

# Efficacité acoustique précoce : un nouveau critère architectural pour l'acoustique des salles de concert symphoniques

**Yann Jurkiewicz,  
Eckhard Kahle**  
Kahle Acoustics  
188, avenue Molière  
1059 Bruxelles  
Belgique  
<http://www.kahle.be>

## Résumé

Dans le cadre du programme acoustique pour le concours de maîtrise d'œuvre de la Philharmonie de Paris qui s'est déroulé en début d'année 2007, un nouveau paramètre acoustique a été développé. Avec une capacité de 2 400 places et une scène placée au centre de l'auditoire dans une configuration enveloppante, la nouvelle salle sera à la limite haute des dimensions considérées comme idéales pour la musique symphonique, et une conception acoustique efficace est donc attendue. Une étude de plusieurs salles de concert existantes a permis de développer un paramètre d'efficacité acoustique précoce destiné à corrélérer un concept architectural de salle de concert à son efficacité acoustique. Pour la salle de concert de la Philharmonie de Paris, le programme demandait à ce que soit prévu dans le concept architectural un total de 1 400 m<sup>2</sup> de surfaces capables de créer des réflexions acoustiques précoces, dont 500 m<sup>2</sup> se situant à moins de 15 m de la scène. Une autre définition plus précise exprime le paramètre d'efficacité précoce en termes d'angle solide depuis une source sur scène, permettant une généralisation de ce nouveau critère à des salles de jagues différentes.

## Abstract

A new acoustic parameter has been defined for the acoustic brief of the Philharmonie de Paris Concert Hall. With a seating capacity of 2400 and the audience enveloping the performers on all sides, the new hall will be at the upper limit of the ideal range for symphonic music, and an efficient acoustic design was called for. In order to relate architectural design to acoustic efficiency, and based on quantitative study of existing halls, an early efficiency parameter was developed. For the Paris Philharmonie the brief requested a total area of 1400 m<sup>2</sup> of surfaces being able to create early reflections, with 500 m<sup>2</sup> being less than 15 meters from the stage. Another, more accurate definition expresses the early efficiency parameter in terms of the solid angle for a source on stage, allowing generalization of the new criterion for all hall sizes.

## Définition d'un critère architectural pour l'efficacité précoce

### Pourquoi un critère architectural pour l'efficacité précoce ?

Dès l'origine du projet de la Philharmonie de Paris, les demandes du client définissaient une salle de 2 400 places avec une excellente acoustique pour le répertoire symphonique et un concept acoustique et architectural novateur. Dans le cadre du programme acoustique pour le concours de maîtrise d'œuvre, Kahle Acoustics a cherché à guider les architectes présélectionnés et leurs équipes tout en leur laissant la liberté nécessaire au développement d'un concept totalement nouveau qui remplirait les objectifs acoustiques spécifiques d'une salle de cette taille. Plutôt que de spécifier une forme architecturale précise il fut décidé, dans le cadre du programme acoustique, d'expliquer les implications architecturales de chacun des objectifs acoustiques définis, dans des termes qui soient

également compréhensibles par les architectes. Ainsi, l'acoustique ne se limite plus la créativité architecturale, mais devient une contrainte bien définie et apte à stimuler la création de nouveaux concepts architecturaux.

Dans une salle de concert avec une jauge importante, dont le volume doit être très conséquent afin d'obtenir la réverbération désirée, une conception acoustique efficace en termes de réflexions précoces est essentielle pour permettre la création d'une clarté et d'une présence sonore des sources adéquate. C'est cette idée que nous désignerons ici par le terme d'efficacité précoce. Selon des études récentes en psychoacoustique, l'audition humaine sépare l'information en deux «flux», le premier correspondant à la perception de la source sonore, le deuxième à la perception de l'espace et de l'environnement dans lequel nous nous trouvons [1, 2, 3]. En conséquence, la conception d'une grande salle de concert ne doit pas se contenter d'optimiser la force sonore globale de la salle, mais doit chercher à optimiser séparément la réponse



précoce (*efficacité précoce*, produisant la *présence sonore des sources*) et la réponse tardive (*présence sonore de la salle*).

Quel critère architectural peut-on utiliser pour quantifier cette efficacité précoce ? Les dimensions (largeur, hauteur, longueur) sont utilisées traditionnellement et fournissent certaines informations, mais elles constituent un critère probablement trop limité et mieux adapté à une forme de salle de type «boîte à chaussures» (forme générale parallélépipédique, typique des salles de concert historiques). L'obtention d'une efficacité acoustique adéquate exige qu'à l'intérieur du volume de la salle une quantité suffisante de réflecteurs (ou d'autres surfaces réfléchissantes intégrées à l'architecture) soit disposée à proximité de l'orchestre et/ou de chaque zone de l'auditoire, et que ces surfaces soient orientées de façon à créer des réflexions précoces (arrivant moins de 80 ms après le son direct). En comparaison d'une salle de 1 600 places, une salle de 2 400 places nécessite qu'un volume plus grand soit créé pour permettre le développement du champ tardif. La conservation d'une bonne présence sonore des sources dans une salle de 2 400 places requiert que ce volume réverbérant supplémentaire soit créé en conservant toujours une quantité suffisante de surfaces acoustiquement efficaces proches des musiciens et des spectateurs. Ces considérations peuvent amener à considérer un design de type «vignoble» (forme de salle de concert dans laquelle l'auditoire est disposé en terrasses ; la première salle de ce type étant la Philharmonie de Berlin), un design de type «chambre réverbérante» (dans lequel un grand volume extérieur très réverbérant est couplé au volume principal de la salle via des portes à ouverture réglable) ou à d'autres concepts dans lesquels les réflecteurs sont inclus dans le volume acoustique total de la salle.



Photo 1 : Philharmonie de Berlin, Allemagne - Photo : Terrence Tourangeau  
Berlin Philharmonie, Germany - Photo : Terrence Tourangeau

Le programme acoustique pour la Philharmonie de Paris définit d'autres critères architecturaux, d'autres paramètres subjectifs et objectifs importants, et des recommandations sont fournies sur la manière de résoudre chacun des principaux objectifs acoustiques [4, 5]. L'efficacité précoce

n'est qu'un aspect parmi de nombreux autres objectifs acoustiques pour la conception d'une grande salle de concert. L'étude présentée dans cet article se concentre sur cet aspect.

### $S_{EE}$ : Surfaces acoustiquement efficaces

Un nouveau critère architectural a été développé dans le but de corrélérer une forme architecturale à son efficacité acoustique en termes de réflexions précoces. Ce critère peut être déterminé directement à partir des plans et coupes de la salle et est simplement défini comme l'aire totale des «surfaces acoustiquement efficaces»  $S_i$  ( $i = 1..N$ ) présentes dans la salle :

$$S_{EE} [m^2] = \sum_{i=1}^N S_i \quad (1)$$

Les surfaces acoustiquement efficaces sont définies comme les surfaces réfléchissantes situées à moins de 15 m des sources et/ou de l'auditoire, et dont l'orientation permet la création de réflexions vers l'auditoire ou de retour vers les musiciens. Il est entendu que ces réflexions peuvent être de premier ordre ou d'un ordre supérieur.

Lors du calcul du paramètre d'efficacité précoce, les surfaces suivantes sont à considérer :

- Les réflecteurs acoustiques suspendus au plafond au-dessus de la scène, ou à l'intérieur du volume de la salle.
- Les fronts de balcon, tant qu'ils sont «efficaces» dans le sens expliqué plus haut.
- Les portions de mur acoustiquement efficaces. Les parties situées derrière un rang de spectateurs ne sont bien sûr pas à prendre en compte.
- Les sous-faces de balcons, lorsqu'elles génèrent des réflexions précoces vers la scène ou l'auditoire. Ces réflexions sont habituellement de deuxième ordre.
- Le plafond de la salle, lorsqu'une partie de l'auditoire est située à moins de 15 m du plafond, et uniquement la zone du plafond efficace dans le sens défini plus haut.

Cette définition simple de l'efficacité précoce, basée sur une aire totale de réflecteurs, comporte évidemment des limitations. Tout d'abord, la limite des 15 m peut sembler arbitraire. Ensuite, la valeur appropriée de  $S_{EE}$  pour une salle de concert donnée dépendra

probablement de la taille de la salle et de sa jauge. Elle pourra sans doute également dépendre du type de musique jouée : certains concerts de musique de chambre exigent probablement davantage « d'efficacité » qu'une symphonie romantique. Par ailleurs ce paramètre, de par



sa définition, ne permet pas d'évaluer l'uniformité de la couverture en énergie précoce. C'est au concepteur de s'assurer que chaque zone d'auditoire, ainsi que la scène, est suffisamment fournie en réflexions. Pour finir, toutes les surfaces ne sont pas aussi efficaces suivant leur distance aux sources et aux récepteurs et suivant leurs caractéristiques en absorption, diffusion et diffraction (courbure, diffraction par les bords...). Cependant, il faut garder à l'esprit que ce paramètre d'efficacité précoce doit rester aussi simple d'utilisation que possible : pour guider efficacement le développement initial d'un concept de salle, il doit pouvoir être calculé rapidement, y compris par les architectes.

#### $\Omega_{EE}$ : une version basée sur les angles solides

Une autre définition du paramètre d'efficacité précoce a été développée afin de tenir compte de la quantité d'énergie effectivement reçue par chacune des surfaces acoustiquement efficaces. D'un point de vue géométrique, l'énergie produite par une source omnidirectionnelle reçue par une surface  $i$  est proportionnelle à l'angle solide  $\Omega_i$  sous lequel cette surface est vue depuis le point source.

La fraction d'énergie produite par la source omnidirectionnelle parvenant sur cette surface est donnée par :

$$\Omega'_i [\%] = \frac{\Omega_i}{4\pi} \quad (2)$$

La somme de ces fractions pour toutes les surfaces acoustiquement efficaces est ainsi représentative de la proportion d'énergie réfléchie vers l'auditoire ou la scène, et contribuant à la réponse précoce.

Cependant, les angles solides ne sont pas aisés à évaluer à partir de plans et coupes, et il nous faut donc envisager une simplification. Pour une surface plane  $S$  relativement éloignée de la source sonore ( $S \ll d^2$   $d$  étant la distance du centre de la surface à un point au centre de la scène) et dont la normale est de direction similaire à celle de l'onde incidente, l'approximation suivante est valable :

$$\Omega'_i [\%] \approx \frac{S_i}{4\pi \cdot d_i^2} \quad (3)$$

L'approximation  $S \ll d^2$  crée généralement une légère surestimation pour des surfaces de grandes dimensions. L'erreur reste inférieure à 10% tant que  $S < 0,40d^2$  ; elle dépasse 50% à partir de  $S > 2,13d^2$ , ce qui peut être à l'origine d'imprécisions sérieuses dans le calcul. Les surfaces de grandes dimensions à proximité de la scène doivent alors être divisées en plusieurs parties, chacune à une distance différente du centre de la scène, faute de quoi le paramètre sera artificiellement surestimé. Afin de garantir une erreur  $< 10\%$ , un fractionnement approprié des grandes surfaces devra être réalisé de façon à limiter le facteur  $S_i/(4\pi d_i^2)$  à une valeur maximale de 3% pour chaque surface individuelle.

Pour des surfaces insuffisamment fractionnées, le fait d'utiliser la valeur limite de 3% au lieu du facteur  $S_i/(4\pi d_i^2)$  amène à une sous-estimation généralement moins sévère

que la surestimation qui serait causée par l'utilisation de  $S_i/(4\pi d_i^2)$ . Ainsi, une alternative raisonnable pour simplifier le calcul consiste à définir un «plafond» à 3% pour le facteur  $S_i/(4\pi d_i^2)$  de chaque surface considérée individuellement. Ceci permettra d'éviter un fractionnement trop poussé des surfaces de grandes dimensions.

Les fractions d'angles solides pour chaque surface individuelle sont également surestimées chaque fois que la surface n'est pas normale à la direction de l'onde incidente, ce qui en réalité est très souvent le cas. Cependant, une prise en compte de l'angle d'incidence n'a pas été considérée pour la définition du critère d'efficacité précoce car le calcul en deviendrait significativement plus compliqué en pratique.

La définition mathématique du paramètre d'efficacité précoce basé sur les angles solides est finalement la suivante :

$$\Omega_{EE} [\%] \approx \sum_{i=1}^N \max \left( \frac{S_i}{4\pi \cdot d_i^2}; 3\% \right) \quad (4)$$

Il est à noter que cette définition adopte par convention l'hypothèse d'un sol de scène absorbant. Etant donné la proximité des sources par rapport au sol de scène, l'ensemble des surfaces efficaces ne peut se trouver que dans un demi-espace (correspondant à un angle solide de  $2\pi$  et non  $4\pi$ ). De ce fait, si l'on adopte une convention opposée dans laquelle le sol de scène est supposé réfléchissant, il faut doubler la contribution de chaque surface ce qui revient à remplacer le facteur  $4\pi$  de la formule (4) par un facteur  $2\pi$ .

### Etude quantitative des critères d'efficacité précoce dans plusieurs salles de concert existantes

#### Le choix des salles de référence

De façon à confirmer la validité des deux définitions du critère d'efficacité précoce, et afin de déterminer une «valeur cible» pour une salle telle que la Philharmonie de Paris, ces paramètres ont été calculés pour une sélection de grandes salles de concert existantes, de formes architecturales différentes. Les 7 salles de référence choisies sont listées dans le tableau 1 ci-après.

Les sept salles choisies ont toutes une jauge relativement importante, entre 1 890 places à Lucerne et 2 660 places à Christchurch. A l'exception de deux «boîtes à chaussures» historiques (Amsterdam et Boston) et de deux salles «en vignoble» (Berlin et Sapporo), elles ont chacune une forme générale différente. Leur volume s'étend entre 18 750 m<sup>3</sup> pour Boston et 28 880 m<sup>3</sup> pour Sapporo.

Le Concertgebouw d'Amsterdam est connu pour la richesse de son acoustique et sa clarté relativement faible, tandis que les salles de Lucerne et de Christchurch sont connues pour une grande clarté et une forte présence sonore des sources. Cette sélection de salles de concert devrait



	Date	Jauge	Volume (m <sup>3</sup> )	Forme générale
Amsterdam (NL) Concertgebouw	1888	2040	18 780 [6]	Boîte à chaussures
Boston (USA) Symphony Hall	1900	2620	18 750 [6]	Boîte à chaussures
Berlin (D) Philharmonie	1963	2340	21 000 [6]	Vignoble
Christchurch (NZ) Town Hall	1972	2660	20 500 [6]	Enveloppant, elliptique
Manchester (GB) Bridgewater Hall	1996	2360	25 000 [6]	Boîte à chaussures/ vignoble
Sapporo (JPN) Kitara Hall	1997	2010	28 800 [6]	Vignoble
Lucerne (CH) KKL Concert Hall	1998	1890	19 000 à 25 400	Boîte à chaussures + chambres de réverbération

Tabl. 1 : Les 7 salles de référence choisies  
The seven chosen reference halls



Photo 3 : Salle de concert de Christchurch, Nouvelle Zélande  
Christchurch Town Hall, New Zealand



Photo 4 : Concertgebouw d'Amsterdam, Pays-Bas,  
Photo : K. Panasupon  
Amsterdam Concertgebouw, the Netherlands,  
Photo : K. Panasupon



Photo 2 : Salle de concert du KKL à Lucerne, Suisse  
KKL concert hall in Luzern, Switzerland

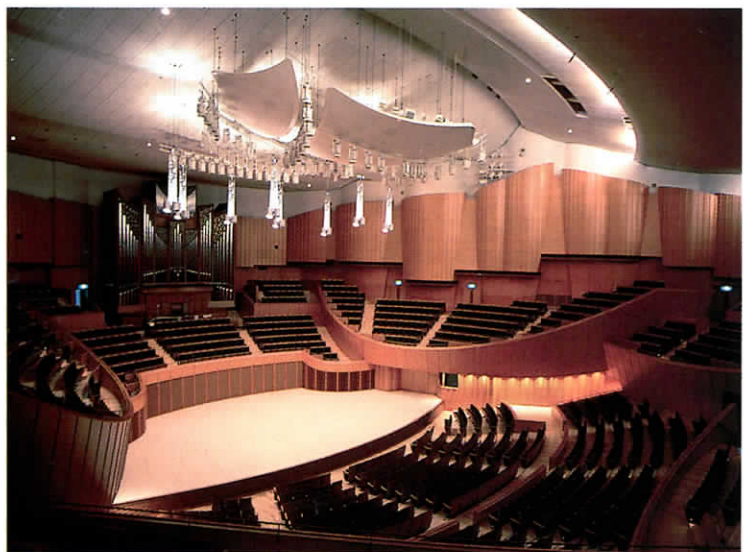


Photo 5 : Kitara Hall à Sapporo, Japon © Nagata  
Kitara Hall in Sapporo, Japan © Nagata



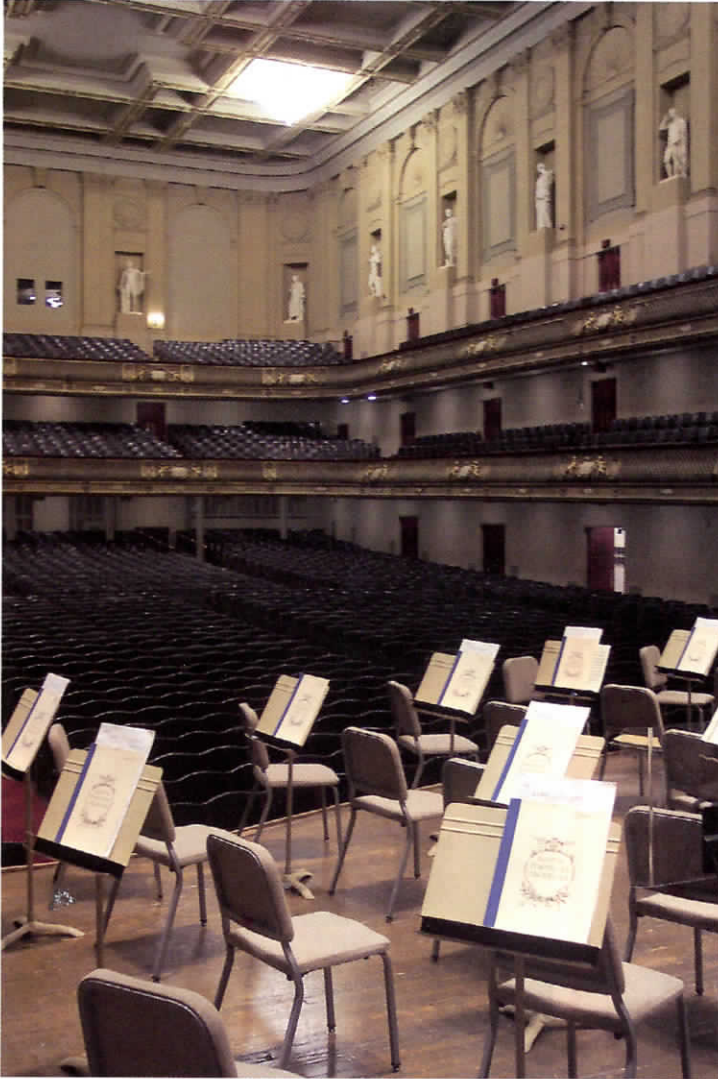


Photo 6 : Salle Symphonique de Boston, Etats Unis,  
Photo : Ben Carlisle  
Boston Symphony Hall, U.S., Photo: Ben Carlisle

donc s'avérer représentative des différentes conceptions possibles d'une grande salle de concert.

Les deux valeurs de volume fournies pour la salle de Lucerne correspondent respectivement à un réglage dans lequel toutes les portes des chambres de réverbération sont en position fermée, et à n'importe quel autre réglage pour lequel les chambres de réverbération sont ouvertes et incluses dans le volume total de la salle.

#### Résultats obtenus

Les paramètres  $S_{EE}$  et  $\Omega_{EE}$  ont été calculés pour chacune des sept salles de référence. Pour la salle de Lucerne, deux réglages extrêmes ont été considérés, représentatifs de la plage disponible dans les réglages acoustiques : le premier avec les chambres de réverbération entièrement ouvertes et le second avec les chambres de réverbération fermées en totalité.

Tous les paramètres ont été calculés à partir des plans et coupes fournies dans [6]. Il est probable que ces calculs ne soient pas d'une précision parfaite, les plans et coupes en question étant reproduits à une petite échelle, et les coupes courtes n'étant généralement pas fournies. Un calcul à partir de plans informatiques ou de reproductions à plus grande échelle permettrait certainement de limiter les imprécisions de calcul. Dans le cadre de cette étude cependant, l'objectif était de démontrer la possibilité d'évaluer les critères d'efficacité précoce avec une précision suffisante, même à partir de plans ou de croquis simples.

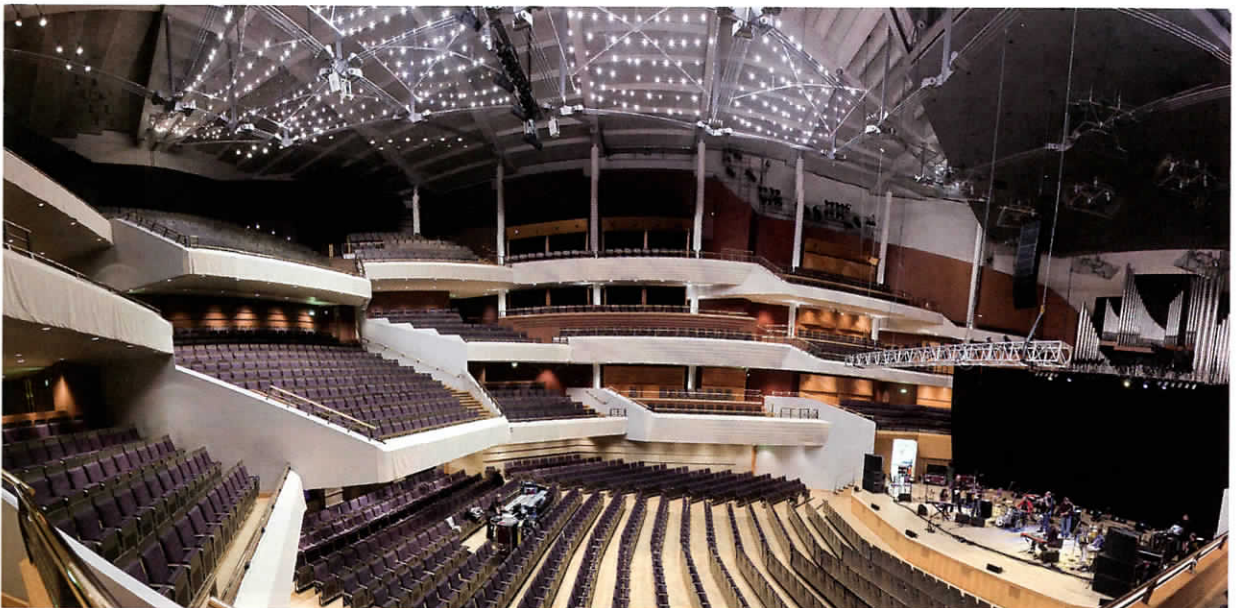


Photo 7 : Bridgewater Hall à Manchester, Angleterre, Photo: Laura Conerney  
Bridgewater Hall in Manchester, England, Photo: Laura Conerney



Les résultats obtenus sont listés dans le tableau 2, accompagnés par des paramètres acoustiques traditionnels provenant de [6]. La figure 1 est une représentation graphique de ces résultats : chacune des huit configurations testées est représentée comme un point dans le plan ( $S_{EE}$  ;  $\Omega_{EE}$ ).

	TR salle pleine (s), [6]	C80 salle vide (dB), [6]	$S_{EE}$ (m <sup>2</sup> )	$\Omega_{EE}$ (%)
Amsterdam Concertgebouw	2,0	-3,63	650	10,1
Boston Symphony Hall	1,9	-2,64	740	15,5
Berlin Philharmonie	1,9	-0,65	811	19,6
Christchurch Town Hall	-	1,60	1328	33,0
Manchester Bridgewater Hall	2,0	-1,25	1052	23,1
Sapporo Kitara Hall	1,8	0,65	717	14,5
Lucerne KKL, chambres fermées	1,8	-	1650	30,7
Lucerne KKL, chambres ouvertes	2,2	-	1165	20,2

Tabl. 2 : Valeurs de C80, TR,  $S_{EE}$  et  $\Omega_{EE}$   
C80, RT,  $S_{EE}$  and  $\Omega_{EE}$  values

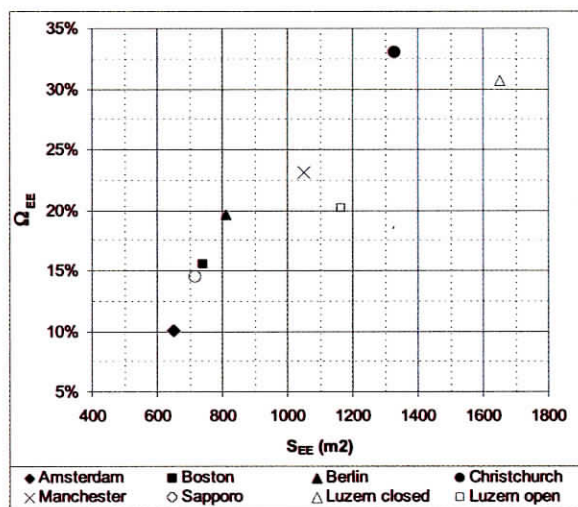


Fig. 1 : Représentation graphique des résultats obtenus, dans le plan ( $S_{EE}$  ;  $\Omega_{EE}$ )  
Graphical representation in the ( $S_{EE}$  ;  $\Omega_{EE}$ ) plane of the results obtained

Une première analyse des résultats s'avère encourageante pour la légitimité des paramètres proposés : on observe la valeur la plus faible à la fois pour  $S_{EE}$  et  $\Omega_{EE}$  pour le Concertgebouw d'Amsterdam tandis que la valeur la plus haute pour  $\Omega_{EE}$  est obtenue pour la salle de Christchurch et la valeur la plus haute pour  $S_{EE}$  pour Lucerne quand les portes de chambres réverbérantes sont fermées. Sur l'ensemble des salles, les deux paramètres semblent bien représentatifs de l'évaluation générale de l'acoustique en termes de «présence sonore des sources».

Afin de valider les deux paramètres d'efficacité précoce, l'étape suivante consiste à tester leur corrélation avec des paramètres objectifs associés aux aspects de clarté et de présence sonore des sources. C80 est probablement le choix le plus simple, car des résultats de mesure fiables peuvent être trouvés dans [6] pour la plupart des salles de concert choisies.

Cependant, il n'est pas certain que C80 soit le paramètre le plus représentatif pour tester l'efficacité acoustique précoce.  $S_{EE}$  et  $\Omega_{EE}$  ne décrivent, de part leurs définitions, que le comportement de l'énergie précoce (si l'on fait abstraction des effets secondaires sur le champ tardif tels qu'une absorption accrue du fait de l'orientation précoce d'une grande proportion d'énergie vers les zones d'auditoire), tandis que C80 dépend également du niveau du champ tardif (et n'est donc pas indépendant du volume et du temps de réverbération de la salle). En ce sens, C80 est davantage représentatif d'une balance entre la présence sonore des sources et la présence sonore de la salle.

G80, défini comme la force sonore du champ précoce, serait probablement un meilleur paramètre à tester pour une corrélation avec les paramètres d'efficacité précoce [4,5], mais des mesures fiables de ce paramètre ne sont pas disponibles dans la littérature, et seul C80 a donc été considéré ici.

C80 est représenté en fonction de  $S_{EE}$  dans la figure 2, et en fonction de  $\Omega_{EE}$  dans la figure 3. Des régressions linéaires sont également représentées.

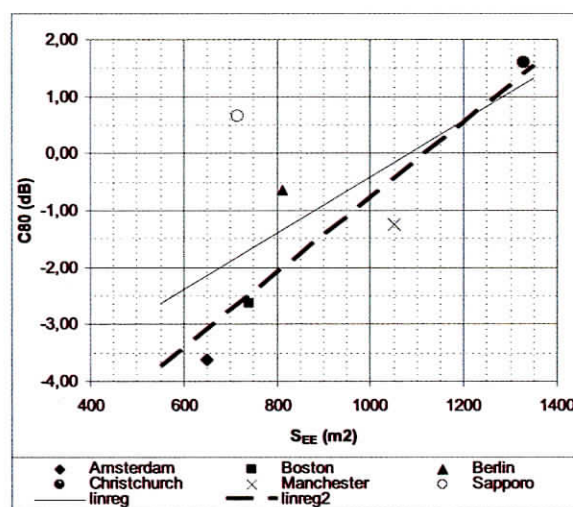


Fig. 2 : C80 en fonction de  $S_{EE}$   
C80 versus  $S_{EE}$



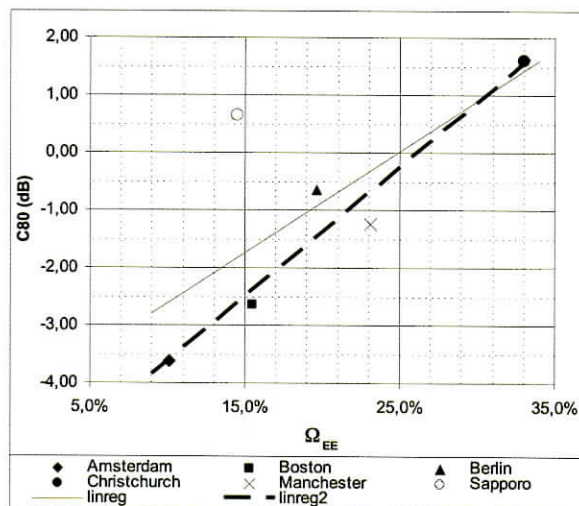


Fig. 3 : C80 en fonction d' $\Omega_{EE}$   
C80 versus  $\Omega_{EE}$

Les deux graphiques indiquent une assez bonne corrélation, seul le point correspondant au Kitara Hall de Sapporo s'écartant de l'alignement obtenu. Cet écart s'explique sans doute par le fait que C80 dépend également du niveau du champ tardif : Sapporo est la salle la plus grande en volume parmi les 6 représentées, et présente également un temps de réverbération comparativement plus court. Un simple calcul d'absorption totale à partir du temps de réverbération et du volume montre que Sapporo présente 1,55 fois plus d'absorption que la moyenne des 5 autres salles représentées, ce qui devrait conduire à un champ réverbéré sensiblement plus faible et une valeur de C80 logiquement plus élevée indépendamment de l'efficacité précoce de la salle. En utilisant la théorie traditionnelle pour l'évaluation de l'énergie réverbérée, on peut expliquer un niveau réverbéré plus faible de 1,9 dB (=  $10\log(1,55)$ ) que la moyenne des 5 autres salles, ce qui pourrait donc expliquer un C80 de l'ordre de 2 dB plus élevé à Sapporo.

L'écart entre Sapporo et les 5 autres salles perturbe les régressions linéaires. Pour cette raison, deux régressions différentes ont été testées : la première (*linreg*) tient compte des 6 salles pour lesquelles des mesures fiables de C80 étaient disponibles, tandis que la seconde (*linreg2*) ignore le point correspondant à Sapporo.

On observe que les salles présentant une plus grande quantité d'absorption présentent généralement une plus grande déviation par rapport aux régressions linéaires obtenues. Une première estimation à partir des données disponibles laisse à penser que la régression *linreg2* devrait être applicable pour les salles de concert présentant moins de ~ 2 000 m<sup>2</sup> Sabine d'absorption. Cependant, cela ne signifie pas pour autant que  $S_{EE}$  et  $\Omega_{EE}$  perdraient leur validité pour des salles présentant une plus grande quantité d'absorption : simplement, ces paramètres sont moins corrélés à C80 lorsque l'on compare des salles dont la réponse tardive est très différente. Les paramètres d'efficacité précoce restent représentatifs de l'efficacité du concept acoustique et de la présence sonore des

sources indépendamment de la réponse tardive. De plus, la possibilité d'utiliser  $S_{EE}$  et  $\Omega_{EE}$ , calculés à partir de plans ou croquis, pour prédire C80 (également à l'aide d'autres paramètres architecturaux tels que le volume et la surface totale d'audience) peut s'avérer un outil intéressant dans le processus de conception acoustique. Cette possibilité semble également confirmer que les paramètres proposés pour quantifier la perception subjective de la présence sonore des sources sont acoustiquement significatifs.

La qualité des régressions obtenues est décrite par les coefficients de détermination  $r^2$  listés dans le tableau 3 :

	<i>linreg</i> (6 salles)	<i>linreg2</i> (5 salles)
C80 en fonction de $S_{EE}$	0,43	0,82
C80 en fonction d' $\Omega_{EE}$	0,52	0,93

Tabl. 3 : Coefficients  $r^2$  pour les régressions linéaires  
 $r^2$  coefficients for the linear regressions

Sans surprise, la corrélation entre C80 et les deux nouveaux paramètres n'est pas idéale lorsque l'on considère l'ensemble des 6 salles :  $S_{EE}$ , comme  $\Omega_{EE}$ , n'explique que 50% environ des variations de C80. Mais dès lors que l'on écarte Sapporo de l'échantillon, la corrélation devient beaucoup plus forte.  $\Omega_{EE}$  apparaît plus adapté que  $S_{EE}$ , ce qui justifierait plutôt l'usage de la version basée sur les angles solides. Sur les 5 salles finalement considérées (Amsterdam, Boston, Berlin, Christchurch et Manchester),  $S_{EE}$  explique 82% des variations de C80, ce qui est encore amélioré à 93% pour  $\Omega_{EE}$ .

$\Omega_{EE}$  est également très prometteur pour ce qui est d'une généralisation du critère pour différentes tailles de salles, et différents styles musicaux. Lorsque l'on considère une salle de taille relativement plus petite,  $S_{EE}$  peut être réduit de façon à compenser le fait que les distances sont généralement plus courtes entre les sources et les surfaces efficaces.  $\Omega_{EE}$  est par contre toujours représentatif de la proportion d'énergie produite sur scène qui est dirigée précocement vers l'auditoire et les musiciens sur scène, indépendamment de toute considération d'échelle concernant la taille de la salle. On peut supposer que la valeur optimale d' $\Omega_{EE}$  dépendra du style musical et de la formation orchestrale : les symphonies romantiques nécessiteront des valeurs d' $\Omega_{EE}$  plus faibles que le répertoire classique et baroque, et les grands orchestres symphoniques nécessiteront une efficacité précoce plus faible que les orchestres de chambre et la musique de chambre. Pour un répertoire donné, conserver un  $\Omega_{EE}$  similaire dans une salle de concert plus petite, dans laquelle les distances aux sources sont plus réduites, requiert automatiquement moins de surfaces. Toutes les salles considérées dans cette étude sont de grandes salles de concert dédiées au répertoire symphonique, une généralisation des paramètres d'efficacité précoce pour différentes tailles de salles et types de concerts semble à la fois prometteuse et intéressante.





Photo 8 : Philharmonie de Paris, rendu du concours © Ateliers Jean Nouvel et ArteFactory  
Paris Philharmonie, compétition rendering © Ateliers Jean Nouvel et ArteFactory

De ce point de vue, il est intéressant de discuter davantage les deux réglages considérés pour la salle de concert de Lucerne. Les deux cas extrêmes (toutes portes ouvertes et toutes portes closes) offrent une fenêtre de réglage de  $\Omega_{EE}$  entre 20% et 30%, le paramètre d'efficacité précoce étant fortement influencé par le réglage des portes de chambres réverbérantes proches de la scène. En étudiant les réglages des chambres réverbérantes de Lucerne les plus appréciés, on observe que ces portes sont généralement placées en position plus fermée pour des petits orchestres et les concerts de musique de chambre que pour les grands orchestres symphoniques.  $\Omega_{EE}$  est donc volontairement réduit pour les grands ensembles orchestraux et le répertoire romantique tardif.

## Conclusion

Le calcul des paramètres d'efficacité précoce pour un ensemble de salles de concert existantes a permis de confirmer leur validité pour l'estimation des aspects de *présence sonore des sources* et d'*efficacité précoce* dans l'acoustique d'une salle. Les résultats indiquent une forte corrélation des paramètres d'efficacité précoce avec les impressions d'écoute dans les salles étudiées.

La corrélation des paramètres d'efficacité précoce avec C80 a également été étudiée et des coefficients de corrélation élevés ont été obtenus. Des 8 configurations initialement considérées, 5 seulement ont pu être retenues pour la régression : certaines configurations ont dû être exclues du fait de l'absence de mesures fiables de C80, d'autre du fait de l'influence du champ tardif sur C80 perturbant la corrélation. Le paramètre d'efficacité précoce n'a pas pour but de tenir compte de la réponse tardive de la salle, et l'utilisation de ce nouveau critère architectural pour prédire correctement des valeurs de C80 nécessite la prise en compte d'autres aspects architecturaux associés au niveau du champ réverbéré. Une étude sur un plus grand nombre de salles de concert serait également nécessaire pour valider de manière définitive les régressions linéaires obtenues.

L'étude a permis de mettre en évidence le potentiel intéressant et prometteur des paramètres d'efficacité précoce pour guider de manière quantitative la conception

architecturale de salles de concert, y compris pendant les premières phases de conception.

Les résultats obtenus ont été suffisamment encourageants pour que ces paramètres d'efficacité précoce soient inclus dans le programme acoustique pour le concours de maîtrise d'œuvre de la Philharmonie de Paris. Dans le contexte de ce programme, une aire totale  $S_{EE} = 1\,400\text{ m}^2$  de surfaces capable de créer des réflexions précoces a été exigée, dont 500  $\text{m}^2$  devront être à moins de 15 mètres de la scène. Une valeur d' $\Omega_{EE}$  de 24% a également été proposée comme objectif. Ces

valeurs relativement élevées ont été motivées par certains traits spécifiques à ce projet, tels que la jauge importante de 2 400 places exigée par le client, l'objectif élevé de temps de réverbération (entre 2,2 et 2,3 secondes, salle pleine) et l'importance particulière pour le public français de l'obtention d'une très bonne clarté acoustique.

Les résultats de cette étude indiquent qu'une généralisation des paramètres d'efficacité précoce, en particulier  $\Omega_{EE}$ , pour différents répertoires musicaux, formations orchestrales et tailles de salle pourrait apporter des résultats particulièrement intéressants pour la conception des salles de concert. On suppose intuitivement que chaque répertoire musical et chaque formation orchestrale est associé à une valeur optimale d' $\Omega_{EE}$  qui lui est spécifique, tandis que ces valeurs optimales devrait être sensiblement indépendantes de la taille de la salle.

## Remerciements

Nous tenons à remercier la Philharmonie de Paris pour l'opportunité qui nous a été offerte de réaliser ce travail de recherche. Davantage d'informations sur ce projet pourront être trouvées sur leur site internet : [www.philharmoniedeparis.fr](http://www.philharmoniedeparis.fr).

## Références bibliographiques

- [1] E. Kahle, "Validation d'un modèle objectif de la perception de la qualité acoustique dans un ensemble de salles de concerts et d'opéras", PhD thesis, Université du Maine, Le Mans (1995)
- [2] D. Griesinger, "The psychoacoustics of apparent source width, spaciousness & envelopment in performance spaces", *Acta Acustica* 83, 721-731 (1997)
- [3] D. Griesinger, "The Theory and Practice of Perceptual Modeling - How to use Electronic Reverberation to Add Depth and Envelopment without Reducing Clarity", Preprint from the Nov. 2000 Tonmeister conference in Hannover (2000)
- [4] E. Kahle, Y. Jurkiewicz, N. Faillet, T. Wulfrank, B. Katz, "La Philharmonie de Paris concert hall competition, part 1: Acoustic Brief". International Symposium on Room Acoustics in Seville (2007)
- [5] «Programme acoustique», rédigé à l'intention des architectes et des acousticiens, pour le concours architectural de la future Philharmonie de Paris, élaboré par Kahle Acoustics et Altia Acoustique (2006)  
"Acoustical program for the Philharmonie de Paris concert hall architectural competition" – elaborated by Kahle Acoustics and Altia Acoustique (2006). Disponible sur [www.kahle.be](http://www.kahle.be)
- [6] L.L. Beranek, "Concert Halls and Opera Houses", Springer, New York (2004)