



HAL
open science

Comparaison de deux méthodes pour la caractérisation de l'impédance acoustique de sols en milieu extérieur

Benoit Gauvreau, Vincent Gary, David Ecotière, Ph Glé, L Brendel, Philippe Bousquet, Vincent Blandeau

► To cite this version:

Benoit Gauvreau, Vincent Gary, David Ecotière, Ph Glé, L Brendel, et al.. Comparaison de deux méthodes pour la caractérisation de l'impédance acoustique de sols en milieu extérieur. 16ème Congrès Français d'Acoustique, CFA2022, Société Française d'Acoustique; Laboratoire de Mécanique et d'Acoustique, Apr 2022, Marseille, France. hal-03847972

HAL Id: hal-03847972

<https://hal.science/hal-03847972>

Submitted on 10 Nov 2022

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

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



16^{ème} Congrès Français d'Acoustique
11-15 Avril 2022, Marseille

Comparaison de deux méthodes pour la caractérisation de l'impédance acoustique de sols en milieu extérieur

B. Gauvreau^a, V. Gary^a, D. Ecotière^b, Ph. Glé^b, L. Brendel^b, Ph. Bousquet^c, V. Blandeau^c

^aUMRAE UGE-Cerema, All. des Ponts et Chaussées, 44340 Bouguenais, France

^bUMRAE, Cerema-UGE, 11 rue Jean Mentelin, 67000 Strasbourg, France

^cAIRBUS Opérations S.A.S., 316, Route de Bayonne, 31060 Toulouse Cedex 9, France



Dans le cadre du projet de recherche DGAC “MAMBO”, une campagne expérimentale a été menée en septembre 2021 par AIRBUS et l'UMRAE dans l'objectif d'établir une base de données permettant la validation de modèles de propagation acoustique du bruit des aéronefs, et d'estimer les incertitudes associées. Un grand nombre de capteurs acoustique et météorologiques ont été déployés sur site pendant la campagne, et une attention particulière a été portée sur la mesure *in situ* des caractéristiques d'absorption acoustique de différents types de sol, ce qui est le sujet principal de cet article. Ainsi, deux bancs de caractérisation semi-automatiques de l'impédance acoustique de sol, respectivement développés par l'UMRAE et par AIRBUS, ont été déployés sur des sols présentant des caractéristiques d'absorption variées. Ces bancs proposent des approches assez différentes, à la fois dans le choix du matériel utilisé (source, microphones, configuration géométrique, échantillonnage spatial) et dans les techniques utilisées pour le calage par méthode inverse des résultats expérimentaux (signal source, traitement du signal, procédures de recalage, etc.). Les travaux présentés permettent de quantifier la variabilité des résultats inter-laboratoires et inter-méthodes que l'on peut observer *in situ*.

1 Introduction

L'amélioration des méthodes de prédiction du bruit extérieur des avions et la maîtrise des incertitudes associées sont des leviers pour permettre la réduction du bruit des avions dès les phases de conception. Dans le cadre du projet de recherche DGAC «MAMBO» (Méthodes Avancées pour la Modélisation du Bruit moteur et aviOn) une campagne expérimentale a été menée en septembre 2021 par AIRBUS et l'UMRAE dont l'objectif était d'établir une base de données permettant la validation de modèles de propagation acoustique du bruit des aéronefs et d'estimer les incertitudes associées. Un grand nombre de capteurs acoustiques et météorologiques ont été déployés sur site pendant la campagne, et une attention particulière a été portée sur la mesure *in situ* des caractéristiques d'absorption acoustique de différents types de sol, ce qui est le sujet principal de cet article. Ainsi, AIRBUS et l'UMRAE ont conduit des essais croisés (*benchmarks*), à l'aide de leurs systèmes respectifs pour la caractérisation expérimentale semi-automatique de l'impédance de sol, dont les résultats sont présentés ici.

Les modèles d'impédance acoustique utilisés sont plus ou moins sophistiqués, allant de modèles semi-empiriques, phénoménologiques à des modèles micro structurels. Ils reposent sur différents paramètres du sol, par exemple l'épaisseur effective du sol, la résistance spécifique au passage de l'air, la tortuosité, la porosité et le facteur de forme. Différents modèles sont disponibles dans la littérature pour décrire les propriétés acoustiques théoriques du sol, suivant différents mécanismes de dissipation pris en compte et de la description de la microstructure. Plusieurs modèles ont été utilisés ici : ceux de Delany & Bazley (D&B) [3], de Miki [2], de Zwicker & Kosten (Z&K) [3], de Hamet & Bérengier (H&B) [4] et d'Attenborough (*variable porosity* et *slit-pore* [5]). L'impédance de surface peut être calculée dans ces conditions en fonction de l'impédance acoustique caractéristique du matériau, de la fréquence considérée et de l'épaisseur du matériau [6]. Comme celui de Delany & Bazley, le modèle de Miki est un modèle empirique initialement développé pour les matériaux fibreux dont la porosité est proche de 1. Il a été largement utilisé dans la littérature et appliqué successivement pour décrire l'impédance de sol en fonction de sa résistance spécifique au passage de l'air. Le modèle de Zwicker & Kosten est une description plus générale des matériaux poreux, sur la base de pores cylindriques ; il présente l'avantage d'être semi-phénoménologique et de fournir une prédiction plus précise

que le modèle Miki pour de nombreuses configurations telles que les matériaux à faible porosité, la microstructure tortueuse ou les pores de forme cylindrique. Trois paramètres sont utilisés dans ce modèle pour décrire le matériau poreux : sa porosité ouverte, sa résistance spécifique au passage de l'air et sa tortuosité [5]. Le modèle de Hamet & Bérengier ainsi que ceux d'Attenborough (*variable porosity*, *slit-pore*) ont été plus spécifiquement développés pour les matériaux très poreux, et ne sont pas forcément adaptés à tous les types de sols étudiés dans ce papier. Le cas échéant, l'effet d'épaisseur («e», exprimée en m) est considéré en supposant le matériau du type «bicouche» et en ramenant l'impédance de sol Z_{sol} à une impédance équivalente dite «caractéristique» (Z_c) à travers l'équation (1) :

$$Z_c = Z_{sol} \cdot \coth(-j \cdot k \cdot e) \quad (1)$$

Tous les processus physiques impliqués peuvent également conduire à des variations de l'impédance de surface, tant dans l'espace que dans le temps. La connaissance de ces paramètres de sol est donc une nécessité pour les chercheurs et ingénieurs en acoustique environnementale. Dans cette optique, plusieurs procédures ont été proposées ces dernières années pour les caractériser. Ainsi, deux bancs de caractérisation semi-automatique de l'impédance acoustique de sol, respectivement développés par l'UMRAE et par AIRBUS, ont été déployés sur des sols présentant des caractéristiques d'absorption variées. Ces bancs proposent des approches assez différentes, à la fois dans le choix du matériel utilisé (source, microphones, configuration géométrique, échantillonnage spatial) et dans les techniques utilisées pour le calage par méthode inverse des résultats expérimentaux (signal source, traitement du signal, procédures d'identification, etc.). Ces 2 systèmes sont brièvement présentés *infra*.

Les travaux présentés dans ce papier permettent de quantifier la variabilité des résultats de mesures selon les différentes méthodes expérimentales, les différents modèles d'impédance, les différentes techniques d'identification, etc. *In fine*, la dispersion associée à ces «incertitudes expérimentales» est à mettre en regard de la variabilité spatiale des caractéristiques de sol observée *in situ*.

2 Présentation des deux systèmes

2.1 Système UMRAE

La méthode de caractérisation *in situ* proposée par l'UMRAE ici (matériel et logiciel) est une méthode non destructive, basée sur une technique à deux microphones développée à l'occasion de travaux antérieurs [7][8][9]. Elle peut être utilisée pour la caractérisation de l'impédance de surface de sols hétérogènes typiques tels que les sols naturels ou les toits et façades végétalisés [9].

La méthode utilisée consiste à ajuster le ratio des spectres de pression mesurés en deux positions différentes au-dessus d'un sol, par rapport à un résultat théorique. Les pressions acoustiques provenant d'une seule source sont ainsi enregistrées pour deux positions au-dessus du sol (Fig. 1) afin d'obtenir une fonction de transfert mesurée.

Après de nombreuses études (in situ/outdoor et en salle semi-anochoïque), la géométrie suivante a été choisie pour le montage expérimental (cf. Fig. 1) :

- Hauteur de la source : 0,6m ;
- Distance source-microphone (d) : 4m ;
- Hauteurs des microphones (Mic1 et Mic2) : 0,6m et 0,06m, respectivement.

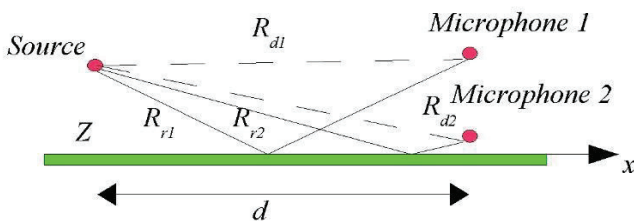


Figure 1 – Schéma de principe du système UMRAE pour la mesure d'impédance des sols.

L'identification des paramètres d'impédance acoustique de la surface considérée nécessite au préalable de calculer la fonction de transfert théorique, i.e. calculée en supposant le sol et l'atmosphère homogènes et séparés par une frontière plane. Dans ces conditions, en supposant que l'atmosphère et le sol sont deux milieux semi-infinis, le modèle de Rudnick [10] peut être utilisé pour décrire la propagation du son sur ce plan. La technique consiste alors à minimiser la différence entre ces deux fonctions en utilisant la méthode des moindres carrés sur une gamme de fréquences donnée.

Cette technique d'identification (calage « *best fit* ») d'une courbe théorique sur une courbe théorique suppose de balayer tout (recherche exhaustive) ou partie (algorithme génétique) des combinaisons possibles de l'ensemble des paramètres impliqués : résistance au passage de l'air, épaisseur du matériau, porosité, tortuosité, facteur de forme, etc.

La méthode utilise appareil de mesure portable dédié, présenté en Fig. 2 et composé de :

- Pour l'émission : un haut-parleur Navsound Fugue 70W et un amplificateur de puissance Pioneer GM-A3602 (classe AB) ;
- Pour la réception : deux microphones Microtechgefell M370 classe 1 (taille ¼", sensibilité 12.5mV/Pa), deux conditionneurs MMF M32 (alimentation ICP) et une carte d'acquisition Acoustics Engineering Triton 2 canaux.

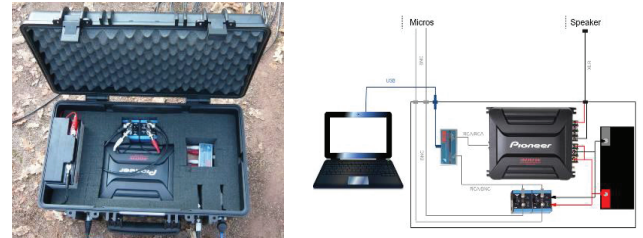


Figure 2 – Dispositif expérimental (à gauche), schéma de montage associé (au milieu) et montage expérimental in situ (à droite)

Ce dispositif est entièrement contrôlé par un ordinateur portable à l'aide d'un programme Scilab open-source permettant l'exécution des différentes étapes de la mesure :

- Vérification de la carte d'acquisition et étalonnage/calibration des microphones ;
- Emission de signaux (p. ex. bruit blanc, chirp, mls, etc.) ;
- Enregistrement, calcul de la réponse impulsionnelle et fenêtrage temporel ;
- Affichage des résultats et identification des paramètres acoustiques du sol (Fig. 3).

Un exemple de la fonction de transfert mesurée et de la fonction de transfert théorique ajustée est présenté sur la Fig. 3.

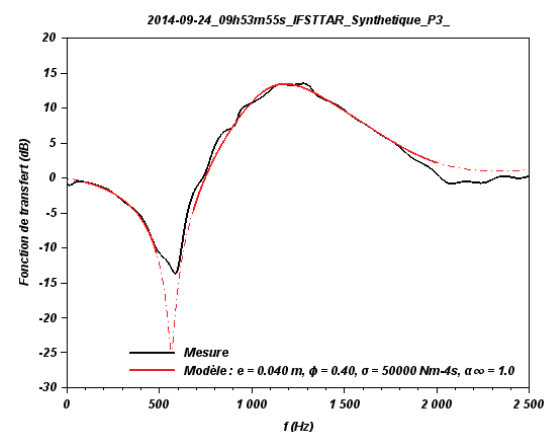


Figure 3 – Exemple de fonctions de transfert (ajustée en rouge, mesurée en noir) pour du gazon synthétique.

2.2 Système AIRBUS



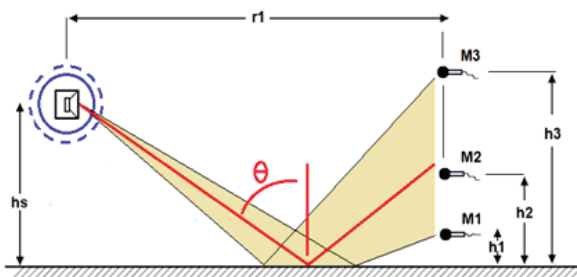
Figure 4 – Banc Airbus d'éduction de l'impédance de sol

La Fig. 4 présente le banc conçu par Airbus pour évaluer l'impédance de sol par éduction. Le banc rassemble sur une portail rigide trois microphones ¼" GRAS ICP et une source acoustique omnidirectionnelle (chambre de compression BMS4592ND avec convergent conique), le tout étant connecté à un chariot intégrant une tablette, une carte d'acquisition Quattro (Data Physics), un amplificateur audio Focal FPP2100 et une alimentation par batterie Lithium ACCUWATT.

La tablette contient le logiciel d'acquisition ainsi qu'une interface développée sous Matlab pour le traitement des données sur site, comme décrit plus loin. Les signaux utilisés sont des chirps qui permettent de maximiser le rapport signal bruit tout en limitant la plage de fréquence à 200Hz-4000Hz afin de protéger la chambre de compression.

Le portail rigide permet une installation rapide par un seul opérateur. Le faible poids de l'ensemble et la compacité du portique le rendent transportable dans un petit utilitaire.

La calibration (hauteur et distance relative des micros et de la source, gains relatifs des voies de mesures) est effectuée au préalable en laboratoire, sur un sol rigide.



Géométrie
 Hauteur de la source: Hs = 30.0cm
 Hauteur du microphone 1 (référence): h1 = 5.0cm
 Hauteur du microphone 2 (centre): h2 = 14.0cm
 Hauteur du microphone 3 (haut): h3 = 35.0cm
 Séparation horizontale source/microphones: r1 = 100cm

Figure 5 – Géométrie du banc Airbus

La géométrie du banc Airbus décrite en Fig. 5, prend en compte les recommandations de la norme ANSI-ASA S1.18 [11]. Elle comporte trois micros permettant de mettre en œuvre simultanément deux géométries proches des dispositifs A & B proposés par la norme.

La paire de micros M1-M3 est associée aux fréquences 250Hz-1120Hz, la paire M1-M2 aux fréquences 1120Hz-4000Hz. On augmente ainsi la sensibilité du banc aux effets de l'impédance en recherchant l'optimum du modèle sur les deux plages de fréquences simultanément (Fig. 6 et Fig. 7)

Dans l'interface Matlab installée sur la tablette, quatre modèles d'impédance ont été codés pour permettre l'évaluation d'impédance par éduction: le modèle Attenborough à porosité variable [11], le modèle d'Attenborough « slit-pore » [5], le modèle de Miki [2] et le modèle de Delany-Bazley [1] étendu pour la prise en compte d'effets d'épaisseur de couche (cf. Eq.(1)).

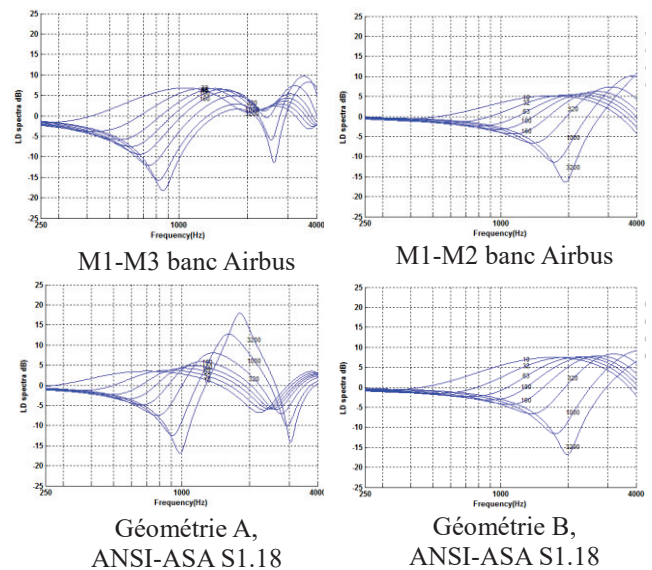


Figure 6 – Spectres de différence de niveau prédits (modèle d'Attenborough porosité variable, pour différentes valeurs de résistivité) pour les deux géométries du banc Airbus vs. géométries A & B de la norme ANSI-ASA S1.18 [11].

Une procédure proche de NORDTEST NT ACOU 104 [12] est suivie pour recalcr les modèles, évaluer l'incertitude de mesure et l'erreur de recalage.

En chaque point, un spectre moyen de différences de niveaux est évalué en tiers d'octaves entre ainsi que l'écart type associé pour chaque bande de fréquence. Pour chaque modèle d'impédance, la différence de niveau prédite est obtenue en utilisant une méthode itérative qui minimise l'erreur de recalage E défini par l'Eq. (2) :

$$E = \sum_{f=250Hz}^{4000Hz} \left(LD_{pred}(f) - LD_{moy}(f) \right)^2 \quad (2)$$

où LD_{pred} et LD_{moy} sont les différences de niveaux issues des prédictions et de la moyenne de mesures, respectivement (cf. [11] pour les détails de la prédiction). Le banc est déplacé au minimum 10 fois de manière à faire une moyenne surfacique et évaluer l'homogénéité du site à caractériser (Fig. 7).

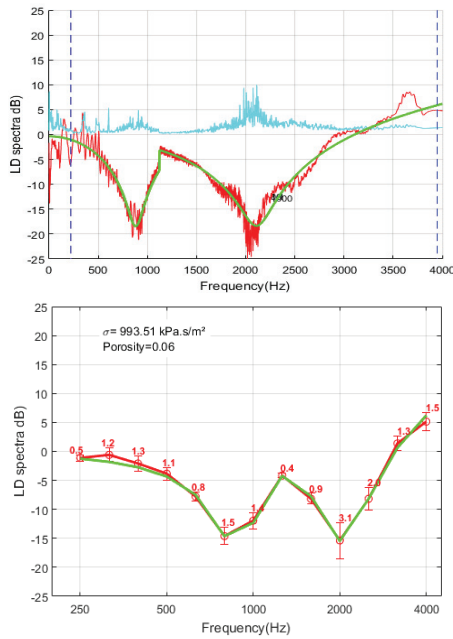


Figure 7 – Exemple de résultats du banc Airbus sur sol goudronné (bandes fines en haut, tiers d’octave en bas, avec écart-type). Courbe rouge: moyenne des mesures. Courbe verte: prédiction du meilleur modèle recalé. Courbe bleue: écart entre prédiction et mesure.

Trois critères sont utilisés pour valider l’évaluation d’impédance : (i) la cohérence moyenne lors de la mesure, (ii) l’écart-type par bande de fréquence entre les 10 mesures et (iii) l’erreur de recalage.

Lors de la mesure, la cohérence moyenne entre le signal de la source et le signal de chaque microphone est contrôlée visuellement par l’opérateur et enregistrée avec les données.

L’opérateur a le choix de recommencer la mesure en cas de perte de cohérence liée au vent ou bien d’éliminer au post-traitement les bins de fréquence pour lequel la cohérence est inférieure à 0.95 (seuil optionnel, c’est le cas par exemple d’un rapport signal bruit faible lié à la courbe de réponse de la source, à la présence de bruit de fond, à un nœud de pression quand l’impédance de sol est élevée...).

Si l’écart-type des 10 mesures dépasse 4dB pour une bande de fréquence comprise entre 250Hz et 4000Hz, le matériau est considéré comme non homogène et la représentativité du modèle discutée.

Pour chaque type de sol mesuré, l’erreur de recalage E (cf. Tab. 1) permet de sélectionner le modèle le plus adapté. Si elle dépasse 15dB le recalage du modèle est invalidé.

3 Essais croisés - benchmarks

3.1 Présentation des sols naturels étudiés

Différents types de sol ont été étudiés dans ce benchmark, depuis des sols très réfléchissants (matériaux fermés type béton) jusqu’à des sols plus ou moins absorbants du type : herbeux, chaumé, stabilisé, terre compacte, etc. Les résultats présentés dans ce papier concernant les sols décrits en Fig. 8 ci-dessous :

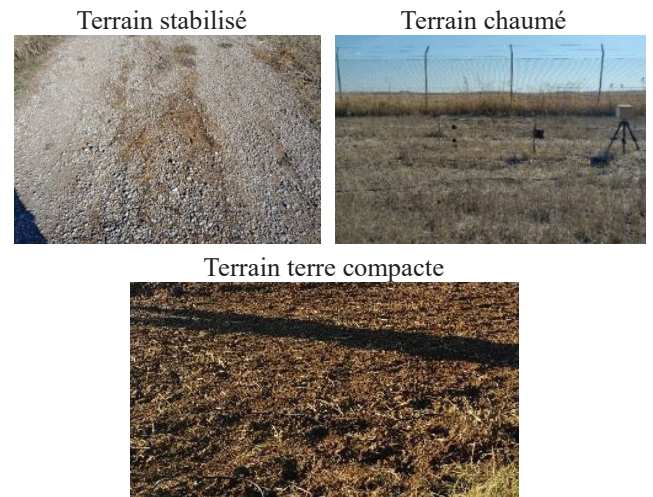


Figure 8 – Exemples de types de sol étudiés.

3.2 Synthèse et analyse des résultats

Les résultats issus des mesures et des traitements (cf supra Section 2) ont été croisés et analysés. Les courbes suivantes en donnent quelques exemples, en particulier concernant les trois types de sol présentés supra. Le suffixe « 1 » ou « 2 » indique le nombre de paramètres considérés. Les barres d’erreur indiquent la dispersion métrologique (répétabilité, reproductibilité), estimée depuis [8] et supposée identique pour les 2 systèmes de mesure (en première approximation).

Le Tableau 1 ci-dessous présente les valeurs d’erreur de recalage obtenus pour les trois types de sol avec la méthodologie Airbus. La valeur la plus faible permet d’identifier le modèle qui a permis le meilleur recalage.

E (dB)	Attenb 2	Slit-pore 2	D&B 2	Miki 1
Stabilisé	7	11	9	8
Chaumé	7	13	12	12
Terre	15	7	11	12

Tableau 1 – Erreur de recalage E obtenue par la méthodologie Airbus (plage de fréquences 250-4000Hz)

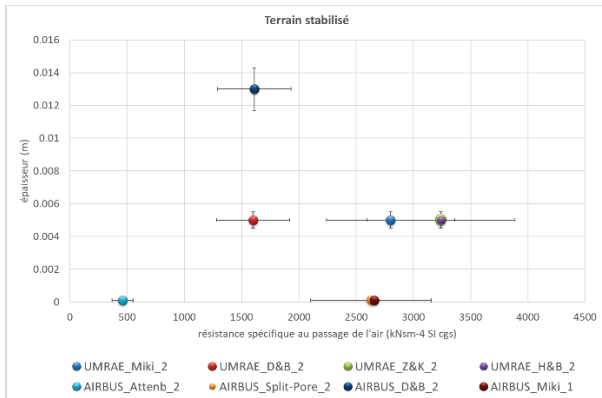


Figure 9 – Exemple de résultats de mesures in situ des paramètres « résistance au passage de l’air » et « épaisseur » pour le sol « stabilisé ».

Sur la Fig. 9, lorsque l’effet d’épaisseur est pris en compte, deux « modes » semblent se dessiner pour la résistance au passage de l’air : 1 mode aux alentours de 1600 kNsm^{-4} et un autre aux alentours de 3000 kNsm^{-4} . Le second est davantage représenté, et d’ailleurs renforcé par les systèmes/modèles sans prise en compte de l’effet d’épaisseur (paramètre en principe peu influent avec ce type de surface, peu absorbante). Bien qu’assez différentes sur le graphe, les valeurs données par le système AIRBUS et le modèle D&B (avec effet d’épaisseur) restent proches de celles données par le système UMRAE avec le même modèle : résistance au passage de l’air de l’ordre de 1600 kNsm^{-4} , et épaisseur de l’ordre du centimètre. Le Tableau 1 montre que sur ce type de sol, les erreurs de recalage sont faibles pour les modèles utilisés par Airbus. Enfin, comme précédemment pour le terrain chaumé et *a fortiori* pour un matériau encore moins poreux comme le terrain stabilisé, le recalage du modèle « Attenborough – variable porosity » mène à des valeurs de résistance à l’écoulement nettement plus faibles que pour les autres modèles.

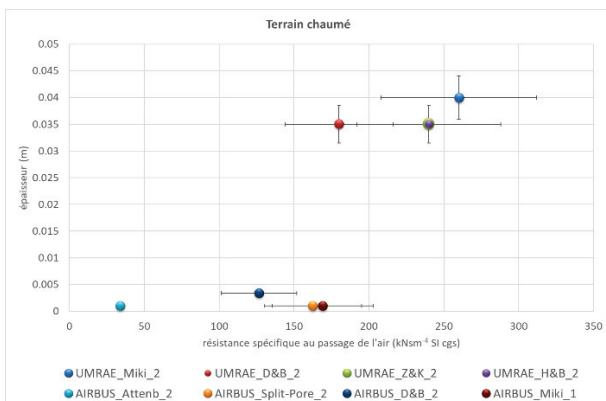


Figure 10 – Exemple de résultats de mesures in situ des paramètres « résistance au passage de l’air » et « épaisseur » pour le sol du type « chaumé ».

Sur la Fig. 10, les valeurs de résistance au passage de l’air données par les différents systèmes/modèles donnent des résultats semblables au sens « opérationnel », c’est-à-dire du même ordre de grandeur sur la plage [150-250 kNsm^{-4}] sauf pour le modèle « Attenborough, variable porosity » dont la résistance recalée est anormalement faible. La table 1 montre que, sur ce type de sol, tous les modèles utilisés par Airbus

donnent des erreurs de recalage acceptables. Lorsque l’information sur l’épaisseur est disponible, elle est également du même ordre pour les différents systèmes/modèles, et cohérente avec le comportement physique d’un tel matériau absorbant, soit [0.03-0.04 m]. Une mesure diffère des autres cependant : celle donnée par le système AIRBUS et le modèle D&B (avec effet d’épaisseur), dont la valeur de résistance au passage de l’air est physique (bien que faible, de l’ordre de 120 kNsm^{-4}) mais dont la valeur d’épaisseur équivalente est très faible et plus proche de celle d’un matériau réfléchissant (0.003m).

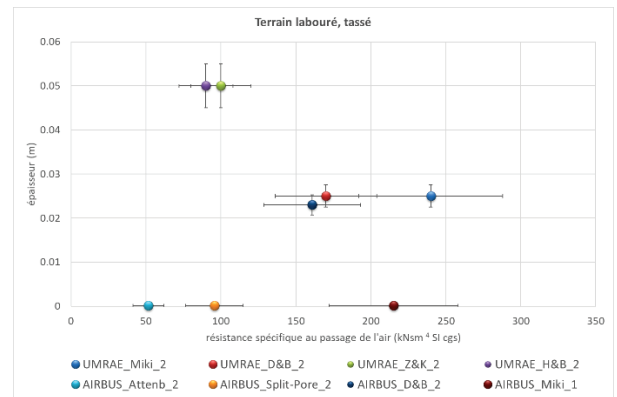


Figure 11 – Exemple de résultats de mesures in situ des paramètres « résistance au passage de l’air » et « épaisseur » pour le sol du type « terre compacte ».

La Fig. 11 ci-dessus concerne le sol « terre compacte » et son analyse montre que les valeurs de résistance au passage de l’air sont du même ordre de grandeur que pour le terrain chaumé (Fig. 10). Les modèles d’impédance phénoménologiques (Z&K, H&B, Attenborough *slit-pore* et *variable porosity*) semblent donner des valeurs proches de résistance à l’écoulement (dans la gamme 50-100 kNsm^{-4} , aux incertitudes expérimentales près), alors que les modèles empiriques donnent les valeurs plus élevées et moins répétibles (dans la gamme 150-250 kNsm^{-4}). Le tableau 1 montre une erreur de recalage acceptable pour le terrain « terre compacte » (au vu de la méthode NORDTES ACOUS 104 [12]), pour tous les modèles utilisés par Airbus, le modèle Attenborough *slit-pore* permettant d’obtenir la plus faible erreur de recalage. Quand elles existent, les valeurs d’épaisseur équivalente du matériau sont du même ordre de grandeur, *i.e.* de quelques centimètres ; cela dit, la question de la valeur de référence (ou « valeur vraie ») reste ouverte.

3.3 Discussion des résultats

La Fig 13 présente quelques résultats complémentaires afin de mettre en regard l’incertitude expérimentale (répétabilité, reproductibilité, choix du modèle d’impédance, étendue fréquentielle pour l’identification, etc.) et la variabilité spatiale des mesures que l’on peut observer en déplaçant le banc de mesure, ici celui de l’UMRAE. Les 3 positions (sur la même zone d’étude, ici le sol « terre compacte ») sont indiquées sur le graphe.

La Fig. 12 nous enseigne que, en présence de ce type de sol (*i.e.* terre compacte) – et uniquement cet exemple de sol –, la variabilité spatiale des valeurs des paramètres d'impédance (résistance au passage de l'air et épaisseur) est quasi négligeable par rapport à la dispersion de ces valeurs selon le choix du modèle d'impédance. Cette observation ne peut pas être généralisée car elle dépend évidemment fortement de l'homogénéité du terrain considéré.

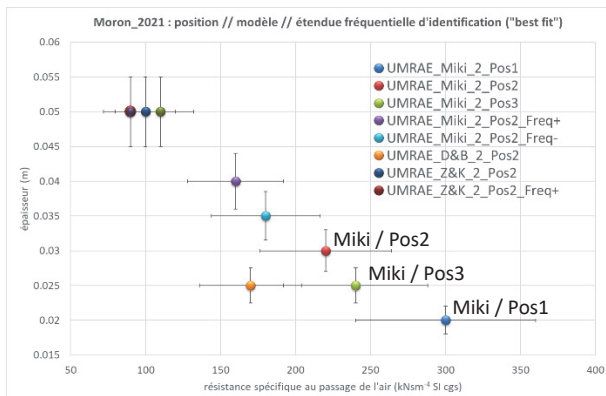


Figure 12 – Exemple de résultats de mesures *in situ* des paramètres « résistance au passage de l'air » et « épaisseur » pour le sol du type « terre compacte ». Influence du modèle, de la position de mesure (Pos1, Pos2, Pos3) et du domaine fréquentiel pour l'identification (calage « best fit » étendu pour Freq+, diminué pour Freq-)

En outre, la Fig. 12 montre que la modification de l'étendue fréquentielle pour l'identification ne change pas radicalement les valeurs respectives de ces paramètres d'impédance (résistance au passage de l'air et épaisseur), que ce soit en utilisant le modèle de Miki ou celui de Z&K. Là encore, cette observation n'est pas généralisable à l'ensemble des types de terrain ; d'autres analyses devront donc être réalisées sur ce sujet.

4 Conclusion

Cette campagne expérimentale d'essais croisés (*benchmarks*) pour la caractérisation de l'impédance acoustique des sols a permis de comparer à la fois différents systèmes de mesures (AIRBUS et UMRAE) et différents modèles (D&B, Miki, Z&K, H&B, Attenborough, etc.). Les premiers résultats d'analyse montrent une grande sensibilité au modèle d'impédance utilisé dans le processus d'identification. Ce modèle doit en effet être adapté au terrain considéré (ex : matériau plus ou moins absorbant), et il ne semble pas possible de pouvoir dégager un « modèle universel ». Par ailleurs, on observe une moindre sensibilité au domaine fréquentiel pour l'identification, ainsi qu'à la position de mesures dans la zone d'étude pour le sol « terre compacte ». Ces considérations ne valent évidemment que pour le(s) terrain(s) considéré(s) dans cet article. D'autres résultats pour d'autres terrains et d'autres paramètres (porosité, tortuosité, facteur de forme, etc.) sont en cours d'analyse et pourront être présentés lors de la session idoine du CFA 2022.

Remerciements

Ce travail a été réalisé dans le cadre du projet MAMBO (sous-flux 1.4), financé par la DGAC sous la référence HNG/M21000549. Les auteurs tiennent à remercier l'équipe des essais acoustiques Airbus pour leur support.

Références

- [1] M. Delany, and E. N. Bazley, "Acoustical properties of fibrous absorbent materials," *Appl. Acoust.* 3, 105–116 (1970).
- [2] Y. Miki, "Acoustical properties of porous materials. Modifications of Delany-Bazley models", *J. Acoust. Soc. of Jap.*, 11(1), 1990.
- [3] Zwikker and C.-W. Kosten, *Sound Absorbing Materials*, Elsevier, New-York, 1949
- [4] Bérengier M, Gauvreau B, Blanc-Benon P, Juvé D. "Outdoor sound propagation: a short review on analytical and numerical approaches", *Acta Acust United Acust* 89, pp 980–p91, 2003.
- [5] Keith Attenborough, Imran Bashir, and Shahram Taherzadeh, "Outdoor ground impedance models", *J. Acoust. Soc. Am.* 129 (5), May 2011.
- [6] K. Attenborough, K.M. Liand K. Horoshenkov, *Predicting outdoor sound*, Taylor & Francis, London, 2007
- [7] Glé, P., Ecotière, D., Gauvreau, B., Bérengier, M., 2019. Mesure de l'Impédance Acoustique des Matériaux de l'Environnement : le système MIAME. *Revue Générale des Routes et de l'Aménagement* 960, 54–57.
- [8] Ecotière, D., Glé, P., Gauvreau, B., Boittin, R., Lefevre, H., Lunain, D., 2015. Uncertainty of an in situ method for measuring ground acoustic impedance, in: *Proceedings of Internoise 2015*. Presented at the Internoise 2015, San Francisco, California, USA.
- [9] G. Guillaume, B. Gauvreau, Ph. L'Hermite, (2014), "Numerical study of the impact of vegetation coverings on sound levels and time decays in a canyon street model", *J. Science of the Total Environment*, Vol. 502(1), pp 22-30
- [10] I. Rudnick, "The Propagation of an Acoustic Wave along a Boundary", *J. Acoust. Soc. of Am.*, 19(2), 1947.
- [11] ANSI/ASA S1.18-2010, 2010. Method for determining the acoustic impedance of ground surfaces. Accredited Standards Committee S1, Acoustics. American National Standard (Revision of ANSI S1.19-1999).
- [12] NORDTEST ACOU 104. "Ground surfaces: determination of acoustic impedance", 1998. www.nordicinnovation.net/nordtestfiler/acou104.pdf (Last viewed 2/28/11).
- [13] SETRA Copyright (Collective), "Road noise prediction: NMPB 2008 - Noise propagation computation method including meteorological effects", methodological guide, 2009