Évaluations physique et subjective de l'influence de paramètres structuraux pour une plaque rayonnante

C. Marquis-Favre,
J. Faure,
F. Sgard,
LASH/DGCB URA CNRS 1652,
ENTPE,
rue M. Audin,
69518 Vaulx-en-Velin,
France,
Tél. : 33 4 72 04 72 66,
Fax : 33 4 72 04 70 41,
e-mail : cathy.marquis@entpe.fr,
faure_j@entpe.fr,
Franck.sgard@entpe.fr

Pendant plusieurs décennies, l'objectif des ingénieurs en acoustique a été d'améliorer le comportement vibroacoustique des structures en réduisant le niveau acoustique global grâce à la compréhension et à la maîtrise des phénomènes physiques. Depuis ces dernières années, la compréhension des phénomènes physiques s'est accompagnée de l'étude de la perception et des attentes de l'homme. Cette nouvelle démarche a conduit à des améliorations notables pour de nombreux produits dans différents domaines industriels. Les travaux présentés dans cet article ont pour but d'appréhender le comportement vibroacoustique des structures en couplant les aspects quantitatifs et qualitatifs des sons rayonnés ou transmis par les structures. Dans cette perspective, une attention particulière est portée à l'influence de différents paramètres structuraux, non seulement sur les indicateurs vibroacoustiques classiques tels que le facteur de rayonnement acoustique ou l'indice d'affaiblissement acoustique, mais aussi sur les jugements de similarité et de préférence donnés par les auditeurs. Ce travail présente des exemples de paramètres structuraux, en particulier le cas d'un paramètre mécanique induisant des effets non négligeables sur la perception sonore alors que dans les mêmes conditions d'étude les effets sur les indicateurs vibroacoustiques usuels sont insignifiants.

For several decades, the main concern for improving the vibroacoustic behavior of vibrating structures was to reduce the overall sound level. Within the last few years, the understanding of physical phenomena has been gone along with taking into account human perception and expectations. This has led to achieve noticeable improvements in sound quality of products in different industries. The presented work couples together qualitative and quantitative aspects of sounds radiated or transmitted by structures. This task is carried out with a particular attention to the influence of various structural parameters, not only on vibroacoustic indicators such as the radiation efficiency or the sound transmission loss, but also on similarity and comparative judgments of listeners. This paper gives examples of some structural parameters which have an effect on human sound perception even if they have weak consequences on vibroacoustic indicators.

L'ingénierie en acoustique a longtemps été basée sur l'étude des phénomènes physiques dans le but de réduire les niveaux de bruit des sources. Pour certains produits, il est aujourd'hui soit utopique de pouvoir continuer à diminuer le niveau sonore, soit nécessaire de maintenir un certain niveau acoustique pour des raisons de sécurité, de contrôle, de diagnostic, etc. Depuis quelques années, la psychophysique est de plus en plus couplée aux études physiques des sources sonores afin de prendre en compte les aspects qualitatifs des sons émis. Ainsi, de nombreux constructeurs, aussi bien d'appareils électroménagers que d'automobiles, cherchent désormais non seulement à réduire le bruit de leur produit mais aussi à lui conférer une signature propre, susceptible d'être associée à l'image que véhicule le produit et susceptible de répondre aux attentes du client [1-4]. L'étude subjective des sons permet en effet de cerner les composantes agréables ou désagréables, de définir l'image qu'attend le consommateur du produit et ainsi de mieux cibler sa bien-sonnance [5]. De plus en plus d'industriels ont bien compris cette nouvelle nécessité et intègrent aujourd'hui dans leurs études les aspects qualitatifs des bruits émis par leurs produits.

Nos travaux consistent à étudier les liens possibles entre les aspects quantitatifs et qualitatifs des bruits rayonnés ou transmis par les structures. Une étude menée pour une structure simple, une plaque en acier [6-8], nous a permis de souligner l'influence prépondérante de certains paramètres structuraux sur la perception sonore, alors qu'une analyse physique ne nous permettait pas de décider du rôle prépondérant de ces paramètres pour les configurations étudiées. Cette étude préliminaire a donc montré la nécessité de travailler à la définition des paramètres structuraux influant sur la perception des bruits en rayonnement et en transmission acoustiques des structures. En effet, l'influence des paramètres structuraux sur le comportement vibroacoustique des structures en rayonnement et en transmission a été étudiée en détail pour des structures simples (voir par exemple [9] et [10]). Par contre, leur influence sur la perception sonore est moins connue ; les principaux travaux menés dans ce domaine traitent essentiellement de l'identification de sons pour des instruments de percussion différant par leur géométrie, leur matériau ou leurs configurations d'excitation [11-14]. Une autre étude a été menée sur les dissemblances entre sons synthétisés pour des barres de section variable, et ce en faisant varier simultanément deux paramètres mécaniques, la masse volumique et l'amortissement, montrant la sensibilité des auditeurs aux dimensions mécaniques [15]. Une dernière étude sur le sujet a été réalisée pour deux paramètres

mécaniques, l'amortissement et le module d'Young d'une plaque en acier et a également confirmé la sensibilité des personnes à ces dimensions [16]. Citons enfin, les travaux de Meunier et al. [17] mettant en évidence la corrélation entre l'agrément et certains attributs psychoacoustiques tels la sonie pour des sons harmoniques issus de la synthèse du rayonnement d'une plaque pour différentes variations temporelles et spaciales de l'accélération imposée à la surface.

Nos travaux, menés pour des variations de différents paramètres structuraux (i.e. paramètres mécaniques, géométriques et conditions aux limites), couplent l'analyse vibroacoustique et l'analyse des jugements de dissemblance et de dominance selon la préférence pour des sons synthétisés transmis par une plaque en acier en faisant varier indépendamment les paramètres. À terme, l'objectif est :

- d'identifier les paramètres devant être définis ou non avec exactitude en entrée des outils de calcul vibroacoustique pour une meilleure maîtrise du degré de précision et une prise en compte des contraintes presceptives dans les calculs prédictifs, voire même dans les modèles prédictifs selon les paramètres étudiés,
- d'orienter le choix de matériaux spécifiques au stade de la conception en connaissant l'influence de leurs caractéristiques mécaniques sur le comportement physique de la structure et également sur la perception sonore qu'en ont les personnes.

Dans ce papier, il sera présenté l'influence de deux paramètres, l'un mécanique, l'amortissement, et l'autre géométrique, l'épaisseur de la plaque. Le chapitre 2 expose la méthode suivie pour la génération des stimuli et pour la mise en place du protocole expérimental. Enfin, le chapitre 3 présente les résultats relatifs à l'analyse des indicateurs vibroacoustiques et à l'analyse du test perceptif. Le couplage de ces deux analyses permet alors d'évaluer l'influence de la variation des paramètres structuraux sur la perception sonore et la précision à accorder aux valeurs affectées à ces paramètres.

Méthode

Pour étudier l'influence des paramètres structuraux sur la perception sonore, la méthode comporte deux étapes. Tout d'abord, la réponse vibroacoustique de la plaque est calculée à partir du modèle physique et exprimée en terme d'indicateurs acoustiques locaux et globaux pour des variations des paramètres structuraux étudiés. Les sons constituant les stimuli du test de perception sont ensuite synthétisés à partir des spectres de pression acoustique calculés. Enfin, la deuxième étape consiste à soumettre les sons synthétisés à un jury d'auditeurs afin de recueillir des jugements de similarité et de dominance selon la préférence.

Génération de stimuli

La plaque en acier considérée est une plaque homogène, isotrope, rectangulaire, bafflée et simplement appuyée sur tous ses bords. Elle est en flexion pure, excitée par une onde plane en incidence normale. Le spectre d'excitation est un bruit blanc. La plaque rayonne en champ semi-infini. Les réponses vibratoires et acoustiques sont calculées de 0,5 Hz à 5 kHz avec un pas de 0,5 Hz. Les déplacements à la surface de la structure sont développés dans la base des modes propres in vacuo de la plaque [9]. Le modèle retenu pour prendre en compte l'amortissement du matériau est le modèle d'amortissement structural. La réponse acoustique locale de la plaque bafflée est calculée à l'aide de la formule de Rayleigh en deux points correspondants à la position des oreilles d'un homme qui aurait été placé à 0.7 mètre en face de la plaque dans le champ semi-infini. D'autres indicateurs vibroacoustiques sont calculés tels que la puissance acoustique rayonnée, la vitesse vibratoire quadratique, le facteur de rayonnement acoustique, la transparence acoustique et l'indice d'affaiblissement acoustique.

Une plaque dite de référence est considérée avec les caractéristiques mécaniques et géométriques suivantes :

Module d'Young : $E=2*10^{11}$ N/m^2	Longueur : a=0,6 m
Masse volumique : $\rho=7870$ kg/m^3	Largeur : b=0,4 m
Coefficient de Poisson : $\nu=0,32$	Epaisseur : $h=1,5x10^{-3}$ m
Facteur de perte par amortissement structural : $\eta=7*10^{-3}$	

L'étude consiste à affecter en entrée du code de calcul différentes valeurs à un paramètre donné, les autres paramètres étant inchangés et égaux aux valeurs fixées pour la plaque dite de référence.

Dans les exemples donnés dans ce papier, il sera présenté l'influence de l'amortissement structural et de l'épaisseur de la plaque. Les variations considérées pour ces deux paramètres sont données dans le tableau 1.

Facteur de perte par amortissement structural	**Épaisseur de la plaque**
$1*10^{-3}$	$1*10^{-3}$ m
$3*10^{-3}$	$1,3*10^{-3}$ m
$5*10^{-3}$	$1,5*10^{-3}$ m
$7*10^{-3}$	$2*10^{-3}$ m
$1*10^{-2}$	$3*10^{-3}$ m

Tabl. 1 : Variations considérées pour les deux paramètres étudiés

À partir des spectres de pression acoustique simulés, les sons sont synthétisés par transformation de Fourier inverse avec une fréquence d'échantillonnage de 44,1 kHz et une qualité de 16 bits. Les stimuli ont une durée de 4 secondes. Le tableau 2 donne pour chaque série de stimuli le nombre de sons et la moyenne des niveaux de pression acoustique aux points de réception gauche et droit.

Série de 5 stimuli pour les variations d'amortissement structural	**Série de 5 stimuli pour les variations d'épaisseur**
$\eta= 1*10^{-3}$: Lp = 93,2 dB (A)	$\eta = 1*10^{-3}$ m : Lp = 94,4 dB (A)
$\eta= 3*10^{-3}$: Lp = 91,6 dB (A)	$\eta = 1,3*10^{-3}$ m : Lp = 92,2 dB (A)
$\eta= 5*10^{-3}$: Lp = 91,2 dB (A)	$\eta = 1,5*10^{-3}$ m : Lp = 91 dB (A)
$\eta= 7*10^{-3}$: Lp = 91 dB (A)	$\eta = 2*10^{-3}$ m : Lp = 88,8 dB (A)
$\eta= 1*10^{-2}$: Lp = 90,9 dB (A)	$\eta = 3*10^{-3}$ m : Lp = 85,8 dB (A)

Tabl. 2 : Séries de stimuli présentées aux auditeurs

Test de perception

Le test a été effectué en chambre semi-anéchoïque, et les sons restitués à l'aide d'un casque Sennheiser HD600 et d'une carte son. Le jury d'auditeurs était constitué de 15 sujets, 8 hommes et 7 femmes, âgés de 23 à 35 ans. Les stimuli leur ont été présentés en utilisant la méthode de comparaison par paires. Les sujets ont été entraînés pour 3 paires de stimuli représentatifs afin de les familiariser avec le type de son, le test et la dynamique de l'échelle de réponse utilisée. Pour chaque série de stimuli, les sons leur ont été présentés par paires et avec un ordre d'apparition aléatoire. Le nombre total de paires de stimuli était de 20. Le test consistait à donner un jugement de similarité entre les sons sur une échelle numérique en 7 points allant de très différents à très semblables. Le jugement de dominance selon la préférence était exprimé par une réponse dichotomique. Les auditeurs étaient face à une interface graphique d'un ordinateur permettant la saisie de leurs réponses et l'écoute des stimuli d'une même paire autant de fois qu'ils le désiraient.
Les jugements de similarité ont ensuite été traités par analyse factorielle des tableaux de dissemblance obtenus [18], permettant ainsi l'appréciation des distances perçues entre stimuli et la description des dimensions perceptives des sons étudiés. Les jugements de dominance selon la préférence ont été traduits grâce à la loi du jugement comparatif [19-20] en une échelle unidimensionnelle du niveau d'intervalles.

Analyses et résultats

L'amortissement structural

Pour l'acier, l'amortissement structural est considéré constant sur tout le domaine fréquentiel. En entrée de codes de calcul, le facteur de perte par amortissement structural correspond pour l'acier à une constante comprise entre 10^{-2} et 10^{-3}, généralement fixée à $7*10^{-3}$, $5*10^{-3}$ ou encore à $3*10^{-3}$. L'influence de l'amortissement structural sur le comportement vibroacoustique est acquise (voir par exemple [10]) : l'amplitude des vitesses vibratoires et des pressions acoustiques est modifiée aux fréquences propres de la structure. La figure 1 présente le spectre de pression acoustique calculé au point de réception gauche, de coordonnées (0,3; 0,2; 0,7) d'un système orthonormé pour une origine du repère placée en un coin de la plaque baffléé. Il est à noter qu'une structure peu amortie comporte des amplitudes de pression beaucoup plus accentuées en moyennes et hautes fréquences qu'en basses fréquences. La variation de la valeur de l'amortissement est en effet plus notable pour les moyennes et hautes fréquences.

D'un point de vue énergétique, la variation du facteur de perte par amortissement structural ne modifie pas les niveaux de puissances acoustiques rayonnée et transmise en basses fréquences (cf. fig. 2). Les différences déjà mentionnées dans le cas de la pression acoustique sont visibles sur le spectre de puissance en hautes fréquences.

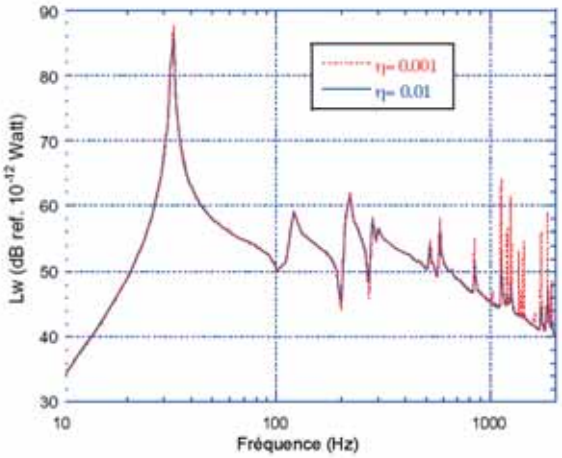

Fig. 2. : Niveau de puissance acoustique rayonnée par la plaque baffléé

La différence des effets de l'amortissement entre les basses et les plus hautes fréquences se retrouve naturellement sur les graphes du facteur de rayonnement et d'indice d'affaiblissement acoustiques (cf. fig. 3 et 4). Mais cette différence reste négligeable. Il a été montré que l'amortissement n'a pas d'effet sur le facteur de rayonnement acoustique [10] et a un effet primordial sur l'indice d'affaiblissement acoustique au voisinage de la fréquence de coïncidence et au-delà pour une excitation par onde plane en incidence oblique [9]. Mais

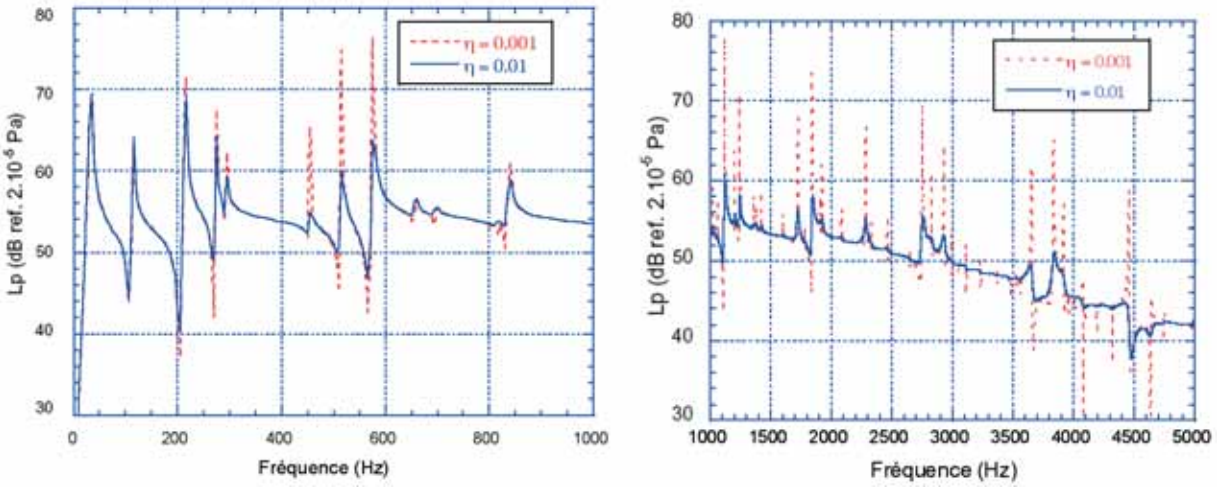

Fig. 1. : Effet du facteur de perte par amortissement structural sur le spectre de pression acoustique présenté entre 0 et 1000 Hz (gauche) et entre 1000 et 5000 Hz (droite)

dans le cas d'une excitation acoustique en incidence normale et pour le matériau considéré, l'amortissement structural a peu d'effet sur l'indice d'affaiblissement acoustique.

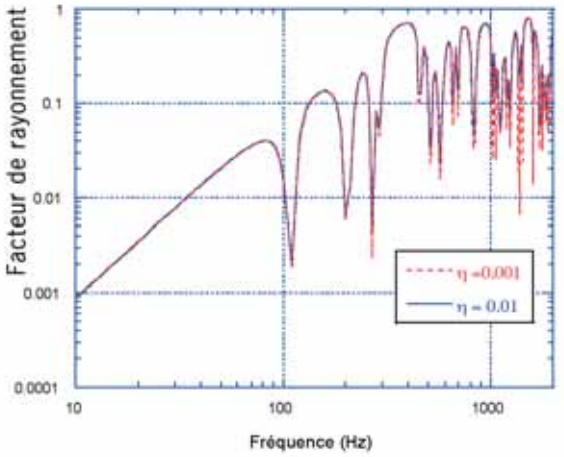

Fig. 3. : Effet du facteur de perte par amortissement structural sur le facteur de rayonnement acoustique

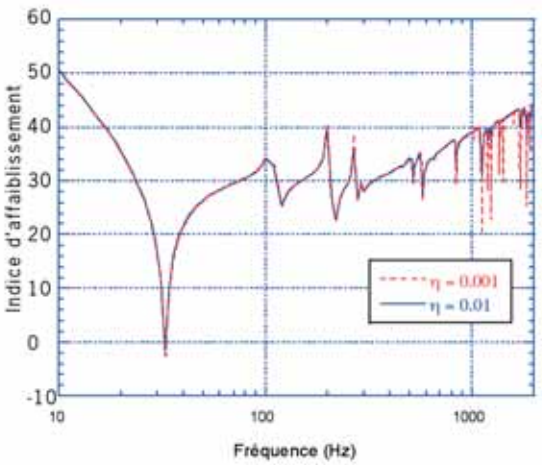

Fig. 4. : Effet du facteur de perte par amortissement structural sur l'indice d'affaiblissement acoustique en onde plane normale

L'analyse des jugements de similarité a conduit à une représentation de l'espace perceptif en une dimension. Cette dernière est fortement corrélée à la sonie de Zwicker (coefficient de corrélation r = 0,99 ; p < 0,0012 – cf. fig. 5). Ce résultat s'explique par la nature de l'influence de l'amortissement sur les indicateurs acoustiques locaux. L'étude des distances perçues montre des distances très marquées entre les stimuli correspondant aux faibles valeurs d'amortissement. La précision accordée à l'amortissement pour des plaques en acier faiblement amorties est donc importante vis-à-vis de la perception sonore. L'analyse des jugements de préférence (fig. 6) montre que les auditeurs préfèrent les sons rayonnés par la structure la plus amortie ; les jugements de préférence ainsi traduits sur l'échelle thurstonienne sont fortement corrélés avec la sonie de Zwicker (r =-0,97 ; p < 0,0048). Comme dans le cas des distances perçues, il apparaît à la tendance donnée par la courbe de la figure 6, présentant la préférence en fonction de l'amortissement, qu'une plus grande précision du paramètre doit être considérée aux faibles valeurs de l'amortissement.

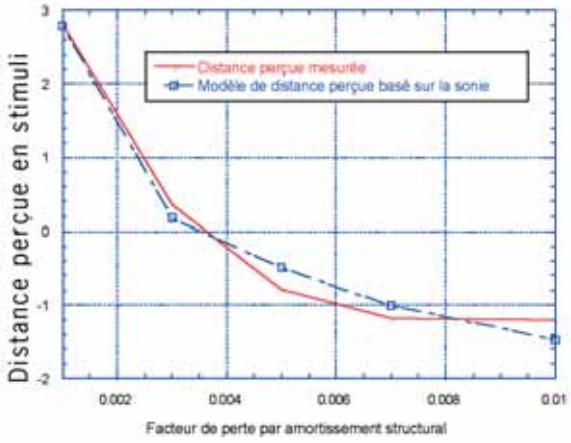

Fig.5. : Distances perçues en fonction du facteur de perte par amortissement structural

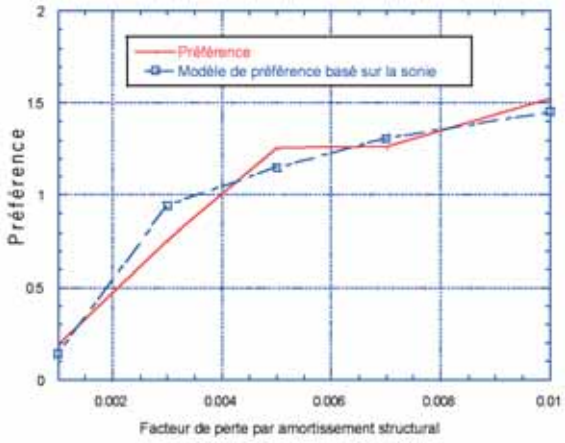

Fig. 6. : Préférence en fonction du facteur de perte par amortissement structural

Ces résultats montrent donc l'importance de la précision de l'amortissement, et ce pour les faibles valeurs de l'amortissement, que ce soit en entrée des codes de calcul ou dans le choix du type d'acier pour des structures minces qui a priori n'ont pas, du fait de leur cahier des charges, à être fortement amorties. Dans le cas étudié, leur amortissement n'a pas d'influence sur les indicateurs vibroacoustiques globaux tels que l'indice d'affaiblissement acoustique pour une incidence normale ou le facteur de rayonnement acoustique caractérisant respectivement leurs propriétés en transmission et en rayonnement acoustiques. Compte tenu de l'effet de ce paramètre sur les indicateurs locaux, la valeur de l'amortissement influe fortement sur la perception du son émis par la structure mince et sur le jugement de préférence des sujets soumis à ces bruits.

L'épaisseur

L'épaisseur d'une plaque intervient dans la rigidité de flexion D de la plaque et dans l'expression des fréquences propres non amorties f_{mn} :

$$D = \frac{Eh^3}{12(1-\nu^2)}$$

avec h l'épaisseur de la plaque en flexion pure, E le module d'Young et ν le coefficient de Poisson.

$$f_{mn} = \frac{1}{2\pi}\left(\frac{D}{\rho\, h}\right)^{1/2}\left[\left(\frac{m\pi}{a}\right)^2 + \left(\frac{n\pi}{b}\right)^2\right]$$

avec (m,n) l'ordre du mode de flexion, a, b et ρ variables définies au chapitre 2 - Méthode.

La rigidité de flexion intervient dans l'équation de mouvement de la plaque. Ses variations influent donc sur les réponses vibratoires et acoustiques de la plaque. Les fréquences propres jouent un rôle prépondérant puisqu'elles correspondent à une forte réponse vibratoire de la structure. Elles constituent un des éléments déterminants lors d'un fort rayonnement ou d'une transmission maximale de l'énergie acoustique par la structure.
Les paramètres comme le module d'Young, le coefficient de Poisson et la masse volumique varient généralement d'un acier à l'autre. Puisqu'ils interviennent dans la rigidité de flexion et l'expression des fréquences propres, ces paramètres peuvent donc avoir une influence sur la perception sonore. Cette influence a été étudiée pour certains d'entre eux tels que la masse volumique [6] et le module d'Young [7].

L'influence de l'épaisseur d'une plaque sur son comportement vibroacoustique est acquise (voir [10]). L'augmentation de ce paramètre géométrique entraîne un décalage des fréquences propres vers le haut du spectre avec :
- une diminution globale des niveaux de pression acoustique (cf. figure 7 - spectre de pression acoustique calculé au point de réception gauche, point de coordonnées (0,3; 0,2; 0,7)),

- une diminution globale des niveaux de puissances acoustiques rayonnée et transmise (cf. figure 8),
une augmentation globale du facteur de rayonnement acoustique (cf. figure 9),

- et une augmentation globale de l'indice d'affaiblissement acoustique (cf. figure 10).

Pour les variations d'épaisseur considérées, les changements induits sur l'indice d'affaiblissement acoustique global de la plaque mince entraînent une différence maximale de 4 dB.

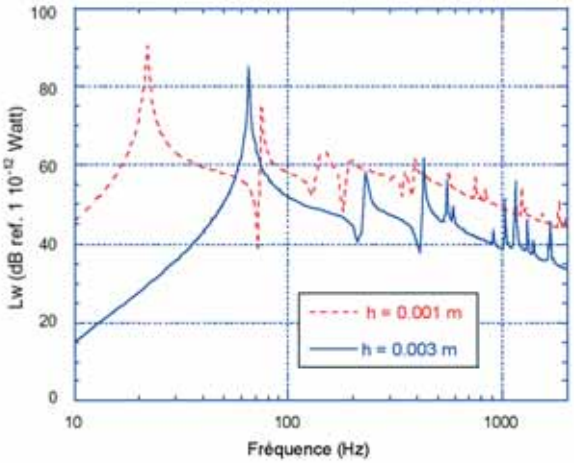

Fig. 8. : Niveau de puissance acoustique rayonnée par la plaque baffléé

L'analyse des jugements de similarité conduit à une représentation unidimensionnelle de l'espace perceptif. D'après l'analyse physique, la différence entre deux stimuli obtenus suite à une variation de l'épaisseur est due simultanément à la variation du niveau de pression acoustique et au décalage des émergences fréquentielles. La dimension perceptive mise en évidence est corrélée à la combinaison linéaire de deux indicateurs ($r = 0{,}953$; $p < 0{,}091$) ; ces deux indicateurs sont la sonie de Zwicker associée aux variations de niveau de pression acoustique et la déviation des fréquences propres associée au décalage des émergences fréquentielles. Ce dernier indicateur a été présenté en référence [7] dans le cas de l'étude de l'influence des variations du module d'Young sur la perception sonore pour des bruits rayonnés par la plaque en acier.

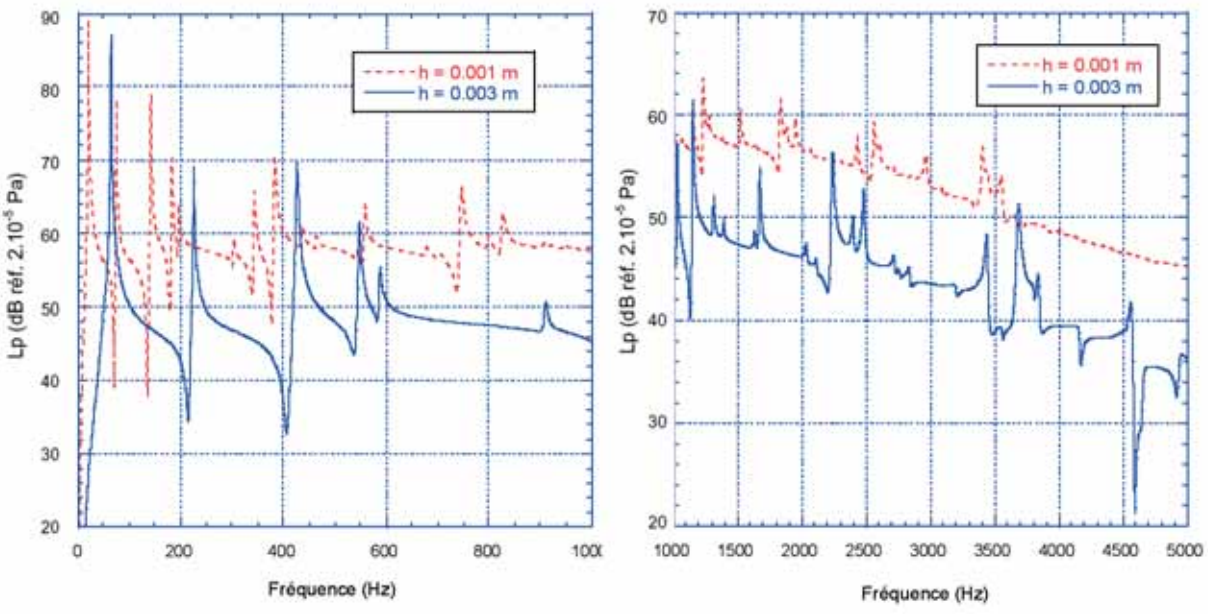

Fig. 7. : Effet de l'épaisseur sur le spectre de pression acoustique présenté entre 0 et 1000 Hz (a) et entre 1000 et 5000 Hz (b)

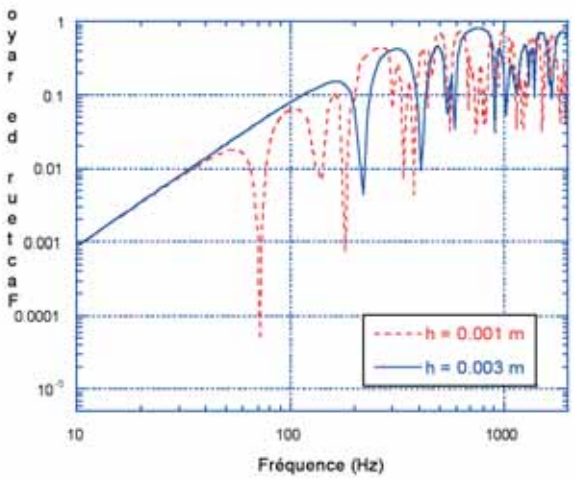

Fig. 9. : Effet de l'épaisseur sur le facteur de rayonnement acoustique

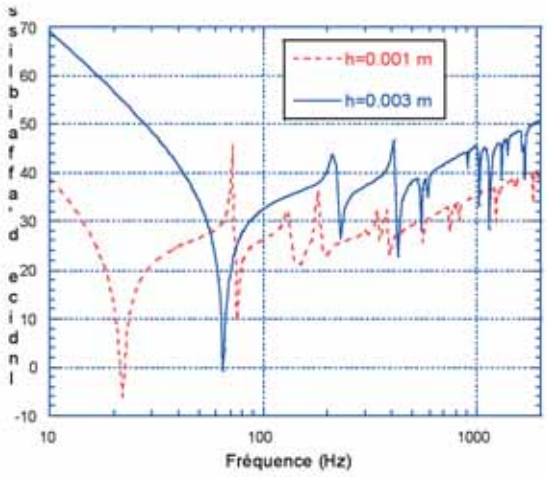

Fig. 10. : Effet de l'épaisseur sur l'indice d'affaiblissement acoustique en onde plane normale

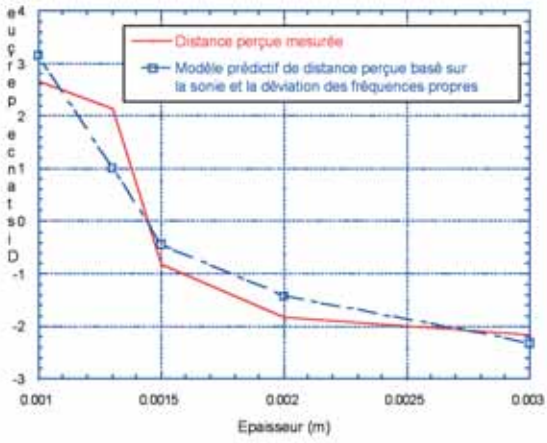

Fig. 11. : Distances perçues en fonction de l'épaisseur

La préférence est également corrélée à la combinaison linéaire de la sonie et de la déviation des fréquences propres ($r = 0.9975$; $p < 0.0051$). La représentation des distances perçues en fonction des valeurs d'épaisseur montre des distances entre stimuli très marquées aux faibles valeurs du paramètre géométrique (cf. figure 11). La même remarque est faite pour les jugements de préférence traduits sur l'échelle thurstonienne et représentés en fonction des valeurs de l'épaisseur (cf. figure 12).

L'étude de l'influence de l'épaisseur sur la perception sonore montre donc l'importance de la précision des valeurs de l'épaisseur en entrée des codes vibroacoustiques et lors de la conception de structures planes minces.

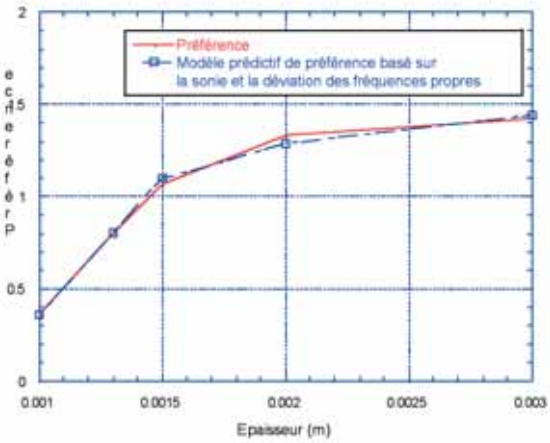

Fig. 12. : Préférence en fonction de l'épaisseur

D'autres tests perceptifs menés ultérieurement pour de plus grandes variations de l'épaisseur [21] renforcent ces tendances obtenues pour les distances perçues et la préférence exprimées en fonction de l'épaisseur de la plaque.

Conclusions

Ce papier a présenté une démarche couplant l'analyse physique du comportement vibroacoustique d'une structure et l'analyse des tests perceptifs pour les bruits rayonnés par cette dernière. Pour une structure simple, une plaque en appui insérée dans un baffle plan infini en champ libre, les premiers résultats obtenus sont encourageants. Ils ont pu donner une tendance de l'influence des paramètres structuraux sur la perception sonore.
Ils permettent de définir la précision de certains paramètres en entrée d'outils prédictifs en vibroacoustique. L'objectif est de déterminer les paramètres des modèles prédictifs et des codes de calcul nécessitant d'être connus ou non avec précision, et d'optimiser ainsi le travail de modélisation et de calcul par un allégement ou un renforcement de la précision de ce travail selon les paramètres considérés.
Ces résultats permettent également d'affiner le choix de matériau spécifique au stade de la conception. Après respect des indicateurs vibroacoustiques usuels imposés par la réglementation, ce choix pourra être ensuite conduit en connaissant l'influence des paramètres structuraux sur la perception sonore. Le comportement acoustique du produit en sera qualitativement amélioré.

Ainsi dans ce papier, il a été montré l'influence de l'amortissement structural d'une plaque en acier sur la perception sonore, et ce pour une configuration d'excitation pour laquelle l'influence de ce paramètre mécanique est négligeable sur l'indicateur vibroacoustique qui prévaut pour caractériser les performances acoustiques de la structure. Ce résultat ouvre donc des perspectives d'amélioration des propriétés acoustiques pour une structure en acier, plane et mince, en rayonnement et en transmission acoustiques, utilisée dans différents domaines industriels (transports, bâtiment, etc.), en choisissant un acier avec un amortissement plus élevé, et ce même dans le cas où le cahier des charges mécaniques et vibratoires n'imposerait pas nécessairement un tel choix. L'étude de l'influence de l'amortissement structural sur la perception sonore a montré également l'importance de la précision de ce paramètre pour des plaques en acier faiblement amorties.
L'analyse des jugements de préférence pour des sons transmis par une plaque mince lorsque différentes valeurs d'épaisseur sont considérées, donne une tendance en adéquation avec les préconisations issues de l'analyse physique en terme d'amélioration des performances acoustiques d'une structure en transmission acoustique. L'influence de la précision de l'épaisseur sur la perception sonore a également été soulignée, alors que cette précision a peu de conséquences sur les indicateurs vibroacoustiques usuels.

Ce papier est basé sur une communication présentée au Premier Forum Européen Matériaux et Dispositifs Insonorisants dans la Conception Vibroacoustique des Machines et Véhicules (Cetim, Senlis, juillet 2001).

Références bibliographiques

[1] Blauert J. et Jekosch U. (1997), Sound quality evaluation – A multi-layered problem , Acta Acustica, 83(5), 747-753.

[2] Urso P. (1997), Mesurer les sensations pour concevoir des produits attrayants , Technologies Internationales, 31, 36-39.

[3] Keiper W. (1997), Sound quality evaluation in the product cycle , Acta Acustica, 83(5), 784-788.

[4] Bisping R. (1997), Car interior Sound quality: experimental analysis by synthesis , Acta Acustica, 83(5), 813-818.

[5] Canévet G. (1996), La psychoacoustique. Aspects fondamentaux et exemples d'applications , Acoustiques et techniques, 5, 7-14.

[6] Marquis-Favre C. et Faure J. (2000), Relationships between quantitative and qualitative aspects of sounds: Case of acoustic radiation from a plate , Proceedings of CAA, Sherbrooke, Canada.

[7] Marquis-Favre C., Faure J. et Sgard F. (2001), Coupling of quantitative and qualitative studies for the understanding of mechanical parameter variations influence: application to a radiating plate , Proceedings of Euronoise, Patras, Greece.

[8] Faure J., Marquis-Favre C. et Viollon S. (2001), Qualitative evaluation of sounds radiated from a steel plate: influence of mechanical and geometrical parameters , Proceedings of Euronoise, Patras, Greece.

[9] Lesueur C. (1988), Rayonnement acoustique des structures, vibroacoustique, interaction fluide-structure, Eyrolles, Paris.

[10] Berry A. (1991), Vibrations et rayonnement acoustique de structures planes complexes immergées dans un fluide léger ou dans un fluide lourd, PhD, Université de Sherbrooke, Canada.

[11] Lutfi R. et Oh E. (1997), Auditory discrimination of material changes in a struck-clamped bar , Journal of Acoustical Society of America, 102(6), pp.3647-3656.

[12] Lakatos S., McAdams S. et Caussé R. (1997), The representation of auditory source characteristics: simple geometric form , Perception and Psychophysics, 59, 1180-1190.

[13] Carello C., Anderson K.A. et Kunkler-Peck A.J. (1998), Perception of object length by sound , Psychological Science, 9, 211-214.

[14] Houix O., McAdams S. et Caussé R. (2000), Structures vibrantes et catégorisation auditive , Proceedings of the 5th CFA, XXI, Lausanne, Suisse.

[15] Roussarie V., McAdams S. et Chaigne A. (1998), Perceptual analysis of vibrating bars synthesized with a physical model , Proceedings of the 16th International Congress on Acoustics, Seattle, U.S.A., 2227-2228.

[16] Dupont T. (1999), Evaluation subjective du bruit, Rapport de DEA, I.N.S.A.

[17] Meunier S., Habault D. et Canévet G. (2001), Auditory evaluation of sound signals radiated by a vibrating surface , Journal of Sound and Vibration, 247(5), 897-915.

[18] Saporta G. (1990), Probabilité analyse des données et statistique, Editions : Technip, Paris.

[19] Thurstone L.L. (1927), Method of paired comparisons for social values , Journal of Abnormal and Social Psychology, 21, 384-400.

[20] Thurstone L.L. (1927), A law of comparative judgment , Psychological Review, 34, 273-286.

[21] Faure J. et Marquis-Favre C. (2001), Sounds transmitted through a steel plate: perceptual judgments analysis , Proceedings of the 17th International Congress on Acoustics, Rome, Italy.