

# **Titre : Modélisation des temps d'arrivée de sons impulsions pour localisation de tirs en environnement complexe**

**Mots-clés :** Propagation acoustique, Localisation acoustique, Temps d'arrivée, Fast-Marching, Sons impulsions, Tirs d'artillerie, Tirs de sniper, Conditions atmosphériques, environnement urbain

## **Résumé**

Les systèmes de localisation acoustique existent depuis le début du XX<sup>ème</sup> siècle. Les tirs d'armes à feu émettent des ondes de forte amplitude (de bouche au départ du coup, balistique générée par un projectile supersonique, éventuellement d'impact) qui se propagent à grande distance. Les capteurs acoustiques pour mesurer ces ondes sont passifs, omnidirectionnels, fonctionnels par tout temps et de faible coût. Distribués dans une zone d'intérêt, ils extraient temps d'arrivée (TOAs) ou caractéristiques fréquentielles, qui permettent de remonter à une position de source via des algorithmes de localisation et des modèles de propagation.

La méthode Matching de l'équipe se démarque par l'inclusion de la physique de la propagation dans la localisation : vent, température, obstacles... Les mesures à un jeu de capteurs sont comparées à des simulations numériques de propagation depuis des sources virtuelles. Celle donnant le meilleur accord est assimilée à la source du son mesuré. En pratique, les TOAs d'une onde sur un jeu de capteurs distribués et synchrones suffisent. La base de données est simulable à l'avance, tandis que la phase de Matching est quasi - temps réel. La localisation est peu sensible au bruit, à la calibration ou aux erreurs de positionnement de capteurs. La création de la base de données est toutefois numériquement coûteuse, et le traitement de géométries et sources sonores non triviales est un défi. Les questions de l'intégration de l'environnement, de la faisabilité de la localisation de tirs d'artillerie en Matching ainsi que du Matching sur les multiples arrivées d'un même tir, se posent.

L'objectif de cette thèse est de concevoir un outil de modélisation qui englobe l'acquisition de données atmosphériques et de terrain, la balistique des tirs et la propagation acoustique, afin de calculer les TOAs associés aux tirs supersoniques de manière physiquement cohérente et réaliste. Le niveau de détail de chaque physique pour la phase de Matching est aligné sur le facteur identifié comme limitant. Pour ce faire, un modèle de propagation acoustique de type Fast-Marching, baptisé IFM, est proposé. IFM conserve la généralité physique des méthodes 3D+temps, mais gagne en temps de calcul en ne calculant que les TOAs. Les géométries urbaines sont traitées par des maillages non structurés, la propagation à grande distance par des maillages curvilignes adaptés au relief. Un modèle balistique, incluant les impacts de balle dans les bâtiments ou le sol et les effets aérodynamiques 3D pour les projectiles de gros calibre, est couplé à IFM la simulation des ondes balistique et d'impact. Enfin, un couplage à des modèles de mécanique des fluides numérique et de prévision numérique du temps méso-échelle est réalisé pour la détermination de données atmosphériques pertinentes, en complément ou remplacement de mesures in-situ.

L'approche est évaluée en environnement urbain via deux campagnes de mesures, avec tirs supersoniques à balles réelles. Les performances de localisation de sources ponctuelles sont excellentes avec 4 capteurs ou plus. La localisation de sniper est précise avec 6 capteurs distribués, sans visibilité directe sur le tir, ce qui est à notre connaissance une première pour du sniper. Une démonstration de l'approche en artillerie est effectuée en utilisant les arrivées multiples extraites de signaux mesurés. Grâce à la précision des simulations des TOAs des ondes de bouche, balistique et d'impact, la localisation est possible depuis des capteurs faiblement espacés, sans influence notable de la géométrie de déploiement sur la performance. Là encore, il s'agit à notre connaissance une première.

Le modèle développé dans cette thèse permet d'estimer numériquement les performances de n'importe quel système de détection synchrone basé sur des TOAs, sniper comme artillerie, dans des scénarios réalistes et des environnements arbitrairement complexes. L'optimisation du placement des capteurs est ainsi envisageable.

**Title: Modeling acoustic impulse arrivals for shot localization in complex environments**

**Key-words:** Acoustic propagation, Acoustic localization, Times of Arrival, Fast-Marching, Impulse sounds, Artillery shots, Sniper shots, Weather conditions, Urban environments

## Abstract

Battlefield acoustics sensing systems have been used since the early 20<sup>th</sup> century for detection and localization of threats. Artillery and gun shots emit loud sounds (muzzle blast upon firing, ballistic wave emitted by the supersonic projectile, possible impact burst) which propagate at long ranges. These sounds may be recorded at low-cost, passive, all-weather, omnidirectional sensors, usually distributed over the monitored area. Sensor data are then fused, using localization algorithms and propagation models to relate observed features, e.g. times of arrival (TOAs) or spectra, to a plausible source position.

The originality of the team's approach, through the Matching method, consists in factoring in the physics of propagation: wind and temperature effects, obstacles... A database of virtual sources acoustic features is numerically predicted at a set of sensors. Upon detection of an event, observed features are evaluated against the database. The estimated sound source position is that of the closest match. In practice, TOAs of signals at synchronous, distributed sensors are sufficient for localization of e.g., sniper shots in urban areas.

The database may be generated in advance, while the Matching is potentially real-time. Localization is robust to noise, sensor positioning, calibration, or environment data errors. However, building the database is computer-intensive, and handling of non-trivial geometries or sources is challenging. Integration of environment data, feasibility of artillery shot localization and of Matching multiple arrivals, are open questions.

The rationale of the present work is to develop a modeling suite, from procurement of terrain and atmosphere data, to shot ballistics and acoustic propagation, to compute TOAs of the acoustic emissions of supersonic shots in a consistent and physics-based fashion. Each time, limiting factors (sensor position error, atmospheric data accuracy, ballistic dispersion...) are determined, and all models are consequently refined, or simplified, to the befitting level of detail for the Matching phase. More specifically, a Fast-Marching acoustic propagation model is derived and implemented (IFM). IFM retains the physical generality of 3D+time solvers, while computing only TOAs and thus being much faster. IFM handles urban geometries with unstructured meshes, and long range propagation with terrain-following grids. Coupling to a ballistic model accounts for sound emissions of supersonic shots. Bullet hits in building façades or the ground and 3D aerodynamic effects for large caliber projectiles are considered. IFM is then coupled to computational fluid dynamics or meso-scale numerical weather prediction models to determine relevant atmospheric inputs in support or replacement of on-site measurements.

Two measurement campaigns were conducted for evaluation of the approach in built-up areas, including supersonic weapons and actual live ammunition.

Point source localization performance is state-of-the-art with down to 4 sensors. Sniper localization performs well with down to 6 sensors, including fully non-line-of-sight sensors configurations - which is to our knowledge a first for countersniper systems. Localization of artillery shots is demonstrated on the multiple arrivals of measured artillery signals, from a small baseline array, with little influence of the array geometry on the sensing performance, thanks to the accuracy of the predicted muzzle blast, ballistic wave and impact burst TOAs. Again, this is to our knowledge a first.

The modeling suite developed in this work may readily assess the performance of any synchronous, TOA-based sensing system in realistic scenarii, in arbitrarily complex, non-line-of-sight environments - with a common framework for both counter-sniper and counter-artillery systems. It could also be used as a decision aid, to choose the most fitting sensor configuration for surveillance of a given area, in a given scenario.