

## **Analyse et Choix des Paramètres d'Entrée d'un Modèle de Lancer de Particules dans le Cas de Réflexions Spéculaires en Acoustique des Salles**

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

Comme pour la méthode du lancer de rayons, une des critiques formulées à l'attention de la méthode du lancer de particules sonores, réside dans l'absence d'une modélisation fine des premières réflexions acoustiques, alimentant le champ précoce. Cette limitation provient du principe même de la méthode, générant des particules sonores (depuis la source), d'une manière soit aléatoire soit discrète, mais non déterministe. La qualité de représentation des premières réflexions est alors en générale assujettie au nombre initial de particules. Dans cette étude, nous montrons que d'autres paramètres sont également importants, en termes de précision temporelle et d'amplitude des réflexions spéculaires, comme la durée du pas de temps, le nombre minimal de particules sonores atteignant le récepteur, ainsi que le volume récepteur. Des recommandations pratiques sont finalement proposées pour ces paramètres afin d'améliorer la modélisation des réflexions spéculaires avec la méthode du lancer de particules.

## 1 Introduction

La modélisation en acoustique des salles a donné lieu au développement d'un grand nombre d'approches différentes, statistiques, analytiques et numériques. En pratique, pour des géométries complexes, le recours à des méthodes numériques est toutefois indispensable. À cet effet, un opérateur dispose aujourd'hui de nombreuses solutions logicielles ou de codes de calcul, basés sur des approches différentes et plus ou moins complexes, de type ondulatoire, statistique ou énergétique. Dans ce dernier cas, plusieurs méthodes sont proposées, parmi lesquelles, les méthodes de rayons, de cônes ou de faisceaux sonores, couplées ou non à des méthodes de sources-images (pour la modélisation du champ précoce) ou de champ diffus (pour la modélisation du champ tardif). Une méthode alternative repose sur l'approche « particules sonores » [1], utilisée en particulier dans le code SPPS développé à l'Ifsttar [2], et diffusé dans la plateforme logicielle gratuite I-Simpa ([i-simpa.ifsttar.fr](http://i-simpa.ifsttar.fr)).

Le code de calcul SPPS a donné lieu à de nombreuses validations [3, 4] et peut être utilisé dans de nombreuses situations pratiques. Toutefois, le principe même du code reposant sur un lancer de particules sonores, intégrant par ailleurs des tirages aléatoires pour modéliser certains phénomènes physiques (émission acoustique, réflexion et diffusion acoustique par des surfaces...), on peut s'interroger sur sa capacité à reproduire de manière pertinente le champ précoce, alimenté principalement par les réflexions spéculaires, lesquelles sont parfaitement déterministes.

Ainsi, dans cet article, nous présentons une étude pour évaluer la qualité de la simulation des réflexions spéculaires par le code SPPS, en fonction de différents paramètres, comme le pas de temps, le nombre de particules sonores et la taille du volume récepteur. La méthode de référence utilisée pour cette étude est la méthode classique des sources-images, appliquée dans notre cas à une géométrie formée par deux plans parallèles, succinctement rappelée dans le paragraphe suivant. La comparaison du code SPPS et de la méthode de référence est présentée et analysée à la section 3.

## 2 Méthode

Par construction, la méthode des sources-images permet de modéliser précisément le champ précoce lorsqu'il est composé intégralement par des réflexions spéculaires. Le principe repose sur la détermination des sources fictives (dites sources-images), images de la source réelle par les plans de symétrie, puis de calculer en un point récepteur la

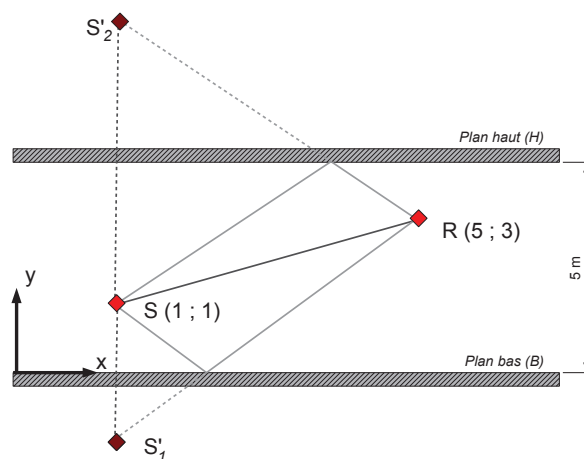


FIGURE 1 – Détermination des sources-images (à l'ordre 1) pour une géométrie formée par deux plans parallèles et représentation des contributions directes et réfléchies (à l'ordre 1).

somme des contributions de chacune de ces sources, sous réserve que ces sources soient visibles par le récepteur (test de visibilité). À titre d'exemple, la figure 1 présente les sources-images à l'ordre 1 (*i.e.* correspondant à 1 réflexion spéculaire) pour le cas simple de deux plans parallèles. La contribution énergétique de chaque source-image  $n$  est donnée en fonction de l'ordre de réflexion  $p$ , de la nature des réflexions sur les parois (coefficient d'absorption  $\alpha_i$ ), de la puissance de la source  $W$  et de la distance  $d$  entre la source-image  $n$  et le récepteur :

$$I_n(d) = \frac{W}{4\pi d^2} \prod_i^p (1 - \alpha_i) \quad (\text{W/m}^2). \quad (1)$$

L'ensemble des contributions des sources-images permet ainsi de constituer un échogramme de référence, qui peut ensuite être comparé à celui simulé par le code SPPS. Par la suite, nous supposons que les plans sont de longueur infinie, parfaitement réfléchissants et espacés de 5 m. La source  $S$  et le récepteur  $R$  sont placés aux coordonnées  $(1, 1)$  et  $(5, 3)$  respectivement. Les simulations SPPS sont réalisées avec 50 ou 5 millions de particules sonores et un pas de temps  $\Delta t = 6$  ou  $\Delta t = 1$  ms. La puissance  $W$  de la source est fixée arbitrairement.

Deux caractéristiques des échogrammes produits par SPPS sont particulièrement étudiés, en comparaison avec la méthode de référence : la précision temporelle (*i.e.* la localisation temporelle des réflexions spéculaires) et la précision énergétique (*i.e.* l'amplitude des réflexions spéculaires).

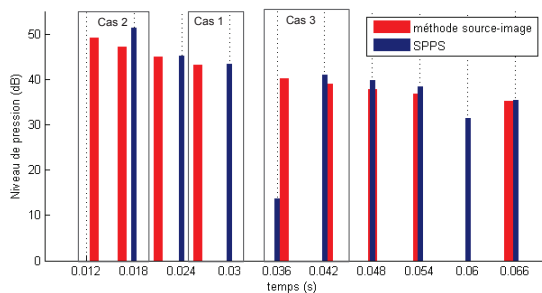


FIGURE 2 – Échogrammes obtenus par le code SPPS et la méthode des sources-images, pour la géométrie de référence de la figure 1.

## 3 Résultats

### 3.1 Analyse préliminaire d'un échogramme

La figure 2 présente les échogrammes obtenus par la méthode des sources-images et par le code SPPS. Comme attendu pour ce type de géométrie, l'échogramme obtenu par la méthode des sources-images présente une distribution temporelle régulière des contributions, en raison de la distribution spatiale régulière des sources-images. Dans le cas présent, les réflexions sont ainsi regroupées par paquets de quatre contributions espacées de quelques ms. En l'absence d'absorption sur les plans, la diminution de l'amplitude des contributions est liée uniquement à la dispersion géométrique (*i.e.* éloignement de la source-image par rapport au récepteur, décroissance en  $1/d^2$ ) soit  $-6$  dB par doublement de distance et donc par doublement du temps ( $d = c \times t$ ). L'échogramme obtenu par le code SPPS est quant à lui moins homogène : en raison du pas de temps et de l'échelle des temps associée, les contributions sont disposées uniquement sur les pas de temps (toutes les 6 ms). Par ailleurs, la diminution de l'amplitude des contributions SPPS ne suit pas la décroissance liée à la dispersion géométrique.

Pour pouvoir analyser plus finement les échogrammes obtenus avec le code SPPS, il est nécessaire de préciser la méthode utilisée pour calculer la contribution énergétique au niveau des récepteurs. La réception des particules au niveau d'un récepteur est en effet une étape déterminante. Comme le montre la projection sur un plan de la figure 3, le récepteur doit être modélisé par un volume (*i.e.* une sphère de rayon  $r_{\text{rec}} = 31$  cm par défaut), car la probabilité qu'une particule atteigne précisément un point récepteur est nulle (en raison de la précision numérique). Ainsi, en pratique, à un pas de temps  $n$  et pour une particule  $k$ , le code SPPS vérifie si la particule se situe dans le volume récepteur. Si c'est le cas, le code détermine la durée  $tv_k^n$  correspondant à la durée que la particule  $k$  passe dans le volume récepteur jusqu'au prochain pas de temps  $n+1$ . Dans l'exemple de la figure 3, cette durée vaut  $tv_n$  pour le pas de temps  $t_n$ . La pression quadratique  $p^2(n)$  au pas de temps  $n$  est alors déterminée par la formule [3] :

$$p^2(n) = \rho_0 c^2 \frac{W}{N V_{\text{rec}}} \sum_k^{N_0} e_k^n \times tv_k^n \quad (\text{Pa}), \quad (2)$$

avec  $\rho_0$  la masse volumique de l'air,  $c$  la célérité du son dans l'air,  $W$  la puissance de la source,  $N$  le nombre initial

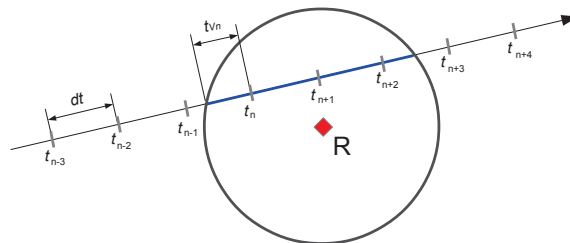


FIGURE 3 – Illustration de la réception des particules dans un volume récepteur (code SPPS). Pour simplifier, le schéma est représenté en 2D, mais les calculs sont réalisés en 3D.

de particules,  $V_{\text{rec}}$  le volume récepteur,  $N_0$  le nombre de particules reçues durant le pas de temps  $n$ ,  $e_k^n$  le coefficient de pondération de l'énergie associé à la particule  $k$  au pas de temps  $n$ .

Ainsi, par construction, une même particule pourra contribuer à l'énergie au niveau d'un récepteur sur plusieurs pas de temps, alors qu'en théorie, une réflexion spéculaire ne se présentera au point récepteur qu'à un temps donné. On peut aussi s'attendre avec cette méthode à une erreur sur l'énergie totale reçue au récepteur, du fait de son volume, par rapport à la théorie. Par ailleurs, toujours par construction, l'énergie reçue par le volume récepteur dans l'intervalle  $[n \times \Delta t, (n+1) \times \Delta t]$  sera assignée au pas de temps  $(n+1) \times \Delta t$ . Ainsi les contributions énergétiques sont décalées « vers le champ tardif ». Ces nécessités et choix du calcul numérique mis en œuvre dans le code SPPS expliquent ainsi intégralement les différences entre les deux échogrammes de la figure 2, que nous détaillons dans le paragraphe 3.2 suivant pour la précision temporelle, et au paragraphe 3.3 pour la précision énergétique.

### 3.2 Analyse détaillée d'un échogramme : précision temporelle

#### 3.2.1 Analyse

Dans l'exemple de la figure 2, trois cas se présentent :

- Cas N° 1 (figure 4(a)) : le cas 1 est un cas simple : dans l'intervalle de temps  $[0.024, 0.03]$  s (*i.e.* sur un pas de temps, entre le 4<sup>ème</sup> et le 5<sup>ème</sup> pas de temps), une seule réflexion spéculaire existe, aux alentours de  $t = 0.026$  s (*i.e.* soit juste après le 4<sup>ème</sup> pas de temps) ; le code SPPS cumule donc toute l'énergie reçue dans la durée de ce pas de temps et l'assigne au pas de temps immédiatement suivant (5<sup>ème</sup> pas de temps), donc au temps  $t = 0.03$  s. La différence de niveau sonore, bien que faible (0.2 dB), est liée à la taille finie du volume récepteur.
- Cas N° 2 (figure 4(b)) : entre les temps 0.012 s et 0.018 s (*i.e.* sur un pas de temps, entre le 2<sup>ème</sup> et le 3<sup>ème</sup> pas de temps), deux réflexions spéculaires d'amplitude 49.1 dB et 47.1 dB arrivent aux temps  $t = 0.013$  s et  $t = 0.0165$  s respectivement. Le code SPPS cumule alors ces deux contributions pour donner une contribution de 51.4 dB au temps  $t = 0.018$  s (3<sup>ème</sup> pas de temps). En réalité, la somme de l'énergie des réflexions spéculaires obtenues par la méthode des

sources-images est de 51.2 dB ; l'écart entre les deux méthodes (0.2 dB) est toutefois acceptable.

- Cas N° 3 (figure 4(c)) : le cas 3 est plus complexe à appréhender car il fait intervenir le rayon du volume récepteur  $r_{\text{rec}}$  ou plus précisément le temps récepteur  $t_{\text{rec}}$  défini par la formule :

$$t_{\text{rec}} = \frac{r_{\text{rec}}}{c}. \quad (3)$$

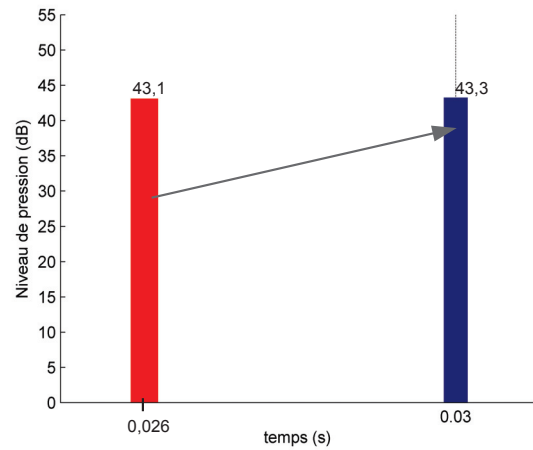
Dans la configuration par défaut de la simulation du code SPPS, le rayon récepteur est égal à 31 cm (*i.e.* un volume sphérique de 1 m<sup>3</sup>), ce qui équivaut un temps récepteur de 0.9 ms. Dans le fonctionnement du code SPPS, lorsqu'une particule atteint le volume récepteur, la contribution énergétique de la particule au volume correspondant est égale à l'énergie de la particule pondérée par la distance parcourue dans le volume récepteur (*i.e.* par le temps de présence de la particule dans le volume, *cf.* relation (2)). Cependant, le temps étant segmenté en pas de temps, la distance l'est aussi. C'est pourquoi, lorsque la transition entre deux pas de temps se situe dans la durée où la particule traverse le volume récepteur, l'énergie apportée par la particule est distribuée sur deux pas de temps différents. Ce raisonnement peut se généraliser à un grand nombre de particules de manière à obtenir par exemple l'échogramme de la figure 4(c). Exprimé d'une autre manière, la réflexion spéculaire présente au temps  $t = 0.03682$  s par la méthode des sources-images se répartit sur plusieurs pas de temps successifs : une partie de l'énergie est répartie au temps correspondant au pas de temps précédant (6<sup>ème</sup> pas de temps), d'où la contribution de 13.5 dB au temps  $t = 0.036$  s ; le reste de l'énergie de la réflexion étant attribué au pas de temps suivant, correspondant à  $t = 0.042$  s (7<sup>ème</sup> pas de temps), lui-même alimenté par des contributions énergétiques liées à la réflexion spéculaire à  $t = 0.0424$  s.

Un autre cas de figure peut se présenter lorsque le pas de temps du calcul SPPS est très petit (cas N° 4 présenté à la figure 5, avec  $\Delta t = 0.1$  ms). La durée du pas de temps étant maintenant plus petite que le temps récepteur, pour une réflexion donnée, l'énergie est répartie sur un grand nombre de pas de temps (19 dans le cas présent). Lorsque l'ensemble de ces contributions est sommé, le niveau sonore obtenu (35.4 dB, barre verte de la figure 5) est proche de celui obtenu par la méthode des sources-images (35.2 dB, barre rouge), montrant ainsi que l'énergie de la réflexion spéculaire est quasiment « conservée » avec le code SPPS, même si elle est distribuée sur plusieurs pas de temps.

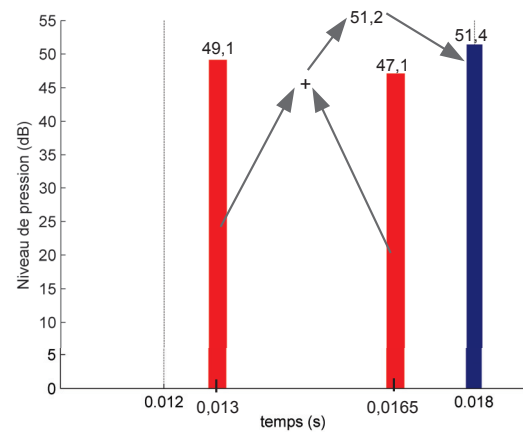
### 3.2.2 Recommandations

Sur la base de cette analyse « temporelle », il est possible d'émettre quelques recommandations, à la fois pour l'opérateur dans le choix des paramètres de simulation, et à la fois en termes de perspectives d'amélioration du code :

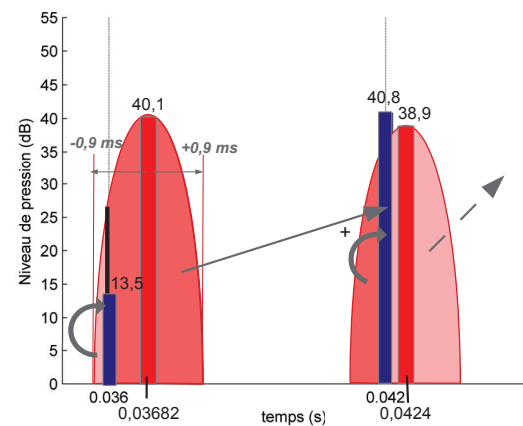
- En analysant un peu plus le cas N° 1, l'écart temporel entre la réflexion obtenue par du code SPPS et par la méthode des sources-images est assez important (4 ms). Cet écart peut facilement être réduit en



(a) Cas N° 1



(b) Cas N° 2



(c) Cas N° 3

FIGURE 4 – Comparaison détaillée des échogrammes obtenus par le code SPPS (en bleu) avec  $\Delta t = 6$  ms et la méthode des sources-images (en rouge).

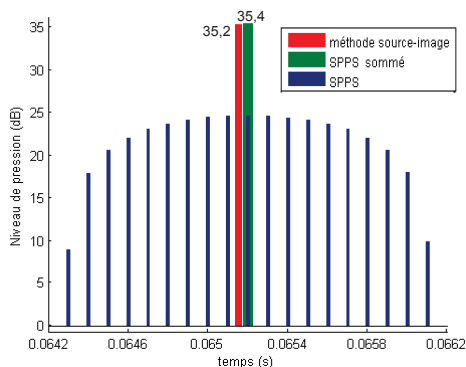


FIGURE 5 – Comparaison détaillée des échogrammes obtenus par le code SPPS avec  $\Delta t = 0.1$  ms et la méthode des sources-images.

assignant, dans le code SPPS (par une modification du code), l'énergie apportée par les particules arrivant entre  $n \times \Delta t/2$  et  $(n \times \Delta t + \Delta t/2)$  (au lieu de  $(n-1) \times \Delta t$  et  $n \times \Delta t$ ) pour le pas de temps  $n \times \Delta t$ . La précision temporelle serait alors réduite à la moitié du pas de temps ;

- Concernant le cas N° 2, pour espérer visualiser les deux réflexions spéculaires sur l'échogramme de SPPS (au lieu de les cumuler dans une seule contribution à un pas de temps donné), le pas de temps du calcul peut être diminué par un facteur 2. Par contre, si le pas de temps choisi est trop faible, le cas N° 4 pourrait à nouveau se produire. Ainsi, le pas de temps doit être adapté au temps inter-réflexions (temps entre des réflexions successives dans l'échogramme), qui pourrait être estimé grâce au Libre Parcours Moyen (LPM) ou à la fréquence de collisions [5, 6] ;
- Pour réduire l'étalement d'une réflexion sur plusieurs pas de temps, le cas N° 3 montre que le temps récepteur ou le rayon récepteur doit être réduit. Plus précisément, le temps récepteur doit être très faible par rapport au pas de temps. Par contre, en réduisant le rayon récepteur, la probabilité qu'une particule atteigne bien le récepteur est aussi plus faible. Si le nombre de particules sonores n'est pas augmenté, cela peut impacter la précision énergétique.

### 3.3 Analyse détaillée d'un échogramme : précision énergétique

#### 3.3.1 Méthode

**Distinction des réflexions** Pour pouvoir évaluer l'erreur sur le niveau sonore entre les réflexions spéculaires attendues (méthode de référence) et celles effectivement obtenues avec le code SPPS, les différentes réflexions doivent être parfaitement distinguables sur l'échogramme obtenu par le code SPPS. À cet effet, de nouvelles simulations ont été réalisées avec un pas de temps plus faible, soit 0.1 ms dans notre cas. Cependant, même avec cette durée de pas de temps plus courte, il n'est pas toujours possible d'assigner à

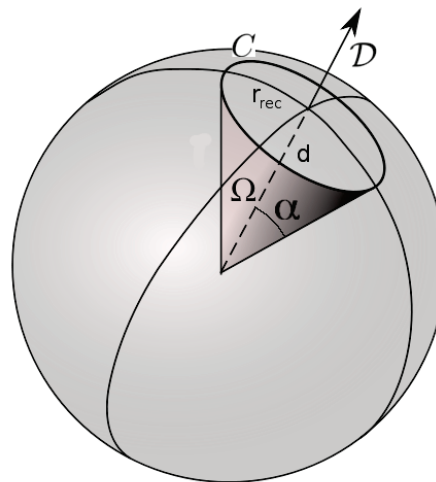


FIGURE 6 – Approximation du nombre de particules reçues par le récepteur à chaque instant : le schéma des angles solides.

une réflexion spéculaire, un paquet de contributions<sup>1</sup> obtenu par le code SPPS. Une procédure a ainsi été développée afin de trouver les cas pour lesquels un paquet de contributions est assignable à une réflexion identifiée, puis de calculer la somme des niveaux de ces contributions et enfin, de calculer l'écart entre ce niveau et le niveau de la réflexion obtenue par la méthode des sources-images. Cette procédure permet alors d'obtenir un « échogramme des écarts », dit échogramme « réduit ».

**Evaluation du nombre de particules reçues par un récepteur** La précision sur les niveaux sonores est liée au nombre de particules reçues à chaque pas de temps. Cependant, le code SPPS n'exporte pas cette donnée. Afin d'obtenir tout de même une approximation du nombre de particules reçues par le récepteur à chaque instant, une méthode approximative a été développée. La loi de probabilité qui définit dans le code SPPS la direction initiale des particules (émission des particules depuis la position de la source) étant une loi uniforme, pour un grand nombre de particules, il est ainsi possible de supposer que les particules sont uniformément réparties, à chaque instant  $t$ , sur la sphère émettrice centrée sur la source et de rayon  $c \times t$ . Ainsi, le rapport du nombre de particules reçues par le récepteur pour le champ direct  $N_{\text{champ direct}}$  sur le nombre initial de particules  $N$  est égal au rapport de l'angle solide  $\Omega$  formé par l'intersection de la sphère réceptrice et de la sphère émettrice (figure 6) sur l'angle solide de la sphère  $\Omega_{\text{total}} = 4\pi$  :

$$\frac{N_{\text{champ direct}}}{N} = \frac{\Omega}{\Omega_{\text{total}}}. \quad (4)$$

Dans le cas où la distance source-récepteur  $d$  est très grande devant le rayon récepteur  $r_{\text{rec}}$ , l'angle solide  $\Omega$  s'exprime en fonction de l'angle  $\alpha$  selon la relation (6). L'angle  $\alpha$  est formé entre la droite  $\mathcal{D}$  passant par la source et le récepteur et une droite passant par la source et un point du cercle  $C$ , perpendiculaire à  $\mathcal{D}$ , de rayon  $r_{\text{rec}}$  et dont le centre est le

1. Un paquet de contributions correspond à l'ensemble des pas de temps pour lesquels l'énergie reçue est non nulle, situé entre deux pas de temps où l'énergie reçue est nulle. Un exemple est donné à la figure 5.

point récepteur (figure 6). Les angles  $\alpha$  et  $\Omega$  sont déterminés par les relations suivantes :

$$\tan(\alpha) = \frac{r_{\text{rec}}}{d}, \quad (5)$$

$$\Omega = 2\pi \times (1 - \cos \alpha). \quad (6)$$

Ce raisonnement peut s'étendre du champ direct à l'ensemble des réflexions spéculaires, en reprenant le même raisonnement que celui mené par la méthode des sources-images : une réflexion est équivalente au champ direct émis depuis une source-image. Ainsi, en augmentant la distance  $d$ , le raisonnement nous permet d'obtenir une approximation du nombre de particules reçues par le récepteur à chaque instant  $t$ .

### 3.3.2 Résultats

Dans cette partie de l'étude, les simulations ont été réalisées avec un pas de temps  $\Delta t = 0.1$  ms, une durée de simulation  $T = 3$  s, un rayon récepteur de 31 cm et 5 millions de particules.

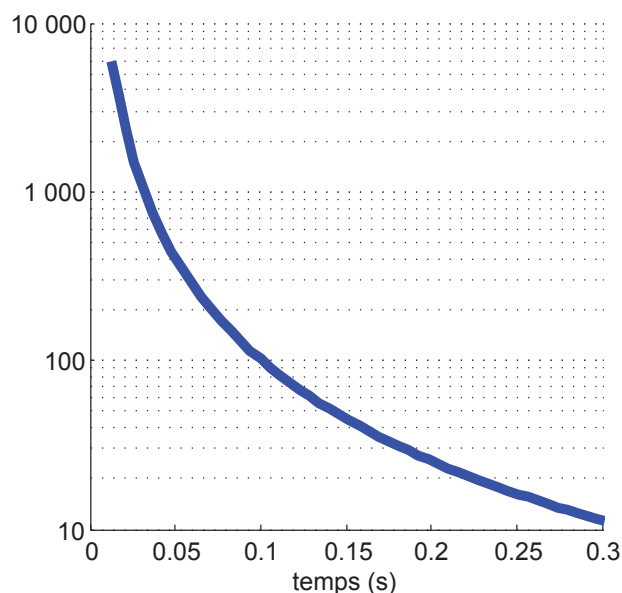
La figure 7(a) présente l'estimation du nombre de particules reçues par le récepteur à chaque instant. La figure 7(b) montre l'écart entre les niveaux sonores obtenus par la somme des contributions issues du code SPPS et ceux obtenus par la méthode des sources-images (solution de référence). Cet écart augmente au cours de la simulation, au fur-et-à-mesure que le nombre de particules reçues diminue. Comme attendu, la relation entre « précision » et « nombre de particules » est bien observée.

En approfondissant le lien entre l'écart observé et le nombre de particules reçues, une règle peut être établie. En considérant que, pour être acceptable, l'écart doit être de l'ordre de 1 dB, les figures 7(b) et 7(a) permettent de déduire que ce niveau de précision peut être obtenu lorsque dans les derniers pas de temps de la simulation, le volume récepteur contient plus de 40 particules environ (valeur « seuil »). Des simulations complémentaires, avec un nombre initial de particules différent et pour d'autres géométries, ont montré que cette valeur « seuil » pouvait être compris entre 14 et 80 particules. Pour améliorer l'estimation de cette valeur « seuil », la connaissance du nombre exacte de particules arrivant à chaque pas de temps dans un volume récepteur serait nécessaire (ce qui suppose une modification du code SPPS). Les résultats actuels (pour des surfaces réfléchissantes) permettent tout de même d'affirmer qu'un minimum de 100 particules atteignant le récepteur à chaque instant assure que l'écart de niveaux sonores avec la méthode des sources-images est bien inférieur à 1 dB.

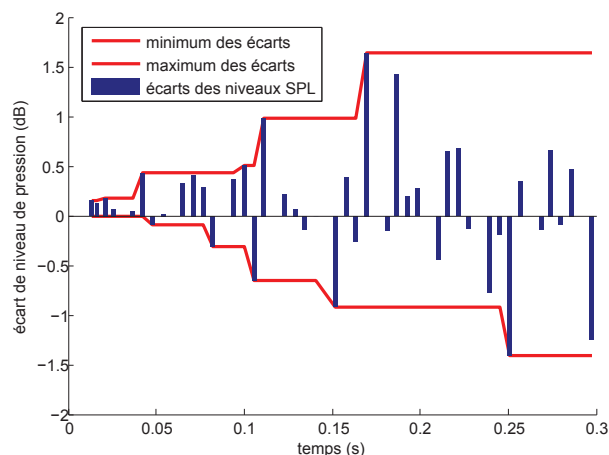
En reprenant les relations présentées plus haut pour l'évaluation du nombre de particules reçues par un récepteur, à chaque pas de temps, plusieurs paramètres de calcul doivent être adaptés afin de s'assurer que le nombre de particules reçues à la fin de la simulation soit supérieur à 100 : le nombre de particules initial, le rayon récepteur et la durée de la simulation.

## 4 Conclusion

Dans l'étude présentée dans cet article, le code SPPS de lancer de particules a été comparé à la méthode des sources-images, pour une géométrie simplifiée constituée de deux



(a) Estimation du nombre de particules reçues par le récepteur à chaque instant.



(b) Échogramme réduit, représentant l'écart entre les niveaux sonores obtenus par la somme des contributions issues du code SPPS et les niveaux sonores obtenus par la méthode des sources-images ( $\Delta t = 0.1$  ms,  $T = 0.3$  s,  $t_{\text{rec}} = 0.9$  s, 5 millions de particules).

FIGURE 7 – Évaluation de la précision énergétique du code SPPS.

plans parallèles parfaitement réfléchissants, afin d'évaluer la capacité de cette approche numérique à modéliser les réflexions spéculaires.

Ce travail a permis d'évaluer la précision temporelle et énergétique de l'échogramme obtenu par le code SPPS et ainsi de mieux comprendre le fonctionnement du code et la pertinence du choix des paramètres de calcul. Dans tous les cas, quelques soient les paramètres de simulation, l'étude a montré que le principe de « conservation de l'énergie » est quasiment respecté par le code SPPS : même si les réflexions spéculaires ne sont pas précisément localisées temporellement dans l'échogramme (par rapport à une approche sources-images), l'énergie portée par une réflexion « théorique » se répartie presque intégralement sur plusieurs pas de temps, le cas échéant.

En complément, plusieurs recommandations peuvent être formulées pour une meilleure utilisation du code SPPS :

- la durée du pas de temps doit être légèrement inférieure à la durée inter-réflexions ;
- le temps récepteur doit être fortement inférieur à la durée du pas de temps ;
- le choix de la durée de simulation, du temps récepteur et du nombre de particules doit permettre qu'au moins 100 particules atteignent le récepteur dans les derniers pas de temps de la simulation, afin d'obtenir une précision inférieure à 1 dB pour les réflexions spéculaires.

En parallèle, des pistes d'amélioration du code SPPS sont suggérées :

- En pratique, le temps inter-réflexions n'est pas une constante. La durée du pas de temps peut alors être définie comme une moyenne des temps inter-réflexions. Le code SPPS pourrait également intégrer un pas de temps variable au cours du temps ( $\Delta t$  serait plus grand en champ précoce qu'en champ tardif) ;
- Le nombre exact de particules atteignant le récepteur à chaque pas de temps n'est pas connu. Une modification du code SPPS permettrait d'exploiter cette donnée, à des fins de recherche, mais également, afin de fournir une estimation de la précision des résultats à l'opérateur, et le cas-échéant, d'adapter automatiquement les paramètres de calcul afin qu'une précision donnée puisse être atteinte ;
- Le nombre de particules atteignant le récepteur en fin de réponse impulsionnelle est parfois trop faible pour obtenir une précision acceptable (*i.e.* inférieure à 1 dB). Afin de compenser la réduction du nombre de particules, une solution consisterait à augmenter le volume récepteur au cours du temps [7]. Cependant, en augmentant le volume, donc le temps récepteur, cela viendrait en contradiction avec la réduction de la durée du pas de temps au cours du temps (*cf.* suggestion plus haut). Ainsi, l'utilisateur devra plutôt réduire la durée de la simulation (*i.e.* limiter la longueur de l'échogramme) ou augmenter le nombre de particules ;
- La précision temporelle est actuellement limitée au minimum entre la durée d'un pas de temps et le

temps récepteur. En assignant, dans le code SPPS, l'énergie apportée par les particules arrivant entre  $(n \times \Delta t - \Delta t/2)$  et  $(n \times \Delta t + \Delta t/2)$  au lieu de  $(n-1) \times \Delta t$  et  $n \times \Delta t$  pour le pas de temps  $n \times \Delta t$ , la précision temporelle serait réduite au minimum entre la moitié du pas de temps et le temps récepteur.

## 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] U. STEPHENSON : Comparison of the mirror image source method and the sound particle simulation method. *Applied Acoustics*, 29(1):35–72, 1990.
- [2] 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.
- [3] Judicaël PICAUT et Nicolas FORTIN : *Manuel de référence du code SPPS*. Ifsttar, Nantes, France, 2011.
- [4] Pierrick NUSSBAUMER et Judicaël PICAUT : Simulation acoustique dans des locaux par la méthode du lancer de particules sonores : validation à partir du round robin III. *In Congrès Français d'Acoustique*, Poitiers, France, avril 2014. Société Française d'Acoustique.
- [5] Lothar CREMER et Helmut A. MÜLLER : *Principles and applications of room acoustics*. Applied Science, 1982.
- [6] Heinrich KUTTRUFF : *Room acoustics*. Spon Press/Taylor & Francis, London & New York, 2009.
- [7] Stéphane LESOINNE : *Méthodes d'accélération du tir de rayons sonores pour la simulation en acoustique des salles/Acceleration methods of acoustical ray tracing in room acoustics*. Doctorat en sciences de l'ingénieur, Université de Liège, Liège, Belgique, décembre 2013.