

Un moyen d'essais en fatigue acoustique a été conçu afin de proposer une alternative aux grandes salles réverbérantes habituellement utilisées pour valider la capacité des satellites à supporter les niveaux de bruits auxquels ils sont soumis dans la coiffe du lanceur lors du décollage. La solution proposée est une cabine fermée dont les parois accueillent des sources électrodynamiques, pilotées par un système de contrôle en temps réel. Le champ résultant est surveillé par un maillage de microphones enveloppant le satellite. L'objectif du dispositif est de réaliser un champ acoustique pseudo-aléatoire, respectant précisément un spectre pré-défini, avec une répartition spatiale uniforme dans chaque bande d'octave. L'exposé mettra l'accent sur les techniques d'égalisation utilisées pour atteindre ces objectifs, les spécificités des sources ayant déjà été décrites. Le domaine des fréquences à reproduire a été divisé en deux parties, la charnière correspondant approximativement à la transition entre un comportement modal et un comportement statistique du champ dans la cabine. Aux basses fréquences le principe de contrôle utilise un jeu de formes d'ondes calculées off-line d'après la structure modale préalablement identifiée dans la cabine. Aux fréquences plus élevées, différentes combinaisons de signaux non corrélés ont été testées afin de respecter la contrainte d'homogénéité malgré la proximité des sources et microphones de contrôle. Un contrôle en boucle fermée gère alors le niveau dans chaque bande d'octave, en utilisant un modèle thermique des sources et une correction de non-linéarité pour cibler un compromis adapté entre la rapidité et la précision du contrôle de niveau et de spectre. Les différentes étapes de la conception seront présentées, étayées par les simulations préalables et les modifications successives qui ont découlé des mesures effectuées sur le moyen d'essai pour affiner progressivement les algorithmes de contrôle.

1 Introduction

Avant d'être embarqués dans un lanceur, les satellites doivent subir de nombreux tests de validation, incluant un test acoustique au cours desquels ils sont exposés à un champ de pression intense et uniforme sensé être représentatif des contraintes qu'ils auront à subir lors du décollage. Pour ces tests, il est usuel d'employer une grande salle réverbérante équipée de sirènes alimentés à l'azote. Une autre approche a été étudiée, permettant de réduire les dimensions et le coût du moyen d'essais. Son principe consiste à équiper une cabine acoustique d'environ $40m^3$ de plusieurs sources électroacoustiques disposées en paroi.

Compte tenu des niveaux sonores très importants à garantir, la réalisation de cet équipement impliquait de disposer d'actuateurs spécifiquement conçus afin de garantir la fiabilité du moyen d'essais. Cet aspect du problème a été décrit par ailleurs [1], aussi cet exposé se concentre sur le problème de l'homogénéisation du champ acoustique, qui nécessite un pilotage individuel des sources.

La gamme des fréquences à couvrir est assez large, pouvant comprendre des octaves de $31Hz$ à $8kHz$. Compte tenu du volume de la salle, qui conduit à des dimensions de quelques mètres, les premières octaves correspondent à un champ acoustique essentiellement modal. Inversement, les octaves supérieures tendent à favoriser un champ à caractère diffus, au moins approximativement. Cependant, l'essentiel de l'énergie acoustique est rayonnée dans les octaves $125 - 500Hz$, où le comportement de la cabine est intermédiaire entre ces deux cas. La gamme des fréquences à reproduire est ainsi divisée en trois : les octaves $31, 63$ et $125Hz$ sont désignées comme la gamme "BF" où le pilotage est basé sur une excitation déterministe pré-calculée d'après la structure modale de la cabine. Les octaves de 1 à $8kHz$ sont désignées comme la gamme "HF", dont les sources sont alimentées par un unique signal pseudo-aléatoire, la pression se répartissant naturellement dans tout le volume. Les octaves 250 et $500Hz$ sont désignées comme la gamme "MF", et leurs sources sont alimentées par une famille de signaux pseudo-aléatoires.

2 Modélisation préalable

La conception de la cabine a fait l'objet de plusieurs phases, après une pré-étude de principe. Après avoir figé sa géométrie et son mode de construction, un modèle numérique a été utilisé pour répartir les sources sur les parois et vérifier les performances attendues. En pratique, plusieurs options ont été envisagées avant d'aboutir à la structure actuelle.

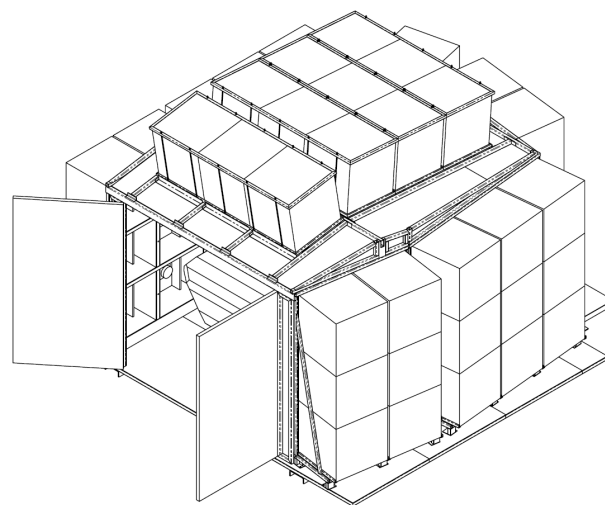


FIGURE 1 – Géométrie de la cabine d'essai étudiée

La figure 1 présente la structure interne de la cabine d'essai étudiée, "l'enveloppe" externe (assurant une isolation acoustique par rapport à l'atelier voisin) n'apparaissant pas. Cette cabine comporte un sol rigide plein (qui supporte le satellite à tester) et une paroi munie de deux larges portes battantes. Les quatre autres parois consistent en des structures porteuses de caissons (approximativement cubiques sur le dessin) destinés à accueillir les sources de génération du champ acoustique. Ces parois "actives" sont chacune divisées en deux pans légèrement inclinés, de manière à ce qu'il n'existe aucune paire de parois parallèles.

Le satellite est disposé sur un berceau dédié dans la cabine, à peu près au centre du volume. Les sources

rayonnent ainsi dans l'espace compris entre les parois intérieures de la cabine et les parois extérieures du satellite, la distance moyenne entre ces deux surfaces étant de l'ordre du mètre. Un grillage est inséré entre les deux surfaces, supportant 63 microphones plus ou moins équi-répartis. Ce grillage correspond ainsi à une surface 3D entourant le satellite où la pression régnant dans la cabine peut être contrôlée, aussi bien à vide qu'en présence du satellite. Cette structure est schématisée par la figure 2, où le volume V où est généré le champ acoustique est coloré en vert clair.

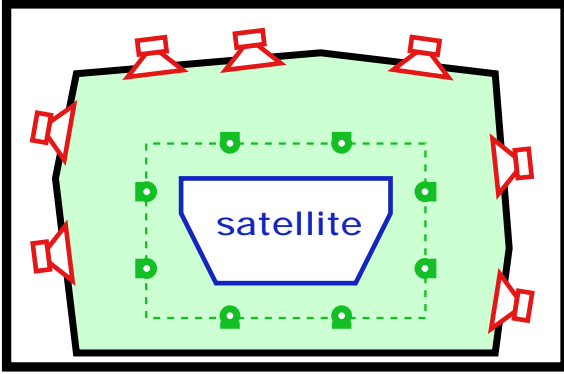


FIGURE 2 – Schéma de principe de l'installation

Le principe de l'installation étant choisi, la première étape de conception du système de restitution sonore est de placer les sources de manière à obtenir les couplages les plus favorables possibles avec les modes de la cabine. Dans notre cas, cette étape était préalable à la construction, aussi il a été nécessaire de développer un modèle du système permettant d'anticiper avec précision les réponses des sources dans ce volume relativement complexe (et contenant le satellite).

Le modèle utilisé combine trois approches. Des modèles électroacoustiques des sources permettent d'en obtenir les réponses et les impédances externes. Un modèle FEM est utilisé pour générer une famille de modes du volume interne, sans prendre en compte d'amortissement. Ce dernier est ajouté par une méthode BEM, dans laquelle la fonction de Green est développée sur les modes FEM précédents. Ce principe permet de prendre en compte avec une bonne précision le caractère très inhomogène des pertes aux parois du volume V . En effet, les parties en tôle peinte (parois ne portant pas de sources) ont une absorption quasi-négligeable, contrairement au satellite lui-même, dont les caractéristiques d'absorption ont été estimées préalablement (par mesures d'une maquette en salle réverbérante). Les sources de contrôle ont enfin une impédance relativement faible et constituent de fait la principale source d'absorption. Ainsi, le modèle permet de "déplacer virtuellement" les sources, ce qui requiert de déplacer simultanément les surfaces rayonnantes et celles d'absorption.

Les calculs des sources et du modèle FEM sont effectués une fois pour toute. Le maillage FEM décrit le volume V , excluant donc le volume externe du satellite. Ce maillage comporte donc une "peau intérieure" (surface externe du satellite) et une "peau extérieure" (surface interne de la cabine, où sont disposées les sources). Le calcul BEM permet d'attribuer à tout élément de ces deux peau un débit

et/ou une admittance, permettant de distribuer avec précision les absorptions et les sources. Seule la partie BEM doit être exécutée pour prendre en compte une nouvelle disposition de sources. La structure du modèle permet alors de réduire le calcul aux surfaces modifiées, ce qui permet d'accélérer le test des solutions. Le protocole de placement des sources est alors le suivant :

- Un jeu de position possible est choisi.
- Le calcul BEM est effectué pour ce jeu.
- Une simulation d'égalisation permet d'estimer l'homogénéité spatiale résultante dans la bande de fréquences ciblée.
- Cette homogénéité est comparée à l'objectif visé.

Ce protocole a été appliqué dans chaque bande "BF", permettant de fixer le nombre et la position des sources nécessaires pour atteindre les objectifs de niveau et d'homogénéité demandés, en gardant des marges de sécurité. Cette partie de la conception (un peu fastidieuse) n'est pas décrite ici.

3 Egalisation des basses fréquences

Pour un jeu de sources donné, l'égalisation des basses fréquences est basée sur le principe d'homogénéisation du niveau sonore en moyenne dans une bande de fréquence (ici une bande d'octave). Ainsi, les différents acteurs sont alimentés par des spectres spécifiques, calculés de manière à minimiser cet écart de niveau moyen entre les différents microphones. Dans la suite, nous considérons un spectre discrétisé par FFT avec une résolution de 1Hz .

Pour chaque bande de fréquences, le système dispose d'un ensemble de N_s sources à piloter, dont les réponses sont observables sur les N_m microphones de l'installation. En régime linéaire, les pressions correspondantes P_i sont liées aux tensions de commande U_j par la relation :

$$P_i(k) = \sum_{j=1}^{N_s} H_{ij}(k) U_j(k) \quad (1)$$

où l'indice k désigne l'une des fréquences du spectre discret appartenant à la bande de fréquences à égaliser : $k \in B_s$.

L'objectif de l'égalisation de cette bande consiste à s'approcher au mieux d'une consigne de pression moyenne P_{moy} sur tous les microphones. Ceci impose de rechercher les commandes $U_j(k)$ qui minimisent la fonctionnelle Ψ :

$$\Psi = \frac{1}{N_m} \sum_{i=1}^{N_m} \left(\sum_{k \in B_s} |P_i(k)|^2 - P_{moy}^2 \right)^2 + \frac{1}{N_s} \sum_{j=1}^{N_s} \left(\sum_{k \in B_s} |U_j(k)|^2 \right)^2 \quad (2)$$

- Le premier terme de l'équation 2 est la variance, sur l'ensemble des microphones, de l'écart entre les pressions quadratiques souhaitées et mesurées.

- Le deuxième terme est la moyenne des énergies fournies aux sources, élevée à la puissance N . Son rôle est de pénaliser le critère à minimiser, de manière à éviter des commandes excessives.

3.1 Algorithme

La recherche des commandes $U_j(k)$ est alors effectuée via un algorithme itératif, décrit ci-après.

Pour des raisons pratiques, la fonctionnelle Ψ est modifiée en introduisant les grandeurs réduites $p_i(k)$ et $u_j(k)$ ainsi que les énergies par bande correspondantes p_i^B et u_j^B :

$$\left\{ \begin{array}{l} p_i(k) = \frac{P_i(k)}{P_{moy}} \\ u_j(k) = \frac{U_j(k)}{U_{max}} \\ p_i^B = \sum_{k \in B_s} |p_i(k)|^2 \\ u_j^B = \sum_{k \in B_s} |u_j(k)|^2 \end{array} \right. \quad (3)$$

Dans la définition de $u_j(k)$, le paramètre U_{max} désigne une valeur limite de la commande, que l'algorithme doit éviter de dépasser. En introduisant aussi deux pondérations w_i^m et w_j^s portant respectivement sur les microphones et les commandes, la minimisation de la fonctionnelle Ψ revient à celle de la fonctionnelle Γ :

$$\Gamma = \frac{1}{N_m} \sum_{i=1}^{N_m} w_i^m (p_i^B - 1)^2 + \frac{\lambda}{N_s} \sum_{j=1}^{N_s} w_j^s (u_j^B)^N \quad (4)$$

La recherche du vecteur $\mathbf{u}(k)$ minimisant Γ est alors faite par une méthode de gradient récursive, où une nouvelle solution $\mathbf{u}(k)^{(n+1)}$ est calculée d'après la dernière solution obtenue $\mathbf{u}(k)^{(n)}$ en ajoutant un terme correctif proportionnel au gradient de Γ :

$$\mathbf{u}(k)^{(n+1)} = \mathbf{u}(k)^{(n)} - \mu^{(n)} \frac{\partial \Gamma}{\partial \mathbf{u}(k)^{(n)}} \quad (5)$$

Dans la relation 5, le terme de gradient peut être calculé analytiquement, et mis sous forme matricielle :

$$\frac{\partial \Gamma}{\partial \mathbf{u}(k)^{(n)}} = [\mathbf{H}(k)]^* \mathbf{v}(k) + \lambda \mathbf{w}(k) \quad (6)$$

où :

$$\left\{ \begin{array}{l} \mathbf{v}(k) = \frac{4}{N_m} [w_i^m (p_i^B - 1) p_i(k)] \\ \mathbf{w}(k) = \frac{2N}{N_s} [w_j^s (u_j^B)^{N-1} u_j(k)] \\ [\mathbf{H}(k)] = \frac{U_{max}}{P_{moy}} [H_{ij}(k)] \end{array} \right. \quad (7)$$

Une difficulté est alors de fixer la valeur du coefficient de convergence $\mu^{(n)}$. Une estimation de sa valeur optimale est déterminée à chaque itération en cherchant la valeur qui

minimise la fonction $\Phi(\mu)$, correspondant à la fonctionnelle Γ pour une valeur de $\mathbf{u}^{(n)}(k)$ corrigée proportionnellement à μ :

$$\Phi(\mu) = \Gamma \left\{ \mathbf{u}(k)^{(n)} - \mu \frac{\partial \Gamma}{\partial \mathbf{u}(k)^{(n)}} \right\} \quad (8)$$

En pratique, la valeur du pas optimal correspondant à $\mu^{(n)}$ est approximée via une interpolation parabolique, à partir des valeurs de Φ calculées pour trois valeurs de μ .

3.2 Paramétrage

L'algorithme de minimisation présenté ci-dessus ne nécessite donc intrinsèquement qu'un point de départ, pris en pratique à $\mathbf{u}(k) = \mathbf{0}$. Par contre la définition du critère à minimiser met plusieurs paramètres à la disposition de l'opérateur ; leur rôle est donc décrit rapidement ci-après.

La pondération w_i^m joue un rôle mineur ici, car l'objectif est d'obtenir une pression uniforme sur tous les microphones. La valeur de U_{max} est imposée par les contraintes matérielles de l'installation. Ainsi l'algorithme d'égalisation n'est finalement paramétré que par les paramètres liés au terme de pénalisation dans la relation 2 : le coefficient λ , la puissance N , et la pondération w_j^s .

Une contrainte très significative liée à la nature du moyen d'essai est que les sources ne sont que très peu surdimensionnées, afin d'éviter qu'un dysfonctionnement de l'installation ne puisse endommager le satellite en cours de test. De ce fait, l'égalisation ne doit pas conduire à des solutions où les commandes U_j auraient des niveaux trop différents. Cette contrainte est gérée par une recherche de solution en plusieurs phases, chacune correspondant à un paramétrage différent :

- Le coefficient de pénalisation λ est initialement fixé à zéro, afin de chercher une solution égalisant le champ acoustique "au mieux".
- Ce coefficient est ensuite augmenté progressivement, afin d'amener les commandes à des valeurs acceptables.
- La pondération w_j^s permet alors de focaliser l'algorithme sur les sources nécessitant les plus fortes commandes, pour tenter de les réduire à un niveau proche des autres. A ce stade, l'augmentation de la puissance N peut être utilisée pour faire tendre l'algorithme vers un critère "minmax".

Il n'est pas toujours facile de trouver une solution qui satisfasse simultanément toutes les contraintes, aussi le "meilleur" compromis est-il cherché par essai/erreur en modifiant les valeurs des paramètres lors des différentes phases ci-dessus.

La figure 3 illustre le principe de cette égalisation "par octave" dans un cas simple, ciblant un plan récepteur avec 4 sources. Les figures de gauche sont les cartes d'écart de pression sur le plan, et celles de droite sont les densités spectrales envoyées aux sources. Les figures du haut illustrent le point de départ de l'algorithme : les 4

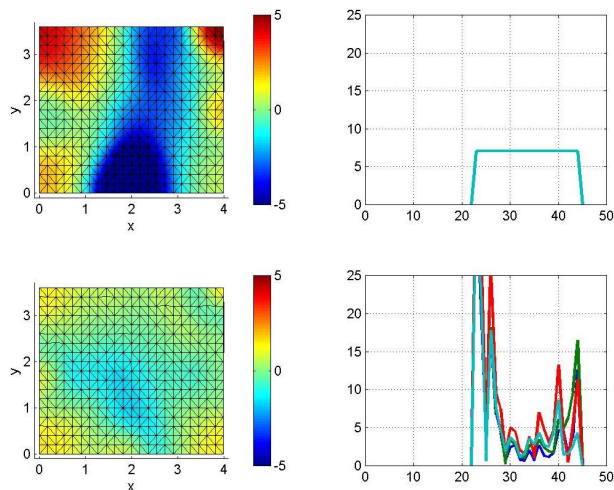


FIGURE 3 – Principe de l'égalisation BF

spectres sont uniformes, conduisant à une répartition spatiale fortement marquée par un mode - et donc peu homogène spatialement. Les figures du bas illustrent le résultat de l'algorithme, où la trace du mode a été fortement atténuée. Les spectres finaux reflètent la résonance de ce mode (en plein centre de la bande), privilégiant les fréquences qui ne l'excitent pas trop. Les spectres délivrés aux 4 sources sont alors différents, reflétant leurs couplages spécifiques avec chacun des modes.

L'égalisation permet ainsi d'homogénéiser la pression au niveau de la surface de contrôle implicitement définie par la grille de microphones. Le modèle permet alors de vérifier que ceci conduit effectivement à une meilleure homogénéité de la pression sur le satellite lui-même, du moins aux fréquences où la densité de microphones est suffisante pour que ceux-ci soient représentatifs du volume délimité. La figure 4 représente un exemple de pression calculée sur un maillage grossier d'une forme de satellite insérée dans le modèle, pour l'octave 63Hz, dans le cas où les sources correspondantes sont pilotées toutes avec les mêmes signaux (figure du haut) ou avec les signaux égalisés (figure du bas). L'amélioration de l'homogénéité de la pression est clairement visible, même si les écarts en dB sur la paroi du satellite ne sont pas exactement ceux prévus sur les microphones. Ce résultat est important, car il n'est pas possible de vérifier la cartographie de pression sur le satellite réel ; la seule information disponible pendant l'essai est donc le relevé des pressions sur les microphones.

4 Egalisation des moyennes fréquences

L'égalisation des bandes "MF" ne peut pas être effectuée de manière similaire à celle des bandes "BF", car la densité modale élevée dans cette bande rend le modèle inefficace et peu précis. Lors de la conception initiale de la cabine, les sources "MF" ont donc simplement été réparties de manière approximativement homogène parmi les sources "BF", un seul signal étant prévu pour les alimenter. L'hypothèse sous-jacente était que la réverbération naturelle de la cabine dans cette bande serait suffisante pour que le champ y soit diffus, et donc suffisamment homogène.

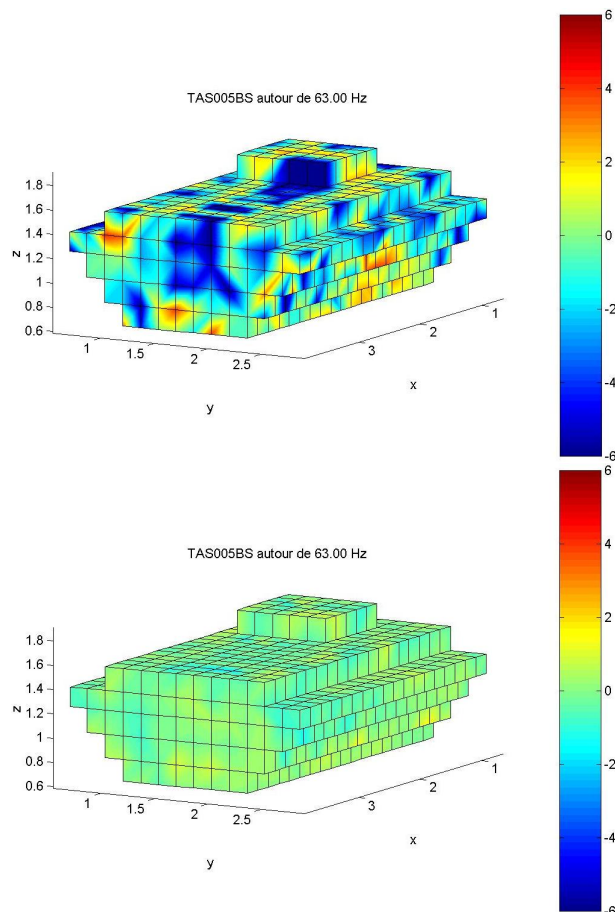


FIGURE 4 – Champ acoustique résultant sur le satellite : sans (h) et avec (b) égalisation de l'octave 63Hz

Les premiers essais effectués après construction de la cabine ont mis en évidence un double problème aux "MF" : le niveau délivré s'est avéré nettement inférieur à celui anticipé, et l'homogénéité spatiale du champ était inacceptable. La cause commune était une absorption beaucoup plus élevée que prévu, principalement liée aux sources elles-mêmes.

Différentes approches ont été envisagées avant d'aboutir à la solution actuelle, qui prévoit trois types de sources optimisées spécifiquement pour trois sous-bandes : deux demi-octaves 250Hz, une octave 500Hz. Ceci permet d'utiliser un nombre limité dans chaque sous-bande (ce qui tend à contenir l'absorption correspondante), avec un rendement accru du fait de leur spécialisation. Inversement, il est alors devenu nécessaire de répartir ces sources (en nombre et en position) pour respecter le cahier des charges à toutes les fréquences. Il a aussi été décidé d'utiliser des signaux différenciés par sources afin d'améliorer l'homogénéité spatiale, conduisant à une problématique similaire à celle de la gamme "BF".

Faute de disposer d'un modèle, l'approche retenue a été de mesurer les fonctions de transfert (dans la cabine réalisée) entre des sources placées aux différentes positions possibles et les 63 microphones de la grille. Une durée de fenêtre de l'ordre de 4s au minimum a été nécessaire pour que la fonction de cohérence atteigne une valeur satisfaisante. En effet, les transferts dans la cabine mettent en jeu un nombre élevé de "trajets acoustiques" correspondant à des retards

significatifs.

Des mesures effectuées à intervalles de plusieurs jours ont alors conduit à une excellente répétabilité (le hall d'essais étant régulé en température et hygrométrie) : le système se comporte bien comme un système déterministe, linéaire et invariant. Le calcul des combinaisons de sources peut donc être effectué par superposition, à partir des transferts mesurés.

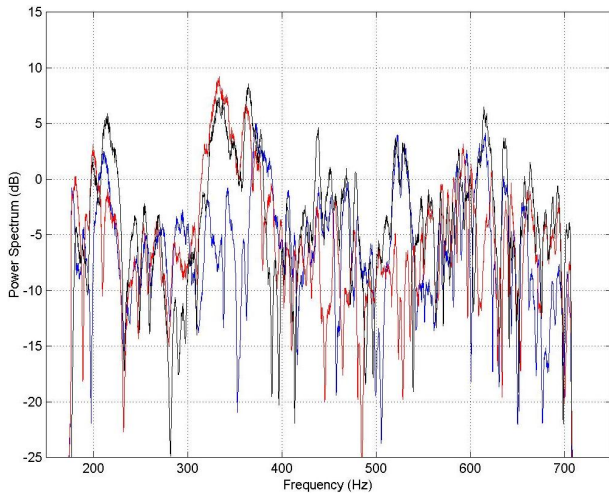


FIGURE 5 – Somme de 2 sources aux "MF" : S1 seule (rouge), S2 seule (bleu) et somme (noir)

Un exemple d'une telle sommation est illustré par la figure 5, où les réponses de deux sources vers un microphone sont mesurées et comparées à la mesure de leur combinaison. Cette figure illustre les variations importantes liées aux positions des sources : la forte densité modale conduit à des maxima d'efficacité quasi-disjoints pour les deux sources. Ainsi les signaux microphoniques correspondant aux deux sources sont très peu corrélés malgré le caractère déterministe des fonctions de transfert. Ceci se traduit par une sommation quadratique des deux contributions, soit augmentation du niveau global très proche de \sqrt{N} pour la somme de N sources.

Cette relation a été vérifiée expérimentalement pour différentes combinaisons de sources, et s'est parfois même révélée optimiste : lorsque des sources ont une efficacité élevée à des fréquences communes, ce n'est jamais avec une même phase sur tous les microphones. Les niveaux relevés en moyenne sur l'ensemble des microphones sont donc plutôt réduits par des interférences destructrices, ce qui se traduit par une moindre efficacité qu'une sommation quadratique.

Ce constat est à l'origine du choix de piloter les sources "MF" par un ensemble de signaux décorrélés (séquences pseudo-aléatoires indépendantes), pré-calculés de manière à aiguiller dans chaque sous-bande un spectre adapté. Comme l'illustre la figure 6, le spectre résultant de la sommation de signaux décorrélés est plus homogène spectralement, et l'égalisation spatiale est également facilitée.

Dans un premier temps, les signaux alimentant les sources MF sont donc simplement des bruit décorrélés, dont

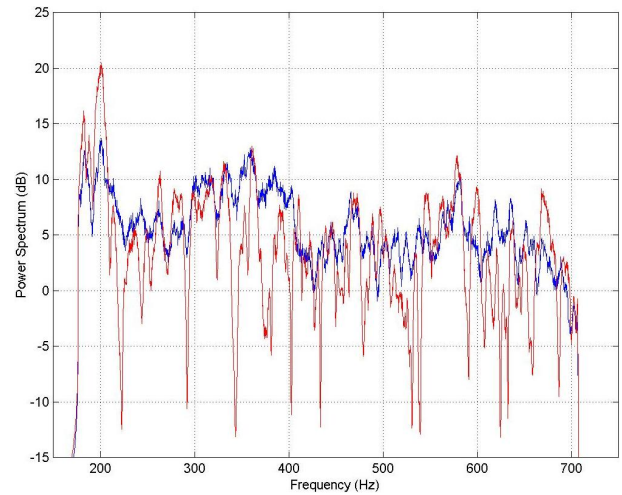


FIGURE 6 – Somme de 8 sources aux "MF" : 1 signal commun (rouge) ou 8 signaux décorrélés (bleu)

le spectre est filtré à $-3dB/octave$ (bruit "rose") et limité aux bandes pré-définies (demi-octaves 250Hz ou octave 500Hz). Il était envisagé de prévoir une pré-égalisation globale de ces spectres ou un réglage des niveaux relatifs des sources, mais cela n'a pas été mis en oeuvre finalement, les performances atteintes ainsi ayant été jugées suffisantes.

5 Performances sur site

L'effet de l'égalisation effectuée dans les bandes BF est illustré par la figure 7. Cette figure représente une cartographie de pression sur la surface définie implicitement par les 63 microphones de contrôle, cette pression étant la valeur efficace résultant de la sommation des composantes spectrales dans l'octave 63Hz. La carte du haut illustre le cas où toutes les sources sont alimentées par un même spectre uniforme. L'écart de pression entre les différents microphones dépasse alors 11dB, une valeur inacceptable pour l'exploitant de la cabine. La carte du bas de la figure 7 représente les pressions obtenues pour une même valeur efficace des signaux envoyés aux sources, mais avec des spectres résultant de l'algorithme décrit au §3. Les fluctuations de pressions entre microphones sont alors réduites à un peu plus de 2dB, et sont alors conformes aux attentes.

De même, la figure 8 illustre le principe du pilotage des sources MF dans l'octave 250Hz (gérée en deux sous-bande, seule la résultante étant présentée ici). La carte du haut illustre le cas où toutes les sources sont alimentées par le même signal aléatoire filtré. L'écart de pression entre les différents microphones atteint alors presque 9dB, illustrant que la cabine ne se comporte pas du tout comme une chambre réverbérante. La carte du bas de la figure 8 représente les pressions obtenues pour un même contenu spectral des signaux envoyés aux sources MF, mais en répartissant 25 signaux décorrélés comme décrit au §4. Les fluctuations de pressions entre microphones sont alors réduites à un peu plus de 5dB, ce qui reste un peu trop élevé, mais a été jugé acceptable car une part importante de cet écart est imputable à un microphone placé sous le satellite.

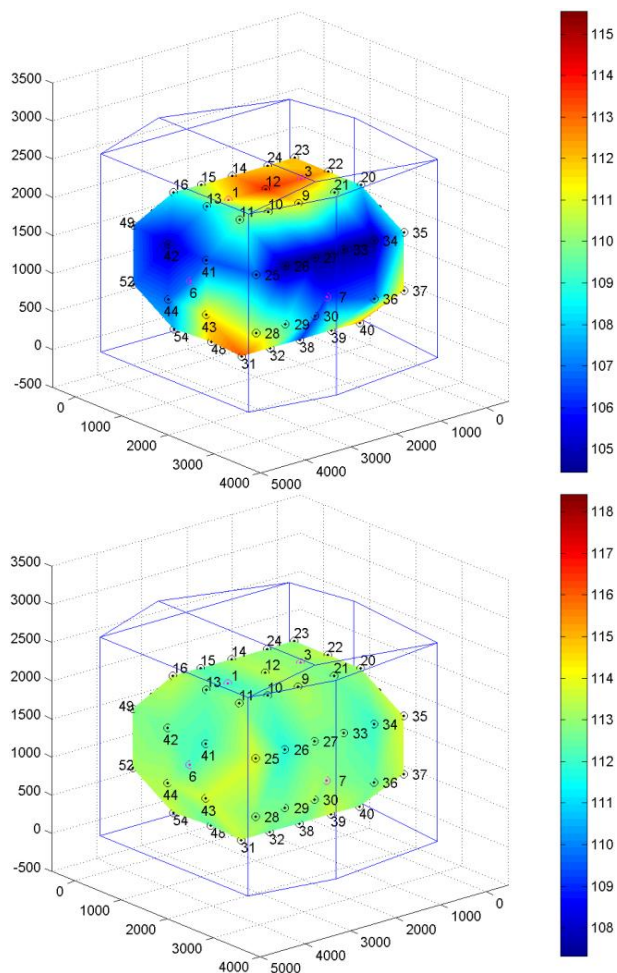


FIGURE 7 – Niveau acoustique relevé sur les microphones en moyenne sur l’octave 63Hz

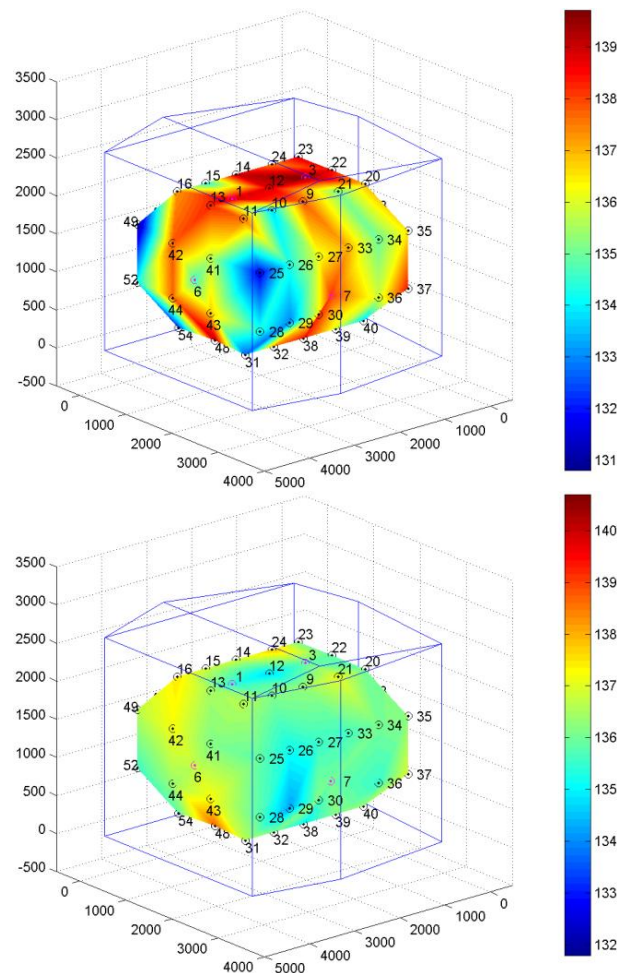


FIGURE 8 – Niveau acoustique relevé sur les microphones en moyenne sur l’octave 250Hz

In Memoriam



Alain Roure (1947-2013)

Ce projet n’aurait même pas démarré sans l’investissement de notre collègue et ami Alain Roure, qui a succombé à la maladie le 4 mai 2013. Un tel projet, plutôt aventureux a priori, était à l’image de nombreux autres qu’il a menés ; son absence nous pèse, malgré tous les bons souvenirs qu’il nous laisse.

Remerciements

Les auteurs tiennent à remercier chaleureusement les personnels de la société Thalès Alenia Space (Rome) qui ont contribué à la mise en place du projet, à l’installation

puis aux évolutions sur site de ce moyen de mesure. Malgré une pression de tous les jours, le travail a bénéficié d’un esprit d’ouverture et de coopération, notamment de la part de Nicola Saggini que les auteurs tiennent à remercier tout particulièrement.

La réalisation de ce projet doit également beaucoup à la société Active Audio, dont les ingénieurs ont su transcrire avec efficacité et beaucoup de rigueur les très nombreuses contraintes de sécurité liée à la nature des équipements à tester. Au-delà du professionnalisme de rigueur, leur disponibilité lors des phases de mise au point a constitué un atout indéniable.

Les auteurs tiennent également à remercier Cédric Pinhède et Muriel Winninger qui ont participé à diverses phases du projet.

Références

- [1] J.C. Le Roux, Ph. Herzog, N. Poulain, Conception et qualification d’actuateurs pour un moyen d’essais utilisant un contrôle du champ acoustique, *10^{ème} Congrès Français d’Acoustique 103*, Lyon (2010).