

# De la détection acoustique de tirs à la restitution 3D des alertes et de la communication audio

**Pierre Naz, Véronique Zimpfer, Sébastien Hengy, Martin Laurenzis, M. Christoph, Pascal Hamery**  
Institut franco-allemand de recherche de Saint Louis (ISL)  
5, rue du Général Cassagnou  
BP 70034  
68301 Saint Louis CEDEX  
E-mail : pierre.naz@isl.eu

## Résumé

Cet article illustre une approche «de la mesure à l'écoute» au travers des travaux menés à l'ISL sur le thème de la détection de tirs d'armes, la localisation de l'origine du tir et de la restitution de ces informations au sein d'un système de communication audio-3D.

Plus précisément, cette application combine les différents aspects techniques suivants :

- Enregistrement des signaux impulsionnels de type bruit de tir,
- Traitement des signaux acoustiques issus d'antennes acoustiques,
- Fusion des informations de détection issues d'un réseau de capteurs distribués,
- Couplage avec un système d'imagerie active par crénelage temporel,
- Restitution acoustique des menaces, spatialisation sonore et communication audio 3D.

Au-delà de la description globale de l'application, cette présentation illustre les travaux de laboratoire nécessaires au niveau du test des capteurs, des traitements du signal et de l'intelligibilité de la parole dans un environnement multi-locuteurs. On notera aussi la synergie entre les moyens dévolus à la détection acoustique et ceux liés à la restitution audio ainsi que la complémentarité des informations fournies aux utilisateurs par les modules de détection acoustique et optronique.

**D**ifférents conflits militaires récents tout comme certaines opérations de police ont illustré le fait que les snipers (tireurs embusqués) sont une menace à laquelle doivent faire face les forces de sécurité. L'ouïe et la vision sont les deux sens qui sont naturellement utilisés par des vigies pour donner l'alerte, pour localiser d'où vient la menace et pour coordonner une réaction éventuelle. Un système électronique peut assister les opérateurs humains dans cette tâche. Parmi les techniques envisageables, l'acoustique apporte un élément de réponse, utilisée seule ou conjointement aux techniques optroniques.

L'application développée (fig. 1) combine les différents aspects techniques suivants :

- Détection de tirs à partir de la mesure des signaux acoustiques impulsionnels,
- Traitement des signaux obtenus par chaque antenne acoustique,
- Fusion des informations de détection issues d'un réseau de capteurs distribués,
- Couplage avec un système d'imagerie active par crénelage temporel,
- Restitution acoustique et visuelle des menaces, spatialisation sonore et communication audio 3D.

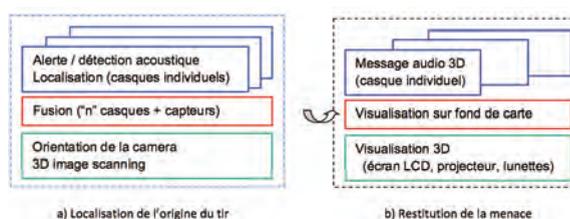


Fig. 1 : Diagramme général pour les aspects de détection et de restitution des alertes

La détection acoustique apporte une contribution importante compte tenu de son caractère passif et de ses potentialités de détection tout azimut (360°) à partir d'une base fixe (pas de pièces mobiles). En intégrant à l'équipement du combattant individuel des capteurs acoustiques, les applications suivantes peuvent être envisagées :

- Aide à une meilleure perception des bruits et des menaces présentes sur le champ de bataille: fonction d'alerte, information de localisation et de classification.
- Protection auditive, amélioration des communications radio au sein des unités (diminution du bruit ambiant, ...), restitution de l'environnement sonore.

Des premières versions de ces composants ont été développées ces dernières années aussi bien par l'ISL que par d'autres laboratoires ou industriels [1, 2]. Les travaux présentés ici montrent qu'il est envisageable de poursuivre ces idées et qu'il est possible d'intégrer logiquement l'ensemble de ces fonctions de manière à aller :

« **de la mesure** », pour identifier et localiser les menaces par leur bruit,

« **à l'écoute** », pour restituer la parole, les ambiances sonores et les menaces.

## Mesure des signaux impulsionnels

Pour la plupart des fusils et des munitions utilisées par les tireurs d'élite, les projectiles sont animés d'une vitesse initiale supersonique et vont générer une série d'ondes de choc dans l'air. Dans ce cas, l'onde de choc principale attachée au projectile forme un cône dont le demi-angle au sommet peut être calculé à partir de la célérité du son dans l'air ( $C^0$ ) et de la vitesse du projectile ( $V$ ). Une deuxième onde de choc, attachée au culot du projectile peut être observée. Dans le cas de projectiles aux formes régulières, le signal temporel mesuré par un capteur de pression éloigné de la trace a une forme typique en «N». Dans le cas de projectiles ayant des formes plus complexes, des ondes de choc peuvent être attachées aux irrégularités du profil. Pour des configurations de tir proches du sol, une deuxième onde en «N» est mesurable, due à la réflexion de l'onde de Mach sur le sol.

Les projectiles sont mis en mouvement au moyen d'une charge de poudre dont la mise à feu génère une onde de pression appelée onde de bouche. À grande distance, cette onde peut être considérée comme étant de forme sphérique et elle se propage à la vitesse du son. Chacune de ces ondes est facilement mise en évidence expérimentalement lors de tirs à courte distance (fig. 2).

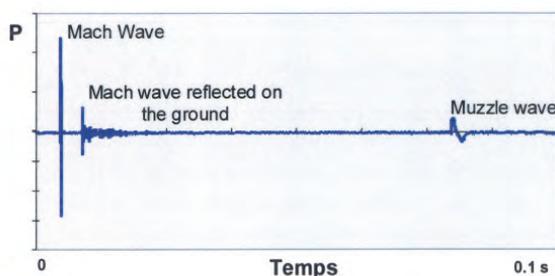


Fig. 2 : Signal acoustique typique d'un tir d'armes

Les bruits de tirs sont suffisamment caractéristiques pour permettre une détection «à l'oreille» et une mise en alerte. Néanmoins l'association dans un même signal physique d'une onde intense et très brève (onde de Mach du projectile) et d'une onde de niveau beaucoup plus faible et plus basse fréquence (onde de bouche) rend difficile l'interprétation complète de ces sons par l'homme.

Quelques caractéristiques typiques de ces ondes sont citées ci-après :

- pics de pression très élevés (de 0,2 à 1 kPa pour l'onde de Mach),

- succession d'impulsions très rapprochées (quelques centaines de ms),
- la durée des impulsions correspondant à l'onde de Mach est très courte (0,2 à 0,5 ms),
- la localisation de la source basée sur la perception de l'onde de Mach (onde conique) et de l'onde de bouche (onde sphérique) n'est pas intuitive.

Le problème est moins critique avec les systèmes électroniques actuels même si des difficultés se retrouvent au niveau du choix du capteur (sensibilité, bande passante, réponse aux niveaux intenses), de la chaîne d'acquisition des signaux (dynamique, précision de la numérisation des signaux), ainsi que pour les algorithmes de traitement des signaux envisagés (extraction et identification des différents phénomènes).

## Traitements des signaux pour la détection et la localisation

Au cours des dernières années, l'ISL a développé plusieurs prototypes de détection et de localisation de sniper basés sur des technologies microphoniques (Fig. 3).



Fig. 3 : Détecteur acoustique (casques microphoniques et capteurs abandonnés)

Ces prototypes peuvent être classés en deux grandes catégories :

- des antennes acoustiques : par exemple une antenne comportant 8 microphones de forme quasi hémisphérique montée sur un casque de protection et associée à des algorithmes de traitements locaux fournissant les directions d'arrivée des ondes détectées, une première estimée de la position du tireur, de la trajectoire du tir et du calibre de la munition,
- des détecteurs acoustiques individuels répartis sur une zone et fonctionnant en réseau à partir d'informations sur les chronométries d'arrivée des différentes ondes. Dix prototypes comportant chacun deux microphones (appelés «doublets») ont été réalisés qui peuvent être déployés sur le terrain.

L'objectif actuel est d'améliorer les performances de ces systèmes en se basant sur des techniques de fusion de données qui ne nécessitent aucune modification de la partie *hardware* des prototypes et permettre ainsi une intégration directe de systèmes existants.

Cela a conduit à privilégier le développement de nouveaux algorithmes de localisation dits « asynchrones » basés sur l'utilisation des écarts entre les temps d'arrivée des ondes de Mach et des ondes de bouche générées lors du tir d'une arme de petit calibre.

L'algorithme de fusion de données recueille les informations qui ont été transmises par les capteurs répartis au travers d'un réseau sans fil (basé sur un protocole de communication ZigBee). Ces données ont été prétraitées localement au niveau de chacun des nœuds acoustiques qui ont détecté un signal impulsionnel dont les caractéristiques correspondent à notre application. Dans le cadre de ce projet, les types de détecteurs acoustiques évoqués précédemment sont utilisés au sein du même réseau ce qui permet d'obtenir dans un premier temps une estimation d'un « corridor de tir » puis une estimation de la position du tireur (Fig. 4).

Les bases physiques sur lesquelles reposent ces techniques sont bien connues, mais la difficulté provient de la nécessité de réaliser un traitement des signaux différencié entre les différents types d'ondes pour tenir compte de la propagation conique des ondes de Mach et de la propagation sphérique des ondes de bouche. L'étape de prétraitements servant à identifier chacune de ces ondes (ou de ces réflexions) est donc particulièrement sensible.



Fig. 4 : Visualisation des résultats fournis sur fond de carte géo-référencée – Estimation du corridor de tir (2 lignes rouges) et position du tireur (point vert)

## Couplage avec l'imagerie active

Pour diverses applications, par exemple pour la surveillance de camps, un système d'imagerie active est utilisable pour l'identification et la vérification de la menace par un opérateur. Ce système actif comporte un imageur intensifié couplé à un illuminateur laser (Fig. 5).

Un laser à solide est utilisé pour émettre dans une longueur d'onde à sécurité oculaire (SWIR : *Short-Wave InfraRed*). La collimation et l'homogénéisation de l'émission du laser utilise une technologie brevetée par l'ISL basée sur un guide d'onde à section rectangulaire dont les propriétés d'homogénéité (profil d'intensité de type « *top hat* ») sont parfaitement adaptées au champ de vision du capteur. L'imageur est composé d'une matrice de résolution 1360 x 1024 points couplée avec un zoom optique motorisé avec une focale variable de 75 mm à 500 mm.

Le système d'imagerie active est installé sur un trépied motorisé de type pan/tilt, qui peut être contrôlé à distance pour orienter le système dans la direction du sniper telle qu'estimée par les détecteurs acoustiques.

## Communication audio et restitution acoustique

Une transmission claire et intuitive des alertes sonores et des informations verbales entre les membres du groupe est importante car elle permet un travail collaboratif efficace et une meilleure prise en compte de la situation sur le terrain. Dans ce contexte, la qualité des communications audio est importante et doit se traduire d'une part par une écoute perçue « naturelle » et d'autre part par le fait que les personnes qui portent un équipement acoustique ne doivent pas se sentir isolées (acoustiquement) de leur environnement extérieur.

Pour que les informations acoustiques restituées soient perçues comme « naturelles », il est non seulement nécessaire que le contenu spectral des sources sonores environnantes soit reproduit fidèlement, pour qu'elles soient correctement reconnues, mais aussi qu'elles soient correctement spatialisées, pour être correctement localisées dans l'espace environnant.

Les équipements actuels qui ne prennent en considération qu'un son monophonique injecté dans une ou deux oreilles ne répondent qu'imparfaitement au besoin, justifiant la recherche de nouvelles solutions techniques.



Fig. 5 : Système d'imagerie active à sécurité oculaire et exemple d'image obtenue

La restitution de la menace détectée peut être transmise aux différents membres du groupe d'intervention par différents moyens. Comme le système de détection fournit des informations géolocalisées, la position estimée de la menace peut être indiquée sur une carte tactique au niveau du poste de commandement, complétée par une séquence vidéo de la scène qui est transmise par le système d'imagerie active. En parallèle, un message sonore (ou son d'alerte) est transmis à chaque membre individuel du groupe d'intervention au moyen d'un système audio-3D, ce qui permet de localiser le tireur de manière intuitive.

Le système audio 3D développé permet la représentation sonore de la direction dans laquelle est estimée le sniper en utilisant les capacités humaines naturelles à localiser un son par une écoute stéréo. Le principe du dispositif de restitution audio 3D est présenté en figure 6.

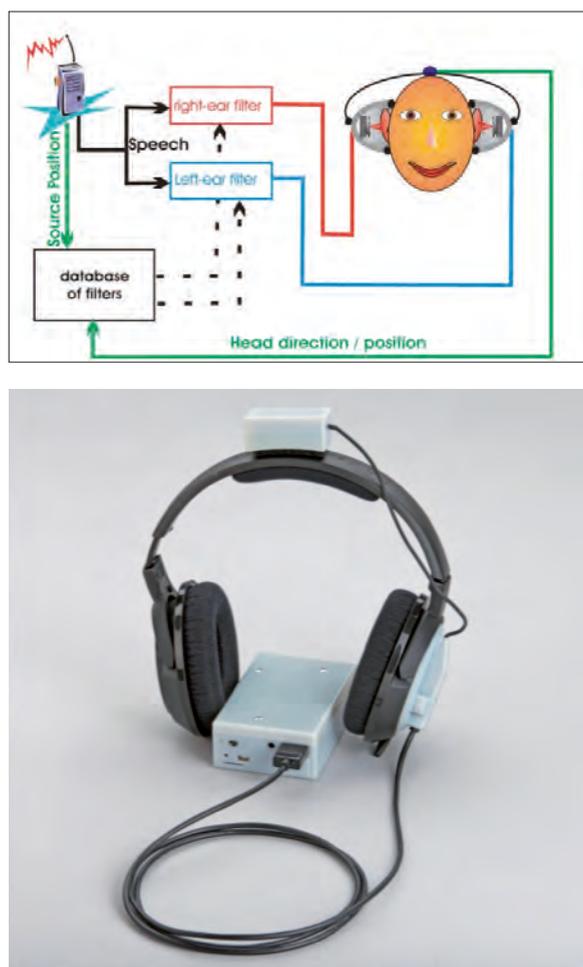


Fig. 6 : Principe de l'équipement de restitution audio-3D et vue du démonstrateur (casque audio, compas magnétique et récepteur GPS sur le dessus et unité de traitement des signaux)

Comme le montre cette figure, pour construire les signaux destinés à chaque oreille, le principe est d'appliquer à la source sonore deux filtres différents, ces filtres étant eux-mêmes dépendants de la position souhaitée de la source. Le signal électrique correspondant au signal de la parole est filtré au moyen des fonctions de transfert appropriées pour l'oreille droite et pour l'oreille gauche.

Les filtres utilisés sont les HRIR (*Head Related Impulse Response*) qui correspondent aux fonctions de transfert HRTF (*Head Related Transfer Function*) dans le domaine fréquentiel. On utilise une base de données de HRIR «génériques» mesurées sur une tête artificielle. Cette fonction de filtrage dépend de la position de la source détectée précédemment et de la position (et de l'attitude) de la tête de la personne écoutant. Elle est tabulée suivant les angles d'azimut et d'élévation. Les messages sonores sont ensuite reproduits par les haut-parleurs d'un casque audio stéréo. Le système doit donc permettre de spatialiser en temps réel un ou plusieurs sons mono en fonction de la position relative des sources par rapport à la tête de l'auditeur. La figure 7 représente les différentes étapes du traitement des signaux sonores qui doivent être implémentées. Sur ce schéma, les carrés rouges représentent les process qui ont été implémentés dans le DSP, les ronds verts représentent les entrées du système, et les ronds bleus représentent les résultats obtenus en sortie des process.

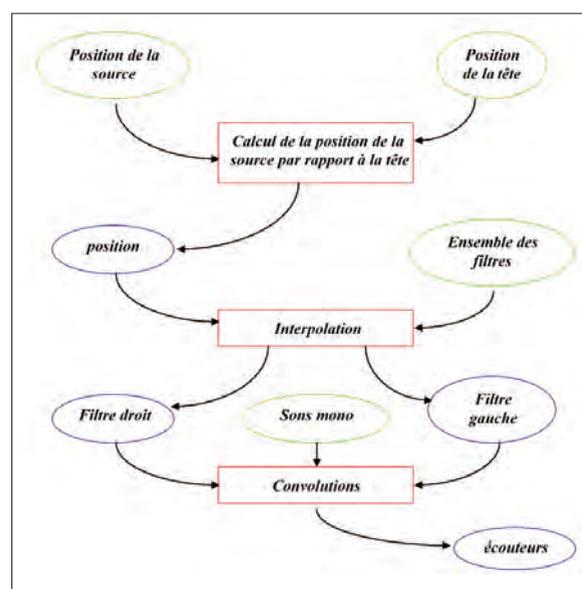


Fig. 7 : Synoptique des principales étapes du traitement des signaux audio 3D

Une phase d'interpolation est nécessaire car les pas entre les différents filtres entraînent des discontinuités lors du passage d'un filtre à un autre. En interpolant des filtres à des positions intermédiaires, on aura un passage plus doux ce qui sera plus agréable à l'écoute (suppression des craquements lors des sauts de filtres). Toutes les positions sont calculées par rapport à une origine fixe qui est la direction du Nord donnée par le magnétomètre. Pour spatialiser plusieurs sources, il suffit de paralléliser le système et d'additionner les résultats.

## Conclusions et perspectives

Cet article a présenté les travaux menés à l'ISL sur le thème de la détection de tirs d'armes, la localisation de l'origine du tir et de la restitution de ces informations au sein d'un système de communication audio-3D. Les différentes technologies ont été développées et testées pour

des applications de surveillance de zone ou comme équipement intégrable aux tenues des forces de sécurité. Les objectifs sont d'améliorer la protection individuelle des personnels par le biais d'une prise en compte «naturelle» et intuitive de l'environnement acoustique, des alertes et des communications audio.

Plus spécifiquement, cette application met en avant les points suivant:

- détection de sources sonores impulsionnelles, avec couplage de moyens acoustiques et optroniques,
- restitution intuitive des menaces par des moyens audio,
- restitution de l'environnement acoustique.

Les principes physiques sous-jacents sont actuellement assez bien connus, néanmoins leur utilisation dans cette application a demandé de résoudre les points principaux suivants :

- mesure de signaux microphoniques «spécifiques» nécessitant à la fois une large bande de fréquences et une très large plage d'amplitudes,
- traitement des signaux acoustiques «avancés» aussi bien en termes de traitement d'antennes que de restitution avancée des voies et alertes sonores.

Au-delà du projet présenté, les technologies développées peuvent avoir d'autres applications civiles ou dans le domaine de la sécurité. Nos axes de travail actuels visent à développer les systèmes de détection de menaces en zone urbaine et les applications de restitution audio 3D.

## Remerciements

Ces travaux ont été initiés par l'ISL dans le cadre de son programme de travail et ont été supportés par la Direction générale de l'Armement (DGA) et le Bundesamt für Ausrüstung, Informationstechnik und Nutzung der Bundeswehr (BAAINBw). Les auteurs les remercient ainsi que toutes les personnes impliquées pour leur participation lors des travaux.

## Références bibliographiques

- [1] S. Hengy, P. Naz, P. Gounon, Source detection and localization using widely separated special arrays : Theoretical study and experimental results, CFA/DAGA'04 Congés Français d'Acoustique, 22-25 mars 2004, Strasbourg, 2004
- [2] F. Parodi, A. Donzier, A., et col., Du principe à la 3ème génération, concept et application de la détection de tirs d'armes légères, Acoustique & Techniques (66), pp. 20-25, 2011
- [3] S. Hengy, M. Laurenzis, A. Schneider, V. Zimpfer, Improvement Of optical and acoustical Technologies for the Protection (IMOTEP). NATO Joint Symposium IST-106 and SET-189, 04-05 May 2015, Norfolk, Virginia, USA, 2015
- [4] P. Naz, S. Hengy, M. Laurenzis, Acoustic sensor network for Hostile Fire Indicator for ground bases and helicopter-mounted applications. SPIE DSS, Proc. 9464, 20-24 April 2015, Baltimore, Maryland, USA, 2015
- [5] M. Laurenzis, F. Christnacher, Laser gated viewing at ISL for vision through smoke, active polarimetry, and 3D imaging in NIR and SWIR wavelength bands. Advanced Optical Technologies, 2 (5-6) pp. 397-405, 2013
- [6] J.R. Gaston, T.R. Letowski, Listener perception of single-shot small arms fire. Noise Control Engr. Journal, 60 (3), May-June 2012, pp. 236-244, 2012
- [7] J. Blauert, Spatial hearing: the psychophysics of human sound localization. MIT Press, Cambridge Massachusetts, 1983

# F2A

Équipementier  
en traitement de l'air

## eSonie

Rendez-vous sur  
[www.f2a.fr](http://www.f2a.fr)

## Logiciel acoustique en ligne

Grâce à un outil simple et accessible, définissez rapidement des silencieux pour toutes vos applications aérauliques.

DÉCOUVREZ TOUTES LES POSSIBILITÉS OFFERTES PAR eSonie :

- > Déterminez vos silencieux en fonction des pertes d'insertions (dB) et des performances aérauliques
- > Traitez une source sonore à partir d'un spectre par bande d'octave (63Hz – 8KHz)
- > Retrouvez tous les textes de prescription

F2A est une entreprise Française qui conçoit et fabrique des solutions aérauliques et acoustiques destinées aux professionnels du génie climatique. Une équipe dédiée aux études acoustiques est à votre disposition pour la sélection et le dimensionnement de votre solution.



ÉQUILIBRAGE



ACOUSTIQUE



GAINE TEXTILE



RACCORDEMENT  
SOUPLE



ÉCHANGEUR

*L'équilibre de l'air*

F2A - 70 impasse des barmettes - parc  
d'activités des 2B - 01360 Bégigneux

Tel : 04 78 06 54 72

Email : [f2a.acoustique@f2a.fr](mailto:f2a.acoustique@f2a.fr)

Site web : [www.f2a.fr](http://www.f2a.fr)