

Localisation de sources impulsives en milieu urbain par capteurs distribués

Sylvain Cheinet et Loïc Ehrhardt
Institut Franco-Allemand de Recherches
de Saint-Louis (ISL),
5, rue du Général Cassagnou
BP 70034
68 301 Saint-Louis
France
E-mail : sylvain.cheinet@isl.eu

Résumé

Le développement de moyens de surveillance dans les zones bâties/urbaines revêt un intérêt pour les forces armées (protection de bases avancées et d'installations sensibles) et pour la sécurité civile (sites industriels, infrastructures de transports, etc.). Un scénario prospectif classique est le recours à un système de capteurs acoustiques distribués, afin de localiser précisément les événements sonores de type tir ou explosion, y compris hors de la ligne de vue. Un tel système reste tributaire du traitement des signaux acoustiques reçus, qui doit prendre en compte les effets de propagation urbaine. Cette étude présente un traitement récemment proposé par l'ISL, qui s'avère fiable et robuste. La performance de localisation a été étudiée sur la base de mesures sur maquette et in situ, en examinant la sensibilité à la position de la source, à l'environnement urbain, au nombre de capteurs etc. Ces travaux illustrent aussi l'importance du scénario opérationnel et des contraintes matérielles associées dans la conception algorithmique d'un tel système. La maturation technique de cette approche va se poursuivre au travers d'un partenariat entre l'ISL et deux PME innovantes, Sonorhc et Avnir-Energy.

Les milieux bâtis portent les éléments névralgiques des sociétés contemporaines, à forts enjeux et à fortes densités de population. Les conflits récents sont ainsi le théâtre de nombreux engagements de troupe en situations urbaines, motivant le développement de moyens de veille situationnelle. La surveillance de zones bâties revêt aussi un intérêt pour la protection de zones sensibles, de bases avancées, et pour la sécurité civile : protection et surveillance des sites industriels sensibles (par exemple centrale nucléaire) et des zones à fort flux (quais de gare, aéroports, stades). Le développement de moyens de surveillance en zones bâties s'est donc imposé comme un sujet de préoccupation majeur et dual. Les structures bâties obligent à une multiplication des systèmes optiques, sans toutefois être efficace lors d'événements dont la signature optique est faible (tir d'arme, explosion). La surveillance acoustique est peu onéreuse, passive donc discrète, et peut être associée à des plateformes fixes ou mobiles (personnels, véhicules, etc.).

En outre, les signaux acoustiques restent exploitables après propagation en milieu bâti, car les longueurs d'onde acoustiques sont suffisamment grandes pour maintenir des niveaux perceptibles pour les ondes diffractées derrière les bâtiments.

Concrètement, un scénario typique d'intérêt est le suivant (Voir figure 1, page suivante) :

- environnement de taille caractéristique 200x200m, cartographie connue, en milieu bâti.
- signal acoustique à localiser : un son impulsif de pression pic à 1 m dans la gamme 120-160 dB, caractéristique des bruits d'arme ou des explosions.
- détection acoustique : des capteurs sont distribués dans l'environnement, leur position peut évoluer dans le temps et est connue, ils sont synchrones, et sont reliés à un PC. On ne suppose pas *a priori* qu'ils sont en ligne de vue de la source.

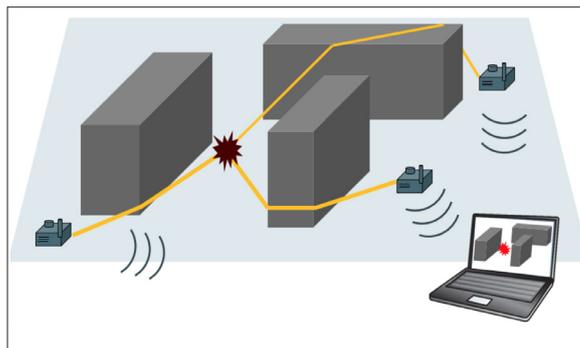


Fig. 1 : Scénario investigué : les capteurs distribués mesurent la signature acoustique, et communiquent vers le PC pour une détection/localisation de l'événement sonore. L'apport décisif de l'acoustique est de traiter des configurations hors de la ligne de vue (capteurs cachés)

Les composants matériels associés à ce scénario sont disponibles sur étagère. Un enjeu de R & D réside dans la conception d'un algorithme de traitement des signaux, afin de parvenir à une localisation décimétrique de la source. D'un point de vue opérationnel, cette précision est suffisante pour la mise en alerte d'autres moyens de confirmation : visuel direct, ou système optique. Or, dans le cas général, cette précision impose que la solution algorithmique prenne en compte le caractère urbain de la propagation. En effet, hors de la ligne de vue, le bâti a un impact majeur sur les signaux, au travers de processus couplés (multiples diffractions et réflexions) et complexes (ils dépendent de la longueur d'onde acoustique, de la position des bâtiments). Un seul événement acoustique génère des contributions à plusieurs temps d'arrivée, ayant chacune un angle d'arrivée et une signature temporelle différents.

Des approches de localisation des bruits impulsifs sont commercialisées [1], mais la non prise en compte de la morphologie de la zone surveillée affaiblit la résolution spatiale en deçà de la résolution spatiale discutée ici. Des alternatives ont été proposées dans la littérature [2, 3], qui restent des pistes de recherche amont. Au cours des années précédentes, des travaux de recherche amont ont été conduits sur ce sujet par l'Institut Franco-Allemand de Recherches de Saint-Louis (ISL), notamment au travers d'un projet soutenu par le programme d'Accompagnement Spécifique des Travaux de Recherches et d'Innovation Défense (ASTRID). Ces travaux ont permis d'étudier la propagation des signaux impulsifs en environnement urbain, et de démontrer la validité des modèles numériques de propagation acoustique dans ces environnements. En outre, une approche de localisation originale, dite par correspondance, est en cours de développement [4, 5]. Elle semble répondre au besoin d'un algorithme robuste et efficace pour la localisation précise de sons impulsifs en environnement bâti.

Principe de localisation par correspondance

Le principe de localisation par correspondance est décrit dans deux articles récents [4, 5], dans lesquels des discussions plus approfondies sont disponibles. Il est basé sur deux étapes.

La première réalise les précalculs numériques de propagation dans l'environnement simulé. La seconde traite de la localisation d'un signal reçu par comparaison aux calculs.

Étape de précalculs

Une base de données de référence est formée, qui fournit les caractéristiques d'un signal acoustique, émis depuis toutes les positions de source possibles, et se propageant vers tous les microphones. Pour simplifier la discussion, nous introduisons ici une seule caractéristique, constituée du temps de première arrivée acoustique parvenant au capteur depuis la source supposée ponctuelle. En indiquant les microphones par j , et la grille de sources possibles par i , il s'agit de déterminer la matrice $t_{i,j}$ des temps d'arrivée. Concrètement, la grille des sources possibles couvre l'ensemble du domaine à surveiller avec une résolution spatiale de l'ordre du mètre. La base de données peut être constituée de manière expérimentale. Cette approche, lourde à mettre en œuvre, est en outre exclue dans certains contextes de défense. La simulation numérique est un recours efficace et fiable, qui permet d'intégrer les effets de propagation liés à l'environnement urbain (voir aussi plus bas).

Étape de localisation

À réception d'un événement sonore, le temps d'arrivée \hat{t}_j et le rapport signal-sur-bruit \hat{s}_j sont déterminés pour chaque microphone (l'accent circonflexe se rapporte aux quantités issues de mesures). Ces quantités sont communiquées au PC, qui utilise comme référence le microphone j_1 ayant le plus grand \hat{s}_j . On définit :

$$\Delta t_{i,j} = t_{i,j} - t_{i,j_1},$$

$$\hat{\Delta t}_j = \hat{t}_j - \hat{t}_{j_1}.$$

L'erreur (en temps) faite en supposant que la source est en position i s'écrit :

$$f_i = \sqrt{\frac{\sum_j \rho_j (\Delta t_{i,j} - \hat{\Delta t}_j)^2}{\sum_j \rho_j}}.$$

Cette grandeur, définie pour chaque position de source i , est une fonction de coût à minimiser.

L'inverse de longueur $\left(\frac{1}{cf_i}\right)$ est utilisé comme critère de localisation. Le poids ρ_j attribué à un microphone peut être choisi par exemple en fonction de \hat{s}_j , ou bien entre 1 ou 0 selon que ce microphone est utilisé dans le traitement de localisation.

La localisation de sources sonores impulsives à partir des temps d'arrivée est très classique en détection acoustique aérienne et dans d'autres domaines (acoustique sous-marine, communication radio). En revanche, le recours à un modèle numérique de propagation pour générer les solutions de référence (étape 1) est une contribution originale de la solution proposée.

Cette méthode, qui se rapproche d'une recherche de solution par apprentissage supervisé par machine, permet de prendre en compte la plupart des effets du canal de propagation (convection, réfraction et absorption par l'atmosphère, réflexion sur le sol et les façades des bâtiments, diffraction par les arêtes des bâtiments, etc.). Au demeurant, certains aspects de cette complexité ne sont pas forcément nécessaires, compte tenu de la robustesse des temps d'arrivée. Par exemple, un vent notoire (10 m/s) altère la vitesse du son, donc les temps d'arrivée, de 3 %. En termes de localisation, l'erreur induite serait de quelques mètres à une distance caractéristique de 100 m, ce qui reste dans la limite de précision souhaitée.

Au-delà de l'algorithme de localisation lui-même, il est important de relever les liens intrinsèques entre les aspects matériels et logiciels. En premier lieu, les caractéristiques exploitées ne requièrent pas de calibration absolue des capteurs, et n'induisent pas de contrainte majeure sur l'acquisition du capteur (fréquence, dynamique d'amplitudes). En outre, la méthode proposée dépend relativement peu du signal impulsionnel émis (fréquences, directivité). Par ailleurs, la méthode ne requiert pas la transmission au PC de l'ensemble du signal acoustique, mais seulement de quelques caractéristiques, telles que calculées au niveau du capteur (ici, le temps d'arrivée). Ceci permet d'alléger considérablement la contrainte de communication capteur-PC, et assure davantage de discrétion.

Tests de performance

La méthode a été testée à partir de mesures *in situ* réalisées sur le site de l'ISL [4]. Cette configuration expérimentale met en œuvre deux positions de source acoustique, seize capteurs, et un environnement composé d'une quinzaine de bâtiments dans un périmètre de 150m x 150m. L'erreur de localisation est inférieure à 10 m dans 90 % des configurations expérimentales analysées lorsque cinq capteurs (choisis aléatoirement) sont utilisés.

Ce taux augmente encore avec davantage de capteurs. Bien que cette performance soit très significative, il faut noter que la hauteur des bâtiments de l'ISL est de l'ordre de 6 à 10 m, avec des distances entre bâtiments de l'ordre de 10 à 30 m. Il s'agit donc d'une configuration de type quartier résidentiel, où les effets de propagation urbaine sont présents, mais ne modifient pas considérablement les temps d'arrivée.

Des tests expérimentaux ont été réalisés sur une maquette de laboratoire [5], afin d'évaluer la méthode dans une configuration urbaine marquée, avec des bâtiments plus hauts et denses (Fig. 2). Le rapport d'échelle est de 1 : 100. Avec un tel rapport d'échelle, une localisation est jugée satisfaisante si elle est à moins de 10 cm de la position réelle de la source.

La figure 3 illustre la carte du critère de localisation obtenue à partir des enregistrements de 4 microphones. Le critère de localisation présente un maximum bien délimité. Alors que les capteurs utilisés sont totalement masqués de la source, la position de la source est retrouvée à quelques centimètres près.

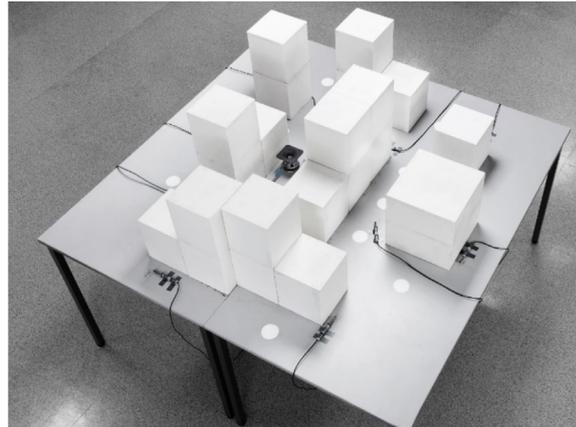


Fig. 2 : Photographie de la maquette utilisée. La source acoustique est le petit haut-parleur noir. Les disques blancs montrent les positions de source testées

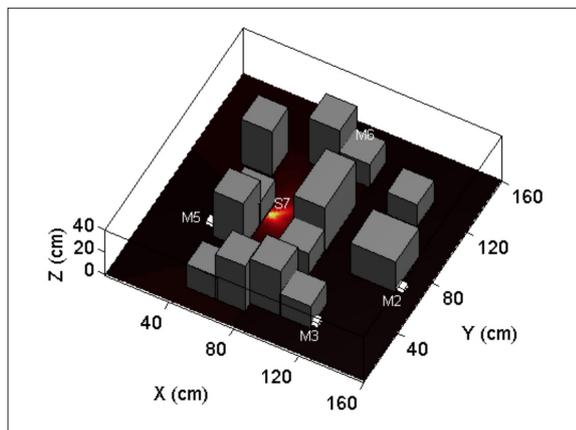


Fig. 3 : Vue 3D de la carte de localisation obtenue à partir du traitement des mesures de 4 microphones hors de la ligne de vue. La tache jaune (maximum du critère de localisation) indique bien l'origine du son, en S7

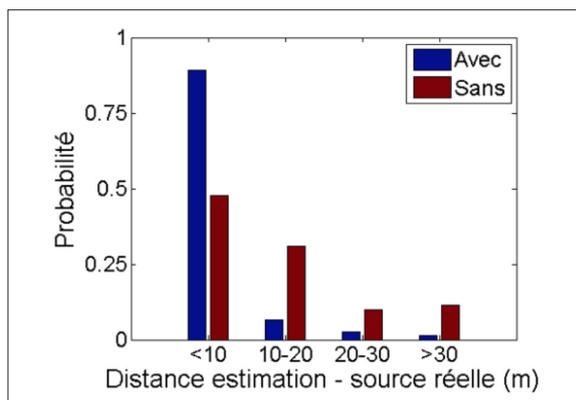


Fig. 4 : Statistique des erreurs de localisation avec 5 capteurs dans l'environnement ci-dessus, avec ou sans prise en compte de la propagation urbaine

La performance de localisation a été analysée de manière systématique (dix-sept positions de source, neuf microphones). La figure 4 montre la statistique de cette performance pour les 2 142 configurations utilisant cinq microphones.

La position de la source est retrouvée à moins de 10 cm près dans la très grande majorité des cas : 91 %. Ignorer l'environnement urbain dégrade notablement la performance de localisation. Ceci démontre l'apport de la méthode introduite ici, en comparaison d'une approche qui supposerait une propagation rectiligne (i.e. sans bâtiments). La performance de localisation augmente encore avec davantage de microphones.

Exploitation de la méthode

La prise en compte des contraintes opérationnelles demande d'aller au-delà de la démonstration de principe.

Constitution de la base de données de référence

D'un point de vue pratique, dans la constitution de la base de données de référence, le choix du modèle numérique est critique, au sens où il met en jeu un compromis entre fidélité et temps de calcul. Dans un premier temps [4, 5], nous avons exploité un modèle physique incluant une résolution complète de la propagation en 3D + temps, dont le coût numérique est important. Une approche beaucoup plus efficace a depuis été développée, basée sur le problème équivalent de la recherche du plus court trajet entre deux points avec obstacles. Ce problème se traite avec un algorithme de planification de trajet [6]. Dans un environnement connu, le temps de calcul des temps d'arrivée (matrice) est inférieur à la seconde. Ceci permet de traiter les scénarios dans lesquels les capteurs sont mobiles. La figure 5 montre que l'algorithme prend bien en compte les diffractions par les arêtes des bâtiments et la propagation au-dessus de ceux-ci. Les temps d'arrivée calculés sont identiques à ceux obtenus par le modèle 3D + temps. En résumé, nous avons développé une solution très efficace pour l'étape (1). Comme l'étape (2) est quasi instantanée, une solution fiable est à portée de main pour effectuer la localisation en temps-réel en environnement connu.

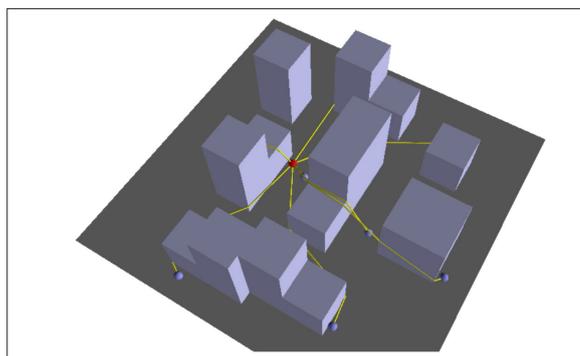


Fig. 5 : Trajets les plus courts entre une position de source (en rouge) et sept microphones (en bleu), calculés par planification de trajet

Extension aux sources non ponctuelles/non impulsionnelles

Des travaux sont aussi en cours pour étendre la méthode à des scénarios mettant en jeu des signaux non impulsionnels ou non ponctuels. En particulier, la thématique du sniper (tireur de projectile supersonique) est l'un des grands enjeux des conflits en zone urbaine.

Un tir de projectile supersonique est associé à une onde impulsionnelle et ponctuelle au niveau de l'arme (onde de bouche), et à une onde impulsionnelle émise par le projectile au cours de son déplacement (onde de Mach). Les caractéristiques de ces deux ondes peuvent se confondre en environnement urbain, et leur distinction semble donc difficile à systématiser.

Pour traiter le problème de la localisation d'un tireur, nous avons proposé d'étendre la base de données aux émissions liées à chaque trajectoire rectiligne issue de la source ponctuelle, en supposant une vitesse typique du projectile. En d'autres termes, la matrice des temps d'arrivée prend une forme $t_{i,\theta,j}$, où θ discrétise l'azimut des tirs. La méthode ne requiert aucun calcul de propagation supplémentaire. Son évaluation *in situ* est difficile par manque de données adaptées. Une évaluation à partir de simulations a été réalisée – ce qui illustre l'un des intérêts majeurs de la modélisation numérique de la propagation en environnement complexe. Au niveau des performances, la méthode donne des résultats très satisfaisants avec six à sept capteurs répartis dans la zone. Comme l'illustre la figure 6, l'algorithme renseigne aussi sur la direction du tir.

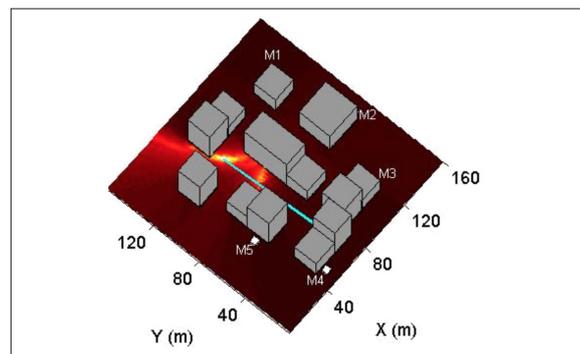


Fig. 6 : Vue 3D de la carte de localisation obtenue à partir du traitement des mesures de cinq microphones en dehors de la ligne de vue, pour un tir supersonique simulé. La tache jaune indique bien la position du départ du tir, l'axe de tir (cyan) est bien retrouvé

Conclusions & perspectives

Les zones bâties sont un sujet émergent des préoccupations de surveillance, à des fins de défense et/ou sécurité. Un scénario classique pour cette surveillance est le déploiement de capteurs synchrones, communiquant vers un PC, distribués dans un environnement urbain connu. Dans un tel scénario, l'acoustique apporte une veille passive, peu onéreuse, capable de faire face à des menaces de type tir ou explosion. En comparaison de l'optique, l'acoustique est associée à des longueurs d'onde très grandes, donc à des angles de diffraction bien supérieurs. Dans les environnements ouverts, ce caractère diffractif des ondes acoustiques tend à perturber la détection/localisation/classification [7]. En environnement urbain, c'est ce caractère diffractif qui assure un rapport signal-sur-bruit suffisant, donc la détectabilité du signal y compris dans des zones d'ombre marquées, derrière un ou deux bâtiments.

En termes purement algorithmiques, l'enjeu est de concevoir un traitement des signaux recueillis, qui prenne en compte les effets du canal de propagation urbain, pour une localisation précise de la source. L'enjeu R & D plus général doit aussi intégrer des aspects opérationnels et matériels : bande passante du réseau communication, connaissance imparfaite de la carte urbaine, temps de calcul, mobilité des plateformes, nombre et nature des capteurs, diversité des sources acoustiques, etc.

L'ISL a récemment proposé une approche de localisation répondant au scénario d'intérêt. Le principe est de constituer à l'avance une base de données de référence, pour toutes les positions de source envisageables. À réception de signaux mesurés, le traitement minimise une fonction de coût pour identifier, dans la base de données, la source correspondant au mieux avec les mesures. Cette approche est robuste aux contraintes matérielles et opérationnelles ci-dessus, et permet de localiser de manière fiable un son impulsionnel ponctuel avec 5 capteurs distribués. La démarche peut être étendue aux tirs de projectile supersonique (sniper).

L'originalité de la méthode se trouve dans la possibilité d'exploiter un modèle numérique intégrant les effets de propagation urbaine dans la constitution de la base de données. En exploitant les temps et angles de première arrivée, le calcul peut être fait en temps réel. Au cours de l'étude, la modélisation numérique s'est aussi avérée utile pour étudier la physique à l'œuvre et générer des signaux difficiles à acquérir expérimentalement.

De nombreuses perspectives sont envisageables sur la base de ces travaux. En termes de fonctionnalités logicielles, un indice a été testé avec succès pour estimer si une localisation est plus ou moins fiable. Le Tableau 1 montre que cet indice permet de ramener le taux de faux positifs (localisations erronées marquées comme fiables) à 3 %. À terme, il serait intéressant de développer les capacités de classification de l'événement acoustique localisé. La méthode pourrait exploiter d'autres caractéristiques que les temps de première arrivée, pour une performance améliorée et/ou une diminution du nombre de capteurs. L'extension à la localisation d'autres sources acoustiques est l'une de ces perspectives, par exemple pour assurer le suivi de véhicule terrestre ou aérien. La méthode peut sans doute être adaptée à ce scénario. Techniquement, il pourrait s'agir de calculer la fonction de coût non pas sur les temps d'arrivée, mais par exemple sur les angles d'arrivée. Cette autre caractéristique est bien définie pour des bruits continus. Au niveau matériel, cette extension demande que chaque capteur soit remplacé par une antenne de plusieurs capteurs microphoniques ou par un capteur de vitesse acoustique.

	Erreur < 10 m (%)	Erreur > 10 m (%)
I +	85	3
I -	6	6

Tabl. 1 : Statistiques des erreurs de localisation avec 5 capteurs, en fonction de l'indice de fiabilité calculé (I+ prévoit une localisation fiable)

En termes de développement système, les étapes suivantes consistent à gagner en maturité technologique, pour évoluer vers un démonstrateur de surveillance effectif dans des situations représentatives.

La poursuite des travaux dans ce sens va être réalisée dans le cadre d'un projet soutenu par la Direction Générale de l'Armement, au travers du programme RAPID (régime d'appui à l'innovation duale). Le projet appelé SURICATE (pour Système de SURveillance Intégrée par Capteurs Acoustiques pour les TErrains Complexes) est un partenariat entre l'ISL et deux PME impliquées dans l'innovation en acoustique: Sonorhc et AVNIR-Energy.

Il s'agira de maîtriser les tenants et aboutissants (lien entre le matériel, le logiciel et les performances de surveillance) pour être à même d'accompagner des industriels intéressés à adapter un tel démonstrateur vers leurs marchés ou applications. Il est aussi prévu d'investiguer le couplage avec un moyen de reconnaissance optique (ralliement vers un objectif pointé par le système acoustique). Un autre enjeu réside dans l'automatisation du couplage avec la documentation de l'environnement (Système d'Information Géographique).

Remerciements

Cette étude a été partiellement financée par le ministère de la défense allemand (BAAINBw) et par la Direction Générale de l'Armement (DGA) au travers du projet ANR-12-ASTR-0038.

Références bibliographiques

- [1] Showen, R. L., R. B. Calhoun, R. B. and J. Dunham, Systems and methods for augmenting gunshot location using echo processing features, Patent US8134889 (B1), 2012
- [2] Albert, D. G., L. Liu and M. L. Moran, Time reversal processing for source location in an urban environment, J. Acoust. Soc. Am., 118, pp. 616-619, 2005
- [3] Singh, V., K. E. Knisely, S. H. Yönek, K. Grosh and D. R. Dowling, Non-line-of-sight sound source localization using matched-field processing, J. Acoust. Soc. Am., 131, pp. 292-302, 2012
- [4] Cheinet S., Ehrhardt L. and Broglin Th., Impulse source localization in urban environments : time reversal versus time matching, J. Acoust. Soc. Am., 139, pp. 128-140, 2016
- [5] Cheinet, S., L. Ehrhardt, Th. Broglin and M. Cosnefroy, Time matching localization of impulse sounds in high-building, non-line-of-sight configurations, Acta Acust. Acust., 102, pp. 1118-1127, 2016
- [6] Papadimitriou, C., An algorithm for shortest-path motion in three dimensions, Inform. Process. Lett., 20, 259-263, 1985
- [7] Cheinet, S. and Th. Broglin, Sensitivity of shot detection and localization to environmental propagation, Appl. Acoust., 93, pp. 97-105, 2015