



## **Simulation Acoustique dans des Locaux par la Méthode du Lancer de Particules Sonores : Validation à partir du Round Robin III**

P. Nussbaumer<sup>a</sup> et J. Picaut<sup>b</sup>

<sup>a</sup>CETE de l'Est - Laboratoire Régionale de Strasbourg, 11, rue Jean Mentelin, BP9, 67035 Strasbourg Cedex 2, France

<sup>b</sup>Ifsttar Nantes LAE, Route de Bouaye CS4, 44344 Bouguenais, France  
judicael.picaut@ifsttar.fr

Parmi les approches utilisées pour la modélisation en acoustique des salles, le lancer de particules sonores est une méthode alternative intéressante, mais qui a été très peu développée au détriment de méthodes plus classiques, basées par exemple sur les rayons ou les faisceaux sonores. Dans cette communication, nous montrons que la méthode du lancer de particules donne des résultats pertinents pour la modélisation en acoustique d'une salle. Cette étude est basée sur les résultats du Round Robin III en acoustique des salles, regroupant à la fois des données expérimentales sur des cas tests, et à la fois des données numériques issues de programmes de calcul (logiciels commerciaux et codes de calcul « recherche »). Sur la base de ces données, nous montrons que la méthode des particules sonores (implantée dans le code de calcul SPPS intégrée dans le logiciel I-Simpa), donne des résultats tout à fait comparables aux autres programmes de « référence ». Les différences observées, notamment avec les mesures, peuvent être attribuées à la présence de phénomènes interférentiels aux basses fréquences, à une modélisation simplifiée des phénomènes de diffusion aux parois, ainsi qu'à l'absence de prise en compte de la diffraction acoustique par certains éléments.

## 1 Introduction

L'acoustique des salles a donné lieu à un nombre considérable de travaux, notamment afin de proposer des modèles permettant de prévoir la qualité acoustique d'un lieu. Plusieurs approches ont ainsi été développées. À défaut de pouvoir proposer des solutions analytiques aux équations des ondes, en raison de la complexité des domaines étudiés, les méthodes les plus récentes proposent une approche numérique de la résolution des équations, comme la méthode des différences finies dans le domaine temporel (FDTD) [1], ou une approche physique, comme la méthode des lignes de transmission (TLM) [2]. Ces méthodes restent toutefois encore limitées en raison des ressources numériques nécessaires à leur application en moyennes et hautes fréquences, ainsi que pour des domaines de grande taille. À l'opposé, les méthodes les plus simples reposent sur des approches statistiques, telle que la théorie statistique de Sabine [3] ou l'approche de diffusion [4]. Ces dernières permettent de prévoir les grandes lignes de l'acoustique d'un lieu, sur la base de données « simplifiées » au niveau de la géométrie et des propriétés acoustiques des surfaces. Enfin, les méthodes les plus répandues et à la base de la plupart des logiciels commerciaux, reposent sur des approches géométriques et énergétiques. On citera en particulier les méthodes des rayons, cones ou faisceaux sonores, couplées en général avec des modèles de sources-images (pour la modélisation du champ précoce) et des modèles de champs réverbérés (pour la modélisation du champ tardif).

Quelques soient les méthodes utilisées, chaque approche doit donner lieu, à un moment donné de son développement, à des validations, afin de déterminer leurs domaines d'application ainsi que leurs limites. À cet effet, des procédures de comparaison et de validation (*Round Robin*) ont été proposées dans la littérature, pour des applications en acoustique des salles. L'objectif est de valider et de comparer des modèles à l'*aveugle*, sur la base de données expérimentales mesurées sur des salles réelles. Plusieurs cas d'étude ont ainsi été proposés : deux auditoriums, à travers les Round Robin I et II [5, 6] et un studio d'enregistrement, à travers le Round Robin III [7, 8].

Dans la présente étude, nous nous intéressons à la validation d'une approche géométrique et énergétique alternative, basée sur une méthode de lancer de particules sonores [9]. La méthode est implémentée dans le code SPPS développé à l'Ifsttar [10] et diffusé dans la plateforme logicielle gratuite I-Simpa ([i-simpa.ifsttar.fr](http://i-simpa.ifsttar.fr)). La validation du code est basée sur le Round Robin III.

Le code SPPS et le Round Robin sont présentés

succinctement dans la section 2. La comparaison du code SPPS avec les données expérimentales et les autres programmes informatiques est détaillée au paragraphe 3.

## 2 Présentation générale

### 2.1 Le code SPPS

Le code SPPS est basée sur une méthode de lancer de particules sonores, très proche sur le principe à la méthode du lancer de rayons sonores [11, 10]. Une fois émises dans le domaine, les particules sont suivies pas de temps par pas de temps, puis comptabilisées au niveau de récepteurs. Sur la base des historiques d'arrivée des particules sonores à ces récepteurs, il est possible de construire des échogrammes, permettant de calculer les paramètres classiques d'acoustique des salles, comme le niveau sonore, les temps de réverbération, la clarté [12]...

Avec cette méthode particulière, il est possible de modéliser un certain nombre de phénomènes physiques, soit de manière déterministe (en pondérant l'énergie de la particule en fonction des phénomènes rencontrés), soit de manière aléatoire (en supprimant la particule du domaine de propagation en fonction des phénomènes rencontrés). La seconde méthode (mode « aléatoire ») est plus rapide du fait d'une diminution progressive du nombre de particules dans le domaine ; la première méthode (mode « énergétique ») est plus précise, mais nécessite des temps de calcul plus importants. La méthode « aléatoire » est donc en général utilisée pour obtenir les grandes lignes de l'acoustique d'un lieu, tandis que la seconde méthode, « énergétique », permet d'obtenir les paramètres acoustiques avec une meilleure précision.

### 2.2 Le round Robin III

Dans le Round Robin III [7, 8], 9 programmes de calcul en acoustique des salles (CAESER, CATT, EASE, Hall Acoustics, Odeon, RAJOS, Ramsete, SAL2000 et un programme de recherche) ont été évalués et comparés les uns aux autres, sur la base de mesures réalisées dans un studio d'enregistrement (figure 1). Les tests ont été réalisés à l'*aveugle* (*i.e.* sans que les opérateurs des programmes aient connaissance des résultats expérimentaux), puis anonymés (*i.e.* les publications ne mentionnent pas explicitement le nom des programmes).

Les mesures réalisées dans le studio d'enregistrement constituent donc la référence. Ces mesures ont permis de déterminer la valeur des paramètres classiques d'acoustique

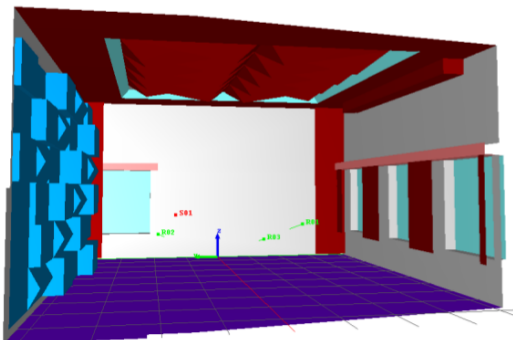


FIGURE 1 – Studio d’enregistrement (PTB) utilisé pour le Round Robin III (volume : 400 m<sup>3</sup> ; surface au sol : 78.43 m<sup>2</sup>).

des salles (Temps de réverbération TR30 et EDT, Définition D, Clarté C, Temps central Ts, Force sonore G, Énergie latérale LF et LFC) sur 6 bandes d’octave [125 Hz, 4000 Hz], conformément à la procédure définie dans la norme ISO 3382 [12] (les résultats ont été obtenus pour plusieurs positions de source et de récepteur). Par ailleurs, ces indicateurs ont été mesurés par quatre équipes différentes afin de réduire les « incertitudes » potentielles liées aux opérateurs, au matériel et au traitement utilisés. Enfin, la diffusion de paroi étant un paramètre fondamental pour l’estimation de ces indicateurs par les programmes informatiques, les caractéristiques des matériaux de la salle (coefficients d’absorption et *scattering coefficients*) ont été mesurées lorsque cela était possible.

Le studio d’enregistrement étant constitué de rideaux escamotables, deux configurations d’étude sont proposées : rideaux ouverts (RO) et rideaux fermés (RF).

Concrètement, la procédure proposée dans le Round Robin III se divise en trois phases. La phase 1 nécessite de modéliser une géométrie très simplifiée du studio d’enregistrement afin de vérifier la cohérence des résultats entre les programmes (sans comparaison avec les données expérimentales). Dans les phases 2 et 3, le studio d’enregistrement est complètement modélisé par les programmes. La différence entre ces deux phases repose sur la manière de modéliser la diffusion des parois diffusantes (un mur et le plafond) : dans la phase 2, les diffuseurs sont géométriquement modélisés sous la forme d’un plan, la diffusion étant introduite à travers les *scattering coefficients* mesurés ; dans la phase 3, les diffuseurs sont modélisés avec leur géométrie réelle, complétés par des *scattering coefficients* « réduits » (fixés à 0.2).

Pour synthétiser les nombreux résultats obtenus, le Round Robin III introduit l’*erreur perceptible*  $e_p$ , qui permet de comparer l’écart entre un résultat  $S$  et une solution de référence  $S_0$  (i.e. écarts entre les programmes ou écart entre un programme et les données expérimentales) avec un indice lié à la sensibilité de la perception humaine  $i_p$  (tableau 1), définie par :

$$e_p = \frac{|S - S_0|}{|i_p|}. \quad (1)$$

Les indices  $i_p$  servent, avant tout, à normaliser les erreurs et permettent la comparaison des différents indicateurs acoustiques. Par ailleurs, même si la « modélisation » est très grossière (un seul indice pour l’ensemble des bandes d’octave), ces indices cherchent à décrire la limite de perception humaine d’une différence. Ainsi un écart peut

Indicateur acoustique	Indice subjectif
TR30	0.05 s
EDT	0.05 s
D	5%
C	1 dB
Ts	10 ms
G	1 dB
LF, LFC	5%

TABEAU 1 – Indices de perception humaine pour chaque indicateur acoustique.

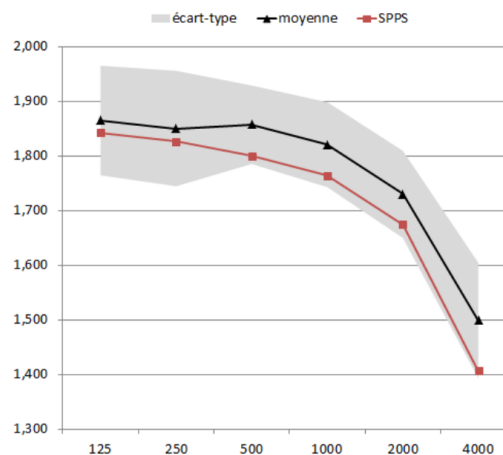


FIGURE 2 – Résultats de la phase 1 pour le TR30 en fonction de la fréquence (position S1R1). Les notations SiRj correspondent aux couples Source  $i$  et Récepteur  $j$

être jugé « acceptable » si l’erreur perceptible est proche ou inférieure à 1.

### 3 Validation du code

Les résultats issus du code SPPS ont été obtenus pour cinq millions de particules, avec un pas de temps de 0.01 s sur une durée de 2 s, en mode « énergétique ».

#### 3.1 Résultats de la phase 1

La solution de référence est choisie comme la moyenne des résultats des autres programmes (rappel : il n’y a pas de données expérimentales pour cette phase préliminaire). L’article de référence [7] montre que les valeurs obtenues par les autres programmes sont globalement assez proches. Les écarts existants entre les programmes ne peuvent être totalement imputés au comportement des programmes mais peuvent aussi être liés à l’opérateur. En effet, les travaux réalisés dans le cadre du Round Robin III montrent que des résultats différents ont été trouvés par différents opérateurs, utilisant un même programme.

Le nombre de résultats étant très important, nous ne présentons ici que quelques résultats représentatifs, en particulier concernant les temps de réverbération.

Les résultats montrent que le temps de réverbération TR30 (figure 2) diminue avec la fréquence car l’absorption atmosphérique augmente avec la fréquence (dans la phase 1, le coefficient d’absorption des parois est identique quelque

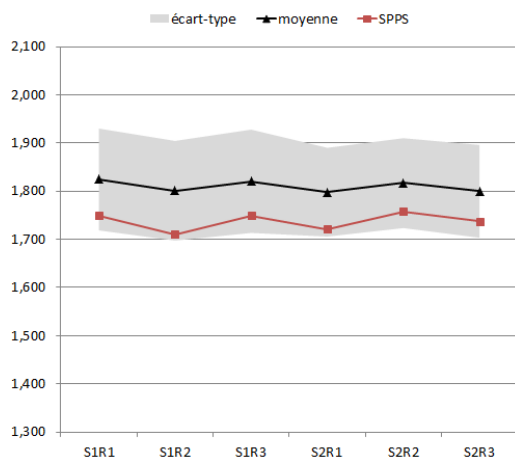


FIGURE 3 – Résultats de la phase 1 pour l'EDT en fonction de la position (1 kHz).

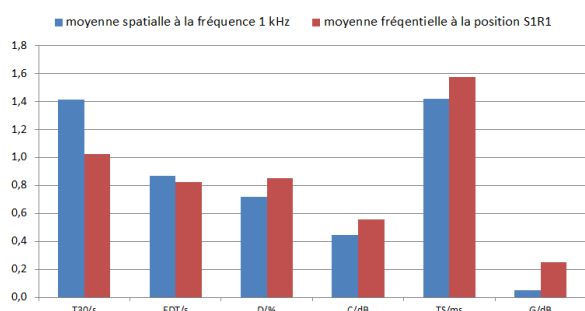


FIGURE 4 – Erreurs perceptives des différents indicateurs, pour la phase 1.

soit la bande d'octave). Le temps de réverbération simulé par le code SPPS est situé à la limite inférieure de l'écart-type des valeurs de référence, mais l'écart avec la moyenne des valeurs (0.05 s environ) reste acceptable. Cet écart augmente légèrement lorsque la fréquence augmente (0.02 s à la bande d'octave 125 Hz et 0.09 s à 4 kHz).

Étant donné que l'EDT est plus sensible à la distance source-récepteur, le temps de réverbération précoce EDT est représenté pour différents couples source-récepteur (figure 3). Comme pour le TR30, la courbe de l'EDT est dans la partie basse du nuage des valeurs, mais l'écart à la moyenne est acceptable : 0.08 s en moyenne (valeur qui augmente avec la fréquence : 0.02 s à 125 Hz et 0.09 s à 4 kHz).

La figure 4 synthétise l'ensemble des résultats de la phase 1 en représentant la moyenne spatiale (moyenne sur toutes les positions de mesure) et fréquentielle (moyenne sur les bandes de fréquence pour un couple source-récepteur) de l'erreur perceptible  $e_p$  définie plus haut. Pour l'ensemble des indicateurs, les résultats sont corrects, puisque globalement inférieurs à 1. Les indicateurs temporels (TR30, EDT et Ts) présentent des erreurs perceptibles plus importantes que pour les indicateurs énergétiques (D, C et G).

Pour conclure, l'ensemble des résultats obtenus pour cette première phase, semble montrer que le code SPPS est globalement validé pour la phase 1 du Round Robin III.

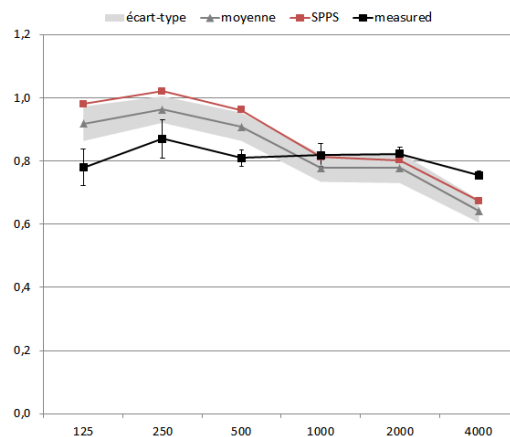


FIGURE 5 – Résultats de la phase 2 pour le TR30, en fonction de la fréquence (S1R3, RF).

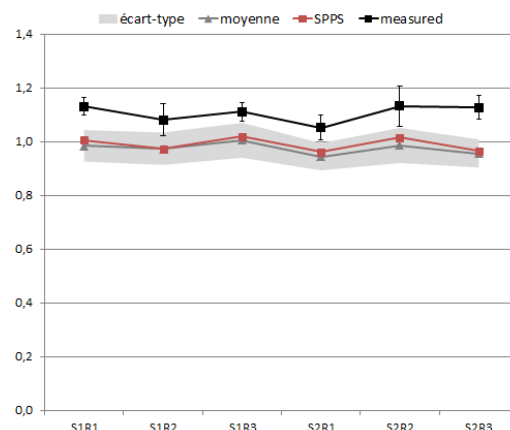


FIGURE 6 – Résultats de la phase 2 pour l'EDT, en fonction de la position (1 kHz, RO).

## 3.2 Résultats des phases 2 et 3

Les résultats des phases 2 et 3 étant très proches, seuls les résultats de la phase 2 sont présentés dans cette section.

### 3.2.1 Indicateurs de réverbération TR30 et EDT

Pour résumer les résultats obtenus au niveau des deux indicateurs de réverbération, les figures 5 et 6 présentent respectivement le temps de réverbération TR30 en fonction de la bande d'octave et l'EDT en fonction de la position. De manière générale, les résultats obtenus par le code SPPS sont proches des valeurs des autres programmes. Par contre, que ce soit pour les autres programmes ou pour le code SPPS, l'écart avec les mesures est assez important. Une explication possible serait la présence de phénomènes interférentiels, pour les fréquences les plus basses, qui ne sont pas modélisés par les approches testées.

En complément, on peut observer que l'écart entre les résultats du TR30 issus du code SPPS et ceux des autres programmes (figure 5) est plus important que l'écart obtenu pour l'EDT (figure 6). Il est possible que le champ tardif modélisé par le code SPPS soit légèrement surestimé par rapport aux autres programmes.

Enfin, l'incidence des rideaux semble bien pris en compte par le code SPPS, puisque les indices de réverbération sont globalement plus faibles pour la configuration RF (la salle

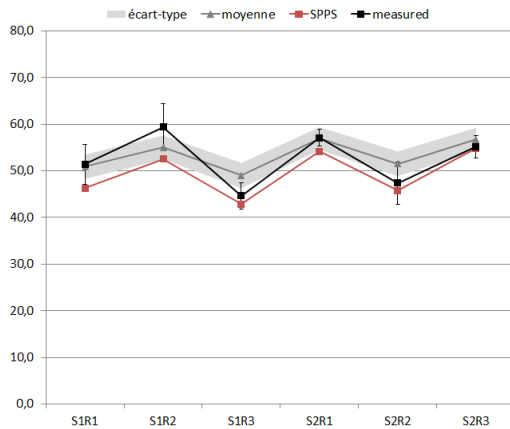


FIGURE 7 – Résultats de la phase 2 pour les indicateurs de précision : D en fonction de la position (1 kHz, RO).

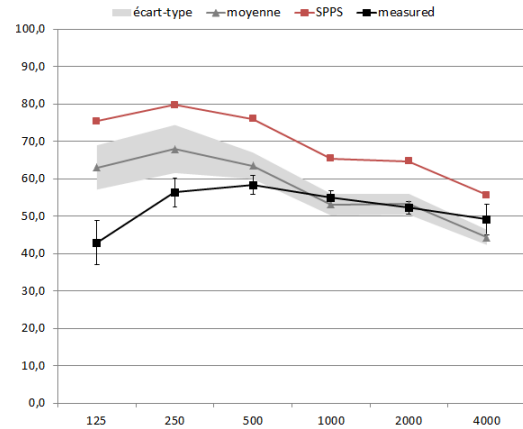


FIGURE 9 – Résultats de la phase 2 pour les indicateurs de précision : Ts en fonction de la fréquence (S1R1, RF).



FIGURE 8 – Résultats de la phase 2 pour les indicateurs de précision : C en fonction de la position (1 kHz, RF).

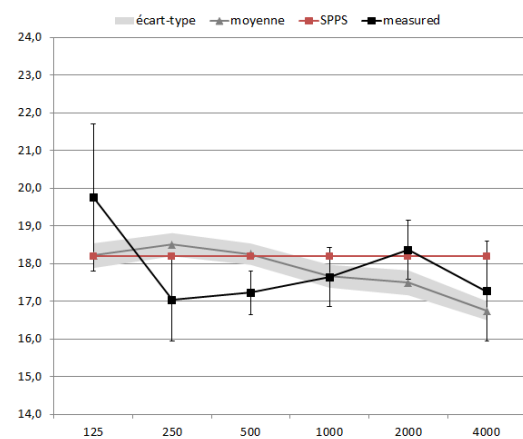


FIGURE 10 – Phase 2 : Valeurs de G (dB) en fonction de la fréquence (S1R1, RF).

est plus absorbante) que pour la configuration RO (résultats non présentés dans cet article).

### 3.2.2 Indicateurs de précision : D, C et Ts

Trois indicateurs différents (D, C et Ts) sont déterminés dans le Round Robin III afin d'évaluer la « précision » dans la salle. La définition D à 50 ms (figure 7) et la clarté C à 80 ms (figure 8) sont définis comme un rapport de l'énergie précoce sur l'énergie tardive de la réponse impulsionnelle. Le temps central Ts (figure 9) est quant à lui défini par le barycentre de la réponse impulsionnelle.

Les variations spatiales sont particulièrement notables pour ces indicateurs. L'allure des courbes issues du code SPPS suivent bien celle des mesures ainsi que celle des autres programmes. L'écart observé est plus important lorsque les rideaux sont fermés (figure 8) que lorsque les rideaux sont ouverts<sup>1</sup> (figure 7).

Pour les deux paramètres D et C, les résultats de SPPS semblent inférieurs à ceux des autres programmes. À l'inverse, le temps central Ts obtenu avec le code SPPS est supérieur à ceux des autres programmes. Comme pour les temps de réverbération, une explication possible pour expliquer cette différence de comportement serait que le

1. De manière générale, l'écart observé pour les indicateurs C et D est semblable (résultats non présentés dans cet article).

code SPPS surestime le champ tardif par rapport au champ précoce.

### 3.3 Indicateur de puissance G

La force sonore G est un indicateur qui a été difficilement mesurée lors du Round Robin III, comme le montre les amplitudes des barres des écart-types sur la figure 10. La force sonore obtenue par le code SPPS est identique quelque soit la bande d'octave, alors que pour les autres programmes cette valeur diminue. Il semblerait que la version testée du code SPPS ne calcule pas cet indicateur suivant la même procédure. Toutefois, l'écart entre les résultats issus du code SPPS et ceux des autres programmes est relativement faible.

### 3.4 Conclusion sur la phase 2

Pour synthétiser les résultats, la moyenne spatiale (à la bande d'octave 1 kHz) et la moyenne fréquentielle (à la position S1R2) des erreurs perceptibles ont été calculées et présentées aux figures 11 et 12 respectivement, pour chaque indicateur et pour les deux positions de rideaux.

Les erreurs perceptibles associées au code SPPS sont globalement acceptables car elles varient majoritairement entre 0 et 1.5. En moyenne spatiale, les indicateurs de réverbération sont moins bien simulés (erreur proche de 2 à

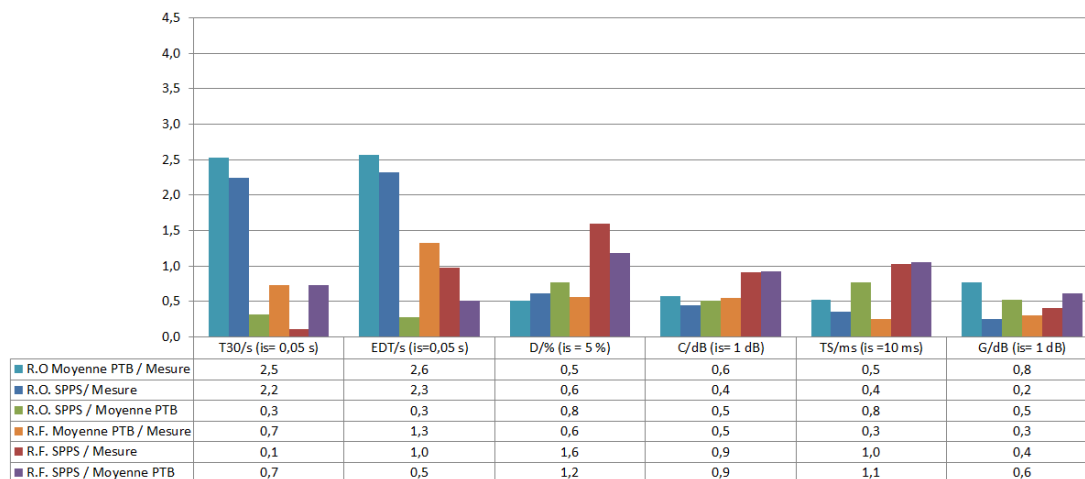


FIGURE 11 – Erreurs perceptibles de la phase 2 pour chaque indicateur acoustique : moyenne spatiale (1 kHz).

2.5), sans-doute en raison de l'hypothèse de surestimation du champ tardif par rapport au champ précoce. En moyenne fréquentielle, les erreurs perceptibles par rapport aux mesures sont plus importantes (autour de 2), comme pour celles des autres programmes testés. Les phénomènes d'interférence, impactant particulièrement les résultats en basses fréquences, n'étant pas modélisé par l'ensemble des programmes, peuvent expliquer ces écarts.

En conclusion, hormis quelques écarts, notamment par rapport aux mesures, le code SPPS semble globalement validé pour la phase 2 du Round Robin III. L'étude de la phase 3 (non présentée ici) donne une conclusion similaire.

## 4 Conclusion

L'objectif de cette étude était de valider le code de calcul SPPS (lancer de particules sonores) sur la base des résultats fournis par le Round Robin III. L'ensemble des résultats obtenus, dont une partie est présentée dans cet article, montre que le code SPPS a été validé pour l'ensemble des phases du Round Robin III, même si des écarts sont parfois observables pour les phases 2 et 3.

Par rapport aux autres programmes, le code SPPS obtient des résultats similaires : les courbes de résultats suivent généralement les mêmes allures. Les résultats du code SPPS sont toutefois assez souvent à la limite de la bande de l'écart-type des valeurs de référence. Une hypothèse pouvant expliquer cette différence serait que le code SPPS surestime le champ tardif par rapport au champ précoce. Le comportement du champ précoce étant essentiellement régi par des réflexions spéculaires, on peut éventuellement s'interroger sur l'efficacité du code SPPS à modéliser correctement ce type de réflexion.

Par rapport aux mesures de référence, les résultats du code SPPS, comme pour ceux obtenus avec les autres programmes, sont parfois discutables. En effet, les mesures fluctuent plus que les valeurs des simulations, en particulier en basse fréquence. L'écart entre l'ensemble des programmes et les mesures peut venir de la difficulté de ces programmes à modéliser correctement certains phénomènes acoustiques :

- modélisation « imparfaite » de la diffusion par les parois : de manière similaire à d'autres programmes, le code SPPS modélise la réflexion acoustique en

séparant la réflexion en deux contributions distinctes, une réflexion spéculaire et une réflexion diffuse, la pondération entre les deux contributions étant introduite par le *scattering coefficient*. En réalité, la réflexion acoustique devrait être modélisée sous la forme d'un unique comportement (*i.e.* une unique loi de réflexion prenant en compte les propriétés physiques de l'état de surface des parois considérées) ;

- phénomènes interférentiels : les écarts observés en basse fréquence peuvent être dus aux phénomènes d'interférence. En effet, même si la fréquence de Schroeder est de 82 Hz et 93 Hz pour les configurations RF et RO respectivement, les observations expérimentales faites à l'occasion du Round Robin III semblent montrer qu'une onde stationnaire se forme entre le sol et le plafond à la fréquence 208 Hz [7]. Le recours à des approches ondulatoires ou hybrides (ondulatoire/énergétique) semble donc indispensable pour modéliser ces effets interférentiels, visibles dans le domaine fréquentiel généralement considéré ;
- diffraction acoustique par les éléments géométriques : comme le mentionne les conclusions du Round Robin III, certaines erreurs peuvent aussi s'expliquer par l'absence de prise en compte des phénomènes de diffraction par la plupart des programmes. Là encore, il conviendra d'intégrer ce phénomène dans le code SPPS, pour en améliorer le comportement.

## Remerciements

Les auteurs remercient l'Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Énergie (ADEME) pour son soutien financier (convention N° 12.17.C.0025).

## Références

- [1] Takeshi OKUZONO, Toru OTSURU, Reiji TOMIKU et Noriko OKAMOTO : Fundamental accuracy of time domain finite element method for sound-field analysis of rooms. *Applied Acoustics*, 71(10):940–946, octobre 2010.



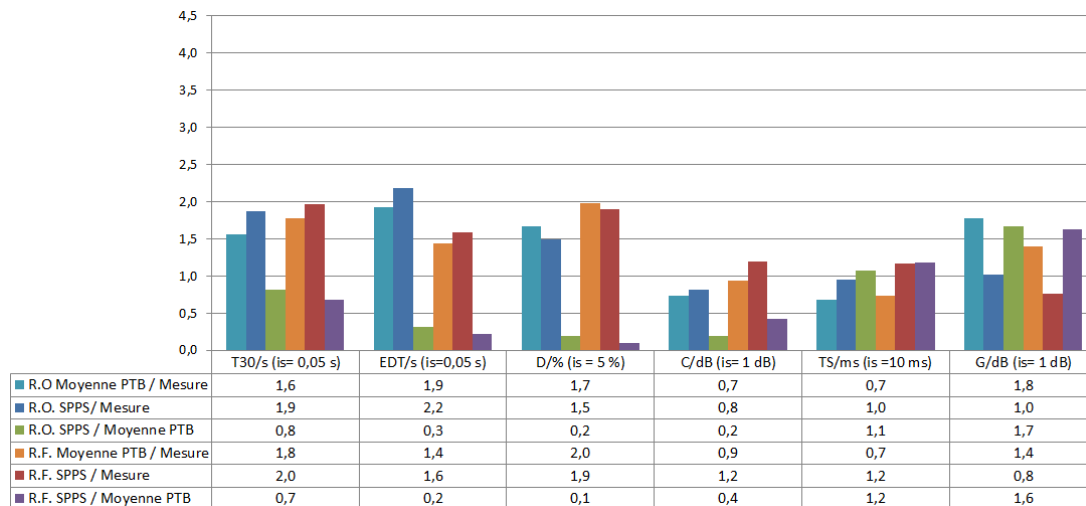


FIGURE 12 – Erreurs perceptibles de la phase 2 pour chaque indicateur acoustique : moyenne fréquentielle (S1R2).

- [2] Judicaël PICAUT et Gwenaël GUILLAUME : TLM modelling for room acoustics. *In 41st International Congress and Exposition on Noise Control Engineering, INTERNOISE 2012*, page 10p, France, janvier 2012.
- [3] Heinrich KUTTRUFF : *Room acoustics*. Spon Press/Taylor & Francis, London & New York, 2009.
- [4] V. VALEAU, J. PICAUT et M. HODGSON : On the use of a diffusion equation for room-acoustic prediction. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 119(3): 1504–1513, mars 2006.
- [5] Brian F. G. KATZ : International round robin on room acoustical impulse response analysis software 2004. *Acoustics Research Letters Online*, 5(4):158–164, août 2004.
- [6] Ingolf BORK : A comparison of room simulation software - the 2nd round robin on room acoustical computer simulation. *Acta Acustica united with Acustica*, 86(6):943–956, novembre 2000.
- [7] Ingolf BORK : Report on the 3rd round robin on room acoustical computer simulation – Part I : Measurements. *Acta Acustica united with Acustica*, 91(4):740–752, juillet 2005.
- [8] Ingolf BORK : Report on the 3rd round robin on room acoustical computer simulation – Part II : calculations. *Acta Acustica united with Acustica*, 91(4):753–763, juillet 2005.
- [9] U. STEPHENSON : Comparison of the mirror image source method and the sound particle simulation method. *Applied Acoustics*, 29(1):35–72, 1990.
- [10] Judicaël PICAUT et Nicolas FORTIN : SPPS, a particle-tracing numerical code for indoor and outdoor sound propagation prediction. *In Acoustics 2012 Nantes*, Nantes, France, avril 2012. Société Française d'Acoustique.
- [11] Judicaël PICAUT et Nicolas FORTIN : *Manuel de référence du code SPPS*. Ifsttar, Nantes, France, 2011.
- [12] Association Française de Normalisation AFNOR : *NF EN ISO 3382-1 : Acoustique - Mesurage des paramètres acoustiques des salles - Partie 1 : salles de spectacles*. 2010.