

Cabine d'essais acoustiques pour satellites

Nicolas Poulain

Jean-Christophe Le Roux

Centre de Transfert de Technologie du Mans

20, rue Thalès de Milet

F-72000 Le Mans

E-mail : npoulain@cttm-lemans.com

Philippe Herzog

LMA - CNRS

31, chemin Joseph Aiguier

F-13402 Marseille CEDEX 20

Résumé

Un moyen d'essai 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 prés-défini, avec une répartition spatiale uniforme dans chaque bande d'octave. L'article met l'accent sur les techniques d'égalisation utilisées pour atteindre d'objectif. Des mesures effectuées sur le moyen d'essai valident la méthodologie.

Contexte

À la fin du cycle d'assemblage et d'intégration, et avant d'être acheminés sur le site de lancement, les satellites sont soumis à un plan de test qui prévoit souvent, entre autres essais, que le satellite soit exposé à une excitation vibratoire au niveau « acceptance » (réception). Le niveau d'excitation vibratoire auquel est soumis le satellite vise à reproduire la sollicitation exercée durant le lancement, dans la coiffe du lanceur. Cet essai a pour fonctions de tester les composants qui ne l'ont pas été à leur niveau d'assemblage, de valider l'assemblage, et de vérifier que le satellite ne sera pas endommagé par les niveaux de vibrations qu'il subira lors du lancement.

Lors des essais, le satellite est instrumenté par un grand nombre d'accéléromètres. Un travail d'analyse consiste ensuite à comparer les signatures vibratoires à plusieurs niveaux d'excitation entre elles, avec celles de l'essai de qualification du premier de série (réalisé à un niveau plus élevé de 3 dB), et avec les prédictions numériques.

Dans le cas de satellites de petite taille, cet essai était souvent réalisé en plaçant le satellite sur un excitateur électrodynamique alimenté par un signal aléatoire (gamme 5 Hz-2 000 Hz), mais l'augmentation des dimensions et du poids des satellites de générations plus récentes ne le permet plus. Un autre moyen de réaliser l'essai est de placer le satellite dans une salle réverbérante de grandes dimensions (volume de 1 000 m³), dans laquelle une combinaison de sirènes électropneumatiques, alimentées par de l'azote, et de sources électrodynamiques génère un champ acoustique de fort niveau considéré comme diffus.

Lorsque le site de Thales Alenia Space à Rome (Italie) s'est vu confier l'assemblage, l'intégration et les essais finaux de la seconde génération de satellites Globalstar, le besoin a émergé de disposer sur place d'un moyen d'essais acoustiques. Les contraintes très fortes de coût et de délai, ainsi que la nécessité d'implanter le moyen d'essais à l'intérieur du hall d'assemblage Intégration et Test (salle blanche de classe 100 000) ont conduit la compagnie à rechercher une solution non conventionnelle et innovante.

Le moyen d'essais doit permettre de générer un champ acoustique de fort niveau et homogène autour du satellite. Il doit également être de faible encombrement, démontable et transportable, et satisfaire aux exigences de cadence (un essai par semaine), d'opérabilité, de sécurité et de maintenance.

La solution proposée est une cabine acoustique d'environ 40 m³, équipée d'un grand nombre de sources électro-acoustiques en paroi.

La conception de la cabine a fait l'objet de plusieurs phases. Une pré-étude a permis de figer sa géométrie et son mode de construction. Un modèle numérique, brièvement décrit au § Calculs de dimensionnement (page suivante), est ensuite utilisé pour répartir les sources sur les parois et anticiper les performances acoustiques. Plusieurs options ont été envisagées avant d'aboutir à la géométrie finale, illustrée par la figure 1, qui représente la structure interne de la cabine d'essai ("l'enveloppe externe" - assurant une isolation acoustique par rapport à l'atelier voisin - n'apparaît pas sur la figure). 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), avec un maximum de 51 emplacements. Chacun de ces caissons est susceptible d'accueillir jusqu'à deux sources électro-acoustiques. La réalisation finale comporte ainsi 95 sources se répartissant les différentes bandes de fréquences à reproduire. Les parois "actives" de la cabine sont divisées en deux pans légèrement inclinés, de manière à ce qu'il n'existe aucune paire de parois parallèles.

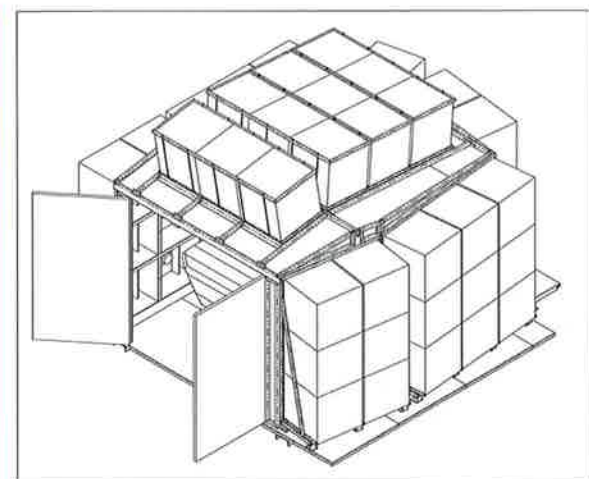


Fig. 1 : Géométrie de la cabine d'essai étudiée

Le satellite est disposé sur un berceau dédié (posé sur le sol rigide), à peu près au centre du volume. Les sources rayonnent ainsi dans le volume V 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 ces deux surfaces, supportant $N_m = 63$ microphones plus ou moins équi-répartis. Ce grillage définit une surface 3D entourant le satellite sur laquelle la pression régnant dans la cabine peut être contrôlée, aussi bien à vide qu'en présence du satellite.

Cette structure est schématisée figure 2 où le volume V est coloré en vert clair.

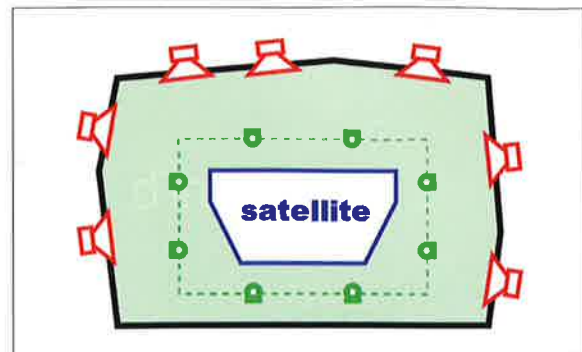


Fig. 2 : Schéma de principe de l'installation

La gamme des fréquences à couvrir par le système de restitution sonore est assez large, pouvant comprendre des octaves de 31 Hz à 8 kHz. Une allure de spectre typique est reproduite en figure 3. Compte tenu du volume de la cabine, 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.

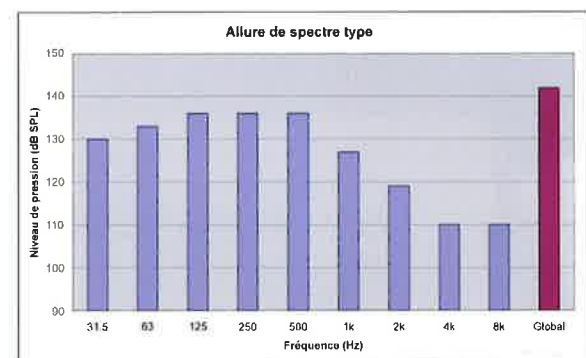


Fig. 3 : Allure de spectre de pression type

Dans les trois premières bandes d'octave (gamme "BF"), la densité modale est relativement faible. Pour respecter les exigences en homogénéité, un contrôle du champ acoustique est mis en œuvre. Il implique un pilotage individuel des actuateurs concernés et utilise un jeu de formes d'ondes calculées hors-ligne d'après la structure modale préalablement identifiée dans la cabine. De ce fait, il est difficile de prédire le niveau acoustique produit, le critère d'homogénéité pouvant être antagoniste avec l'obtention d'un niveau acoustique élevé. La solution retenue consiste à développer des actuateurs avec charge résonante. Ceci permet de maximiser le rendement des sources en conservant un encombrement minimal. La contrepartie est qu'il faut un modèle d'actuateur dédié pour chacune des trois premières bandes d'octave. La conception des actuateurs est détaillée au § Conception des actuateurs BF (page suivante). Le principe de l'égalisation est présenté au § Égalisation des BF (page 10).

Les bandes d'octaves 1 kHz à 8 kHz sont désignées comme la gamme "HF", dont les sources (des chambres de compression) sont alimentées par un unique signal pseudo-aléatoire, la pression se répartissant effectivement dans tout le volume via la réverbération naturelle de la cabine. Le dimensionnement reprend les règles usuelles de l'acoustique en champs diffus et n'est pas détaillé d'avantage ici.

La gamme des fréquences restante, octaves 250 Hz et 500 Hz sont désignées comme la gamme "MF". Leurs sources délivrent l'essentiel de l'énergie acoustique rayonnée. Dans cette gamme de fréquences, le comportement de la cabine est intermédiaire entre un champ modal et un champ diffus. Les sources correspondantes sont alimentées par une combinaison de signaux pseudo-aléatoires (cf. § Égalisation des MF page 12), qui s'est avérée suffisante pour respecter la contrainte d'homogénéité malgré la proximité des sources et microphones de contrôle. Les performances ainsi obtenues dans le moyen d'essai final sont illustrées au § Performances sur site (page 13).

Calculs de dimensionnement

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 numérique du système permettant d'anticiper avec précision les réponses des sources dans ce volume relativement complexe (et contenant le satellite).

Le modèle numérique 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 V, sans prendre en compte l'amortissement. Ce dernier est ajouté par une méthode BEM, dans laquelle la fonction de Green est développée sur les modes FEM précédents : la série modale est perturbée au premier ordre par une expression intégrale calculée d'après les admittances présentes sur les parois [6]. 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 des parois intérieures de la cabine ne portant pas de sources (réalisées en tôle peinte) 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 électroacoustiques 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. Le résultat du modèle est utilisé pour vérifier l'impact de la charge acoustique sur le débit des sources, qui est corrigé en fonction du rapport des impédances de source et des impédances de charge. Ainsi, la modélisation prend en compte rigoureusement toutes les sources de dissipation et les atténuations liées aux couplages source-charge, permettant de déterminer le niveau rayonné avec une bonne précision – tout au moins dans les limites de la linéarité.

Les calculs des modèles des sources et du modèle FEM sont effectués une fois pour toutes. Le maillage FEM décrit le volume V, excluant ainsi le volume interne 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 attribue à tout élément de ces deux peaux 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 positions possibles est choisi.
- Un calcul BEM est effectué pour ce jeu.
- Une simulation d'égalisation permet d'estimer l'homogénéité spatiale résultante dans la bande de fréquences ciblée.
- Une comparaison de cette homogénéité à l'objectif visé est effectuée.

Ce protocole a été appliqué dans chaque bande d'octave de la gamme "BF", et a permis de fixer le nombre et la position des 37 sources nécessaires pour atteindre les objectifs de niveau et d'homogénéité demandés, en gardant des marges de sécurité.

Conception des actuateurs Basses Fréquences (BF)

La conception des actuateurs "BF" s'appuie sur un modèle électroacoustique linéaire [1,2,3,4]. L'emploi d'un tel modèle, simple et validé, permet en effet de guider efficacement le développement des actuateurs tout en limitant l'apparition de phénomènes non linéaires. Ceci implique de bien connaître les limites technologiques potentielles des actuateurs. Cette démarche de maîtrise des seuils est indispensable car les actuateurs seront sollicités au maximum de leurs performances, et la linéarité et la fiabilité de leur fonctionnement devront être assurées. Compte tenu de la charge acoustique dans laquelle rayonnent les actuateurs (assimilable au premier ordre à un volume clos), le meilleur compromis entre performances et encombrement est obtenu avec des enceintes de type bass-reflex [5]. La figure 4 rappelle le schéma équivalent correspondant sur lequel sont indiquées les grandeurs critiques pour un bon fonctionnement de l'actuateur.

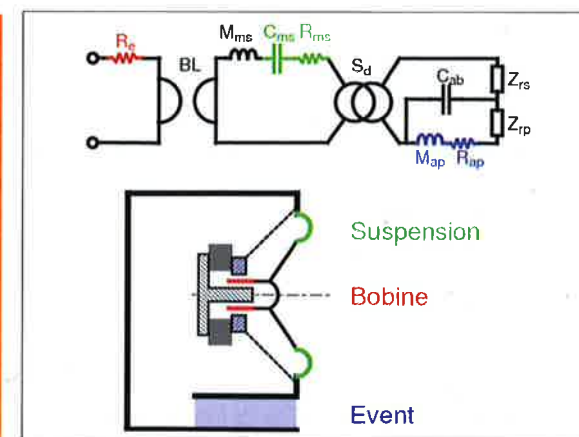


Fig. 4 : Schéma électroacoustique des actuateurs "BF"

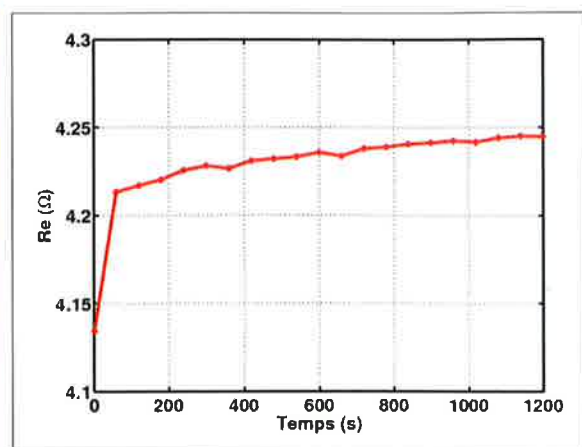


Fig. 5 : Évolution de R_e à puissance constante

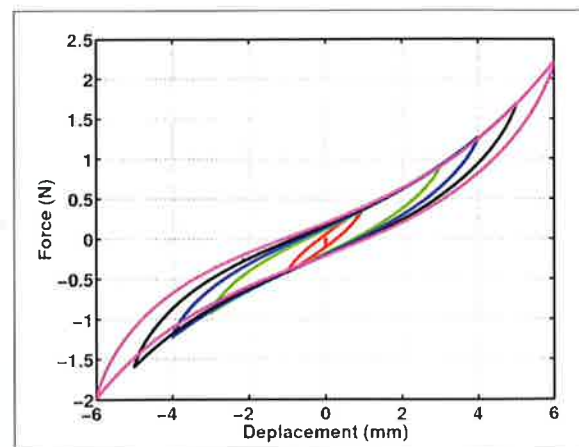


Fig. 6 : Essai de traction sur un petit boomer

Limites des actuateurs

Les principales sources de non-linéarité susceptibles de se manifester dans les actuateurs ont été abondamment décrites dans la littérature [7]. Elles sont rappelées ici pour illustrer les précautions qui doivent être prises lors de la phase de conception, afin de limiter les non-linéarités à un niveau acceptable.

La première source de non-linéarité est la compression thermique, résultant de l'échauffement de la bobine mobile sous l'effet du courant qui y circule [8,9]. Cet échauffement en augmente significativement la résistance R_e , ce qui réduit la sensibilité des haut-parleurs. La figure 5 illustre ce phénomène, dans le cas d'un petit boomer. Deux échelles de temps peuvent être différenciées : celle liée à la masse thermique de la bobine, de l'ordre de la minute, et celle liée au circuit magnétique, bien plus longue. Le fait que la constante de temps thermique de la bobine soit du même ordre de grandeur que la durée des essais envisagés signifie que la compression thermique peut impacter les performances du moyen d'essais. Elle est donc minimisée en choisissant des haut-parleurs dotés d'une bobine mobile de grand diamètre et ventilée, afin que leur tenue en puissance électrique soit très supérieure à la puissance nominale envisagée.

La deuxième source de non-linéarité est liée au comportement des suspensions des haut-parleurs, qui est à la fois viscoélastique et non-linéaire [2, 7, 10]. La figure 6 illustre un essai de traction cyclique effectué sur un petit boomer. Cet essai met en évidence un phénomène d'hystérèse, qui correspond à la dissipation dans les matériaux. Lorsque l'amplitude du déplacement augmente, la pente moyenne de la caractéristique suit la dissymétrie du cycle, et a d'abord tendance à diminuer tant que l'excursion reste faible. À plus forte excursion, la raideur intrinsèque de la suspension est augmentée par une raideur géométrique, signifiant que la limite de fonctionnement linéaire est dépassée.

L'effet de ce comportement est illustré par la figure 7 dans le cas d'un petit boomer, alimenté par une tension croissante pendant une mesure de suivi de sa fréquence de résonance f_s . Celle-ci décroît au fur et à mesure de l'augmentation de tension, tant que le niveau reste en deçà du nominal.

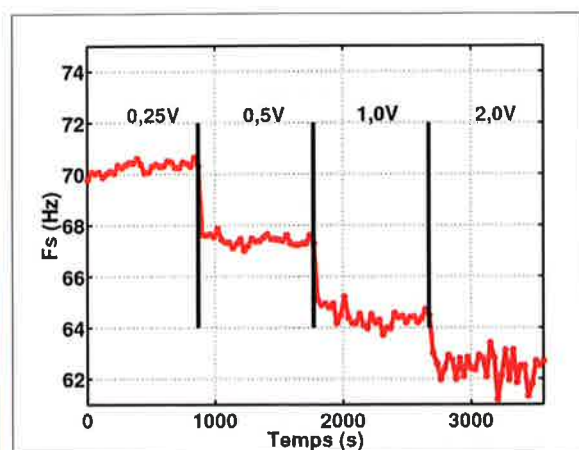


Fig. 7 : Évolution de f_s avec le niveau en régime linéaire

Cet effet est inhérent au comportement du matériau de la suspension, et peut conduire à un léger désaccord de la charge acoustique en fonction du niveau. L'accord de la charge acoustique est donc optimisé à fort niveau, de manière à limiter l'impact des décalages des résonances sur les performances maximales du système. De plus, la simulation électroacoustique permet d'estimer le déplacement maximal nécessaire en fonctionnement, et donc de choisir un modèle de haut-parleur qui soit capable de garantir une bonne linéarité jusqu'au niveau nominal.

Une troisième source de non-linéarité est liée à la charge acoustique : il s'agit de la variation de la « masse acoustique » de l'évent, résultant d'une perturbation de l'écoulement par la turbulence induite à ses extrémités [11,12]. Lorsque la vitesse dans l'évent dépasse une limite découlant de sa géométrie, une zone turbulente apparaît au bord de l'évent, et peut se développer rapidement sur une grande partie de sa longueur. Le seuil d'apparition de ces phénomènes a été évalué expérimentalement à quelques m/s [13], et il devient significatif à partir d'environ 10 m/s. La figure 8 montre la perturbation d'une vitesse normalement sinusoïdale à l'extrémité d'un évent à bord légèrement biseauté, lorsque l'écoulement devient turbulent. Cette perturbation reste ici localisée au bord de l'évent, dont le débit moyen reste quasi-linéaire à ce niveau de vitesse.

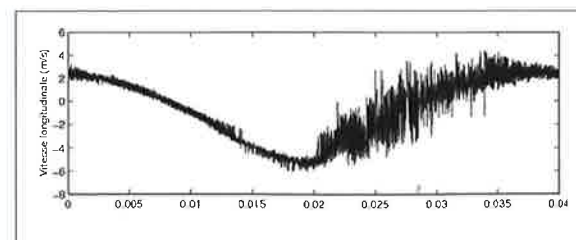


Fig. 8 : Vitesse dans un évent au seuil de turbulence

Les dimensions des charges acoustiques des actuateurs sont donc choisies de manière à ce que les sections d'évent soient suffisamment importantes pour que la vitesse moyenne y reste autant que possible en dessous du seuil de non-linéarité de l'écoulement.

Conception et qualification des actuateurs

Suite à un premier dimensionnement (cf. § Calculs de dimensionnement page 7), la conception des sources est ajustée en prenant en compte certaines contraintes supplémentaires :

- d'une part, la quantité totale d'actuateurs détermine maintenant l'encombrement de chaque module (ces derniers doivent être interchangeables),
- d'autre part, la réponse de chaque type d'actuateur doit être ajustée en tenant compte du nombre de sources travaillant dans la même bande de fréquence. Ceci est particulièrement critique dans le cas de sources résonantes. Ainsi, pour l'octave 31,5 Hz pour laquelle 5 sources sont nécessaires, le dimensionnement doit maintenant considérer que chaque actuateur est chargé par un volume de 8 m³,
- enfin, pour faciliter la gestion des pièces de rechange, les actuateurs doivent être équipés du même modèle de haut-parleur.

Pour la qualification des actuateurs, deux types d'essais sont réalisés, pour lesquels ce dernier est placé dans des conditions réalistes.

Des mesures de courbe de réponse en pression sont tout d'abord effectuées en mode sinus pas à pas, à différents niveaux d'excitation, avec un volume de charge de 0,66 m³, représentatif du montage final. Cette première étape permet entre autres de contrôler la fréquence d'accord des actuateurs, plus élevée qu'en espace libre en raison de la charge apportée par le volume de la cabine. Les essais montrent que la compression de niveau entre la mesure à 10 Vrms et celle à 40 Vrms est au maximum de 2 dB, et que la dérive de la fréquence d'accord reste inférieure à 3 Hz. Un exemple de résultat (module 63 Hz) est illustré à la figure 9.

Pour le second essai, deux actuateurs du modèle 125 Hz sont placés dans une cabine réverbérante de 6,44 m³. Ils sont excités par un bruit aléatoire filtré pour ne couvrir que la bande d'octave concernée. Le niveau de pression moyen mesuré dans la cabine est comparé avec celui prédit par les modèles linéaires (le calcul est réalisé à partir des paramètres du haut-parleur mesurés à fort niveau). Les résultats sont présentés en figure 10. On retrouve comme précédemment une compression de l'ordre de 2 dB, dont l'effet peut être pris en compte simplement, en appliquant une correction de gain.

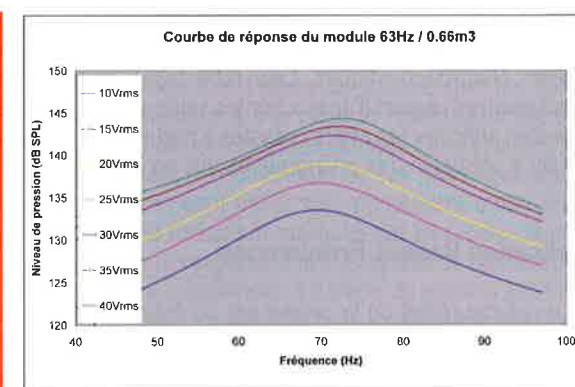


Fig. 9 : Courbe de réponse de l'actuateur 63 Hz chargé par un volume clos de 0,66 m³

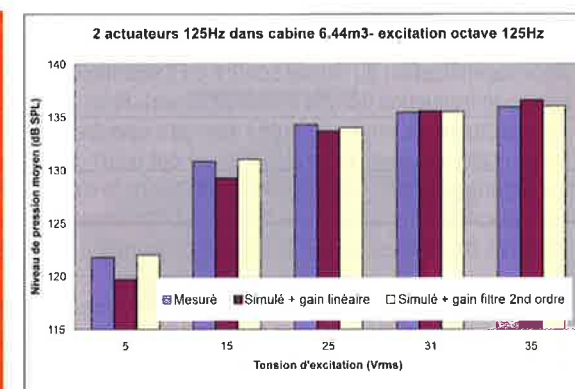


Fig. 10 : Niveau moyen généré par deux actuateurs 125 Hz

Conclusion

Le travail présenté ici illustre une démarche classique de conception de sources électroacoustiques, mais avec la complication supplémentaire que le cahier des charges ne permet pas de prendre de marge de conception puisque la charge acoustique est inconnue au démarrage du projet.

La modélisation des sources fait appel à des modèles éprouvés, mais qui ont dû être complétés par un modèle acoustique sophistiqué de la cabine, de manière à prendre en compte un couplage particulièrement fort entre la source et sa charge. Les nombreuses étapes de validation partielle ont permis de limiter le risque à l'issue de la phase de pré-étude, malgré de nombreuses inconnues (notamment une estimation nécessairement très imprécise des pertes structurelles dans les parois du moyen d'essai).

La qualification des actuateurs a mis en évidence qu'ils sont capables de tenir le cahier des charges initial, au prix d'une légère compression de niveau. Cette dernière se manifeste uniquement lorsque les actuateurs sont utilisés à leur puissance maximale, ce qui confirme que les seuils de linéarité anticipés sont effectivement très proches de ceux qui avaient été pris comme limites. La compression est compensée par un contrôle en boucle fermée qui gère 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. Ce point est relativement classique, et n'est pas décrit ici.

Cette démarche illustre ainsi l'intérêt de modèles analytiques linéaires simples pour le dimensionnement d'actuateurs électroacoustiques. Leur robustesse vis-à-vis des paramètres permet d'approcher les seuils de non-linéarité et d'en anticiper les effets néfastes à partir d'une connaissance préalable des phénomènes mis en jeu.

Égalisation Basses Fréquences

Le volume réduit de la cabine est contraire à l'établissement d'un champ acoustique homogène, la réponse étant fortement modale aux basses et moyennes fréquences. Des solutions différentes sont apportées dans chaque gamme, basées sur un pilotage individuel des sources.

Égalisation des basses fréquences

Pour un jeu de sources donné (nombre et position), 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 actuateurs sont alimentés par des spectres spécifiques, calculés de manière à minimiser cet écart de niveau moyen entre les différents microphones. Dans la suite, nous nous plaçons dans le domaine de Fourier et considérons les spectres discrétisés (par FFT) avec une résolution de 1 Hz.

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 ($i = 1, \dots, N_m$) sont liées aux tensions de commande U_j ($j = 1, \dots, N_s$) 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 ($k \in B_s$) et $H_{ij}(k)$ représente la fonction de transfert entre la source j et le microphone i , obtenue par mesure ou modèle.

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 fonction coût Ψ :

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

où

- Le premier terme de l'équation (2) est l'écart quadratique moyen, sur l'ensemble des microphones, entre la pression quadratique moyenne mesurée sur la bande B_s et le carré de la pression moyenne souhaitée.
- Le deuxième terme est la moyenne des énergies fournies aux sources, élevée à la puissance N et pondérée par λ (≥ 0). Son rôle est d'introduire une pénalisation sur les commandes de manière à éviter de surcharger les sources.

La recherche des commandes $U_j(k)$ est alors effectuée via un algorithme itératif, décrit dans le paragraphe suivant.

Algorithme

Pour des raisons pratiques, les grandeurs réduites, $p_i(k)$ et $u_j(k)$, ainsi que les moyennes des énergies par bande de fréquences, $P_i^{B_s}$ et $U_j^{B_s}$, définies par :

$$\begin{cases} p_i(k) = \frac{P_i(k)}{P_{moy}}, & P_i^{B_s} = \sum_{k \in B_s} |p_i(k)|^2 \\ u_j(k) = \frac{U_j(k)}{U_{max}}, & U_j^{B_s} = \sum_{k \in B_s} |u_j(k)|^2 \end{cases} \quad (3)$$

sont utilisées. Dans la définition des $u_j(k)$, le paramètre U_{max} désigne une valeur limite de la commande que l'algorithme doit éviter de dépasser. La fonction coût Ψ est remplacée par la fonction coût Γ :

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

où $\mathbf{u}(k) = (u_1(k) u_2(k) \dots u_{N_s}(k))^T$ désigne le vecteur des commandes à la fréquence k et $\mathbf{u} = \{\mathbf{u}(k), k \in B_s\}$ l'ensemble des commandes. Deux jeux de pondération w_i^m (≥ 0) et w_j^s (≥ 0) portant respectivement sur les microphones et les commandes ont été introduits.

La minimisation de la fonction coût Γ est alors réalisée par la mise en œuvre d'une méthode de gradient où la nouvelle commande $\mathbf{u}^{(n+1)}$ est calculée à partir de la dernière commande obtenue $\mathbf{u}^{(n)}$ en ajoutant un terme correctif proportionnel au gradient de Γ :

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

où $\mu^{(n)}$ désigne le coefficient de convergence.

Dans l'équation (5) le gradient peut être calculé analytiquement et mis sous forme matricielle par blocs ($k \in B_s$) :

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

avec

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

où $[a_i]$ (respectivement $[a_{ij}]$) désigne le vecteur (respectivement la matrice) de composante a_i (respectivement a_{ij}).

Une difficulté est alors de choisir le coefficient de convergence $\mu^{(n)}$. Une estimation de sa valeur optimale (méthode du gradient à pas optimal [14]) est déterminée à chaque itération en cherchant la valeur de μ qui minimise la fonction réelle $\gamma(\mu)$ définie par

$$\gamma(\mu) = \Gamma(\mathbf{u}^{(n)}) - \mu \frac{\partial \Gamma(\mathbf{u}^{(n)})}{\partial \mathbf{u}} \quad (8)$$

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

Paramétrage

L'algorithme de minimisation présenté ci-dessus ne nécessite donc intrinsèquement qu'un point de départ, pris en pratique à $\mathbf{u} = \mathbf{0}$. Par contre la définition du critère à minimiser (4) met plusieurs paramètres à la disposition de l'opérateur ; leur rôle est donc décrit rapidement ci-après.

La valeur de P_{moy} est une donnée du problème. La valeur de U_{max} est imposée par les contraintes matérielles de l'installation. La pondération w_i^m joue un rôle mineur ici, car l'objectif est d'obtenir une pression uniforme sur tous les microphones. Ainsi l'algorithme d'égalisation n'est finalement paramétré que via son terme de pénalisation dans la fonction coût à savoir le coefficient λ , la puissance N , et la pondération w_j^s .

Une contrainte très significative liée à la nature du moyen d'essais est que les sources ne sont que très peu surdimensionnées [1], 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 $u_j(k)$ pour $j = 1, \dots, N_s$ auraient des niveaux trop différents. Cette contrainte est gérée par une recherche de solution en plusieurs phases, chacune correspondant à un réglage différent des paramètres :

- 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 $u_j^{B_s}$ à des valeurs acceptables (voisines de l'unité).
- La pondération w_j^s permet alors de focaliser l'algorithme sur les sources nécessitant les plus fortes commandes, pour les réduire à un niveau inférieur à l'unité. À ce stade, l'augmentation de la puissance N peut être utilisée pour faire tendre l'algorithme vers un critère « min-max ».

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.

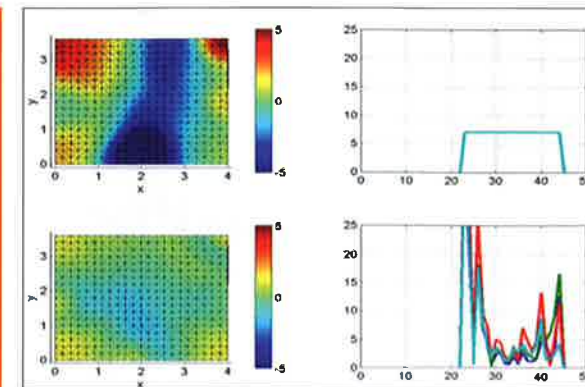


Fig. 11 : Principe de l'égalisation BF (simulation)

La figure 11 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 spectres des commandes envoyées aux sources. Les figures du haut correspondent au cas sans égalisation : les 4 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. 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.

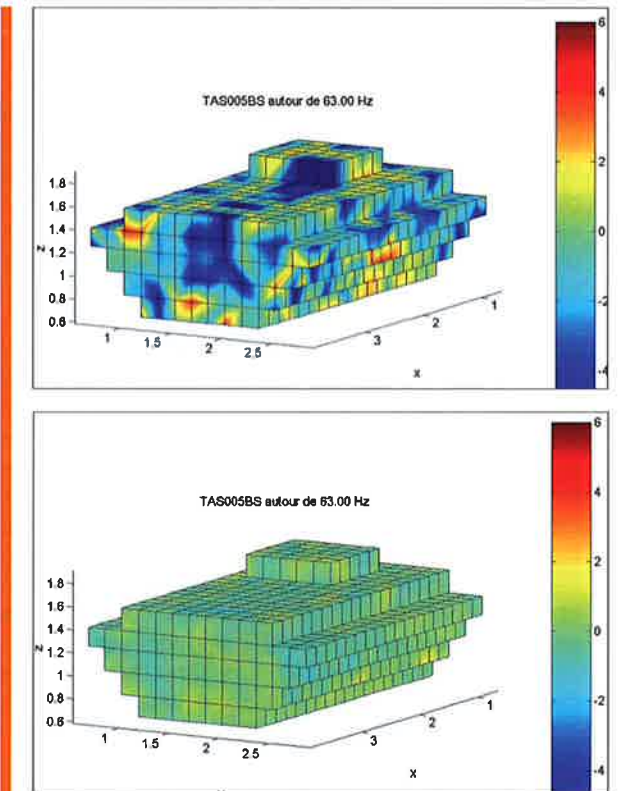


Fig. 12 : Simulations du champ acoustique sur le satellite : sans (a) et avec (b) égalisation de l'octave 63 Hz

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 12 représente un exemple de pression calculée sur un maillage grossier d'une forme de satellite insérée dans le modèle, pour l'octave 63 Hz, dans le cas où les sources correspondantes sont pilotées toutes avec les mêmes signaux (figure 12-haut) ou avec les signaux égalisés (figure 12-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 les essais est donc le relevé des pressions sur les microphones.

Égalisation 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.

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 (actuateurs et pavillons) pour trois sous-bandes : deux demi-octaves 250 Hz, une octave 500 Hz. Ceci permet d'en 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. Les sources sont pilotées par des signaux différenciés 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 4 secondes 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.

Un exemple d'une telle sommation est illustré par la figure 13, 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 pour la combinaison de N sources.

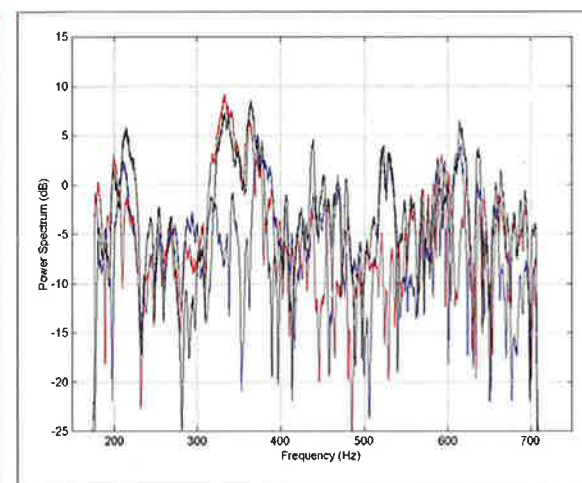


Fig. 13 : Mesure de 2 sources aux "MF" : S1 seule (rouge), S2 seule (bleu) et combinaison (noir)

Cette relation a été vérifiée expérimentalement pour différentes combinaisons de sources, et s'est parfois même révélée trop 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 14, le spectre résultant de la sommation de signaux décorrélés est plus homogène spectralement, et l'égalisation spatiale est également facilitée.

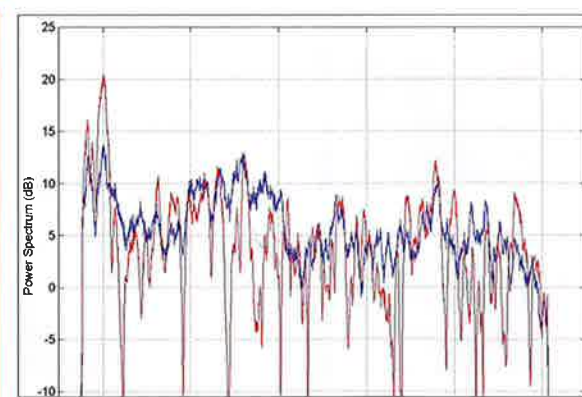


Fig. 14 : Mesure de 8 sources aux "MF" : 1 signal commun (rouge) ou 8 signaux décorrélés (bleu)

Dans un premier temps, les signaux alimentant les sources "MF" sont donc simplement des bruits décorrélés, dont le spectre est filtré à -3 dB/octave (bruit "rose") et limité aux bandes prédéfinies (demi-octaves 250 Hz ou octave 500 Hz). Une pré-égalisation globale de ces spectres ou un réglage des niveaux relatifs des sources ont été envisagés mais les performances obtenues ayant été considérées satisfaisantes il n'a pas été donné suite.

Performances sur site

La figure 15 montre la cabine lors de son assemblage et des essais de mise au point au Mans.



Fig. 15 : Intérieur de la cabine et système d'excitation

Deux résultats obtenus avec le moyen d'essais après son assemblage à Rome sont présentés. L'effet de l'égalisation effectuée dans les bandes "BF" est illustré Figure 16. 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 63 Hz. Pour cette octave, 12 sources sont réparties sur les surfaces actives de la cabine.

La carte du haut (Figure 16) illustre le cas où les sources sont alimentées par un même spectre uniforme. L'écart de pression entre les différents microphones dépasse alors 11 dB, une valeur inacceptable pour l'exploitant de la cabine. La carte du bas (Figure 16) représente les pressions obtenues pour une même valeur efficace des signaux envoyés aux sources, mais avec des spectres résultant de l'algorithme décrit au § Égalisation BF (page 10). Les fluctuations de pressions entre microphones sont alors réduites à un peu plus de 2 dB, et sont alors conformes aux attentes.

L'effet de l'égalisation dans les bandes "MF" est illustré Figure 17. L'octave 250 Hz (gérée en deux sous-bandes) est considérée et seul l'effet résultant est présenté. Pour cette octave, 36 sources sont réparties sur la surface active de la cabine (16 pour la demi-octave basse, 20 pour l'autre).

La carte du haut (Figure 17) 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 9 dB, illustrant que la cabine ne se comporte pas du tout comme une chambre réverbérante.

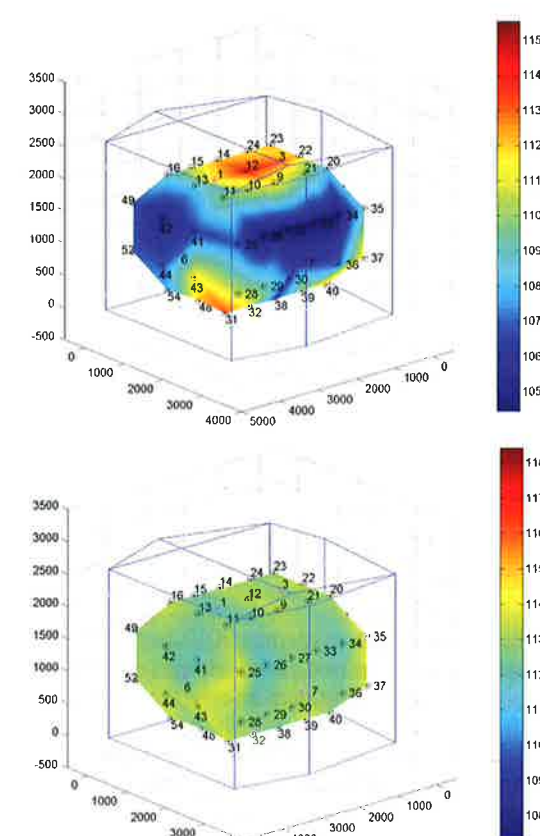


Fig. 16 : Mesures du niveau acoustique relevé sur les microphones en moyenne sur l'octave 63 Hz

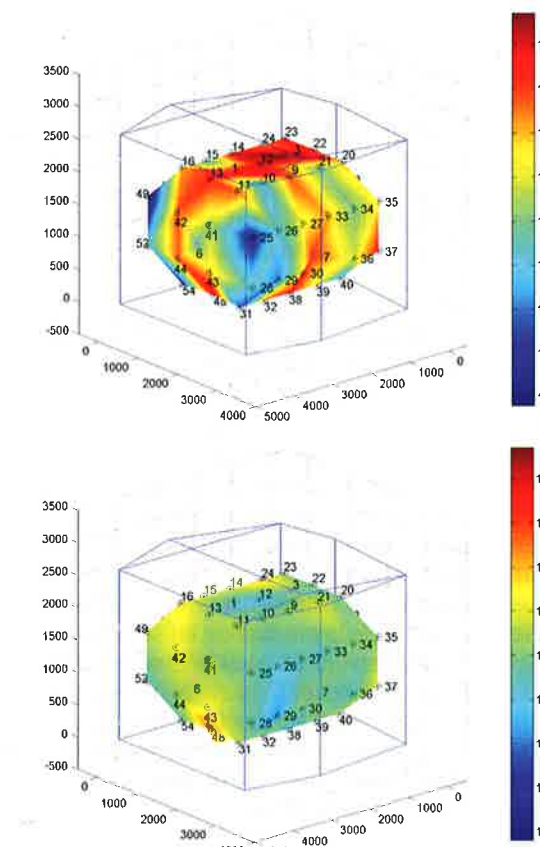


Fig. 17 : Mesures du niveau acoustique relevé sur les microphones en moyenne sur l'octave 250 Hz

La carte du bas (Figure 17, page précédente) représente les pressions obtenues pour un même contenu spectral des signaux envoyés aux sources MF, mais en utilisant 18 signaux décorrélés (phases pseudo-aléatoires, un signal pour 2 sources) comme décrit au § Égalisation MF (page 12). Les fluctuations de pressions entre microphones sont alors réduites à un peu plus de 5 dB, ce qui reste un peu trop élevé, mais a été jugé acceptable car une part significative de cet écart (≈ 1 dB) est imputable à un microphone placé sous le satellite.

Ces deux résultats, obtenus d'après des fonctions de transfert mesurées, illustrent le potentiel des deux méthodes utilisées pour égaliser les gammes de fréquences "BF" et "MF". Les calculs correspondants étant effectués hors ligne, ils n'impactent pas le contrôle temps réel ou sa fiabilité.

Conclusion

Mise en service au printemps 2010, la cabine a permis de tester avec succès plus de 40 satellites ou sous-ensembles aujourd'hui en exploitation en orbite.

Les techniques mises en œuvre ont permis de produire un environnement sonore suffisamment proche de celui des moyens classiques, à la fois en termes d'homogénéité spatiale et de spectre, pour permettre un référentiel commun, la grande chambre réverbérante étant utilisée pour l'essai de qualification sur les premiers de série, et la cabine pour tous les essais de réception.

Le niveau de bruit est en effet une limite inhérente à la conception, il est impossible d'atteindre des niveaux plus élevés que 143 dB global, principalement à cause des sources moyennes fréquences : le « gain » de bruit apporté par chaque module supplémentaire est consommé par son absorption caractéristique. En dépit du vif intérêt pour cette possibilité, il n'est actuellement pas envisageable d'utiliser la cabine pour les essais de qualification.

Une autre limite inhérente à la conception de la cabine est aussi un de ses principaux avantages : les dimensions des satellites continuent d'augmenter à chaque nouvelle génération, et le moyen d'essais sera bientôt trop petit pour accueillir les futurs satellites. Une extension a bien été prévue, mais dans la direction longitudinale uniquement.

En comparaison avec le moyen d'essai classique, des atouts déterminants en termes de flux de production sont apportés par l'utilisation d'une solution électrodynamique. Lors de la production en série d'une constellation la répétabilité et l'extrême stabilité du champ acoustique permettent de simplifier grandement le travail d'analyse, d'identifier facilement les comportements atypiques, et de fluidifier la séquence d'essais, d'autant plus lorsqu'une base de données d'essais significative a pu être établie.

De plus la maintenance est quasiment inexistante, et l'opérabilité simplifiée permet à un seul opérateur de conduire l'essai.

Remerciements

Les auteurs remercient chaleureusement Alain Rouet, Cédric Pinède, Muriel Winniger et Marc Pachebat du CNRS-LMA, les personnels de la société Thalès Alenia Space (sites de Cannes et de Rome), de la société Ingélicance Altep Ingénierie (sites d'Angoulême, de Grenoble et de Bordeaux), et de la société Active Audio (Saint Nazaire).

Références bibliographiques

- [1] M. Rossi, *Électroacoustique*, Presses polytechniques romandes, Lausanne, 1986
- [2] M. H. Knudsen and J. G. Jensen, Low-Frequency Loudspeaker Models that Include Suspension Creep, *J. Audio Eng. Soc.*, 41 (1/2), pp 3-18, 1993
- [3] W. M. Leach, Loudspeaker Voice-Coil Inductance Losses: Circuit Models, Parameter Estimation, and Effect on Frequency Response, *J. Audio Eng. Soc.*, 50 (6), pp 442-450, 2002
- [4] J.C. Le Roux, *Le Haut-parleur Électrodynamique : Estimation des Paramètres Électroacoustiques aux Basses Fréquences et Modélisation de la Suspension*, Thèse de Doctorat de l'Université du Maine, Le Mans, 1994
- [5] R.H. Small, Vented-Box Loudspeaker System Analysis--Part I: Small-Signal Analysis; Part II: Large-Signal Analysis; Part III: Synthesis; Part IV: Appendices, *J. Audio Eng. Soc.*, 21 (5) pp 363-372; 21(6) pp 438-444; 21(7) pp 549-554; 21(8) pp 635-639, 1973
- [6] P. Herzog and M. Bruneau, Shape perturbation and inertial mode coupling in cavities, *J. Acoust. Soc. Am.* 86 (6), pp 2377-2384, 1989
- [7] W. Klippel, Tutorial: Loudspeaker Nonlinearities—Causes, Parameters, Symptoms, *J. Audio Eng. Soc.*, 54 (10), pp 907-939, 2006
- [8] M.R. Gander, Dynamic Linearity and Power Compression in Moving-Coil Loudspeakers, *J. Audio Eng. Soc.* 34 (9), pp 627-646, 1986
- [9] P.J. Chapman, Thermal Simulation of Loudspeakers, 104th Convention of the Audio Eng. Soc., preprint 4669, 1998
- [10] R. Mariani, F. Mazerolle, B. Cochelin, P. Herzog, P.-O. Mattei et S. Bellizzi, Vers l'utilisation d'un haut-parleur comme absorbeur acoustique en basse fréquence, Actes du 10e Congrès Français d'Acoustique, Lyon, 2010
- [11] J. Backman, The Nonlinear Behaviour of Reflex Ports, 98th Convention of the Audio Eng. Soc., preprint 3999, 1995
- [12] "J. Vandekeoy, Nonlinearities in Loudspeaker Ports, 104th Convention of the Audio Eng. Soc., preprint 4748, 1998
- [13] J.C. Valière, F. Kerhervé et Ph. Herzog, Non linéarités générées au niveau des events d'enceintes, Actes du 6e Congrès Français d'Acoustique, R76, pp268-271, 2002
- [14] P.G. Ciarlet, Introduction à l'analyse numérique matricielle et à l'optimisation, Dunod, 2007