréhension du temps chez les physiciens du XVIIème siècle*', mémoire DEA, Université de Lille 1, 2004.
BASKEVITCH, François, *'Musique et Science à Florence à la fin du XVIème siècle : la Camerata et les Galilei'* in *Arts et Sciences à la Renaissance,* Ellipses, Paris, 2007
BASKEVITCH, François, *'L'élaboration de la notion de vibration sonore : Galilée dans les Discorsi',* in *Revue d'Histoire des Sciences, 60-2,* A. Colin, Paris, 2007
BASKEVITCH, François, 'Les représentations du son, d'Aristote à l'*Encyclopédie*', thèse d'histoire des sciences, Nantes, oct. 2008.
BEYER, Robert -T., *Sounds of our times,* Springer-Verlag, New York, 1999
CERNUSCHI, Alain, « La question d'un découpage par matières : l'exemple du corpus musicographique de l'*Encyclopédie*. », in *Recherches sur Diderot et sur l'Encyclopédie*, numéro 31-32 *L'Encyclopédie en ses nouveaux atours électroniques: vices et vertus du virtuel*
CHABOT Hugues, « *Sciences, musiques, Lumières, Mélanges offerts à Anne-Marie Chouillet*, Ulla Kölving et Irène Passeron (II) », in *Recherches sur Diderot et sur l'Encyclopédie*, numéro 36 *Varia*,
CHARRAK, André, *Raison et perception, fonder l'harmonoie au XVIIIème siècle,* Vrin, Paris, 2002
COHEN, H.-F., *Quantifying music,* Reidel, Dordrecht, 1984
GOTTSCHALK, H.-B., *"The De Audibilibus and peripatetic Acoustics",* in *Hermes, 96 , p. 435-461*, 1968
GOUK, Penelope, *'Acoustics in the early Royal Society'* in *Notes and records of the Royal Society of London 36-2,* Londres, 1982
GOUK, Penelope, *Science and natural magic in seventeenth century England,* Yale University Press, New Haven, 1999
GOZZA, Paolo, *'La musica nella filosofia naturale del seicento in Italia'* in *Nuncius : Annali di Storia della Scienza 1986-1,* IMSS, Florence, 1986
HUNT, Frederick-Vinton, *Origins in acoustics,* Yale University Press, New Haven, 1978
KUBBINGA, Henk, *L'histoire du concept de molécule,* 3 tomes, Springer-Verlag, Paris, 2002
LEIPP, Emile, *Acoustique et musique,* Masson, Paris, 1980
LINDSAY, R. Bruce, *Acoustics, Historical and philosophical development,* Dowden Hutchinson Ross, Stroudsburg Pennsylvania, 1974
MALHERBE Michel, « Présentation de la traduction de la préface de la *Cyclopaedia or an Universal dictionary of Arts and Sciences* », in *Recherches sur Diderot et sur l'Encyclopédie*, numéro 37 *Cyclopaedia*
PALISCA, Claude-Victor, *'Was Galileo's father an experimental scientist?',* in V. Coelho, *Music and science in the age of Galileo,* Kluwer, Dordrecht, 1984
PROUST, Dominique, *L'harmonie des sphères,* Le Seuil, Paris, 2001
WALKER, Daniel-Pickering, *Studies in musical science in the late Renaissance,* Brill, Leiden, 1978
ZIGGELAAR, August, *physicien Ignace Gaston Pardies S.J. (1636-1673),* Odense university press, Copenhague, 1971
ZWICKER, Eberhard et Feldkeller Richard, *Psychoacoustique,* Masson, Paris, 1981

Index des auteurs cités

A

Ango, Pierre 5
Aristote 3, 4, 9, 14, 23, 24

B

Bacon, Francis 4, 5
Beeckman, Isaac 5
Benedetti, Giovanni-Battista 4, 16
Bernoulli, Daniel 14, 19, 20
Bernoulli, Jean (dit Jean II) 17, 18, 20, 22
Boèce 4
Boyle, Robert 5, 7, 9, 18
Brook Taylor 16, 20
Buffon, Georges-Louis Leclerc 13

C

Cassini de Thury, César-François 10, 18, 22
Castel, Louis-Bertrand 12, 13
Chambers, Ephraïm 1, 2, 15, 20, 22
Chladni, Ernst 2, 22
Chrysippe 4
Corneille, Thomas 2
Cramer, Gabriel 13

D

d'Alembert, Jean le Rond 1, 2, 13, 14, 15, 18, 19, 20, 22
d'Aumont, Arnulphe 17
de Brémond, François 8, 9, 10, 11, 14, 22, 23
de la Hire, Philippe 12
de Mairan, Jean-Jacques Dortous 8, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 22, 23
de Montvallon, Barrigue 13
Diderot, Denis 16, 22, 23, 24

E

Epicure 3, 5
Estève, Pierre 13
Euler, Leonhard 14, 18, 19, 20, 22, 23

F

Fontenelle, Bernard Le Bouyer 2, 8, 11, 12, 13, 23
Formey, Jean-Henri-Samuel 1
Furetière, Antoine 2

G

Galilei, Galileo (Galilée) 4, 7, 16, 23, 24
Galilei, Vincenzo 4
Gassendi, Pierre 5, 12, 23
Geoffroy, Etienne-Louis 14
Grimaldi, Francesco 5, 23

H

Hauksbee (ou Hawksbee) Francis 8, 9, 10, 22, 23
Huygens, Christiaan 5, 6, 11, 18

K

Kircher, Athanase 5, 19, 23
Klein, Jakob Theodor 14

L

Lagrange, Joseph-Louis 18, 19, 20, 23
le Cat, Claude-Nicolas 14

M

Marsh, Narcissus 2, 19, 23
Mengoli, Pietro 16
Mersenne, Marin 4, 5, 9, 19, 23

N

Newton, Isaac 6, 7, 10, 11, 12, 18, 19, 20, 22, 23
Nollet, Jean-Antoine 8, 9, 13, 14, 20, 22, 23

P

Pardies, Ignace-Gaston 5, 20, 23, 24
Pascal, Blaise 5
Perrault, Claude 4, 6, 12, 19, 23

R

Rameau, Jean-Philippe 11, 13
Régnault, Noël 14
Rohault, Jacques 15, 23
Rousseau, Jean-Jacques 1, 2, 15, 16, 20

S

s'Gravesande, Jakob 10, 11, 22, 23
Sauveur, Joseph 2, 23
Sturm, Johann-Christoph 9, 23

T

Thomas d'Aquin 4

V

van Musschenbroek, Pieter 11, 13, 22, 23
Vitruve 4, 6
von Guericke, Otto 5

Y

Young, Thomas 4, 23

Z

Zanotti, Francesco-Maria 9, 10, 22, 23