

**CFA '18 LE HAVRE ■ 23-27 avril 2018**  
**14<sup>ème</sup> Congrès Français d'Acoustique**



**CarmenCita : la petite sœur de Carmen**

J. Jagla, P. Chervin et J. Martin  
CSTB, 24 rue Joseph Fourier, 38400 Saint Martin D'Hères, France  
[jan.jagla@cstb.fr](mailto:jan.jagla@cstb.fr)

L'objectif d'un système électroacoustique d'assistance à la réverbération est de transformer une salle de spectacle adaptée au spectacle parlé en un lieu polyvalent pouvant accueillir tout type de représentation dans des conditions acoustiques optimales. Il y a près de 20 ans le CSTB a développé le système Carmen. Carmen est basé sur le principe de murs virtuels : les cellules Carmen placées dans les murs et les plafonds de la salle permettent de modifier l'absorption et le volume apparents de la salle. En raison du grand nombre de cellules Carmen (généralement plus de 30) nécessaires pour augmenter de manière homogène la durée de réverbération d'une salle, Carmen n'est pas adapté aux petites et moyennes salles de spectacle. Cette limitation a motivé le développement d'un nouveau système appelé CarmenCita. CarmenCita utilise moins de cellules (8 à 16) mais intègre une matrice de réverbération spécifiquement développée pour cette application permettant d'obtenir une large gamme de configurations acoustiques. Par ailleurs, pour accompagner l'essor des expériences immersives proposées par les spectacles contemporains, CarmenCita dispose également de fonctionnalités de diffusion spatialisée.

## 1 Introduction

Chaque type de représentation musicale nécessite une acoustique particulière pour être pleinement appréciée par les spectateurs mais aussi pour permettre aux artistes d'exprimer leurs talents dans les meilleures conditions [1]. Le théâtre nécessite de l'intelligibilité afin que les messages parlés soient parfaitement compréhensibles pour les spectateurs. Ceci se traduit en termes d'indicateurs acoustiques par une clarté/définition importante et une faible durée de réverbération. A l'opposé, un concert symphonique sera plus apprécié par les spectateurs s'ils se sentent enveloppés par la musique et si chaque note est soutenue par l'acoustique de la salle. Une telle acoustique se caractérise notamment par une énergie latérale renforcée et une durée de réverbération plus longue. Entre ces deux extrêmes, l'opéra requiert une réverbération modérée pour soutenir l'orchestre sans détériorer la compréhension des voix chantées. Ainsi, l'unique solution permettant à une salle de spectacle d'être réellement polyvalente est la variabilité acoustique [2]. La variabilité peut être obtenue de manière passive (avec des panneaux acoustiques pivotants ou amovibles permettant de varier l'aire d'absorption équivalente de la salle) ou de manière active à l'aide d'un système électroacoustique [3]. La Figure 1 présente les durées de réverbération généralement préconisées pour différents types de représentations. Une salle polyvalente devra donc permettre de varier la durée de réverbération d'environ une seconde pour le théâtre à plus de deux secondes pour la musique symphonique.

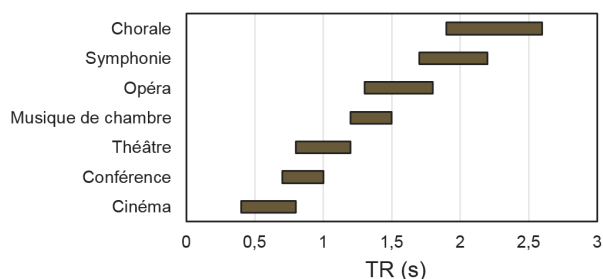


FIGURE 1 – Durées de réverbération généralement préconisées pour différents types de représentations.

Le système Carmen ainsi qu'un certain nombre de systèmes concurrents tels que AFC, Lares, SIAP ou Constellation permettent d'apporter ce type de variabilité à des salles prestigieuses de grandes dimensions mais restent souvent inaccessibles financièrement à des salles plus modestes. L'ambition du système CarmenCita est de démocratiser le recours à l'acoustique variable pour les

petites et moyennes salles de spectacle.

Cet article présente dans une première partie le principe et les fonctionnalités de CarmenCita. La procédure de réglage automatisée permettant au système de s'adapter à chaque géométrie de salle est décrite dans une seconde partie. Enfin, une troisième partie présente l'installation CarmenCita dans l'espace de démonstration du CSTB ainsi que les mesures acoustiques associées.

## 2 Principe et fonctionnalités

### 2.1 Fonctionnement

Un système d'assistance à la réverbération (SAR) utilise un ensemble de microphones et d'enceintes reliés à un processeur de traitement numérique afin de capter les signaux sonores dans la salle, appliquer un traitement spécifique puis les ré-émettre en temps réel par les enceintes. Il existe deux types de SAR : les systèmes dits "in-line" ou non-régénératifs et les systèmes régénératifs [4]. Les systèmes non-régénératifs captent les signaux à proximité de la scène, ajoutent un effet de réverbération puis par un matricage électronique redistribuent ces signaux dans l'ensemble du volume via les enceintes. Ces systèmes sont en général très stables mais sont très sensibles au placement et à l'orientation des microphones et sont inefficaces pour les sources sonores situées en dehors de la scène. Les systèmes régénératifs captent les signaux dans le volume de la salle et les ré-émettent dans le même volume. Un système régénératif imite donc plus fidèlement les principes de la propagation acoustique naturelle mais nécessite des méthodes avancées permettant de limiter les problèmes de coloration et de stabilité dus aux rebouclages acoustiques entre les microphones et les enceintes.

CarmenCita est un SAR régénératif. Un schéma de principe est présenté Figure 2. Il est composé de huit à seize cellules électroacoustiques. Chaque cellule contient un haut-parleur amplifié et huit contiennent également un microphone (voir Figure 3). Ces cellules sont reliées au processeur principal qui implémente l'ensemble du traitement nécessaire au fonctionnement du système. Le processeur est contrôlé par une tablette tactile de commande permettant un contrôle en salle ou en régie du système.

Le traitement réalisé par le processeur est représenté de manière simplifiée Figure 4. Une matrice de réverbération électronique spécifiquement développée pour cette application traite les huit signaux captés par les microphones afin de leur ajouter la réverbération souhaitée et les matricer vers les canaux de sortie. Afin d'assurer la stabilité du système et contrôler l'équilibre spectral de la réverbération,

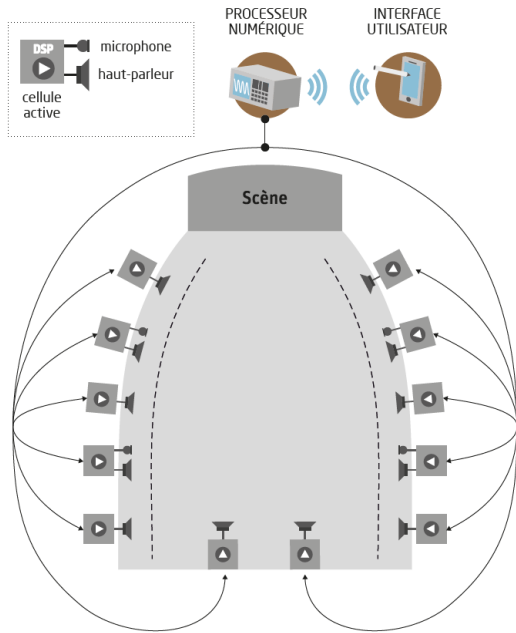


FIGURE 2 – Schéma d'installation de CarmenCita



FIGURE 3 – La cellule active CarmenCita

un ensemble de filtres paramétriques et de gains sont utilisés en sortie. CarmenCita étant régénératif, l'ensemble des signaux émis par les haut-parleurs du système sont soumis à l'acoustique naturelle de la salle avant d'être captés à nouveau par les microphones du système.

Afin d'exploiter pleinement les possibilités du matériel installé, CarmenCita dispose également de fonctionnalités de diffusion multicanal spatialisées. Ces fonctionnalités permettent notamment d'utiliser CarmenCita pour la création d'ambiances sonores immersives nécessitant ou non une modification des caractéristiques acoustiques de la salle.

## 2.2 Réverbération matricée

Dans le cas d'un système à 16 cellules avec 8 microphones, la matrice de réverbération est une matrice 8x16 composée de filtres réverbérants spécifiques dont les caractéristiques sont ajustées pour chaque configuration acoustique souhaitée (musique de chambre, opéra, musique symphonique, etc.). Le paramétrage des filtres réverbérants permet de fixer la forme de la courbe de réverbération en fonction de la fréquence. Ce paramétrage est une étape délicate puisque CarmenCita est un système régénératif, il faut donc anticiper l'apport du matriçage acoustique entre les cellules pour obtenir le rendu final souhaité. Chaque canal de sortie de la matrice dispose d'un gain ( $g$ ) permettant de régler le niveau de diffusion de chaque cellule et assurer l'homogénéité du champ sonore diffusé, ainsi que d'un banc de filtres paramétriques ( $eq$ ) calibré par la procédure de réglage automatique assurant d'une part la stabilité du système mais surtout l'absence de coloration. Un banc de filtres paramétriques global ( $EQ$ ) permet le réglage de l'équilibre spectral de la réverbération, ces filtres sont utilisés lors du réglage final pour ajouter de la rondeur dans le grave ou de la brillance à la demande de l'utilisateur. La procédure de réglage du système est détaillée dans la troisième partie de cet article.

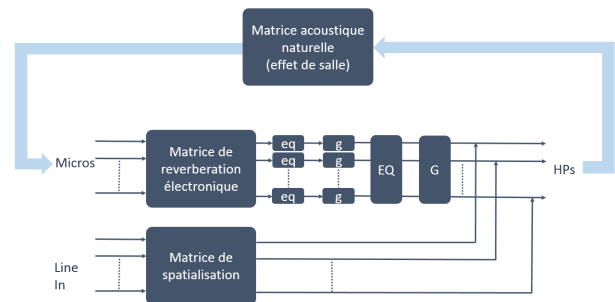


FIGURE 4 – Schéma de fonctionnement du système CarmenCita

## 2.3 Diffusion multicanal spatialisée

Afin de s'adapter aux programmations contemporaines et élargir les possibilités d'utilisation, CarmenCita intègre une matrice de spatialisation basée sur le VBAP (Vector Base Amplitude Panning [5]). Des entrées lignes sont ainsi disponibles afin d'émettre tout signal sonore de manière spatialisée sur les cellules du système. L'interface de commande des fonctionnalités de diffusion est présentée Figure 5. Cette interface déployée sur une tablette tactile permet notamment le déplacement en temps réel des sources sonores et la sauvegarde de dispositions de sources dans différents presets.

## 3 Procédure de réglage

### 3.1 Principe

La première étape du réglage consiste à fixer les gains  $g$  de chaque cellule afin d'assurer l'homogénéité du champ sonore diffusé par le système. Dans un deuxième temps, les filtres paramétriques ( $eq$ ) permettant d'assurer la stabilité du système sont définis. Afin de raccourcir au maximum le temps nécessaire au réglage du système, une procédure automatisée a été développée pour cette étape. Cette procédure consiste à exciter l'acoustique de la salle avec une source omnidirectionnelle émettant un bruit blanc

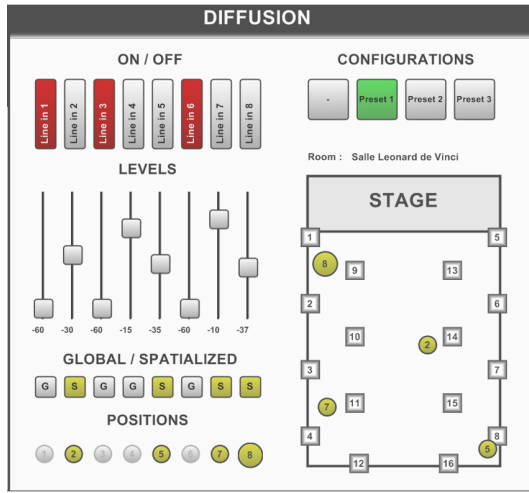


FIGURE 5 – Interface de contrôle de la spatialisation

puis à supprimer les émergences fréquentielles dues aux rebouclages entre les microphones et les haut-parleurs au fur et à mesure que l'on augmente le gain global du système (**G**). Cette procédure itérative est détaillée Figure 6.

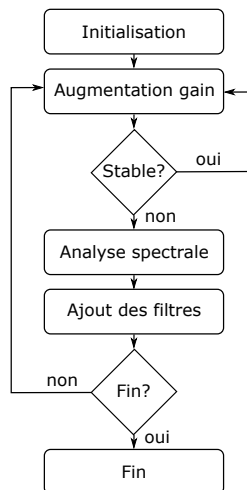


FIGURE 6 – Principe du réglage automatisé

L'initialisation consiste à fixer le gain **G** de manière à placer le système en limite de stabilité. Le gain **G** est incrémenté par pas  $\Delta G$  jusqu'à instabilité. Lorsque l'instabilité est détectée, une acquisition des signaux captés par les huit microphones du système est effectuée avant de désactiver le système pour protéger le matériel. Une analyse spectrale des huit signaux acquis permet d'estimer le ou les filtres paramétriques permettant de supprimer l'émergence constatée. Cette étape est répétée jusqu'à ce que le critère de convergence soit atteint. La méthode de calcul des filtres paramétriques ainsi que le critère de convergence de cette méthode itérative sont décrits dans les deux sections suivantes.

## 3.2 Calcul des filtres paramétriques

Dans un premier temps, les transformées de Fourier discrètes des huit signaux microphones acquis durant l'instabilité provoquée sont calculées. La moyenne des huit spectres est également calculée afin de déterminer la ou les fréquences émergentes à traiter. La Figure 7 montre un

exemple de spectre moyen calculé et illustre la méthode de sélection des fréquences à traiter.

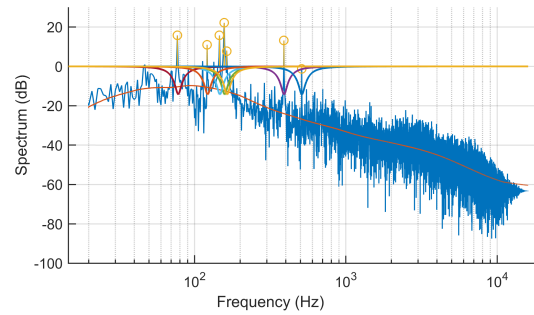


FIGURE 7 – Spectre moyen des huit signaux acquis par les microphones lors de l'instabilité (bleu), spectre moyen lissé (courbe rouge), fréquences émergentes identifiées (cercles oranges). Les positions des filtres paramétriques sont également schématisées.

Le spectre moyen est lissé (courbe rouge) et les émergences les plus importantes par rapport au spectre lissé sont identifiées (cercles orange). Des filtres paramétriques centrés sur ces fréquences seront appliqués au système. Il n'est pas pertinent d'appliquer le filtrage paramétrique estimé sur l'ensemble des cellules car seules certaines cellules sont responsables d'une instabilité. Les huit spectres des signaux acquis par les microphones sont utilisés pour localiser spatialement les émergences identifiées. En pratique, pour chaque fréquence émergente identifiée, les signaux acquis par les huit microphones seront classés en fonction du niveau de l'émergence. Le filtre paramétrique correspondant sera alors appliqué uniquement aux cellules proches du microphone ayant enregistré le plus fort niveau d'émergence à la fréquence considérée.

Afin d'accélérer la procédure de réglage et limiter le nombre de filtres nécessaires, différentes optimisations ont été apportées. Lorsque les mêmes fréquences émergentes sont identifiées à différentes itérations de l'algorithme, l'atténuation du filtre paramétrique concerné est renforcée au lieu d'implémenter un filtre paramétrique supplémentaire. De plus, deux seuils de détection différents sont utilisés pour identifier les fréquences émergentes dans le spectre moyen. Cette différenciation permet de moduler l'atténuation des filtres paramétriques en fonction du niveau de l'émergence identifiée.

L'avantage d'une telle méthode de réglage est qu'elle s'adapte automatiquement à la disposition des cellules et à la géométrie de la salle. Les colorations dues au maillage électronique et acoustique sont supprimées de manière itérative et les imperfections existantes de la salle sont masquées petit à petit par la réverbération ajoutée.

## 3.3 Convergence

La condition d'arrêt de cette procédure itérative est basée sur l'évolution du gain **G**. Lorsque celui-ci atteint une valeur asymptotique, l'algorithme est arrêté. Cette condition d'arrêt est pertinente tant que l'atténuation résultante des filtres paramétriques reste négligeable devant l'énergie apportée par l'augmentation du gain global **G**. Cette condition a été vérifiée dans le cadre du réglage d'un système CarmenCita. Une évolution typique du gain global du système durant la procédure de réglage est présentée Figure 8.



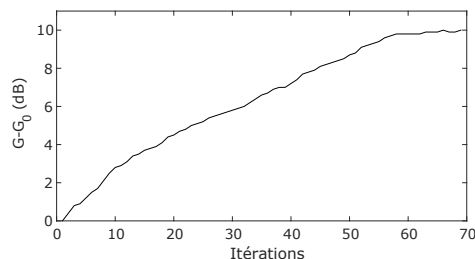


FIGURE 8 – Évolution du gain  $G-G_0$  durant la procédure de réglage ( $G_0$  étant le gain à l'initialisation).

L'atténuation de chaque filtre paramétrique est volontairement choisie faible de manière à filtrer uniquement l'énergie responsable de l'instabilité quitte à incrémenter cette atténuation aux itérations suivantes. Ceci implique qu'à chaque itération, le nombre de fréquences émergentes sera plus important, les nouvelles fréquences émergentes s'ajoutant à celles précédemment traitées. Lorsque le nombre maximal de filtres est atteint sur une ou plusieurs cellules, l'algorithme ne peut plus augmenter le gain global et converge.

Une fois la convergence atteinte, le système se trouve en limite de stabilité comme lors de l'initialisation mais avec un gain global environ 10 dB plus haut. Ce gain est ensuite abaissé de 10 à 12 dB afin d'obtenir une marge de stabilité suffisante et surtout réduire au maximum les effets de coloration spectrale.

## 4 Le système de démonstration

### 4.1 Dimensionnement et installation

Un système de démonstration a été installé au CSTB de Paris dans une salle de réunion de 150 m<sup>2</sup> et 750 m<sup>3</sup>. La salle est traitée acoustiquement avec des matériaux absorbants en fond de scène et en fond de salle. Des baffles acoustiques suspendus réduisent également la durée de réverbération naturelle de la salle pour la fixer à 0.7 seconde aux fréquences moyennes.

Seize cellules CarmenCita ont été installées dans la salle de manière à assurer une acoustique homogène et fournir un maillage adéquat pour les fonctionnalités de diffusion spatialisée :

- Quatre cellules sur chaque mur latéral.
- Six cellules au plafond.
- Deux cellules en fond de salle.

La Figure 9 montre une visualisation 3D de la salle de démonstration.



FIGURE 9 – Visualisation 3D de la salle de démonstration

Pour chaque configuration acoustique souhaitée, la

matrice de réverbération a été pré-calibrée puis la procédure de réglage automatique a été mise en œuvre. Un réglage fin de chaque configuration a été réalisé sur la base de mesures acoustiques intermédiaires et d'écoutes subjectives afin d'obtenir des réponses acoustiques équilibrées et adaptées à chaque type de représentation. Cinq configurations acoustiques ont ainsi été réglées :

- Preset 1 : Musique de chambre (TR  $\approx$  1.3s)
- Preset 2 : Opéra (TR  $\approx$  1.7s)
- Preset 3 : Symphonie classique (TR  $\approx$  2.0s)
- Preset 4 : Symphonie romantique (TR  $\approx$  2.5s)
- Preset 5 : Cathédrale (TR  $\approx$  5.3s)

Les quatre premières configurations correspondent à des réglages pouvant être utilisés pour des représentations musicales classiques, la cinquième pourrait être adaptée à de la chorale mais correspond plutôt à une configuration maximale qui illustre l'étendue de la plage de variabilité acoustique accessible avec le système.

### 4.2 Mesures acoustiques

Afin de chiffrer les performances des différentes configurations en termes d'indicateurs acoustiques, une série de mesures a été effectuée avec une source omnidirectionnelle placée sur l'estrade et trois récepteurs placés en différentes positions dans la salle. Les résultats pour quatre indicateurs sont présentés :

- Figure 10 : Durée de réverbération précoce, EDT
- Figure 11 : Durée de réverbération, TR<sub>20</sub>
- Figure 12 : Clarté, C<sub>80</sub>
- Figure 13 : Augmentation de la force sonore induite par le système,  $\Delta L$

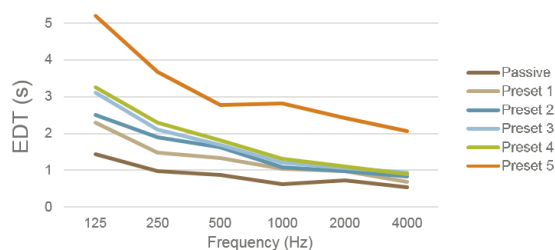


FIGURE 10 – Durée de réverbération précoce, EDT(s)

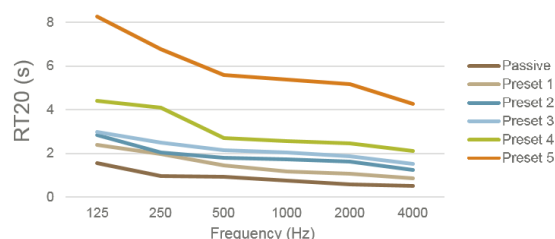


FIGURE 11 – Durée de réverbération TR<sub>20</sub>(s)

Le TR<sub>20</sub> et l'EDT sont ajustés pour chaque configuration de manière à apporter un peu de chaleur aux représentations musicales avec des durées plus importantes dans le grave que dans l'aigu. L'EDT est inférieur au TR<sub>20</sub> car le niveau des premières réflexions est naturellement important dans la salle et que les distances entre la source et les récepteurs sont faibles [6]. Les écoutes subjectives ont montré qu'augmenter

le niveau de la réverbération tardive afin d'équilibrer l'EDT et le  $TR_{20}$  dans cette salle n'est pas perçu comme naturel compte tenu de faibles dimensions de celle-ci.

Les valeurs de  $C_{80}$  mesurées sont supérieures aux valeurs généralement mesurées dans des salles de spectacle de durée de réverbération équivalente. Ceci est dû au volume restreint de la salle et aux parois latérales réfléchissantes qui rendent le champ direct et les premières réflexions très présents naturellement.

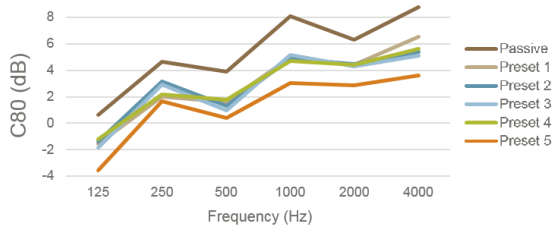


FIGURE 12 – Clarté,  $C_{80}$ (dB)

L'augmentation du niveau sonore induite par le système est relativement homogène sur les bande d'octaves 125 Hz à 4 kHz et ne dépasse pas 4 dB pour les configurations 1 à 4. Augmenter la durée de réverbération avec un SAR, augmente forcément le niveau sonore perçu dans la salle car des contributions acoustiques sont ajoutées. L'objectif d'un système d'assistance à la réverbération régénératif est de contrôler cette augmentation pour offrir assez de réverbération tardive sans trop amplifier le bruit de fond naturellement présent dans la salle.

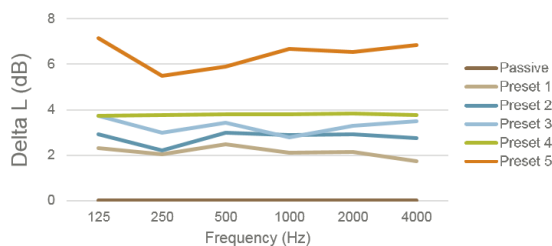


FIGURE 13 – Augmentation de niveau sonore,  $\Delta L$ (dB)

### 4.3 Avantages de la procédure de réglage automatisée

La Figure 9 montre des surfaces vitrées réfléchissantes parallèles sur les deux murs latéraux de la salle de démonstration. La largeur de la salle est de 10 m, ce défaut de conception ne se traduit donc pas par un écho flottant mais plutôt par une sonorité très métallique de la réponse de la salle lorsque l'on place une source entre les surfaces vitrées.

La procédure de réglage décrite section 3 présente l'avantage de prendre en compte automatiquement l'acoustique naturelle de la salle et de n'apporter de l'énergie que là où la salle en manque naturellement. En d'autres termes, les émergences fréquentielles naturelles dues aux réflexions successives entre les parois vitrées ne sont pas amplifiées par CarmenCita car elles sont détectées par l'algorithme de réglage automatique et atténuées en sortie de la matrice de réverbération électronique. Ainsi, dès lors que la durée de réverbération fixée par le système CarmenCita est plus grande que le temps de décroissance

des réflexions successives entre les parois vitrées, la sonorité métallique qui en résulte n'est plus audible. CarmenCita peut ainsi masquer certains défauts de conception acoustiques grâce à son adaptation automatique aux caractéristiques acoustiques naturelles de la salle.

## 5 Conclusion

Le recours aux systèmes d'assistance à la réverbération est une pratique relativement marginale pour l'acoustique des salles de spectacle. Les causes de cette tendance sont multiples. L'utilisation de microphones et de haut-parleurs pour modifier l'acoustique d'un espace suffit parfois pour qualifier les performances acoustiques obtenues d'artificielles ou de non naturelles. Cependant les performances de calcul des processeurs et le réalisme des algorithmes utilisés aujourd'hui par les SAR sont tels qu'il devient très difficile de faire la différence entre une acoustique active et une acoustique passive. Le coût d'un SAR demeure alors le frein principal à l'expansion de cette technologie.

CarmenCita est un SAR régénératif développé pour les petites et moyennes salles de spectacle. Il a été conçu de manière à limiter au maximum les coûts matériels, d'installation, de réglage et de maintenance. Il permet grâce à 16 cellules electroacoustiques de varier les caractéristiques d'une salle pour s'adapter à chaque représentation et de créer des ambiances sonores immersives pour les représentations contemporaines.

Le couplage entre les réflexions naturelles de la salle, le matricage acoustique entre les cellules et le matricage électronique implémenté dans le processeur CarmenCita permet de créer une acoustique homogène grâce à une procédure de réglage itérative automatisée basée sur la détection et le filtrage d'émergences fréquentielles. Cette procédure offre également l'avantage de pouvoir masquer certains défauts de conception de la salle.

## Références

- [1] L. Beranek, *Concert halls and opera houses : Music, Acoustics and Architecture*, Chap. 1, Springer (2004).
- [2] M.A. Poletti, Active Acoustic Systems for the Control of Room Acoustics *Proceedings of the International Symposium on Room Acoustics*, Melbourne, Australia (2010).
- [3] M. Asselineau, Acoustique active et acoustique passive : Approches complémentaires ou opposées? *10ème Congrès Français d'Acoustique*, Lyon, France (2010)
- [4] O. Warusfel, J. Blauert, D. Wessel, Synopsis of Reverberation Enhancement Systems, *Forum Acusticum*, Seville, Espagne (2002).
- [5] V. Pulkki, Virtual Sound Source Positioning Using Vector Base Amplitude Panning, *Journal of Audio Engineering Society*, **Vol. 45**, No. 6 (1997).
- [6] M. Barron, Interpretations of Early Decay Times in Concert Auditoria, *Acustica*, **Vol. 81** (1995).