

# 100 ans d'ingénierie acoustique allemande appliquée aux techniques de réduction du bruit

**Joachim Scheuren**

Müller BBM GmbH  
Robert Koch Strasse 11  
D-82152 Planegg  
ALLEMAGNE

Tél. : +49 (0)89 85602-205

Fax : +49 (0)89 85602-111

E-mail : JScheuren@MuellerBBM.de

*Le niveau de vie et la prospérité dont nous jouissons dans nos sociétés industrialisées s'accompagnent d'une production de nuisances sonores – qu'il est impératif de maîtriser au nom de la qualité de la vie et du bien-être. C'est pourquoi l'histoire de l'industrialisation et du développement technologique fait une place de plus en plus large à l'histoire de l'ingénierie acoustique et de la réduction du bruit. L'article retrace cette histoire dans ses grandes lignes et s'efforce de rendre hommage au travail des ingénieurs acousticiens en présentant certaines réalisations exemplaires.*

*Since increasing standard of living gives rise to increasing noise, living in comfort necessitates noise reduction. Therefore, the history of industrialization and technical development is increasingly tied to advancements in technical noise reduction. The paper presents the highlights of the history and documents the achievements of acoustics engineers by way of examples.*



On sait même sans beaucoup d'imagination ni connaissances historiques particulières que les activités humaines sont sources de bruits dont la perception peut être désagréable pour autrui, voire gênante. Même la musique, dont la finalité est pourtant de produire des sonorités harmonieuses, n'est pas exempte de ces effets secondaires. Dans *Dideldum!*, histoire en images parue en 1874, le poète populaire allemand Wilhelm Busch a épinglé cette contradiction en deux vers que l'on récite encore aujourd'hui :

*« Musik wird oft nicht schön gefunden, weil sie stets mit Geräusch verbunden.*

*La musique, c'est bien joli, Mais pour tout dire, ça fait du bruit! »*

Dès lors qu'ils sont indésirables, bruits ou musique se font nuisance. La signification du mot allemand « Lärm » (bruit - au sens désagréable du terme) trouve son origine dans les mots du nouveau haut-allemand précoce « Alerm (a) » (signal de danger, alarme) et « Lerma » (bruit retentissant). La définition du terme « Lärm » est aujourd'hui fixée par les normes en vigueur (DIN 1320: « phénomène sonore audible indésirable susceptible de provoquer une gêne ou une nuisance »).

Quelle que soit l'ancienneté du mot, ce n'est qu'au vingtième siècle qu'il s'est vraiment installé dans l'esprit des gens et la conscience collective. En 1908, le grand dictionnaire encyclopédique Meyers ne faisait référence à la rubrique « Lärm » qu'à des objets utiles ou nécessaires

tels que les instruments servant à produire la coulisse sonore des films parlants ou encore les dispositifs avertisseurs qui nous alertent en cas de défaillance technique ou de danger immédiat. Il a fallu attendre des éditions plus récentes pour que l'encyclopédie Brockhaus consacre au bruit et à la protection acoustique un article d'une demi-page en 1955, puis d'une page en 1970, et enfin, en 1990, de quatre pages avec encadré explicatif. Désormais promu « terme-clé » dans les dictionnaires, le bruit occupe également dans notre langage courant une place qui correspond bien à sa présence quotidienne dans nos vies. Nous avons pris conscience du bruit et avons éprouvé, souvent à nos dépens, qu'il s'agit d'un phénomène inhérent à l'industrialisation, à la technicisation et à la prospérité de notre société.

En Allemagne, les innombrables machines et installations dont le fonctionnement contribue à notre bien-être consomment une puissance moyenne de 100 GW. Si l'on retenait comme hypothèse que 0,01 % - pourcentage généralement admis - de cette puissance correspond à l'émission de bruits indésirables, la surface construite en bâtiments professionnels et industriels baignerait dans une pollution sonore sur site supérieure à 100 dB. Ceci dépasse largement ce que nous accepterions – et serions physiquement capables – de supporter à long terme sans avoir à subir d'effets négatifs.

Or, on peut être installé sur un site professionnel ou à proximité et y travailler, s'y concentrer, et même y vivre dans de bonnes conditions de confort dès lors qu'il a été

analysé et conçu avec le soin requis. Le mérite en revient aux ingénieurs acousticiens et à leurs longues années d'efforts. Les recherches théorique et expérimentale systématiques qu'ils ont menées - en particulier ces cent dernières années - et leur volonté constante de tester des solutions nouvelles font que, grâce à eux :

- On comprend aujourd'hui dans une large mesure les mécanismes présidant à la production et à la propagation du bruit ainsi que l'impact des nuisances sonores ;
- On a pu valider de nombreuses solutions techniques d'atténuation du bruit qui sont accessibles car rassemblées au sein de directives et de catalogues de solutions exemplaires ;
- On dispose d'un appareil réglementaire utile et ambitieux qui tient compte de l'état de l'art et s'attache à suivre son évolution.

Notre environnement n'est pas devenu plus silencieux pour autant car le développement continu de la mécanisation et de l'automatisation va de pair avec l'augmentation du nombre des machines et installations génératrices de bruit. On a donc d'un côté une réduction ponctuelle des bruits et de l'autre un relèvement du niveau de bruit global – l'une ne suffisant pas toujours à compenser l'autre. C'est pourquoi il est indispensable que les acousticiens poursuivent leurs efforts non seulement pour améliorer notre environnement mais aussi pour préserver le niveau de protection acoustique que nous avons déjà atteint.

L'article qui suit a pour objectif de présenter à l'aide d'exemples caractéristiques les progrès réalisés ces cinquante dernières années par les techniques de réduction du bruit. Il ne saurait être question ici de rédiger leur histoire – ce qui supposerait une démarche systématique et exhaustive. Tant les recherches nécessaires que la quantité des informations à présenter dépasseraient le cadre de cet article. Mais il serait effectivement fructueux et instructif de retracer l'évolution du bruit et de la lutte antibruit sur un plan historique et technico-social : on disposerait enfin d'une histoire complète et détaillée sans laquelle aucune analyse systématique du sujet n'est encore envisageable. En effet, si l'on en croit les bases de données listant les publications, le bruit – qui est à la fois une pollution de notre environnement et l'objet d'une discipline des sciences de l'ingénieur – n'a jusqu'à présent éveillé l'intérêt ni des historiens de la recherche sur l'environnement ni des historiens des techniques.

Certes, la reconnaissance publique du problème posé par les nuisances sonores n'eut lieu qu'au cours de la deuxième moitié du XXe siècle, mais cela ne signifie pas que l'ingénierie acoustique n'ait pas existé avant cette époque. Au contraire, la littérature spécialisée publiée autour des années 50 est parfois de très haut niveau ([1] et [2] par exemple ainsi que les ouvrages qui y sont mentionnés) et l'on constate que l'acoustique avait mis depuis longtemps déjà ses connaissances et son expérience au service de la lutte antibruit. Ceci étant posé, il est évident que c'est la mécanisation rapide de notre quotidien intervenue depuis la deuxième guerre mondiale qui a fait du bruit une nuisance lourde et porteuse de

risques non seulement pour quelques-uns mais bien pour la majorité de la population.

Par définition, le bruit en tant que nuisance sonore présuppose qu'il existe non seulement un phénomène sonore mais aussi une ou plusieurs personnes qui l'entendent et qui en sont affectées : ce sont les personnes exposées au bruit. En attirant l'attention sur le désagrément subi et en persévérant dans le refus de cette nuisance, elles ont fortement contribué à l'évolution acoustique des produits, des process et des systèmes. En effet, sans information sur la nuisance perçue et donc sans possibilité de l'analyser, sans la parole des personnes exposées au bruit et sans l'opposition dont elles ont su faire montre, il aurait été plus difficile encore d'accepter la nécessité de solutions visant à maîtriser et réduire le bruit.

C'est aux ingénieurs que revient le mérite d'avoir voulu créer de nouvelles fonctionnalités techniques « à faible niveau de bruit » et de les avoir réalisées. Dès 1950, leurs efforts ont rendu les équipements et installations techniques plus agréables pour les utilisateurs et plus supportables pour les personnes exposées au bruit. Leur travail ne s'est pas limité à résoudre les problèmes techniques. Ayant compris très tôt l'impact des nuisances sonores occasionnées par leurs produits, ils ont mis leurs connaissances et savoir-faire au service d'une société plus silencieuse en travaillant main dans la main au sein d'associations et en promouvant la rédaction des directives et des normes (DIN, VDI, NALS).

C'est ainsi que l'acoustique technique a pénétré les domaines d'activité et l'esprit des ingénieurs, s'intégrant à leurs objectifs de travail et au profil des produits qu'ils développaient. L'objet de cet article est de présenter le processus et la dynamique nés de l'interaction entre les personnes exposées à des nuisances sonores intolérables, les ingénieurs qui définissent et proposent les solutions techniques et les directives et normes qui viennent définir le cadre réglementaire applicable.

Cet état des lieux du développement acoustique est aussi un coup de projecteur qui souhaite mettre en lumière le travail de tous les intervenants qui ont contribué à la réduction du bruit et leur rendre hommage. Quelles que soient l'urgence et la gravité des problèmes actuels à traiter, il faut dire que les techniques acoustiques développées et appliquées ces dernières décennies ont permis de remporter de nombreuses victoires sans lesquelles il nous serait impossible aujourd'hui de concilier technique et bien-être - pour ne pas dire technique et santé.

Fondé à Cologne il y a cinquante ans, le Cercle allemand de lutte contre le bruit ou *Deutscher Arbeitsring für Lärmbekämpfung* – DAL - occupe une place importante dans cette histoire ([3]). Le présent article est d'ailleurs rédigé à l'occasion du cinquantième anniversaire du DAL. Nous souhaitons à cette occasion présenter nos félicitations au DAL pour l'œuvre accomplie et lui exprimer nos vifs remerciements pour son engagement au service d'une bonne cause. Tous nos vœux de réussite accompagnent ses activités futures dans la lutte contre les nuisances sonores.

## Les techniques de lutte contre le bruit avant 1945

En tant que discipline, les techniques de lutte antibruit recouvrent l'application et la mise en œuvre de connaissances acoustiques lors de la planification, de la conception, de la fabrication et de l'exploitation d'équipements et installations techniques et ce, dans le but de restreindre les nuisances sonores provoquées. Très tôt, cette activité fut désignée par des termes qui évoquent clairement la lutte et le combat. Si le terme de « défense antibruit » signale un agresseur qui s'en prend au bien-être et à la santé et dont il faut se défendre, la « lutte antibruit » et « l'atténuation du bruit » semblent miser sur une stratégie plus active, sur une attaque qui constitue peut-être là aussi la meilleure forme de défense.

La vision du bruit en tant qu'agression indésirable qui débute par la production d'un son, puis enchaîne sur sa propagation avant d'atteindre nos tympans non protégés a un équivalent technique direct. En effet, ce parcours nous livre en parallèle les diverses possibilités dont nous disposons pour nous attaquer à la nuisance: en limitant ou en empêchant sa production (émission), ou encore sa propagation ou encore sa diffusion dans l'environnement direct de l'auditeur exposé au bruit (immission).

Le bruit chemine donc de l'émission à l'immission, et c'est sur ce parcours que viennent se placer les diverses solutions techniques de réduction du bruit, qui entrent dans des catégories différentes selon le stade où elles interviennent. Les émissions et les immissions sonores sont les deux piliers sur lesquels s'appuie toute évaluation du bruit telle que concrètement définie dans de nombreuses normes, directives et prescriptions relatives à différents types de bruits, sources de bruits et environnements concernés.

Quelles que soient la complexité et la diversité des environnements techniques, des domaines d'application et des nuisances, les techniques de réduction du bruit se placent toujours dans le droit-fil de l'acoustique technique appliquée, discipline dont les bases physiques sont connues depuis plusieurs décennies. Dans son traité d'acoustique en deux volumes: *Theory of Sound* [5] publié en 1894-1896, John William Strutt [4], plus connu sous le nom de Lord Rayleigh, donne une description cohérente et pertinente de l'acoustique physique et mathématique qu'il a contribué à fonder. Cette description a gardé toute son actualité dans de nombreux domaines jusqu'à aujourd'hui et elle a permis dès ce stade de s'ouvrir à des phénomènes dont la découverte explicite et l'étude n'interviendront qu'ultérieurement. Grâce aux multiples contributions d'autres contemporains à l'étude de l'acoustique et de sa perception - parmi lesquels Hermann von Helmholtz mérite une mention particulière [6], [7], on parvint dès la fin du XIXe siècle à une bonne compréhension théorique des fondements de l'acoustique qui servit ensuite de base aux applications techniques mises en œuvre par les ingénieurs [8].

Même si la prise de conscience du bruit comme nuisance sonore n'est intervenue à l'échelle de la société que bien plus tard, comme en témoignent les entrées des dictionnaires et encyclopédies précédemment citées, nombreux sont

ceux qui considèrent le bruit comme une gêne dès l'époque de l'empire allemand [9]. Les désagréments qu'il entraîne ont été abondamment décrits par les *travailleurs de l'esprit* qui se plaignent de ses méfaits et de l'entrave à la réflexion et à la pensée qu'il représente.

Le philosophe Arthur Schopenhauer (1788 – 1860) est souvent cité en témoignage dans ce contexte. Dans son ouvrage *Parerga et Paralipomena* paru en 1851, il stigmatise dans le style clair et percutant qui lui est propre « le claquement infernal des fouets, qui retentit dans les ruelles sonores des villes comme une nuisance des plus inexcusables et abominables, vacarme qui vide l'existence de sa paix et de sa profondeur ». En plus des nombreux autres bruits irritants, « ce claquement soudain, violent, qui paralyse le cerveau, sabre la réflexion et poignarde les pensées » est ressenti comme « une insolente moquerie adressée par ceux qui travaillent avec leurs bras à ceux qui travaillent avec leur esprit ». Il est déclaré coupable au motif qu'il « assassine les pensées » et « entrave le travail de l'esprit ».

Les plaintes et récriminations de Schopenhauer et des autres personnes affectées ne restèrent pas sans suites. Au XIXe siècle, les services d'inspection du travail, de médecine publique et de police ainsi que les tribunaux commencèrent à se pencher sur le problème des nuisances sonores avec en priorité les bruits provenant des activités artisanales, puis ceux des auberges et des activités musicales, et ultérieurement ceux des industries et du trafic. La législation de l'époque disposait en effet de tout un arsenal permettant de réduire ou d'empêcher le désagrément du bruit et ses risques pour la santé: refus d'accorder les permis de construire, de délivrer ou renouveler les concessions, d'étendre les horaires d'ouverture. La non-application par les exploitants des ordonnances antibruit prévoyant des solutions de protection acoustique dans le cas des entreprises bruyantes pouvait entraîner des procès-verbaux voire même la fermeture. C'est ainsi que naquirent les premières restrictions et obligations légales, qui furent souvent l'objet de décrets administratifs et de démêlés juridiques.

Cependant, on constate encore en 1914 que « l'absence d'études scientifiques et pratiques relatives au seuil de nuisance du bruit et au niveau des dommages causés » restent un obstacle insurmontable qui bloque toute possibilité d'intervention des autorités. Même la *Physikalisch-Technische Reichsanstalt* dut reconnaître qu'il n'existait pas de « méthodes incontestables permettant de mesurer les bruits » [9].

La nécessité de lutter contre les nuisances sonores n'en devenait pas moins de plus en plus évidente: conséquence de l'industrialisation, le bruit croissant des entreprises et des transports faisait de plus en plus de victimes, surtout dans les zones d'habitation fortement peuplées. Les services de l'hygiène sociale et les neurologues étaient d'accord pour constater que les nuisances sonores provoquaient des maladies telles que la perte du sommeil ou l'épuisement nerveux et amenuisaient les capacités de régénération indispensable à l'organisme. Et même si la nature et l'importance des perturbations restaient matière à controverse, il était clair que la lutte contre le bruit devait être l'affaire de la collectivité.

C'est dans ce but que fut créée en 1908 la première association allemande antibruit ou *Antilärmverein* sur la base de la thèse publiée par Theodor Lessing: *Les nuisances sonores – Pamphlet contre les bruits de notre vie* [11]. Cette société publie un bulletin appelé *L'Antigoujat - Der Antirüpel* - dans lequel elle informe sur toutes les activités d'atténuation du bruit engagées en Allemagne et dans les pays voisins, sur les actions en justice et les jugements rendus, les plaintes et les pétitions ou encore les mesures administratives et ordonnances de police. Elle consacre une rubrique spéciale aux progrès des techniques antibruit – des protections auditives et cale-portes à l'insonorisation des machines et des bâtiments. Malgré un accueil et des débuts encourageants, *l'Antilärmverein* ne parvint pas à dépasser le stade de ses nombreuses activités initiales pour s'inscrire dans une action à long terme, ni à mobiliser les fonds nécessaires, ni à motiver suffisamment ses quelque 1000 membres pour qu'ils s'impliquent dans le travail de l'association. C'est ainsi que la tentative d'établir une société allemande de lutte contre le bruit se solda au bout de trois ans par un échec et ce, en dépit des nombreux espoirs qu'elle avait suscités lors de sa création à l'automne 1908 et à la différence de son homologue new-yorkaise *Society for the Suppression of Unnecessary Noise* fondée en décembre 1906.

On peut citer jusqu'à aujourd'hui de nombreux cas de lutte contre le bruit où les solutions à appliquer le furent aussi et surtout parce qu'elles entraînaient d'autres avantages - économies d'énergie et de carburant ou diminution de l'usure. Les revêtements de chaussée en asphalte, qui développèrent ensuite leur propre dynamique dans le contexte de la réduction des nuisances sonores, constituent l'un des tous premiers exemples de cette conjonction d'intérêts.

Les tramways électriques, le développement des villes et la distance croissante séparant le domicile du lieu de travail conduisirent à une explosion des transports individuels et publics. Le bruit de « déferlement » de la circulation vint se superposer à la coulisse sonore que composaient les bruits de la ville jusqu'à créer cette symphonie urbaine immortalisée en 1927 par le film *Berlin, Symphonie der Großstadt* ([12]) – une glorification qui ne pouvait toutefois ni compenser ni faire oublier la nuisance subie au quotidien. Or, les nouvelles chaussées en asphalte semblaient présenter de nombreux avantages et promettre une issue au problème posé par ce vacarme.

Après Paris en 1854, Berlin fut la première grande ville allemande à introduire en 1878 l'asphaltisation des voies de circulation principales et ce, contre l'avis des propriétaires de véhicules hippomobiles qui craignaient de manquer de prise les jours de mauvais temps et dans les montées. Cette solution permit de supprimer enfin le vacarme que produisaient les cahots et les heurts des roues ferrées sur les pavés inégaux et la nuisance sonore que subissaient de ce fait les habitants des quartiers très peuplés. Ainsi naquit le « pavé silencieux », précurseur de notre « asphalte silencieux ». Il est d'ailleurs tout à fait intéressant de suivre le débat enflammé que suscita à l'époque le nouveau revêtement, dont l'adéquation et la fonctionnalité étaient loin de faire l'unanimité, car sa virulence ne le cède en rien à celle de nos débats actuels.

Le réseau des chaussées asphaltées ne s'est étendu que lentement en Allemagne en raison des coûts élevés de construction, d'entretien et de nettoyage (enlèvement régulier du crottin, par exemple, qui aurait pu provoquer des dérapages), et ce, alors même que les médecins et les associations de propriétaires - soucieux de santé publique dans le premier cas et du niveau des loyers dans le second – soulignaient les bienfaits des chaussées asphaltées et que les responsables de l'hygiène sociale avaient ajouté au début des années 1890 la non-bruyance aux « exigences définies pour la consolidation idéales des voies ». Toutefois, dès cette époque, le service d'urbanisme municipal de Berlin chargé de la construction des voies et chaussées dut constater que, même dans la capitale et ville la mieux asphaltée du pays, les victoires de la lutte antibruit et le gain de silence procuré par les nouveaux revêtements se trouvaient annulés et débordés par l'intensité croissante de la circulation [9]. Il n'empêche que le débat autour du bruit était désormais lancé, pour la population comme pour les pouvoirs publics – et que ce débat ne s'arrêterait plus.

Au XXe siècle, ce débat fut accompagné de travaux de recherche acoustique qui reprirent et développèrent les thèses de Lord Rayleigh grâce à l'étude approfondie de nombreux phénomènes et effets acoustiques [8]. Citons ici quelques travaux importants pour la lutte antibruit de cette époque et de la période qui suivit :

- La découverte explicite, la formulation, la déduction et la vérification métrologique par R. Berger de la loi de masse ou loi de Berger (1910, [13]). Selon cette loi qui découle de la théorie de Rayleigh, l'isolation acoustique d'une paroi est donnée en première approximation par la masse surfacique de la paroi.
- L'introduction de l'unité « décibel (dB) » (fin des années 20) sur la base de l'échelle du logarithme base 10 multiplié par 10 pour exprimer les paramètres de champ et d'intensité acoustique. Le bel et le décibel sont en usage depuis 1925 dans les télécommunications.
- L'introduction de la notion « d'intensité sonore » applicable à tout bruit avec une valeur en phones convenue correspondant au même nombre de décibels à une fréquence de 1000 Hz ; le développement et la construction des premiers appareils de mesure subjective de l'intensité sonore par Barkhausen (1926, [14]). - - - La détermination de valeurs de référence via la comparaison des sons s'est avérée jusqu'à aujourd'hui un instrument précieux de la psychométrie auditive.
- La détermination empirique de rapports d'approximation simples (formule de Piening par exemple, 1937, [15]) pour une première évaluation de l'atténuation obtenue grâce à l'utilisation d'amortisseurs de bruit.
- La déduction (1942, [16]) et la démonstration empirique (1948, [17]) du phénomène des fréquences de coïncidence qui se produit lorsque la longueur d'onde de la fréquence sonore et la longueur d'onde de flexion du matériau coïncident – ces creux de coïncidences provoquant une chute brutale des qualités insonorisantes.
- Développement d'autres appareils de mesure des paramètres de champ, de conception et des paramètres de matériaux – avec un appareil de mesure du niveau sonore par exemple ou encore un dispositif à marteaux appelé « batteur de plancher » pour mesurer l'absorption des bruits de pas.



Fig. 1 : Le 'batter de plancher', invention géniale qui permet de reproduire les mesures de l'absorption des bruits de pas (fonctionne aujourd'hui à l'électricité)

Il convient de mentionner en outre l'étude de plus en plus systématique des mécanismes présidant à la production du son et à sa propagation ainsi qu'aux moyens de l'influencer, qui furent exposés de façon abrégée en 1950 par Werner Zeller dans son livre *Technische Lärmabwehr* [1] consacré aux techniques de lutte antibruit.

La lutte contre le bruit a directement profité des efforts accrus entrepris dans la première moitié du XXe siècle dont témoignent ces exemples. On peut ajouter à l'appui des travaux et publications déjà cités un certain nombre d'ouvrages et de compendiums de l'époque [1], [2], [18], [19] ainsi que la rétrospective effectuée dans le livre de Schmidt [20].

Mais l'acquisition de connaissances acoustiques et techniques n'est qu'une étape. Il faut pouvoir ensuite communiquer ces connaissances et les faire passer dans la pratique, ce qui suppose à la fois des réglementations techniques et des valeurs de référence permettant de caractériser la nuisance subie par les personnes exposées et de disposer ainsi d'une base de décision afin de juger de l'adéquation des solutions « possibles ou nécessaires » à engager. Cette distinction entre le nécessaire et le possible est fondamentale dans les directives et les prescriptions et c'est aux comités de normalisation et d'élaboration de directives qu'il incombe de la faire. En Allemagne, ces comités se sont formés dès le premier tiers du XXe siècle et ont pris la forme des comités de normalisation du *Deutsches Institut für Normung* (DIN) ou encore des cercles de travail du *Verein Deutscher Ingenieure* (VDI).

Citons à titre d'exemple la norme *DIN 4110: Dispositions techniques relatives à l'agrément de nouveaux modes de construction* qui, certes, ne formule pas encore d'exigences sur les installations techniques des bâtiments et leur nuisance sonore mais qui contient déjà d'utiles indications sur les valeurs d'atténuation des bruits de pas et des bruits propagés par la voie aérienne que doivent atteindre divers matériaux sur les bancs d'essais.

Dans les années qui suivirent, on continua de travailler à la *Directive relative à la protection contre le bruit dans*

*les bâtiments*, qui fut également publiée en 1944, peu avant la fin de la guerre, en tant que norme DIN 4109. Outre la meilleure façon de concevoir les éléments de construction, ses remarques et recommandations portaient également sur le rôle de la planification des bâtiments et des contextes urbains. Elle définissait comme exigence minimale d'insonorisation d'une paroi en briques pleines la valeur de 48 dB (depuis 1989: 53 dB). Ces 48 dB étaient également repris comme valeur minimale pour les plafonds.

Le bruit de voisinage mais aussi la nuisance sonore croissante provoquée par les industries et par le trafic furent pris en considération dans les travaux d'un comité spécifique fondé en 1930, le Comité VDI pour la Réduction du bruit, qui se préoccupa essentiellement des aspects techniques et physiques de la lutte antibruit dans les milieux industriels et professionnels et dans le trafic. Les premières mesures du bruit du trafic s'effectuèrent en liaison étroite avec l'Institut Heinrich Hertz de Berlin et ce, en accordant une attention particulière au bruit des systèmes d'échappement et des avertisseurs sonores. Ce Comité VDI pour la Réduction du bruit organisa un certain nombre de réunions de ses sous-comités avant de se présenter devant un plus large public en 1932, lors du congrès VDI [21].

Mais il était apparemment trop tôt encore pour les projets et les initiatives de grande envergure. C'est ce que semblent indiquer les réactions des administrations chargées de la construction dans le cadre d'une enquête effectuée par le sous-comité sur la technique du bâtiment et qui portait sur l'influence de la conception architecturale sur l'acoustique: on exprime son intérêt, on transmet quelques rapports et quelques recommandations. Mais on n'entreprend aucune des observations systématiques ni des études nécessaires et ce, par manque d'appareils de mesure et de moyens financiers.

## Les techniques de lutte contre le bruit après 1945

A l'issue du second conflit mondial, la reconstruction de l'Allemagne dut se concentrer sur des besoins absolument élémentaires et dans un premier temps, les questions de protection contre le bruit ne se virent accorder qu'une place secondaire. Mais justement parce qu'il s'agissait d'une reconstruction et qu'elle s'effectuait dans le cadre d'une technicisation clairement perçue, la protection contre le bruit ne tarda pas à occuper une place explicite dans les procédures d'agrément et de planification. Cette place se consolida et se développa au cours des années qui suivirent et cette évolution fit que la lutte technique contre le bruit, en tant que domaine d'application spécifique de l'acoustique technique, prit peu à peu forme et contours jusqu'à devenir une discipline technique en tant que telle.

Cette revalorisation de l'ingénierie acoustique eut pour point de départ les centres d'acoustique créés peu après la guerre à Berlin, Dresde et Göttingen. A Berlin, l'Institut Heinrich Hertz spécialisé dans la recherche vibratoire et qui s'inscrivait dans la tradition de la physique vibratoire sur les traces de Karl Willy Wagner s'intéressa de plus

en plus aux questions d'acoustique. Erwin Meyer, qui y dirigea des années durant le département d'acoustique, et Lothar Cremer y oeuvrèrent avec un tel succès qu'ils furent appelés peu après la fin de la guerre à exercer des fonctions universitaires.

Tous deux réussirent par la suite à faire de leur instituts respectifs – le troisième Institut de physique de l'université Göttingen, fondé par Erwin Meyer en 1947 et l'Institut d'acoustique technique de l'université technique de Berlin, fondé par Lothar Cremer en 1954 – d'importants centres de formation et de recherche dédiés à l'acoustique physique et technique. Le troisième centre vit le jour à Dresde à partir de l'Institut des courants faibles, établissement réputé que dirigeait Barkhausen, après que Walter Reichardt eut répondu en 1950 à un appel visant la fondation de l'institut d'acoustique électrique et du bâtiment de l'université technique de Dresde.

L'importance croissante des questions d'acoustique et le besoin accru d'ingénieurs et de physiciens formés à cette discipline se retrouva dans les formations dispensées par les universités et par les instituts universitaires techniques où des professeurs compétents en matière d'acoustique enseignèrent de plus en plus nombreux, ancrant ainsi la matière interdisciplinaire « Acoustique technique » dans de nombreux départements et cursus.

Son travail à l'université n'a pas empêché Lothar Cremer de continuer ses activités de conseil et il est intéressant de signaler ici une autre des traces qu'il a laissées. Lorsqu'il rejoignit Berlin en 1954, il laissa derrière lui à Munich son Laboratoire de technique sonore qui continua ses activités sous la houlette d'Helmut Müller avant d'être repris par ce dernier puis d'être intégré au nouveau *Schalltechnische Beratungsbüro Müller-BBN* ouvert en 1962 par Helmut Müller, Manfred Heckl et trois autres membres fondateurs. Ce cabinet d'ingénierie fusionna par la suite avec de nombreux organismes existants ou nouvellement fondés qui axaient également leurs activités acoustiques sur la lutte antibruit – un indice supplémentaire de l'importance croissante qu'acquies rapidement la réduction technique des nuisances sonores à cette époque.

Cette importance se reflète également dans l'activité foisonnante des organismes publics et professionnels qui ont contribué dans leurs domaines respectifs au progrès de la lutte antibruit par leurs nombreuses suggestions et réglementations. Il s'agissait dans certains cas de départements oeuvrant en aval des administrations publiques et plus spécifiquement chargés non seulement de prendre des dispositions mais aussi de veiller à la réalisation et à la promotion d'études ciblées qui ont permis de faire évoluer l'état de l'art et de mettre en application les solutions de réduction du bruit.

Il convient de mentionner ici les nombreux comités de normalisation et les cercles d'ingénieurs acoustiques car ce sont eux qui ont fait en sorte que les normes reflètent le niveau de faisabilité technique du moment, qui l'ont décrit dans le texte des directives et en ont recommandé l'application et ce, bien avant que les personnes exposées au bruit et le législateur ne commencent à le réclamer. En République fédérale, ce sont pour l'essentiel les cercles

de VDI et, à partir de 1965, la Commission de réduction du bruit VDI. Depuis sa création et même après sa fusion avec les cercles spécialisés de l'institut de normalisation DIN au sein du Comité de normalisation Acoustique, Réduction du bruit et Techniques vibratoires du DIN et du VDI – le *Normenausschuss Akustik, Lärminderung und Schwingungstechnik* ou NALS, cette commission a largement contribué à concrétiser le niveau actuel des techniques de réduction du bruit en Allemagne [22].

En République démocratique allemande, la Chambre de la technique ou *Kammer der Technik* était l'homologue du VDI en République fédérale. Elle était flanquée d'un groupe de travail centralisé fondé en 1957 et dénommé *AG (Z) Lärmschutz* dont relevaient tous les secteurs de l'activité sociale sources de bruit ou exposés au bruit. Cet organisme de conseil, qui bénéficiait de l'assistance de divers départements publics et professionnels, avait pour mission d'élaborer les normes et directives acoustiques, de coordonner les volets scientifiques des projets de recherche et de développement, de mettre au point des propositions visant à lancer de nouvelles études et réglementations et de formuler des points de vue et recommandations à l'intention des entreprises et administrations. Dans les communes, cet organisme était relayé par les sections communales de lutte contre le bruit, qui dépendaient de la Société d'hygiène générale et communale de la RDA.

Un autre comité d'orientation important était le Comité de coordination pour la lutte antibruit dans le secteur des machines dépendant de l'Institut central pour la protection au travail de Dresde (ZIAS), qui, en tant qu'organisme chargé de la lutte contre le bruit et les vibrations, joua un rôle important dans la formulation de missions et d'objectifs liés à l'acoustique des machines. La définition d'objectifs ambitieux et les recommandations en faveur de la mise à disposition par l'État des moyens nécessaires avaient pour but de procurer au secteur de la construction de machines-outils de la RDA un avantage concurrentiel sur les produits étrangers qui profiterait aux exportations. Le label « peu bruyant » devint ainsi un facteur de qualité clairement défini et reconnu pour les machines et outillages [23].

La protection antibruit dans le bâtiment était confiée – outre divers organismes universitaires - à l'Académie de construction de la RDA sise à Berlin qui oeuvra des décennies durant par son propre travail de recherche au développement de l'état de l'art et des techniques.

Les deux États allemands firent évoluer chacun de leur côté l'appareil de normes DIN (resté DIN en RFA et baptisé TGL en RDA pour *Technische Normen, Gütevorschriften und Lieferbedingungen* à partir de 1960 environ) que leur avait légué le Reich et pourtant, on ne constate aucune divergence fondamentale en dépit de cette double évolution. Les forces agissantes sont parvenues des deux côtés à éviter cet écueil et le fait que l'on ait pu préserver un certain parallélisme est dû à la volonté persistante de scientifiques et ingénieurs réputés qui, des deux côtés de la frontière, ont mis tout leur poids dans la balance pendant des dizaines d'années pour que les échanges d'idées et d'informations sur les réglementations continuent d'avoir

lieu. On a pu vérifier après la réunification en 1990 que les normes et directives antibruit est-allemandes et ouest-allemandes étaient tout simplement restées allemandes, préservant en secret leur communauté d'esprit au fil de leur double évolution. L'appareil de directives de la RDA a peut-être bénéficié dans ce contexte du centralisme plus poussé qui était en vigueur et qui n'accordait qu'un rôle mineur au pluralisme et à la diversité des opinions, d'où un système de réglementations plus simple et plus facile à saisir dans son ensemble.

### La protection acoustique dans la construction

Après avoir construit de nouveaux logements dans l'urgence et à moindres frais, on s'aperçut rapidement que les matériaux employés pour y parvenir – parpaings creux par exemple – n'offraient qu'une isolation acoustique insuffisante.

Il fallait donc encadrer le secteur de la construction en le dotant de directives et prescriptions acoustiques adaptées, et cette prise de conscience entraîna de nombreux travaux de recherche et de développement dès les années 50 et le début des années 60. La tendance était à l'économie – de matériaux puis un peu plus tard de main-d'œuvre - et on s'efforça d'améliorer les réalisations à partir d'éléments creux ou espacés puis d'éléments préfabriqués pour répondre sans déperdition de qualité à cette exigence, ce qui motiva de nombreuses études théoriques et expérimentales sur différents types de murs, plafonds et façades ainsi que sur divers équipements et installations.

On actualisa les textes existants afin de communiquer les nouvelles règles de l'art et de faire passer dans la pratique les améliorations nécessaires. La protection acoustique dans la construction a été l'objet de quelques normes importantes parmi lesquelles nous citerons :

- DIN 4109, qui régleme les exigences auxquelles doivent satisfaire les éléments de construction et les bâtiments et détermine les modes de calcul à appliquer, avec depuis 1962 l'adjonction de nombreux exemples d'application, afin d'assurer la qualité de la planification et de la réalisation. DIN 4109 a toujours été une directive dynamique et ses stipulations ont évolué pour tenir compte des progrès de l'état de l'art et des techniques.

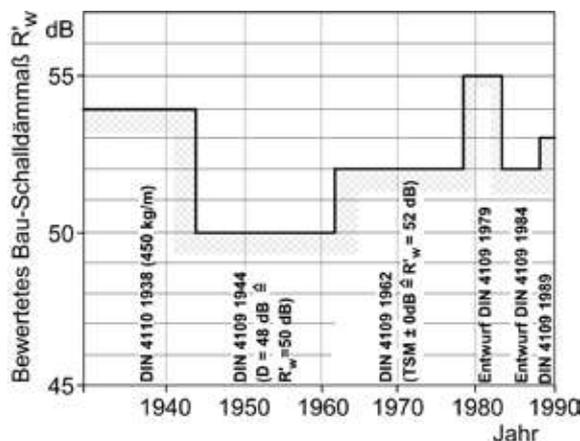


Fig. 2 : Évolution des exigences minimales d'insonorisation dans les textes de normes (projets de normes de 1938 à 1989 inclus) pour les cloisons d'immeubles

#### Traduction des légendes de la figure 2

Bewertetes Bau Schalldämmmaß $R'_w$	Niveau d'isolation acoustique $R'_w$ de la construction
Entwurf DIN...	Projet de norme

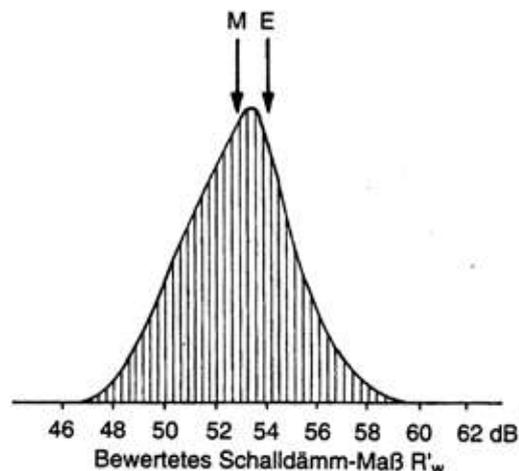


Fig. 3 : Distribution de fréquence du niveau d'isolation acoustique  $R'_w$  des cloisons d'immeubles collectifs  
M : Exigences de la norme DIN 4109, édition 1989  
E : Recommandation d'isolation acoustique supérieure, conformément à l'annexe 2 de la norme DIN 4109 [27]

#### Traduction des légendes de la figure 3

Bewertetes Schalldämmmaß $R'_w$	Niveau d'isolation acoustique $R'_w$
---------------------------------	--------------------------------------

- DIN 52210, qui régleme les procédures de contrôle s'appliquant aux performances d'insonorisation des éléments de construction (tests sur banc) et des bâtiments terminés en définissant les essais acoustiques à effectuer pour la propagation des bruits de contact (bruits de pas) et des bruits aériens.
- DIN 52219, qui complète DIN 52210 en lui ajoutant des prescriptions métrologiques relatives au bruits des installations de plomberie et alimentation en eau.

On peut dire que les années 50 et le début des années 60 ont marqué la grande époque de l'acoustique dans le bâtiment. La protection acoustique des constructions et habitations était la préoccupation majeure des acousticiens oeuvrant à la lutte antibruit, ce dont témoignent les nombreux articles publiés dans les grandes revues spécialisées de ces années-là telles que *Acustica*, *Akustische Zeitschrift*, *Schalltechnik*, *Kampf dem Lärm*, *Der Bauingenieur*, *Der Gesundheits-Ingenieur* ou encore *Elektrische Nachrichtentechnik*.

Le travail des acousticiens du bâtiment a largement profité de l'évolution des méthodes d'analyse mises au point à partir des modes de calcul de la propagation du son dans les solides que Lothar Cremer avait exposés dans une monographie [24] publiée en 1949. Ces modes de calcul s'appliquaient aux véhicules et aux constructions et constituèrent ensuite la base de l'ouvrage sur l'acoustique des solides [25] publié en 1966 par Lothar Cremer et Manfred Heckl et qui représenta une percée considérable.

Cremer et Heckl y exposent les phénomènes de la dynamique des structures liés à la production et à la propagation du bruit en milieu aérien et dans les solides ; la démarche adoptée est remarquablement cohérente avec le mode de pensée acoustique. Leur ouvrage a fait tomber un certain nombre de barrières entre l'acoustique et la dynamique des structures, qui relève de la mécanique classique. La démarche de fond et de forme appliquée a marqué l'ouverture des deux disciplines l'une à l'autre et fondé l'approche pluridisciplinaire systématiquement mise en œuvre aujourd'hui.

Si l'acoustique s'était dotée d'une théorie applicable à la construction, encore fallait-il que ses nouveaux acquis soient pris en considération dans la pratique, et d'abord formalisés dans des normes et directives. Outre de nombreux experts et conseillers compétents et persévérants, l'Institut Fraunhofer de physique du bâtiment et son directeur Karl Gösele y contribuèrent pour beaucoup. On leur doit en effet de nombreuses études pratiques dont les résultats servirent de base aux travaux de normalisation.

Les ouvrages [26] et [27] rendent compte de cette étape ; leurs différentes éditions permettent de suivre les progrès réalisés et intégrés à la planification et à la construction au fil des 35 dernières années.

On peut dire pour conclure que le développement de la protection acoustique dans le secteur du bâtiment a été caractérisé ces cinquante dernières années par les progrès suivants :

- Introduction et optimisation des dalles flottantes limitant la propagation des bruits de pas ;
- Introduction de réalisations à doubles parois pour améliorer l'isolation acoustique tout en réduisant les masses ;
- Abandon progressif des réalisations massives et adoption de solutions complexes allégées dont les performances acoustiques furent régulièrement améliorées ;
- Suppression quasi totale des phénomènes de cavitation au niveau des équipements et installations hydrauliques du bâtiment grâce à l'expérimentation et à l'application systématique de nouvelles connaissances scientifiques ;



Fig. 4 : Voiture électro-technique équipée d'appareils de mesures analogues dans les années 70

## Fréquences de coïncidence

C'est dans les années 40 que l'on découvrit le phénomène des fréquences de coïncidence et que l'on comprit leurs effets sur l'indice de transmission du son et l'isolation acoustique des murs et cloisons. Les premières applications pratiques de cette découverte remontent aux années 50 lorsque les murs de briques pleines cédèrent la place à des réalisations plus économes de matériaux (béton au gaz, béton de ponce). Le phénomène des fréquences de coïncidence permit d'expliquer sans ambiguïté pourquoi des cloisons lourdes et flexibles à la fois assurent un bon niveau d'isolation acoustique.

Cette découverte se traduit également par une application qu'il est intéressant de mentionner sur un plan historique. On essaya de réaliser des cloisons souples en utilisant des plaques minces peu rigides alourdies par des masses locales qui ne dégradèrent pas la rigidité en flexion. La souplesse de la réalisation devait permettre d'obtenir une onde courte, en latin 'brevis unda', d'où la désignation 'brevunda' choisie pour faire valoir les avantages du produit, dont la commercialisation ne rencontra pourtant pas un vif succès.

- Elaboration et application de notions et paramètres spécifiques à l'acoustique des bâtiments tels que les indices d'isolement aux bruits aériens et aux bruits d'impact (bruits de pas) sont évalués par comparaison pondérée avec une courbe d'objectif ;
- Elaboration d'un ensemble de normes et de réglementations visant le long terme et régulièrement actualisées afin de coller aux progrès techniques de la construction.

## La protection acoustique dans les milieux professionnels et industriels

Au milieu des années 60, on avait remédié aux déficits les plus patents dont la construction de logements avait souffert depuis la fin de la deuxième guerre mondiale et la lutte antibruit commença à se concentrer sur les édifices professionnels et industriels. Dans ce secteur également, les deux États allemands en pleine reconstruction avaient relégué les questions d'isolation acoustique au second plan. Mais les doléances des riverains ne tardèrent pas à s'accumuler, relayées par les associations et les communes. Le retour à une certaine prospérité s'accompagnait d'exigences liées à la qualité de la vie et par conséquent à la réduction de nuisances sonores perçues comme intolérables.

Comme sous l'empire allemand, dans les années 50 on pouvait déduire du code civil (*Bundesgesetzbuch* § 906, alinéas 1-3) une revendication pour la réduction du bruit, qui stipule le droit à la préservation de l'intégrité physique. Les personnes exposées au bruit devaient alors consulter un avocat qui, après constatation du grief, exigeait de l'exploitant qu'il fasse appel à un spécialiste – en règle générale un consultant en acoustique. On créait ainsi la situation à partir de laquelle un ingénieur acousticien

## Bruits des installations sanitaires

Au début des années 50, l'utilisation de réservoirs de chasses d'eau débitant à de fortes pressions provoqua de nombreux problèmes. Il fallut pour les résoudre des études poussées sur les phénomènes de cavitation. On aménageait les salles de bains sans considérations particulières et leurs déficiences acoustiques étaient telles que l'on continua longtemps encore de respecter la règle tacite interdisant de faire couler de l'eau la nuit dans la douche ou la baignoire.

La suppression des phénomènes de cavitation mais aussi l'utilisation de conduites et tuyaux isolés et de compensateurs de dilatation dans les immeubles d'habitation collective a permis aux installations sanitaires d'atteindre le niveau de silence et de confort que nous leur connaissons aujourd'hui.

pouvait intervenir et mettre au point des solutions à la fois efficaces et adaptées aux exigences d'exploitation (installation d'un système de silencieux sur une bouche d'évacuation, par exemple).

Les recours de ce type allant croissant, il devint de plus en plus évident que l'on ne pourrait remédier à la situation qu'en définissant des valeurs limites réalistes et en élaborant des directives nationales établissant clairement les droits et devoirs des parties prenantes, qui n'étaient pas précisés par le code civil. Ce qui fut fait – et le mérite en revient aux ingénieurs saisis de cette question, qui se regroupèrent à partir de 1954 au sein du cercle VDI « Techniques vibratoires » et plus particulièrement du comité « Techniques de défense antibruit » et élaborèrent dans ce cadre la norme VDI 2058.

On créa pour définir l'objectif à atteindre la notion d'installation « inaudible ». Les mesures effectuées ([28] p. ex.) avaient abouti à la constatation que, même aux heures les plus calmes de la nuit, on ne descendait pas au-dessous d'un seuil de 40 à 45 phons DIN, une plage de valeurs qui correspond au silence tel que perçu par les citoyens. Par conséquent, on pouvait supposer qu'une installation était inaudible si elle ne dépassait pas ce plafond. C'est la raison pour laquelle le comité VDI utilisa cette plage pour fixer les contraintes de la planification. Elle fut reprise en 1960 dans la directive VDI 2058 puis en 1968 dans le document : *Instructions techniques relatives à la protection antibruit ou Technische Anleitung zum Schutz gegen Lärm* – en abrégé le *TA Lärm*.

La directive VDI 2058 : *Évaluation des nuisances sonores professionnelles et méthodes de protection* et le *TA Lärm* qui la suivit marquèrent deux étapes importantes de la lutte antibruit et de l'application de solutions acoustiques. Certes, on disposait précédemment d'une législation sur les entreprises qui stipulait que les installations susceptibles de présenter un danger ou une nuisance requéraient un agrément mais les conditions à remplir pour recevoir cet agrément n'était pas précisées plus avant. Le *TA Lärm* de 1968 vint combler cette lacune.

Désormais, la délivrance des permis de construire était assujettie pour toutes les nouvelles installations à la mise en place de solutions de protection antibruit correspondant à l'état de l'art et des techniques ; en outre, les nouvelles installations ne pouvaient plus dépasser certains plafonds d'immission hors des limites du site. Les exploitants d'installations trouvèrent dans le *TA Lärm* des directives relatives aux solutions de protection antibruit à engager sur les installations existantes ou à prévoir lors de la planification de nouvelles installations. Quant au voisinage, il pouvait s'appuyer sur le *TA Lärm* pour évaluer la nuisance sonore provoquée par de nouvelles installations.

Les stipulations du document *TA Lärm* ne dépassaient pas le cadre de l'installation objet de l'autorisation ; elles portaient donc sur les effets d'une seule et unique installation sur son environnement. Pourtant, les plafonds d'immission qu'elles définissaient furent de plus en plus fréquemment considérés comme des valeurs limites dont le dépassement était susceptible d'exercer un effet nuisible sur l'environnement et ce, plus particulièrement en relation avec la loi fédérale sur la protection contre les immissions *Bundes-Immissionsschutzgesetz (BImSchG)* entrée en vigueur en 1974.

Cette loi exprimait le besoin de disposer de prescriptions administratives plus adaptées. Cette exigence, l'application des réglementations de la norme VDI 2058 nouvellement rédigée venue compléter le *TA Lärm* mais aussi les variations constatées dans l'application et l'interprétation des textes en fonction des différents Länder nécessitèrent l'élaboration d'un nouveau *TA Lärm* valable cette fois pour toute la République fédérale ; il entra en vigueur en 1998. Cela dit, si ce document avait pour mérite d'éclaircir un certain nombre de points jusqu'alors restés obscurs, il introduisait aussi de nouvelles notions qui suscitérent à leur tour des divergences d'interprétation.

En dépit des différences de lecture auxquelles se prêtait le *TA Lärm*, ses directives et instructions ont entraîné de nombreuses solutions de protection acoustique et l'on peut dire de ce fait qu'il est à l'origine d'une nouvelle page d'histoire des techniques. Avec le *TA Lärm*, la planification de nouvelles installations ne pouvait plus se faire sans envisager l'aspect de la lutte antibruit ; quant aux installations existantes, il leur fallait une remise à niveau sur le plan des techniques d'isolation acoustique si on voulait qu'elles obtiennent les agréments nécessaires à leur modification ou à leur extension.

Du point de vue des techniques de réduction des nuisances sonores, les retombées positives furent les suivantes :

- De nombreuses installations existantes se virent soumises à des analyses minutieuses dans le cadre de campagnes de mesures parfois étendues à plusieurs semaines ;
- On mit au point ou fit évoluer des procédés métrologiques permettant de caractériser et de distinguer les sources de bruit : mesure précise du bruit diffusé par les solides par exemple avec définition de la puissance acoustique via l'indice de rayonnement, ou mesure dite globale afin de connaître la puissance acoustique de groupes d'installations pris dans leur ensemble ;

- On analysa les sources de bruit principales de nombreuses installations en tenant compte non seulement des parties constitutives essentielles à leur fonctionnement mais aussi de leur périphérie - canalisations et raccordements ;

- Dans le cas de nombreux composants tels que les ventilateurs, les vannes et actionneurs, les moteurs et systèmes d'entraînement ou encore les transformateurs, on mit au point des versions d'équipements plus silencieux ;

- on mit au point pour les émissions de fluides ou de gaz chargés en poussières des systèmes de silencieux peu sensibles à la saleté : ils atténuaient le bruit de rotation des soufflantes d'aspiration qui s'entendait auparavant à des kilomètres à la ronde.

La notion de « puissance acoustique » contribua dans une large mesure au progrès technique enregistré par la protection antibruit et on recourut de plus en plus souvent à ce paramètre pour caractériser les émissions sonores. En effet, il permettait de décrire sans ambiguïté et dans le respect des lois de la physique la contribution de différentes sources à un niveau de pression acoustique total, une condition essentielle à l'établissement de la carte d'identité acoustique des différents composants et donc à la création de bases de données dont l'existence nous semble aujourd'hui relever de l'évidence. Ces informations étaient indispensables pour pouvoir envisager la spécification des interfaces, puis la définition d'exigences corrélées étendues étape par étape à tous les acteurs d'une filière. Sans ces paramètres et données, la tendance actuelle qui veut que l'on déplace la responsabilité acoustique de l'exploitant de l'installation aux fabricants ou constructeurs des composants relèverait tout simplement de l'arbitraire.

Les raisons qui motivèrent l'emploi de la puissance acoustique comme paramètre de base sont sûrement évidentes pour toutes les personnes expertes en acoustique ; sur le plan technique, il n'en fut pas moins très difficile de l'imposer dans le cadre de la pratique quotidienne. Aujourd'hui encore, au bout de 25 ans et plus, divers malentendus ou débats imprévus et ce, au niveau international également montrent que ces difficultés ont laissé leurs traces.

Initiée par l'entrée en vigueur d'une réglementation tournée vers l'avenir, l'évolution technique de la protection acoustique nécessita dans un premier temps de nombreux travaux véritablement pionniers qui trouvèrent dans les années 70 le soutien actif de nombreuses entreprises intéressées par une réduction efficace des nuisances sonores mais aussi des administrations concernées et des organismes de recherche qui les assistaient. Cette volonté commune et les idées des acousticiens impliqués se traduisirent par un certain nombre d'actions spectaculaires que l'on a du mal à s'imaginer aujourd'hui :

- mesure de la puissance acoustique d'une cheminée d'usine au moyen d'un ballon aérien piloté autour de l'installation ;

- ou encore interruption complète de toutes les tours de refroidissement d'une grande raffinerie afin de vérifier

les calculs qui prédisaient une diminution par deux de la puissance acoustique (3 dB de réduction du niveau de pression) pour l'ensemble de l'installation.

D'innombrables actions ponctuelles et études de ce type – moins spectaculaires en général – ont permis d'engranger au fil des années de très nombreuses connaissances relatives à l'acoustique de nombreux organes, installations et process. Ces connaissances sont aujourd'hui à la base des solutions techniques de réduction du bruit.

A cette époque, il était déjà très important d'atteindre les objectifs acoustiques convenus, et ce n'était pas une tâche facile car les questions et les démarches liées à la réduction du bruit relevaient encore de la nouveauté. C'est pourquoi l'acoustique était « l'affaire du chef » : dans les entreprises, on vit les membres du directoire s'impliquer personnellement et intervenir directement pour assurer le bon déroulement des opérations. Aujourd'hui, la situation est bien différente : la protection antibruit est entrée dans les mœurs, elle se traite comme une affaire de routine et cette évolution traduit bien la réussite de son application pratique dans les décennies qui ont précédé.

De façon générale, on peut dire aujourd'hui que la maîtrise des nuisances sonores qu'engendrent les équipements techniques de grande envergure employés dans les secteurs industriels et professionnels suppose une planification extrêmement précise des solutions de réduction du bruit souhaitables ou nécessaires. Seule cette planification basée sur l'analyse précise de toutes les sources d'émissions partielles permet de définir les solutions primaires et secondaires adéquates qui permettront de répondre aux exigences d'une spécification en vigueur et ce, en prévoyant précisément les dépenses à engager.

Cela vaut tout particulièrement pour les installations de grande envergure telles que les unités pétrochimiques par exemple, qui sont exploitées à l'air libre pour des raisons de sécurité. Étant donné qu'il est généralement impossible de les confiner dans des bâtiments, la réduction des émissions sonores ne peut se faire que par l'élaboration de solutions nombreuses et diversifiées portant sur tous les organes et sur toutes les parties de l'installation contribuant à l'émission et/ou à l'immission globale. Il est donc impératif de dresser un bilan acoustique de toutes les sources si l'on veut respecter le plafond d'émission prescrit et fiabiliser le résultat tout en évitant les dépenses liées à un surdimensionnement des solutions d'insonorisation.

Dans le cas des installations confinées dans des bâtiments fermés, il suffit par contre de ventiler par sous-ensembles les émissions de l'installation pour pouvoir prédire la puissance acoustique à l'intérieur, qui servira ensuite de base à la conception d'une façade industrielle isolante.

Étant donné le grand nombre de nouvelles façades industrielles à construire, il était intéressant de les optimiser non seulement du point de vue de leur aptitude à un montage rapide (éléments préfabriqués) ou de leur faible coût (gain de matériaux par la diminution des masses) – deux aspects qui motivaient des changements

fréquents – mais aussi du point de vue de leurs propriétés isolantes. Les nombreuses études réalisées sur différents types de façades envisageables ont permis des progrès considérables et on peut dire aujourd'hui que les façades industrielles modernes atteignent dans la plage des fréquences moyennes les mêmes niveaux d'isolation acoustique que ceux que l'on obtenait autrefois avec des parois simples et dix fois plus lourdes.

Les deux exemples qui suivent ont un caractère suffisamment typique pour pouvoir illustrer la démarche appliquée selon que l'on travaillait sur les nuisances sonores d'une installation à l'air libre ou confinée dans un bâtiment.

Dans les années 50, on décida de planifier et de construire à Munich dans la Müllerstraße - autrement dit en plein secteur d'habitation - une centrale thermique de 50 MW. Ce projet marqua une étape importante dans la maîtrise des émissions sonores d'installations industrielles exploitées dans des bâtiments. A l'époque, les centrales étaient encore extrêmement bruyantes et leur bruit s'entendait à des kilomètres à la ronde. Par conséquent, une exploitation de ce type dans une zone résidentielle exigeait des dispositions en amont afin de rendre la centrale 'inaudible' comme l'exigeait la procédure d'agrément. Sur le plan technique, cela signifiait qu'en mode de fonctionnement normal, l'installation ne devait pas augmenter la valeur de référence de 40 phones DIN – soit le plus bas niveau sonore en heures nocturnes – dans le voisinage. Pour les pics occasionnels et émergences de courte durée, on convint d'une valeur de 60 phones DIN au niveau des habitations les plus proches.

Pour que la planification puisse atteindre ces objectifs, il fallait donc dans un premier temps déterminer le niveau de bruit à l'intérieur de la centrale en analysant les émissions sonores des différentes sources. Or, les puissances acoustiques de référence aujourd'hui listées dans les bases de données n'existaient pas encore ; on ne disposait pas non plus de prescriptions ou méthodes reconnues pour procéder aux mesures. Il fallut par conséquent déterminer le niveau d'émission des sources en effectuant des mesures sur des organes et systèmes comparables dans des milieux acoustiques variés.

Partant d'un niveau de bruit théorique à l'intérieur d'une part, et du niveau de bruit à distance qu'il fallait respecter d'autre part, on dut émettre des hypothèses sur les conditions de rayonnement et de propagation pour pouvoir envisager les solutions d'isolation à prendre au niveau des parois extérieures et des différentes sources. Bien sûr, il n'existait encore à l'époque aucune directive structurant cette démarche, et c'est à l'ingénieur acousticien qu'il revint en pleine et entière responsabilité de résoudre le problème et de mettre au point une méthode fiable à partir de ses connaissances en physique. Aujourd'hui, on dispose de directives claires et, pour le volet métrologique, de modes opératoires reconnus qui s'appuient sur la théorie et l'expérience et il est difficile rétrospectivement de se figurer les remises en question véhémentes auxquelles l'approche que nous retraçons ici – justifiée et parfaitement fondée – a pu donner lieu en son temps.

Outre les émissions primaires propagées par la voie aérienne, il fallait également considérer les émissions secondaires provoquées par une excitation ou un ébranlement du sol et qui était susceptibles d'atteindre les habitations riveraines. Les ingénieurs définirent et réalisèrent des solutions adéquates et les mesures effectuées lors de la réception de la centrale attestèrent qu'en mode de fonctionnement normal, l'installation ne dépassait pas le niveau d'émission maximal exigé. On était ainsi parvenu à satisfaire aux exigences de maîtrise d'une nuisance sonore et à démontrer que l'application systématique des techniques de réduction du bruit permettait de construire des installations de grande envergure dans des zones d'habitation sans avoir à redouter de nuisances pour leur environnement.

Le travail effectué sur la centrale thermique de la Müllerstraße à Munich permit par ailleurs de démontrer que l'on pouvait prédire les caractéristiques technico-acoustiques d'une installation industrielle, et intervenir sur cette base dès le stade de la planification. C'était là une constatation essentielle pour la définition et l'application contraignante d'exigences acoustiques - car en l'absence de toute méthode de prédiction fiable sur laquelle fonder une planification, les chances de respecter un plafond d'émissions sont effectivement minimes.

Dans les années 70 et 80, les unités de craquage produisant de l'éthylène et du propylène à partir de pétrole brut constituèrent un autre exemple important de l'application ciblée des solutions de protection antibruit dans le contexte des grandes installations industrielles. En général, la réglementation prévoyait dans les zones résidentielles voisines (rarement distantes de plus de 1000 mètres) un plafond maximal de 35 dB (A) pour les immissions sonores provoquées par l'installation, ce qui nécessitait des solutions d'insonorisation complexes.

Rappelons pour mémoire quelques paramètres typiques de ce genre d'installation : une production annuelle maximale d'environ 450 000 tonnes d'éthylène, environ 500 MW d'énergie thermique consommée pour produire 100 MW d'énergie mécanique, jusqu'à 10 fours et compresseurs, environ 70 pompes et 500 vannes de régulation sur une surface d'environ 37 500 m<sup>2</sup>.

Leur dimension, leur puissance, la complexité du procédé utilisé, les quantités d'énergie consommée et transformée et la nécessité de construire en plein air pour des raisons de sécurité classent les unités de production d'éthylène en tête des installations pétrochimiques les plus bruyantes. La définition des solutions de protection acoustique à envisager était compliquée par le nombre et la diversité des sources de bruit concernées. Il fallut élaborer des spécifications exactes à la fois pour les valeurs d'émission maximales autorisées, pour les solutions d'insonorisation nécessaires mais aussi pour les méthodes de mesure qui s'appliqueraient lors de la réception.

Les émissions sonores d'une unité de production d'éthylène sont dues pour l'essentiel aux écoulements et aux combustions nécessaires au process. Les solutions primaires appliquées visèrent une réduction de la vitesse caractéristique des écoulements. La conception de

vannes à plusieurs seuils de décompression, la diminution de la vitesse de rotation des ventilateurs et l'optimisation du dessin de leurs ailettes constituent quelques exemples typiques de ces solutions.

Elles furent complétées par de nombreuses solutions secondaires telles que silencieux pour les brûleurs, les ouvertures d'aspiration, les bouches de sortie et les conduits ou encore carénages et capotages insonorisants.

L'unité de production d'éthylène dont nous parlons était plus performante que les unités traditionnelles et pourtant, l'ensemble des solutions de protection antibruit appliquées permit de réduire de 15 dB (A) environ la puissance acoustique rayonnée globale. D'un point de vue spatial, cela signifie que la zone géographique exposée avait été réduite de plus de 90 %. Cette réduction significative a contribué de façon majeure – en combinaison avec d'autres réussites du même type sur d'autres installations industrielles – à démontrer qu'il était possible d'exploiter des installations industrielles de grande envergure et de viser une forte productivité tout en respectant les exigences environnementales [30], [31].

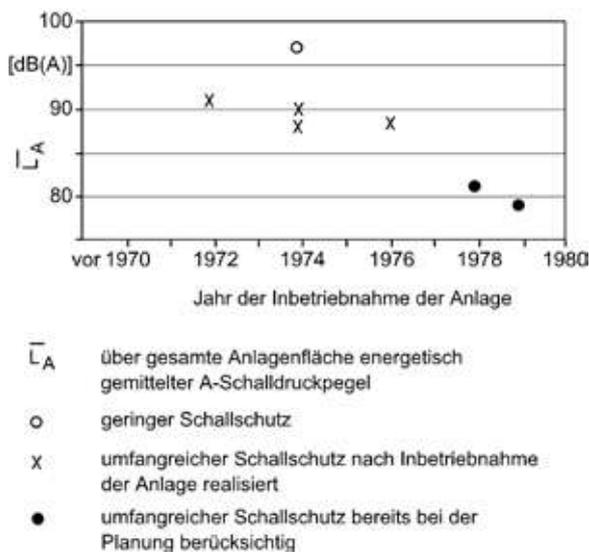


Fig. 5 : Évolution du niveau de pression acoustique A (moyenne énergétique sur l'ensemble de l'unité) de diverses unités de production d'éthylène entre 1970 et 1979

Traduction des légendes de la figure 5	
LA in dB(A)	LA en dB(A)
Jahr der ...Anlage	Année de mise en service de l'unité
über ...pegel	Moyenne énergétique du niveau de pression acoustique A sur l'ensemble de l'unité
o geringer..	Faible protection acoustique
X	Protection acoustique importante lors de la mise en service de l'unité de production
•	Protection acoustique déjà importante lors de la planification

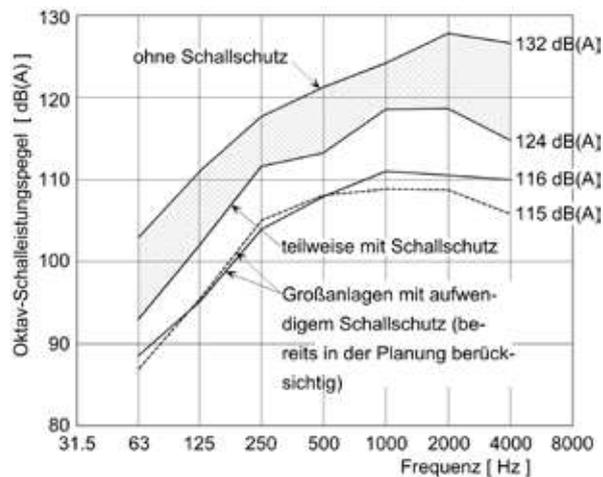


Fig. 6 : Impact de la protection acoustique sur la puissance acoustique des unités de production d'éthylène

Traduction des légendes de la figure 6	
Oktav-Schalleistungspegel..	Octave de puissance acoustique en dB(A)
ohne Schallschutz	sans protection acoustique
teilweise mit ss	protection acoustique partielle
Großanlagen...	Unités de grande taille avec protection acoustique complexe (prévue dans les plans de construction)
Frequenz..	Fréquence en Hz

On peut donc dire en conclusion que la réduction du bruit dans les milieux industriels et professionnels entreprise dans les années 70 a eu pour effet de démontrer que l'on pouvait construire, moderniser et remettre à niveau de grandes installations industrielles afin qu'elles soient à même de fonctionner dans le respect de l'environnement et ce, même dans des zones à forte densité de population. Grâce aux progrès considérables effectués dans le secteur des techniques antibruit, on a également donné aux exploitants d'installations les moyens nécessaires à l'obtention des agréments stipulés par le législateur. De ce fait, l'acoustique technique a joué un rôle essentiel dans la préservation du site industriel qu'est l'Allemagne.

### La protection acoustique dans les transports

Dans les 20 à 30 années qui suivirent la fin de la deuxième guerre mondiale, la lutte antibruit se concentra dans un premier temps sur les bâtiments et l'industrie mais les nuisances sonores dues au trafic ne tardèrent pas à attirer l'attention. Tout comme dans les autres secteurs, cette situation se traduisit dans un premier temps par diverses solutions ponctuelles, puis par la rédaction de prescriptions et de directives adéquates puis finalement par des mesures de réduction du bruit systématiques que nous allons maintenant retracer pour les trois modes de transport essentiels.

#### La protection acoustique dans le trafic routier

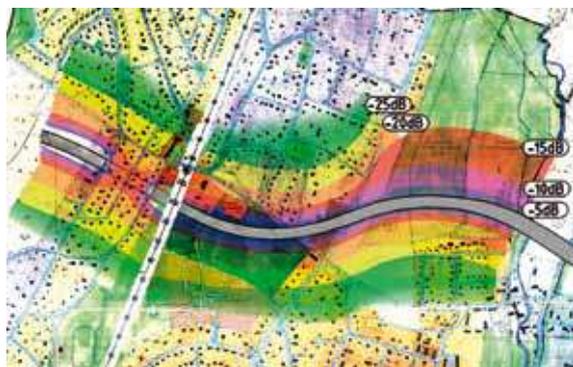
Le trafic routier est probablement l'un des secteurs – avec le trafic aérien – qui illustre le mieux le développement extrême et rapide des techniques qui s'est fait jour

après 1945. Au début, la généralisation des véhicules à moteur rencontra l'assentiment de la population mais personne n'avait prévu le caractère exponentiel qu'elle allait prendre. Les administrations réagirent en planifiant et en construisant un réseau routier largement dimensionné (jusqu'en 1970 environ) et en adaptant les villes à l'automobile - le credo de l'époque. En outre, tout le monde était convaincu que l'on disposerait toujours des moyens nécessaires à la maîtrise des inconvénients qu'entraînent les nouvelles techniques (« *Tout est toujours faisable à condition de savoir planifier* »), ce qui contribuait largement à l'optimisme général.

Ce n'est que plus tard, vers la fin des années 60, que l'on commença à émettre des réserves dues au « *caractère inhospitalier de nos villes* », un aspect que confirment les protestations de citoyens de plus en plus sensibilisés au problème. Les voitures furent bannies des zones piétonnières; leur liberté de circulation fut restreinte par l'introduction de zones à trafic limité et c'est à leurs dépens que s'implantèrent les systèmes de transport publics de proximité alors en pleine expansion.

Hors des villes également, les communes et les administrations commencèrent à intégrer les exigences de la protection antibruit dès le stade de la planification des routes. On peut dater de 1965 la toute première étude technico-acoustique relative au trafic routier. Il s'agissait d'une route nationale existante qui devait être aménagée pour rejoindre l'autoroute. L'étude avait pour objectif de mettre au point les techniques de métrologie acoustique nécessaires à un premier état des lieux. Il fallait ensuite pouvoir évaluer la nuisance sonore à laquelle s'attendre une fois l'aménagement terminé et proposer des solutions de réduction du bruit appropriées.

On ne disposait à l'époque d'aucune méthode reconnue pour calculer la propagation du son, ni de valeurs limites s'appliquant au bruit du trafic, ni même de valeurs de référence pour l'évaluer. A l'instar d'autres situations analogues, la démarche adoptée fut la suivante : s'appuyer sur les lois de la physique et l'état de l'art, utiliser comme point de départ les valeurs de référence de documents validés (tels que la norme VDI 2058) et en déduire celles



**Fig. 7 :** Première carte du bruit établie à partir d'un calcul prévisionnel de la propagation du son sur des terrains accidentés avec les émissions sonores d'une autoroute et en tenant compte des distances et du relief. Les différences de niveau constatées ici se réfèrent au niveau moyen à 25 m de l'autoroute

qui s'appliqueraient au cas considéré. Du reste, les valeurs utilisées dans le cadre de ce travail ont été reprises ultérieurement dans la norme *DIN 18005: Protection antibruit en milieu urbain*.

Cette démarche conduisit finalement à la toute première cartographie des nuisances sonores. C'est sur la base des cartes ainsi établies et des critères retenus que les premières solutions furent mises au point : la construction de murs de protection acoustique, qui furent même complétés ultérieurement par des souterrains fermés. Précisons pour mémoire qu'à l'époque, la construction d'un mur de protection acoustique était beaucoup plus facile à financer si on la présentait comme une mesure d'esthétique paysagère plutôt que comme une mesure de protection antibruit.



**Fig. 8 :** Premier mur antibruit d'une route nationale transformée en autoroute

Sur un plan technique, les mesures de protection définies dans ce contexte sont restées – avec les fenêtres insonorisantes – l'instrument essentiel de réduction des nuisances sonores dues au trafic. Les modifications acoustiques se sont concentrées sur les revêtements absorbants et sur une conception optimale du bandeau déflecteur des murs et plus particulièrement de son impédance ([32]). En Allemagne, les grandes voies de circulation sont aujourd'hui équipées de murs de protection acoustique sur une longueur de 1739 km et d'autres types de barrières acoustiques (levées de terre) sur 906 km. En 2000, la progression enregistrée a porté sur 58 km de parois et environ 18 km de murs de protection acoustique.

En 1975, on parvint à uniformiser la réglementation relative à la propagation du son à proximité des voies de circulation et au calcul des émissions sonores routières grâce à des directives provisoires sur la protection acoustique à la périphérie des routes (RLS) qui furent ensuite complétées et révisées en 1981 puis 1990 (RLS 90). Les valeurs d'immission dont cette réglementation ne faisait pas encore état furent précisées en 1990 également dans une directive d'application complétant la loi fédérale sur la protection contre les émissions *Bundes-Immissionsschutzgesetz*; elles étaient définies comme valeurs limites d'immission constatées en avant de la fenêtre et s'appliquaient à la construction de nouvelles voies ou à l'aménagement des voies existantes s'il s'agissait d'une modification de grande ampleur. Même si l'application de ces valeurs limites eut pour conséquence des travaux de protection acoustique - et des dépenses

- largement supérieurs aux prévisions, cette directive d'application est aujourd'hui très largement reconnue. Sans les solutions définies et mises en œuvre à l'époque, les nuisances sonores dues au trafic s'avèreraient bien plus lourdes à supporter qu'elles ne le sont actuellement.

Ajoutons à propos de la norme DIN 18005 qu'elle a largement contribué dès sa première version (texte initial de 1968), puis dans sa version de 1987, à accorder à la protection contre le bruit en milieu urbain la place qui lui revenait. Depuis, aucun projet de construction ne peut recevoir d'agrément s'il n'est pas étayé par une étude sur les techniques de protection acoustique. Il faut prouver que la protection contre le bruit a été prise en considération de manière appropriée lors de la planification et fournir les documents correspondants.

Bien entendu, la protection contre les nuisances sonores dues au trafic routier ne saurait se limiter à des mesures secondaires. Il est évident qu'il faut s'entendre sur des solutions efficaces qui agissent à la source, autrement dit qui s'appliquent aux millions de véhicules immatriculés tous les ans en Allemagne. Cette exigence a été satisfaite au cours de ces 25 dernières années grâce à une sévèrisation des valeurs limites à respecter pour l'homologation de type avec une baisse de 8 dB pour les voitures particulières et de 11 dB pour les véhicules industriels. Désormais, les véhicules sont beaucoup plus silencieux lors du passage en accélération que prévoient les essais d'homologation de type. Pourtant, les nuisances sonores dues au trafic n'ont pas vraiment diminué à nos oreilles. Cela s'explique par l'augmentation considérable du trafic mais aussi par l'apparition d'organes ou d'équipements plus bruyants – moteurs diesel, pneus larges. Par ailleurs, les conditions de fonctionnement prises en considération dans les tests d'homologation de type ne correspondent pas forcément aux plages de service les plus fréquentes dans la réalité quotidienne.

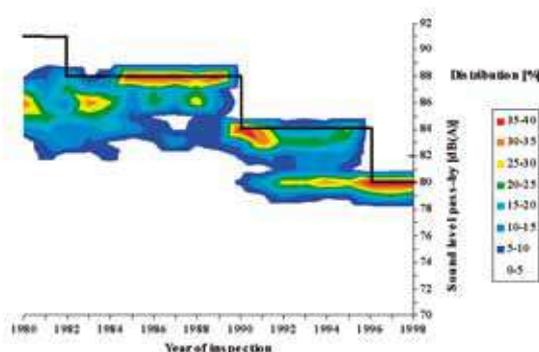


Fig. 9 : Évolution temporelle des bruits mesurés (et des valeurs limites correspondantes) lors du test d'homologation de type [42]

Traduction de la figure 9	
year of inspection	année de l'inspection
sound level..	Niveau sonore de passage [dB(A)]

Le bruit provoqué par la chaîne cinématique des véhicules étant fortement pondéré dans le test de passage en

accélération pratiqué lors de l'examen d'homologation, cette nuisance a considérablement diminué. C'est maintenant le bruit de roulement des pneumatiques qui constitue la source de bruit principale dans le trafic, ce qui signifie que l'on peut s'attendre à un progrès important si l'on parvient à réduire ce bruit de roulement.

Cette attente s'avère réaliste, ce dont témoignent des mesures récentes effectuées sur de nombreux types de pneumatiques et des revêtements routiers extrêmement variés [33]. On sait maintenant fabriquer des pneus peu bruyants et des revêtements absorbants. Du reste, il existe depuis 2001 une homologation pour des pneumatiques qui - quelles que soient les controverses dont leurs valeurs limites actuelles font l'objet - constituent indiscutablement une plate-forme d'avenir y compris pour la détermination de nouvelles valeurs limites adaptées aux progrès techniques.

Les programmes de calcul ont également effectué des débuts prometteurs : on peut simuler des solutions acoustiques optimisées pour les revêtements routiers en saisissant et en combinant différents paramètres. Il existe d'autre part des analyses coûts/avantages qui permettent de démontrer la rentabilité à long terme des revêtements insonorisants dans les situations concrètes. Mais toute innovation exige que l'on ait aussi le courage de passer à l'action et d'expérimenter - et l'expérimentation serait bien nécessaire pour mettre en évidence l'adéquation des revêtements insonorisants existants, pour démontrer la nécessité d'améliorer encore leurs performances et pour venir enfin à bout de l'attitude très réservée qui continue de dominer en Allemagne.

L'objectif semble en valoir vraiment la peine : réduire le bruit directement à la source avec une efficacité à grande échelle et ce, sans avoir à intervenir ni sur le milieu urbain ni sur le paysage. On oppose à cette démarche la hausse des coûts de la construction et de l'entretien qu'elle entraîne et la moindre durée de vie des revêtements. Elle n'en est pas moins globalement rentable, ce que les analyses détaillées coûts/avantages mentionnées plus haut peuvent justement démontrer au cas par cas en tenant compte de la suppression d'autres mesures secondaires dès lors superflues.

#### La protection acoustique dans le trafic ferroviaire

A la différence du trafic routier, le trafic ferroviaire était déjà bien établi en Allemagne avant 1945 et bien accepté dans son rôle de mode de transport principal. L'interconnexion des réseaux, l'aspect collectif du trafic ferroviaire – qu'il s'agisse des marchandises ou des personnes transportées – et une consommation d'énergie relativement peu coûteuse - surtout avec l'électrification des réseaux après 1945 et la production de l'énergie électrique dans les centrales – font que les chemins de fer ont bénéficié dès l'apparition de la notion d'écologie d'une image « respectueuse de l'environnement », image qu'ils n'ont pas tardé à revendiquer face au problème des nuisances sonores causées par le bruit de roulement des trains et d'exploitation des lignes.

Dans ses efforts pour justifier cette image, la préserver et la développer, la Deutsche Bundesbahn s'est largement

appuyée sur le monopole dont elle jouissait. Organisme d'État, elle avait en effet à assurer une mission de service public, ce qui impliquait qu'elle soit au service de la collectivité et qu'elle contribue non seulement à préserver sa qualité de vie mais aussi à l'améliorer.

En ce qui concerne la protection antibruit, cette obligation inhérente à sa mission se traduit par de nombreux travaux portant sur les aspects les plus divers de l'acoustique ferroviaire afin de mieux comprendre la naissance du bruit dans les rames et sur les lignes et de définir les solutions et améliorations appropriées. Ces travaux furent confiés par la Bundesbahn à son service des essais. Pour disposer d'une vue d'ensemble sur les activités de ce service, on peut se référer aux deux éditions du manuel [31] et à l'importante bibliographie qu'elles contiennent. Il peut être intéressant à titre d'exemple d'exposer le travail de ce service dans le contexte des ponts de chemin de fer, pour lesquels on utilisa après 1945 des types de conception et de réalisation très différents et dont les effets sont également très différents du point de vue acoustique.

On s'aperçut grâce à des études systématiques que la fixation des rails sur un pont et les différences d'élasticité (en fonction du lit de ballast, par exemple) influençaient le niveau de bruit propagé en milieu aérien. Un emploi ciblé de paliers d'appui pour les rails et la modification de la conception d'ensemble et de la pose (ajout d'éléments amortissants) permit de diminuer de 15 dB le niveau de pression acoustique A généré par les ponts en tôles d'acier. Les résultats obtenus dans le cadre de ces études permirent à leur tour d'adapter l'acoustique des ponts de chemin de fer aux contingences locales dès le stade de la planification [31].

L'efficacité du travail fourni par le service des essais déboucha finalement sur la création d'un département spécialisé où étaient centralisées toutes les questions touchant à l'acoustique ferroviaire. Du fait de son implantation directe au siège de la Bundesbahn - le *Bundesbahnzentralamt* - et de sa place tout en haut de l'organigramme, ce département en charge de toutes les questions et de tous les problèmes liés aux techniques acoustiques a contribué non seulement à les valoriser mais aussi à leur ouvrir de nouvelles perspectives et à leur conférer un nouvel élan.

Au fil de ses travaux, la Deutsche Bahn a coordonné la planification et la réalisation de nombreuses solutions visant à diminuer les nuisances sonores. Elle a élaboré les directives nécessaires à la saisie et à l'évaluation des différentes situations acoustiques liées au trafic ferroviaire. Grâce aux activités de recherche et de développement qu'elle a soit directement assurées, soit commanditées, elle a élargi et approfondi les connaissances acoustiques spécifiques aux chemins de fer.

Ce travail a produit des résultats remarquables tels que :

- L'analyse et l'évaluation du bruit de passage des trains dans le cadre d'une étude interdisciplinaire à grande échelle menée dans les années 80 qui a motivé l'introduction en 1990 du *bonus rail* de 5 dB (A) par rapport au trafic routier. La justification de ce *bonus rail* a pu être globalement

confirmée par une étude récente sur les effets du bruit et même si l'on peut souhaiter quelques éclaircissements supplémentaires sur certains points précis, le résultat obtenu ne remet pas en question la justification de ce bonus appliqué au rail.

- La définition et l'entrée en vigueur en 1976 d'une directive intitulée: *Schall 03* dont l'importance est comparable à celle de la directive RLS 90. Elle définit la valeur des émissions en fonction de la vitesse, de la longueur des trains et d'autres paramètres spécifiques aux rames ainsi que les modes de calcul applicables à la propagation du bruit.

- Des études technico-acoustiques poussées pour accompagner le développement et l'utilisation des voies sur dalle (VSD) installées sur tous les nouveaux tronçons du fait de leurs faibles coûts d'exploitation et d'entretien.
- Les calculs, les analyses et les essais théoriques complexes ont visé à la fois des solutions à court terme (revêtements absorbants par exemple) et d'autres à long terme (construction de superstructures peu bruyantes) afin d'éviter - ou tout du moins de compenser - l'augmentation du niveau sonore lié à l'introduction des voies sur dalle.



Fig. 10: Étude de l'absorption maximale possible d'une voie sur dalle avec utilisation de la limite de gabarit d'espace libre (absorbeur en caoutchouc recyclé)

- L'étude poussée de la formation sur les rails de rainures dues à l'usure ondulatoire ainsi que du bruit de roulement provoqué par les aspérités des roues et des rails. Le modèle de simulation mis au point permet de calculer le niveau sonore des trains à leur passage à partir du profil des aspérités. Cette simulation prend en compte les paramètres de construction des superstructures et des matériaux, ce qui permet de l'utiliser également pour la conception acoustique des superstructures ferroviaires.

- La mise en évidence que le bruit de roulement moyen sur un tronçon donné est directement lié à l'état des rails (aspérités, rainures). Le lien de cause à effet une fois établi, on a pu mettre au point un procédé reconnu de surveillance des voies: une voiture électro-technique surveille régulièrement l'état des rails et, dès que certains critères sortent des plages de tolérance, on remédie à la situation en rectifiant la surface des rails.

- La mise en évidence que la dégradation des surfaces fonctionnelles des roues provoquées par les freins à sabots entraîne une augmentation notable du niveau de

bruit des trains à leur passage. Cette constatation a déjà conduit dans le passé à l'emploi de freins à disque pour les transports de personnes et motive un programme à long terme prévoyant pour les trains de marchandises circulant en Europe l'emploi de systèmes de freins silencieux (à disque, par exemple).

- L'élaboration d'autres solutions exemplaires telles que les jupes insonorisantes à hauteur du châssis des trains ou les murs de protection acoustique qui contribuent dans les deux cas de façon notable à réduire les émissions des trains de marchandises.

Depuis sa privatisation, la Deutsche Bundesbahn - devenue la société anonyme DB AG - a décentralisé un certain nombre de ses activités dont la responsabilité incombe désormais à ses partenaires contractuels, les constructeurs de matériels roulants. Aujourd'hui, c'est à eux seuls qu'il revient de développer les solutions techniques qui permettront de répondre aux exigences croissantes en matière acoustique afin que les émissions des sources restent compatibles avec les besoins de l'environnement.

On peut mentionner ici à titre d'exemple les nouveaux modes de propulsion introduits ces dernières années et qui ont pour corollaire des besoins accrus en matière de ventilation: les nouvelles émissions sonores provoquées par ces systèmes ont pu être ramenées au niveau d'exigence voulu grâce à l'application systématique du savoir-faire technico-acoustique.

#### **La protection acoustique dans le trafic aérien**

Comme pour les autres modes de transport, c'est dans les années 60 que la population concernée commença d'exprimer un malaise croissant face aux nuisances du trafic aérien. Dans ce cas précis toutefois, le niveau extrêmement élevé des émissions sonores fit que l'on se pencha très tôt sur leurs éventuelles conséquences sur la santé. Par conséquent, il est logique que le bruit du trafic aérien ait été la première nuisance sonore pour laquelle les études concrètes effectuées ont porté non seulement sur le désagrément provoqué mais aussi sur les risques et conséquences sanitaires. Il est intéressant de constater que le bruit du trafic aérien a conservé aujourd'hui ce rôle de précurseur dans les études sur les effets du bruit.

En 1965, un rapport d'expertise [34] proposa de caractériser le désagrément entraîné par les bruits du trafic aérien en utilisant l'indice de gêne Q. Ce rapport a joué un rôle non négligeable car l'indice de gêne proposé fut en fait le précurseur de l'indice d'énergie acoustique  $L_{eq4}$  utilisé ultérieurement dans la loi sur la protection contre le bruit du trafic aérien *Fluglärmschutzgesetz*.

Ce rapport d'expertise et le besoin de réglementation qu'il formulait entraînèrent en 1971 la promulgation de la loi sur la protection contre le bruit du trafic aérien qui définissait les zones de protection et qui introduisait un mode de prédiction adapté aux nuisances aériennes. La refonte de cette loi fait l'objet d'un vif débat depuis quelques années.

Côté émissions, l'homologation de type des aéronefs (ICAO ANNEX 16) comprend depuis 1971 des valeurs

limites internationales s'appliquant au niveau de bruit des avions en vol. Cette réglementation a eu pour conséquence positive de stopper rapidement la construction d'un certain nombre d'avions bruyants. Ses effets restent pourtant très en-deça de l'atténuation obtenue grâce aux nouveaux moteurs à double flux, qui n'ont pas été introduits pour leurs avantages acoustiques mais bien pour des raisons de rentabilité. Le bruit de passage en vol de certains avions a diminué de 13 dB comparé à celui d'autres types homologués dans une catégorie de tonnage équivalente.

Il n'empêche que le bruit du trafic aérien continue de faire les gros titres en dépit de ces améliorations. Cela s'explique par le nombre croissant des aéroports et des zones impactées puisque toute infrastructure aéroportuaire provoque une extrême concentration du trafic et crée autour d'elle une zone d'exposition au bruit très étendue.

Aujourd'hui, seule une petite partie des solutions d'atténuation du bruit dans les aéroports présente un caractère technique - mesures de protection acoustique, par exemple. Elles sont complétées par l'efficacité d'ensemble d'autres méthodes d'optimisation - une bonne répartition des surfaces utiles, ou des procédures de décollage et d'atterrissage limitant les pics sonores. Mentionnons également la possibilité d'appliquer le principe du pollueur/payeur en prévoyant une taxe à l'atterrissage avec bonus pour les avions silencieux et malus pour les avions bruyants.

La loi sur le trafic aérien tient compte du rôle prépondérant des installations aéroportuaires dans l'émission de nuisances sonores: elle impose la réalisation et l'exploitation de stations de surveillance du bruit en vol qui ont à contrôler, mesurer et analyser tous les événements à caractère acoustique et elle stipule la mise en place dans les aéroports de commissions d'acoustique chargées du bruit du trafic aérien et auxquelles participent toutes les personnes concernées par les questions de planification et d'exploitation.

#### **La protection acoustique dans le secteur des machines et de l'outillage**

Dans nos sociétés fortement dominées par la technique, une partie importante des nuisances sonores est provoquée d'une façon ou d'une autre par l'utilisation de machines ou d'engins. On peut donc dire que la plupart des solutions techniques adoptées pour atténuer les niveaux de bruit relèvent de l'acoustique des machines. Pourtant, il a fallu attendre un certain nombre d'années après 1945 pour que les efforts de réduction des nuisances sonores - après les bâtiments, l'industrie et les transports - se concentrent sur les machines en tant que telles et sur leurs caractéristiques acoustiques.

Concevoir des machines peu bruyantes en intégrant cet objectif dès le stade de la conception - ce mot d'ordre déboucha sur l'élaboration de réglementations et de directives grâce auxquelles un ingénieur même non spécialisé en acoustique pouvait connaître et respecter certaines règles de bases lui permettant d'éviter tout bruit superflu de la machine et de résoudre de manière optimale le conflit d'intérêts qui existe parfois entre un niveau de performance maximal et un niveau d'émission sonore minimal.

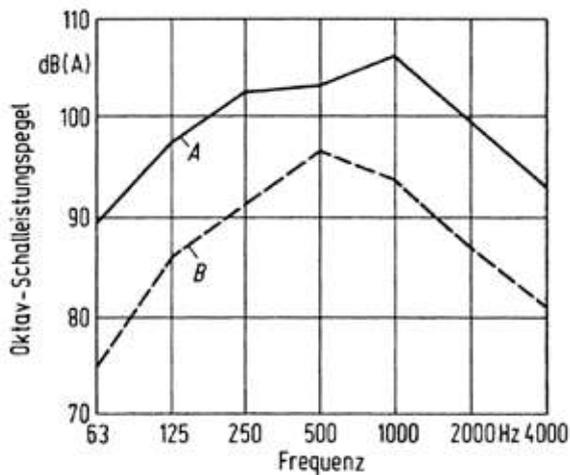


Fig. 11 : Constructions peu bruyantes : spectres des octaves de puissance acoustique de deux ventilateurs hélicoïdaux de tours de refroidissement sous conditions d'utilisation identiques [31]

Traduction de la figure 11	
Octav-Schalleistungspegel..	Octave de puissance acoustique en dB(A)
Frequenz..	Fréquence en Hz

A l'instar des autres secteurs, celui de l'outillage et de la machinerie fut progressivement encadré par des exigences et directives claires qui permirent à la construction de machines à faible niveau de bruit de décoller. Outre l'obligation de marquage, de nombreuses spécifications réglementèrent les utilisations dans le contexte des grandes installations. L'actualisation des directives, des valeurs de référence et des procédures métrologiques, leur standardisation à l'échelle européenne et parfois internationale et l'élargissement aux caractéristiques acoustiques de l'obligation de marquage ont porté leurs fruits et le niveau sonore des machines joue désormais un rôle important dans leur compétitivité. Ceci vaut à la fois pour les milieux industriels et professionnels, où la législation sur la protection au travail et le respect de l'environnement se traduisent par des exigences acoustiques précises, et pour la vie privée des particuliers avec par exemple la directive communautaire Outdoor qui prévoit des valeurs limites standard pour un certain nombre d'équipements utilisés en plein air et une obligation de marquage pour tous.

Pourtant, on ne peut pas dire que l'univers des machines soit devenu plus silencieux, ni dans les milieux industriels ni dans la vie privée. En effet, la popularisation des machines fait que le parc a considérablement augmenté, ce qui relativise l'atténuation ponctuelle de leur niveau de bruit.

### Le bruit, sa perception et ses effets

Traiter les nuisances sonores suppose que l'on sache évaluer le bruit et ses conséquences du point de vue du système auditif. Les premiers efforts entrepris pour y parvenir en tenant compte de la perception de l'oreille ne datent pas d'aujourd'hui et un premier succès vient les couronner en 1926 avec la création du phône.

Du fait des comparaisons subjectives avec sa propre courbe d'audition, l'utilisateur d'un appareil d'audiométrie subjective tel qu'inventé à l'époque disposait d'une courbe d'évaluation correspondant à sa perception sonore. Bien entendu, ce type de mesures subjectives et dépourvues de toute reproductibilité objective ne pouvait correspondre qu'à une étape et on ne tarda pas à mettre au point trois courbes d'évaluation correspondant à trois niveaux de bruit – faible, moyen et fort – clairement exprimés en phones DIN.

Le fait que de faibles écarts d'intensité sonore aient pourtant provoqué des écarts importants dans le résultat des mesures - cette situation ayant nécessité le recours à une autre méthode d'évaluation, et le fait que les paramètres psycho-acoustiques élaborés par Eberhard Zwicker et plus particulièrement la bruyance aient permis de mieux justifier la notion d'intensité sonore ont entraîné la définition de trois courbes d'évaluation indépendantes caractérisées par les unités d'intensité acoustique dB (A), dB (B) et dB (C).

Même si l'on n'est toujours pas parvenu à établir une corrélation parfaite entre les grandeurs utilisées dans les normes et directives et les paramètres psycho-acoustiques, ces derniers revêtent une importance croissante dans la réduction technique des nuisances sonores. En effet, les études et les spécifications acoustiques présentent leurs résultats sous forme de niveaux et courbes correspondant à des évaluations mais elles n'en recourent pas moins fréquemment à des déductions et motivations fondées sur la perception sonore.

Ces dernières années, la planification et l'évaluation des installations sources de bruit ont commencé à prendre en considération – outre la caractérisation acoustique objective et subjective – un certain nombre de réflexions relatives aux retombées du bruit. L'analyse détaillée des nuisances sonores telles que perçues par les personnes exposées au bruit a toujours été une démarche utile et productive lorsqu'il s'agissait de réduire le niveau sonore de grandes installations industrielles comportant de multiples sources de bruit tout en évitant les dépenses inutiles. L'Association des industries chimiques a montré de façon exemplaire que l'on pouvait recourir à des analyses de ce type aussi judicieuses que poussées. On constate ainsi dans l'enquête *Rendre lisibles les doléances en matière de bruit* effectuée par ses soins en 1977 que la majeure partie des doléances formulées, soit 88 %, porte sur des bruits riches en fréquences acoustiques (40 %) et en impulsions (48 %) et contenant des informations tandis que 12 % seulement des doléances sont suscitées par des bruits ne contenant pas d'informations, autrement dit des bruits à large bande, par exemple.

Dans le contexte de l'installation considérée, les paramètres des doléances peuvent ensuite être complétés par la prise en compte d'autres paramètres non-acoustiques tels que la nature, l'occasion et la fréquence des doléances, le lieu et le moment de la gêne ou encore les conditions de propagation (météorologie) et d'exploitation, autant d'informations dont on peut tirer des conclusions directes sur l'efficacité et même l'adéquation des solutions à engager. Grâce à l'établissement de statistiques

minutieuses, les solutions de protection acoustique envisagées peuvent alors être étayées par une double analyse : une analyse énergétique fondée sur la puissance acoustique (bilan des sources et de leur contribution au niveau de bruit global) et une analyse de la gêne fondée sur les doléances des personnes exposées au bruit (bilan des sources et de la part qui leur revient dans le niveau de gêne global exprimé par les doléances). Cette démarche était et reste d'autant plus judicieuse qu'une partie importante des doléances se rapporte à des bruits riches en fréquences et en impulsions et qui s'avèrent difficiles à évaluer de manière simple et objective – un problème qui n'a pas encore trouvé de solution satisfaisante à ce jour.

Il est intéressant de constater que les études de ce type - avec cahier de doléances et prise en considération des effets du bruit pour évaluer une situation de nuisance donnée – ont retrouvé une nouvelle actualité ces dernières années. Effectivement, ces études d'impact peuvent contribuer dans une large mesure à l'évaluation d'une situation, surtout lorsque les directives existantes ne trouvent pas à s'appliquer ou que leur adéquation est sérieusement remise en cause parce que les sources d'émissions sont trop variées – présence de différents modes de transport par exemple – ou que le niveau de bruit constant est très élevé – dans le cas des aéroports. C'est la raison pour laquelle, depuis 1980 environ, les procédures de planification leur font une place de plus en plus grande dans les cas de ce genre.

La recherche sur les effets du bruit a déjà permis d'enrichir un certain nombre de connaissances. On peut corréler les données caractéristiques d'une situation de nuisance sonore (étude physico-acoustique) avec les acquis de cette recherche pour évaluer concrètement les effets de la nuisance considérée sur les personnes qui y sont exposées (étude médico-acoustique). Il existe aujourd'hui trois modes de description des réactions présentées par les humains et les animaux dans les études d'impact acoustiques effectuées en laboratoire ou in situ. Pour saisir les effets du bruit, on peut considérer les réactions physiologiques (système végétatif) telles que l'accélération du pouls [35], ou les réactions psychologiques (agression ou troubles de la communication) [36] ou encore les réactions psychophysiologiques [37]. Étant donné que « *la distinction entre les aspects médicaux, psychologiques et sociaux ne correspond pas au niveau actuel des connaissances de la recherche moderne sur l'impact des nuisances* » [38], on peut prévoir que les études d'impact du bruit se concentreront à l'avenir sur le volet des réactions psychophysiologiques.

Pour une présentation plus détaillée des connaissances et tendances actuelles de la recherche sur l'impact du bruit, nous renvoyons nos lecteurs au numéro actuel de la revue sur la lutte antibruit *Zeitschrift für Lärmbekämpfung* [39].

### **Autres secteurs concernés par les techniques de protection acoustique**

Nous avons malheureusement dû laisser de côté dans cet article de nombreux développements qui auraient mérité d'être présentés parce qu'ils ont joué un rôle primordial dans l'évolution de la lutte contre le bruit. Il s'agit de démarches et de méthodes ou encore d'exemples historiques qui ont

compté mais aussi de véritables secteurs ou disciplines techniques sans lesquels les réussites que nous avons retracées n'auraient pas été envisageables. Citons ici à titre d'exemple :

- La protection contre les risques sonores au travail, qui s'est appuyée sur les progrès de l'acoustique des salles et de l'acoustique des machines pour optimiser la conception des halls de production et des bureaux et diminuer les nuisances sonores des postes de travail. Elle a également préconisé des mesures de protection acoustique secondaires et su exploiter les possibilités techniques et les valeurs limites ou de référence en vigueur pour contribuer à la diminution des maladies professionnelles dues aux méfaits du bruit.

- Le développement de méthodes de mesure, qui recourt désormais à des systèmes de calcul informatique complexes pour évaluer le produit des mesures multicanaux (mesures d'intensité, analyses modales, analyses des sources avec mesures orientées ou holographie acoustique en champ proche, mesure de bruits de passage véritables ou simulés).

- La métrologie acoustique, qui a profité depuis 1945 de l'explosion des performances des composants électroniques et des solutions logicielles (analyseurs FFT, p. ex.) et a rendu possibles des mesures fondamentales – du premier sonomètre objectif à batterie (Rohde et Schwarz, 1949, [40]) à l'analyse à bande étroite en passant par l'analyseur de fréquences.

- L'acoustique numérique, qui fait siens les progrès des systèmes informatiques et qui a réalisé certains rêves (pas tous encore!) des acousticiens (FEM, BEM et SEA).

- La réduction active du bruit, qui n'a sans doute pas su tenir toutes les promesses formulées dans certains moments d'euphorie mais qui n'en constitue pas moins un instrument efficace de lutte antibruit dans de nombreux cas particuliers.

Toutes ces disciplines et leurs intervenants ont contribué à ramener notre environnement acoustique à *une discrétion de bon ton*.

### **Conclusion**

L'histoire de la lutte antibruit est si riche et les documents qui retracent l'évolution de ses techniques si nombreux que l'auteur a dû faire un choix dont il reconnaît la subjectivité et les limites. Le laps de temps qui lui était imparti exigeait de relater les aspects essentiels de la lutte antibruit et de ses techniques en recourant à des textes et ouvrages facilement accessibles.

Peut-être la rétrospective présentée ici aura-t-elle contribué à effacer les distances entre la lutte antibruit actuelle et les premières démarches dont elle est issue et à attiser la curiosité. L'ingénierie acoustique appliquée à la lutte antibruit mériterait en effet qu'on lui accorde une attention plus complète et systématique et que l'on replace ses différentes étapes dans leur contexte historique. Ce souci d'exactitude et d'exhaustivité serait une bonne façon de lui rendre hommage et elle ne pourrait que profiter d'un travail critique poussé et minutieux qui lui permettrait de mieux évaluer ses forces et ses faiblesses.

## Références bibliographiques

- [1] W. Zeller, Technische Lärmabwehr. Alfred Kröner Verlag, Stuttgart, 1950.
- [2] C. M. Harris, Handbook of Noise Control. McGraw-Hill, New York, 1957.
- [3] 50 Jahre DAL – ein Rückblick auf die Lärmbekämpfung in Deutschland. Série de contributions publiées dans le Lärm-Report, Ausgabe 1 bis 4, 2002, édité par Deutsche Arbeitsring für Lärmbekämpfung DAL, Bundesvereinigung gegen Fluglärm GfV et Bundesvereinigung gegen Schienenlärm, Düsseldorf, 2002.
- [4] Pioneers of Acoustics: Lord Rayleigh 1842-1919: Acoustics Bulletin, Vol.27, No.3, pp. 30-33, 2002.
- [5] Lord Rayleigh, The Theory of Sound. Vol.1 (1894) and Vol.2 (1896), réédité par Dover Publications, New York, 1945.
- [6] M. Heidelberger, H. v. Helmholtz (1821-1894), in Die großen Physiker, hrsg. Von Karl von Meyenn, Verlag C.H.Beck, München.
- [7] H. v. Helmholtz, Die Lehre von den Tonempfindungen. Braunschweig, 1913, réédité par Georg Olms Verlag, Hildesheim, 2000.
- [8] R. T. Beyer, Sounds of our Times – Two Hundred Years of Acoustics. Springer-Verlag, New York, 1999.
- [9] K. Saul, Kein Zeitalter seit Erschaffung der Welt hat so viel und so ungeheuerlichen Lärm gemacht... – Lärmquellen, Lärmbekämpfung und Antilärmbewegung im Deutschen Kaiserreich. in: Umweltgeschichte – Methoden, Themen, Potentiale. Tagung des Hamburger Arbeitskreises für Umweltgeschichte, Waxmann-Verlag, Münster, 1994.
- [10] A. Schopenhauer, Über Lärm und Geräusch. in: Parerga und Paralipomena – Kleine philosophische Schriften. 2. Band, Kap. 30, 1851.
- [11] T. Lessing, Der Lärm – eine Kampfschrift gegen die Geräusche unseres Lebens. Grenzfragen des Nerven- und Seelenlebens, Bd.54, Wiesbaden, 1908.
- [12] Berlin, Symphonie der Großstadt, film de Walter Ruttmann (1927) et Berlin, Symphonie einer Großstadt, film de Thomas Schadt (2002).
- [13] R. Berger, Über die Schalldurchlässigkeit. Dissertation, München, 1910.
- [14] H. Barkhausen, Ein neuer Schallmesser für die Praxis. VDI-Zeitschrift, S.1471ff, 1926.
- [15] W. Piening, Schalldämpfung der Ansaug- und Auspuffgeräusche von Dieselanlagen auf Schiffen. Zeitschrift des VDI, Band 81, S.770-776, 1937.
- [16] L. Cremer, Theorie der Schalldämmung dünner Wände bei schrägem Einfall. Akustische Zeitschrift, Band 7, S.81-104, 1942.
- [17] L. Cremer, A. Eisenberg, Verbesserung der Schalldämmung dünner Wände durch Verringerung ihrer Biegesteifigkeit. Bauplanung und Bautechnik, Band 2, S.235-238, 1948.
- [18] F. Michel, Lärm- und Resonanzschwingungen im Kraftwerksbetrieb. VDI-Verlag, 1932.
- [19] E. Lübcke, Schallabwehr im Bau- und Maschinenwesen. 1940.
- [20] H. Schmidt, Technischer Schallschutz in Betrieb und Umwelt. Fortschritte der Akustik – DAGA 1976, Heidelberg, S.147-161, VDI-Verlag, 1976.
- [21] Technik, Ingenieure und Gesellschaft: Geschichte des Vereins Deutscher Ingenieure 1856-1981: VDI-Verlag, Düsseldorf, 1981.
- [22] 25 Jahre VDI-Kommission Lärminderung, VDI-Bericht 798, VDI-Verlag, Düsseldorf, 1990.
- [23] W. Schirmer (Éditeur), Lärmbekämpfung – Maßnahmen an Maschinen und in Produktionsstätten zum Schutz des Menschen vor Lärm und Schwingungen. Verlag Tribüne Berlin, de la 1<sup>ère</sup> édition 1971 à la dernière édition 1989.
- [24] L. Cremer, Propagation of Structure-Borne Sound Sponsored Research Report No.1 (Germany Series B) for the Department of Scientific and Industrial Research, London, 1949.
- [25] L. Cremer, M. Heckl, Körperschall. Springer-Verlag, 1967.
- [26] K. Gösele et al., Schall – Wärme – Feuchtigkeit. Bauverlag, Wiesbaden, de la 1<sup>ère</sup> édition 1965 à la dernière édition 2000.
- [27] W. Fasold, E. Sonntag, H. Winkler: Bauphysikalische Entwurfslehre, Bau- und Raumakustik. VEB Verlag für Bauwesen Berlin, 1972/1976 und 1987.
- [28] Messungen des Schalltechnischen Laboratoriums Lothar Cremer für die Stadt München anlässlich der Planung von Heizkraftwerken in Wohngebieten, München, 1954 env.
- [29] L. Cremer, H.A.Müller, Schalltechnische Maßnahmen beim Bau der Heizkraftwerke. Energie, Band 11, Heft 7, S.3311-313, 1959.
- [30] Stand der Technik bei der Lärminderung in der Petrochemie: Müller-BBM Forschungsbericht 79-105-03-302 für den Bundesminister des Innern, 1979.
- [31] M. Heckl, H. A. Müller, Taschenbuch der Technischen Akustik. Springer-Verlag, Berlin, 1.Auflage 1975, 2. Auflage 1994.
- [32] M. Möser, Die Wirkung von zylindrischen Aufsätzen an Schallschirmen. Acustica, Band 81, S.565-586, 1995.
- [33] T. Beckenbauer et al., Einfluss der Fahrbahntextur auf das Reifen-Fahrbahn-Geräusch: Forschungsbericht aus dem Forschungsprogramm des Bundesministeriums für Verkehr, Bau- und Wohnungswesen und der Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen e.V., Bonn, août 2002.
- [34] Fluglärm – seine Messung und Bewertung, seine Berücksichtigung bei der Siedlungsplanung, Maßnahmen zu seine Minderung Gutachten für den Bundesminister für Gesundheitswesen, Göttingen, 1965.
- [35] G. Jansen et al., Lärm, Handbuch der Umweltmedizin, édité par Wichmann, Schlipkötter, Fülgraf, Ecomed Verlag, Band 3 VII-1; S. 1 – 22, 1996.
- [36] R. Guski, Expertise zu einigen Auswirkungen des Fluglärms auf die Wohnbevölkerung im Zusammenhang mit dem Planfeststellungsverfahren zum Ausbau des Vorfeldes II Hamburg-Fuhlsbüttel. Im Auftrag der Gemeinden Norderstedt, Quickborn und Hasloh, 1997.
- [37] C.Maschke et al.: Lärmmedizinisches Gutachten für den Flughafen Hamburg Vorfeld II. Technische Universität Berlin, 1996
- [38] B.Griefahn et al.: Fluglärmkriterien für ein Schutzkonzept bei wesentlichen Änderungen oder Neuanlagen von Flughäfen/Flugplätzen. Zeitschrift für Lärmbekämpfung 49, Nr. 5, 171-175.
- [39] R. Guski: Status, Tendenzen und Desiderate der Lärmwirkungsforschung zu Beginn des 21. Jahrhunderts. Zeitschrift für Lärmbekämpfung, Band 49, Heft 6, 2002.
- [40] W. Holle, Ein neuer Schallpegelzeiger. Funk und Ton, Heft 7, S.367ff, 1949.
- [41] E. Sälzer: Kommentar zur DIN 4109 – Schallschutz im Hochbau. Bauverlag, Wiesbaden, 1995.
- [42] E. de Graaff, Geluid van wegvoertuigen 1974-1999 – emissiekentallen, typekeuringsresultaten en techniek (Geräusche von Straßenfahrzeugen 1974-1999 – Emissionskennzahlen, Typprüfungsergebnisse und Technik). Rijksinstituut voor Volksgezondheid en Milieuhygiene, Niederlande, Kolloquium, Juni 2000.