

Synthèse de Thèse

Résumé

Le développement de structures légères constitue une tendance importante dans divers secteurs de l'ingénierie, tels que l'aérospatiale et le génie mécanique. Le compromis important entre poids et rigidité entraîne souvent des problèmes de bruit et de vibrations qui doivent être résolus. Les structures légères sont confrontées à des inconvénients en termes d'émissions sonores sur une large gamme de fréquences, ce qui nécessite des efforts d'optimisation. Les panneaux sandwich composites représentent des structures légères typiques et sont largement utilisés dans divers secteurs industriels. Ces panneaux sont constitués de fines feuilles de face et d'un noyau, offrant un large éventail de choix en termes de matériaux et de configurations architecturales.

Des recherches récentes ont démontré que les propriétés vibroacoustiques des panneaux sandwich peuvent être optimisées et améliorées en manipulant leur architecture géométrique ainsi que leurs propriétés mécaniques. Plusieurs idées ont été explorées pour valider l'impact de la conception géométrique sur les indicateurs vibroacoustiques. Il est à noter que cette étape d'optimisation considère uniquement les caractéristiques vibroacoustiques et ne prend pas en compte la perception auditive, c'est-à-dire les caractéristiques psychoacoustiques.

Certaines recherches ont exploré les liens entre les paramètres physiques des structures rayonnantes, en particulier les plaques isotropes, et les propriétés auditives des sons rayonnés ou transmis qui en résultent. Ces études se sont concentrées sur l'évaluation des effets des paramètres physiques sur la perception auditive, notamment les paramètres structurels, les conditions d'excitation, les incertitudes structurelles et les paramètres de simulation utilisés dans les calculs vibroacoustiques pour la modélisation des structures. Les résultats ont été précieux en fournissant des recommandations pour améliorer la qualité des sons émis ou transmis par ces structures simples dès leur phase de conception.

Cette thèse se concentre à la fois sur l'analyse psychoacoustique et vibro-

oustique d'une structure sandwich, visant à optimiser la conception d'une telle structure tout en considérant sa qualité sonore. Plus précisément, elle aborde les problématiques suivantes : revoir les modèles de modélisation vibro-acoustique des panneaux composites, réaliser des mesures en laboratoire pour évaluer les modèles théoriques d'un point de vue physique, proposer une méthode de mise à jour hybride pour enrichir les modèles nécessaires à une modélisation vibro-acoustique précise des panneaux composites, évaluation auditive de la simulation vibroacoustique à l'aide d'enregistrements des sons émis par la structure, détermination des paramètres structuraux pertinents d'un point de vue perceptif et optimisation de la qualité sonore des structures sandwich grâce à des simulations vibroacoustiques de différentes conceptions. Pour atteindre ces objectifs, cette recherche intègre des analyses théoriques, des simulations, des mesures vibroacoustiques en laboratoire en considérant à la fois les excitations mécanique et acoustique des structures composites et enfin des tests psychoacoustiques et leurs analyses.

Chapitre 1 - Introduction et état de l'art

Dans ce chapitre, on discute d'abord de la motivation de ces travaux de recherche. Ensuite, la revue de la littérature se concentre sur l'état actuel de l'art en ce qui concerne les études vibroacoustiques des structures sandwich composites et les études psychoacoustiques menées pour des structures vibroacoustiques.

La motivation de cette recherche découle des applications et de l'utilisation de structures composites. Au cours des dernières années, une tendance rapide et de plus en plus prédominante s'est dégagée dans l'utilisation de matériaux composites dans diverses industries, notamment l'aéronautique, les études spatiales et les transports. Cette forte attraction pour les matériaux composites peut s'expliquer par leurs propriétés exceptionnelles, telles qu'un poids plus léger, une résistance et une rigidité acceptables, une stabilité améliorée, une résistance à la corrosion, une isolation sonore pour un environnement de fonctionnement plus silencieux et une flexibilité de conception pour des projets complexes. En conséquence, de nombreuses études de pointe ont émergé dans la littérature au cours des dernières années, visant à étudier le comportement dynamique des structures composites, telles que les panneaux sandwich, et à améliorer leurs propriétés mécaniques.

Chapitre 2 - Définition du problème

Dans ce chapitre, la vibration des panneaux composites est investiguée analytiquement. À cette fin, les équations aux dérivées partielles gouvernantes (EDP), appelées problèmes d'ordre 6 et 4, capables de modéliser le comportement vibratoire de différents panneaux composites, sont discutées en détail. Ces problèmes serviront de base pour les simulations et la modélisation mathématique dans la thèse actuelle. La vibration des panneaux composites est un domaine complexe qui nécessite l'application de diverses théories et concepts de la mécanique des structures, de la science des matériaux et de l'analyse des vibrations. La théorie fondamentale qui régit le comportement des panneaux composites découle de la théorie de l'élasticité. Les matériaux composites présentent un comportement différent des panneaux isotropes en raison de leurs structures complexes, telles que la variété de matériaux et de couches utilisés dans les panneaux composites, les dispositions et les arrangements géométriques des couches, ainsi que les orientations des fibres de renforcement dans la matrice de chaque couche. Par exemple, l'orientation affecte les matrices de rigidité et de compliance, qui décrivent comment le stress et la déformation varient dans différentes directions.

La théorie des laminés peut être utile pour étudier les caractéristiques mécaniques des panneaux composites, nécessaires pour l'analyse des vibrations des panneaux composites. La théorie des laminés prend en compte les couches individuelles ou les lames, et les propriétés de rigidité de chaque lame, telles que le module d'Young et le coefficient de Poisson, jouent un rôle crucial dans la prédiction du comportement global du panneau. La théorie des laminés permet d'effectuer des évaluations analytiques des contraintes et des déformations sur diverses structures laminées soumises à des charges mécaniques ou acoustiques. Elle permet l'analyse de laminés avec n'importe quel nombre de couches, des épaisseurs de couches diverses et différents types de matériaux. La théorie classique des laminés permet de calculer les contraintes et les déformations au sein des couches individuelles, de déterminer les propriétés globales du laminé et d'évaluer la déformation totale subie par le laminé.

D'autre part, la théorie classique des plaques est souvent utilisée pour modéliser la déformation des panneaux composites sous des charges de flexion. La théorie classique des plaques, également appelée théorie de Kirchhoff-Love des plaques, sert de cadre utile pour représenter de manière simplifiée une plaque tridimensionnelle sous forme de plaque bidimensionnelle. Cette théorie repose sur l'hypothèse fondamentale selon laquelle l'épaisseur de la plaque reste constante pendant toute déformation. Cette théorie fournit des équations différentielles qui décrivent com-

ment les déplacements et les rotations du plan médian du panneau changent par rapport aux coordonnées à l'intérieur du panneau.

De plus, les fréquences naturelles et les déformées modales décrivent comment un panneau ou une poutre composites vibre lorsqu'il est soumis à des charges externes et à diverses conditions aux limites. L'analyse modale implique la résolution de problèmes de valeurs propres pour déterminer les fréquences naturelles du panneau et les déformées modales correspondantes.

Ainsi, en tenant compte de la théorie des laminés, de la théorie des plaques et de l'analyse modale des panneaux composites, lorsque ces structures composites rencontrent des forces mécaniques ou acoustiques externes ou des excitations, l'analyse des vibrations forcées peut être utilisée pour déterminer comment le panneau réagit. Cette analyse consiste à résoudre les équations dynamiques du mouvement tout en tenant compte des effets d'amortissement, des charges externes et des conditions aux limites. Ces dernières années, d'un point de vue vibroacoustique, plusieurs études ont été menées pour examiner et étudier les panneaux composites, leur comportement vibroacoustique lorsqu'ils sont soumis à divers types de charges, ainsi que les équations de mouvement correspondantes qui les régissent. Entre-temps, les études théoriques menées dans ces domaines peuvent être résumées en deux problèmes : les problèmes d'ordre 6 et 4, que nous discuterons dans les sections suivantes.

Chapitre 3 - Modélisation avec excitation acoustique diffuse

Dans ce chapitre, on aborde les étapes mathématiques/numériques et expérimentales nécessaires à la modélisation vibro-acoustique de plaques composites et isotropes excitées par un champ acoustique diffus (CAD). Ici, la modélisation analytique a été réalisée en utilisant des problèmes du 4e et 6e ordres adaptés aux plaques composites et isotropes. De plus, la modélisation numérique a été effectuée grâce à la méthode des éléments finis (MEF). Les observations expérimentales ont également été réalisées au moyen d'une cabine d'essai acoustique utilisée pour générer idéalement un champ acoustique diffus. Les différents types de simulations analytiques et numériques, y compris les sons synthétisés nécessaires aux futures analyses psycho-acoustiques, ainsi que les observations expérimentales, y compris les sons enregistrés, ont été étudiés et comparés.

Avant de réaliser des expériences en laboratoire, il était nécessaire d'effectuer certaines expériences numériques afin de nous assurer de la validité de la modélisation

analytique et des simulations, ainsi que de satisfaire certaines exigences numériques du problème. Ici, une méthode des éléments finis a été utilisée comme outil numérique pour révalider les procédures de la stratégie proposée, et les exigences numériques ont été satisfaites grâce à certaines comparaisons numériques.

Dans ce contexte, nous avons certains objectifs pour la réalisation des expériences en laboratoire. Nos objectifs étaient les suivants : 1) vérifier expérimentalement la modélisation mathématique et numérique ainsi que les simulations, 2) étudier expérimentalement la possibilité d'excitation par CAD dans la modélisation mathématique du champ de vibration et de pression nécessaire aux évaluations vibro/psycho-acoustiques proposées, et 3) enregistrer le son émis par la plaque dans le but de valider perceptivement les sons synthétisés obtenus pour une telle excitation.

La stratégie proposée commence par les analyses mathématiques liées à l'excitation des panneaux, puis il est essentiel d'adopter un modèle analytique approprié pour prédire les vibrations comme étape suivante. Une autre étape consiste à calculer le champ de pression provoqué par le son émis par la plaque vibrante. À cette fin, ce chapitre présente certaines expériences numériques et certaines exigences de calcul, puis il nous fournit des résultats expérimentaux et leur comparaison avec la modélisation mathématique et les simulations. Enfin, l'étude se termine par la synthèse de sons, qui seront utilisés pour les évaluations psychoacoustiques nécessaires à la conception de panneaux composites. Ces sons synthétisés ont été utilisés pour certaines épreuves psychoacoustiques visant à évaluer de manière perceptible les modèles et les simulations. Ce test psychoacoustique est décrit en détail dans le chapitre 6.

Chapitre 4 - Modélisation avec excitation mécanique

Similaire au chapitre précédent, ce chapitre se concentre sur plusieurs expériences en laboratoire et approfondit la modélisation des vibrations pour les panneaux composites. La différence majeure réside dans le fait que nous les soumettons à une excitation mécanique plutôt qu'à une excitation acoustique. Cette recherche englobe à la fois des connaissances théoriques et des expérimentations pratiques. Pour ce faire, nous avons réalisé toute une série d'expériences en laboratoire, en utilisant la vélocimétrie laser Doppler et des mesures de niveau de pression acoustique. Ces mesures ont été effectuées sur deux types de panneaux : des panneaux composites épais (sandwich avec un noyau en nid d'abeille Nomex) et des panneaux composites minces (stratifié CFRP).

De plus, nous avons inclus deux plaques isotropes en acier et en aluminium

dans nos expériences pour renforcer le processus de validation. Les résultats de ces expériences ont servi de base essentielle pour nos prochaines phases de thèse visant à développer des modèles vibroacoustiques précis qui abordent les préoccupations psychoacoustiques et font l'objet d'une validation perceptive approfondie. Il était donc essentiel de mettre à jour et d'améliorer les modèles existants pour les panneaux vibrants. Par conséquent, le prochain chapitre sera consacré au processus critique de mise à jour des modèles et des paramètres, garantissant une modélisation vibroacoustique et des simulations plus précises.

Chapitre 5 - Mise à jour des modèles et paramètres

Dans ce chapitre, l'étude avait pour objectif de développer une approche de mise à jour hybride adaptée aux problèmes du 4ème et 6ème ordres, nécessaires pour la modélisation vibroacoustique de panneaux composites. Cette approche repose sur les fonctions hiérarchiques pour formuler analytiquement les problèmes, la technique IWC¹ pour l'identification initiale des paramètres, et les optimisations des moindres carrés, y compris la méthode de Baruch et des moindres carrés totaux, pour la mise à jour des modèles et des paramètres. L'approche utilise la méthode IWC, en employant les relations de dispersion du 4ème et 6ème ordres pour l'identification des paramètres. Elle suit le processus de mise à jour du modèle via la méthode de Baruch, qui est alimentée avec les paramètres identifiés par la méthode IWC. Les fonctions hiérarchiques fournissent aux modèles des formulations analytiques facilitant la méthode de Baruch, et les solutions fournies par la méthode de Baruch sont utilisées pour finaliser le processus de mise à jour des paramètres via la méthode des moindres carrés totaux. En fait, dans l'approche hybride proposée, les méthodes sont employées étape par étape, en utilisant leurs capacités respectives à chaque étape pour se compléter mutuellement.

Ici, l'idée principale de la recherche a été examinée par des expériences en laboratoire, notamment des mesures de vibrométrie laser Doppler (LDV) et l'enregistrement des pressions acoustiques. Les enregistrements sonores serviront pour la constitution de stimuli utilisés dans la validation perceptive du modèle de synthèse vibroacoustique présentée en chapitre 6. Les mesures ont été effectuées sur certains panneaux, y compris un panneau sandwich composite, un panneau composite stratifié, ainsi que deux plaques isotropes pour des évaluations supplémentaires. L'efficacité de la méthode a été atteinte grâce à la mise en œuvre progressive des capacités éprouvées des méthodes susmentionnées, où la mise en œuvre progressive a facilité l'évaluation

¹Inhomogeneous wave correlation technique

contrôlée des paramètres et évité les procédures longues et fastidieuses d'essai et d'erreur. Elle a été examinée par différentes comparaisons vibroacoustiques entre les mesures et les simulations utilisant des paramètres mis à jour. Les mesures LDV ont montré la capacité de l'approche à améliorer les simulations pour la modélisation du champ de vibration. De plus, la comparaison des spectres de niveau de pressions acoustiques SPL mesurées a permis de valider expérimentalement l'exactitude des vibrations simulées. Cette capacité de la méthode de mise à jour dans la modélisation précise des SPL peut également être bénéfique pour la modélisation vibroacoustique requise dans les évaluations psychoacoustiques futures, ce qui est l'un des objectifs futurs de cette recherche.

De plus, l'amélioration du Critère d'Assurance Modale (MAC) peut également être mentionnée comme l'une des réalisations numériques. La méthode proposée a considérablement amélioré le MAC croisé entre les modes calculés et mesurés. En conséquence, l'étude a réussi à obtenir un haut niveau d'accord parmi toutes les données collectées, qui comprenaient des mesures vibroacoustiques en laboratoire, des simulations mathématiques améliorées par des procédures de mise à jour, et des informations préliminaires sur les paramètres mécaniques. Cette cohérence constitue une preuve des capacités de l'approche hybride proposée pour la mise à jour des modèles et des paramètres, en particulier pour résoudre les problèmes du 4^{ème} et 6^{ème} ordres, avec un accent spécifique sur les panneaux composites minces et épais. Ces résultats sont prometteurs pour la réalisation de simulations précises nécessaires à la conception intégrée vibroacoustique et psychoacoustique de panneaux composites pour la suite de la thèse.

Chapitre 6 - Évaluation auditive

Ce chapitre nous a fourni les processus psychoacoustiques nécessaires pour obtenir une modélisation précise des panneaux vibrants d'un point de vue perceptif. Le test psychoacoustique a été effectué avec 40 participants, âgés de 18 à 63 ans. Les modélisations et simulations ont été confirmées par des analyses psychoacoustiques, mettant en évidence l'utilité potentielle de prendre en compte à la fois les perspectives vibroacoustiques et psychoacoustiques pour la conception de panneaux composites. Le test psychoacoustique a été réalisé en trois sessions, chaque session ayant un objectif spécifique. En se basant sur les expériences vibroacoustiques de laboratoire effectuées précédemment, l'approche de comparaison par paires a été utilisée pour évaluer la dissimilarité des stimuli simulés et les stimuli issus des enregistrements sonores menés lors des expériences vibroacoustiques, décrites aux

chapitres 3 et 4 pour les excitations acoustique et mécanique, respectivement.. Une interface basée sur MATLAB a été développée à cette fin et utilisée pour effectuer l'évaluation de la dissimilarité des stimuli appariés. Après le test, le regroupement et les dendrogrammes résultants ont été utilisés pour étudier s'il y avait consensus au sein des réponses données par les participants. Ensuite, l'approche d'échelonnement multidimensionnelle INDSCAL a été utilisée pour établir l'espace perceptif de la dissimilarité et rendre compte des distances perçues entre les stimuli. Les résultats ont indiqué que les stimuli simulés étaient proches des stimuli enregistrés, et ces résultats ont été confirmés par les tests statistiques et les intervalles de confiance obtenus par les analyses de bootstrap. De plus, dans ce chapitre, nous avons cherché à étudier et explorer la relation entre les dimensions de l'espace perceptif et les attributs auditifs influençant la perception et les jugements des participants.

Ainsi, la relation entre les indices psychoacoustiques et les dimensions perceptives a été étudiée. Ces analyses ont mis en évidence des corrélations entre l'une des dimensions perceptives et la sonie de Zwicker lors de la session mécanique. De plus, les autres dimensions perceptives ont montré des corrélations avec l'acuité et le centre de gravité spectral (CGS) lors de la même session, ainsi que lors de la session acoustique. De plus, l'autre dimension perceptives de la session acoustique a montré une corrélation avec la tonalité. De plus, l'analyse nous a donné un aperçu de la manière dont les indices psychoacoustiques sont interconnectés avec à la fois les dimensions perceptives et les propriétés mécaniques des panneaux étudiés. À cette fin, l'analyse de corrélation statistique entre les dimensions de l'espace perceptuel et les propriétés mécaniques équivalentes des panneaux a été examinée. De plus, nous avons exploré la relation logique entre les indices psychoacoustiques et les aspects mécaniques. En outre, les sujets abordés dans ce chapitre portaient sur les évaluations de la validité perceptive des modèles mathématiques et des simulations discutées dans les chapitres précédents, qui seront finalement utilisées dans le prochain chapitre pour l'étude de conception de panneaux composites.

Chapitre 7 - Conception et optimisation

Ce chapitre se concentre principalement sur la conception et l'optimisation de panneaux composites vibrants du point de vue perceptif. Pour commencer, nous avons développé des conceptions spécifiques de panneaux composites, en nous appuyant sur le modèle affiné et mis à jour au chapitre 5. Par la suite, une expérience psychoacoustique a été menée sur ces conceptions. Ce test psychoacoustique a impliqué 40 participants âgés de 19 à 63 ans.

En tenant compte de test psychoacoustique, des analyses correspondantes ont été entreprises pour concevoir des stimuli. À cette fin, nous avons utilisé les modèles mis à jour et créé 10 conceptions différentes de panneaux composites vibrants. Nous avons examiné attentivement les paramètres géométriques et mécaniques des panneaux composites vibrants, y compris le module de cisaillement du noyau, en tirant des enseignements de précédentes études similaires. Ces paramètres ont été soigneusement agencés et planifiés pour créer les stimuli synthétisés.

Les stimuli correspondant à chaque conception ont été simulés à l'aide du modèle mis à jour et de la méthode d'intégration de Rayleigh. Deux sessions distinctes d'expérience psychoacoustique ont été menées : l'une basée sur une excitation mécanique et l'autre basée sur une excitation acoustique. Après avoir recueillies les données de similarité et de préférence auprès du panel des participants, nous avons prétraité les données à l'aide de la méthode CAH pour détecter et éliminer les valeurs aberrantes.

Ensuite, nous avons appliqué la méthode INDSCAL, la technique d'échelonnement multidimensionnelle (EMD), pour construire l'espace perceptif associé aux deux sessions. Avant de construire ces espaces perceptifs, nous avons utilisé la méthode de la courbe en L pour déterminer le nombre optimal de dimensions nécessaires. Une fois les espaces perceptifs créés, nous avons calculé les scores de préférence pour chaque session et analysé leur corrélation avec les dimensions de l'espace perceptif.

Avant d'aborder les analyses psychoacoustiques, nous avons discuté des sensations auditives suscitées par les stimuli. Les analyses psychoacoustiques ont ensuite été menées sur la base des indices psychoacoustiques obtenus à partir du logiciel dBsonic. Ces analyses ont éclairé la manière dont les indices psychoacoustiques se rapportent aux dimensions perceptives et leur lien avec les scores de préférence.

Il est à noter que tous les résultats psychoacoustiques ont souligné que la sonie avait l'effet le plus significatif sur la préférence dans les deux sessions. Pour remédier à cela, nous avons développé un modèle linéaire pour prédire la préférence en fonction de la sonie. De plus, nous avons exploré les corrélations entre les paramètres mécaniques et l'espace perceptif ainsi que les scores de préférence. Nos résultats ont révélé que le rapport rigidité-masse et les facteurs de perte par amortissement étaient les paramètres mécaniques les plus influents du point de vue de la perception parmi tous les paramètres considérés. De plus, nous avons introduit deux modèles de régression qui relient la préférence observée dans les deux sessions à ces paramètres mécaniques. De plus, une analyse visant à trouver la meilleure conception optimale a été présentée.

Chapitre 8 - Conclusion générale

Ce chapitre offre un aperçu d'une thèse qui explore le comportement vibroacoustique de panneaux composites sous diverses excitations, le développement de modèles mathématiques, la mise en œuvre d'une méthode hybride de mise à jour et des évaluations psychoacoustiques. Les points clés de ce chapitre sont les suivants :

Analyse du Modèle Mathématique :

- La thèse analyse de manière approfondie le comportement vibratoire de panneaux composites à l'aide de modèles mathématiques.
- Elle se concentre sur les formulations de problèmes du 4e et du 6e ordres avec des hypothèses spécifiques (Kirchhoff-Love pour le 4e ordre et Mead pour le 6e ordre) et leur applicabilité à différents types de panneaux.
- Ces formulations de problèmes sont la base de la simulation et de la modélisation du comportement vibroacoustique de divers panneaux, qui sont ensuite testés lors d'expériences en laboratoire sous des excitations acoustiques et mécaniques.
- Les problèmes du 4e et du 6e ordre jouent également un rôle crucial dans le développement d'une méthode de mise à jour hybride pour une modélisation précise des panneaux composites.

Modélisation Vibroacoustique :

- La thèse établit un cadre pour la modélisation du comportement vibratoire et acoustique des panneaux sous des charges acoustiques et mécaniques.
- Le processus de modélisation implique des analyses stochastiques pour les panneaux excités par un champ acoustique diffus (DAF) et des expériences en laboratoire.
- Le processus de modélisation comprend des analyses modales pour les panneaux excités par une charge mécanique et des expériences en laboratoire.
- Les panneaux sont testés sous des excitations acoustiques et mécaniques pour valider les modèles développés sur la base des formulations de problèmes du 4e et du 6e ordres.

Méthode de Mise à Jour Hybride :

- Une nouvelle approche de mise à jour hybride est développée pour améliorer les modèles créés à partir des problèmes du 4e et du 6e ordres.
- La méthode combine la formulation analytique du problème, la technique IWC pour l'estimation des paramètres et l'optimisation par moindres carrés.
- Des expériences en laboratoire valident l'efficacité de l'approche de mise à jour hybride pour traiter les problèmes du 4e et du 6e ordres et améliorer la précision des modèles vibroacoustiques.

Évaluation Psychoacoustique :

- Des évaluations auditives sont réalisées pour évaluer les modèles et les sons synthétisés d'un idem point de vue perceptif auditif.
- L'expérience psychoacoustique comprend différentes sessions, chacune axée sur l'évaluation de simulations avec une excitation mécanique et acoustique, ainsi que sur la détermination de la fréquence de simulation optimale.
- Des techniques telles que CAH et EMD sont utilisées pour construire l'espace perceptif et évaluer les distances perçues entre les stimuli simulés et enregistrés dans cet espace.

Conception de Panneaux Composites :

- La phase finale de la thèse se concentre sur la conception et l'optimisation de panneaux composites en tenant compte des aspects perceptifs.
- Diverses conceptions de panneaux composites sont créées sur la base des modèles mis à jour.
- Des expériences en laboratoire psychoacoustiques évaluent les qualités perceptives des conceptions, en accordant une attention particulière à la sonie identifiée comme un facteur important de préférence.

Perspectives :

- Le chapitre se termine en suggérant des domaines potentiels de recherche future, notamment l'exploration de différentes configurations de panneaux, de

matériaux et de conditions aux limites dans les expériences vibroacoustiques.

- Les études futures peuvent examiner les effets de différentes dispositions de stratifiés sur les dimensions perceptives et les indices psychoacoustiques.
- L'utilisation de techniques d'intelligence artificielle et d'apprentissage profond dans les analyses psychoacoustiques est proposée pour modéliser les comportements humains dans l'évaluation des conceptions.