

Du principe à la 3^{ème} génération, concept et applications de la détection de tirs d'armes légères

**Fabrice Parodi, Alain Donzier,
Frédérique Mollieux, Pierre-Henri Vimort**
01dB-Metravib
200, chemin des ormeaux
69578 Limonest CEDEX
E-mail : fabrice.parodi@01db-metravib.com

Résumé

Depuis le besoin initial de protéger les soldats de la paix à Sarajevo, les systèmes de détection de tir ont atteint un niveau de maturité et sont de plus en plus utilisés. Cette maturité a été atteinte depuis la fin des années 90 après les déploiements initiaux et la mise sur le marché de la deuxième génération de systèmes qui a été sélectionnée et utilisée intensivement par les Forces Spéciales Américaines et par plus de 20 pays. Utilisant une technologie dérivée de celle utilisée dans les sonomètres, les détecteurs ont été militarisés pour fonctionner en environnement hostile et apporter une grande précision de localisation sur des plateformes variées. Avec un marché en croissance, l'objectif pour rester en tête de la course est maintenant d'offrir plus de fonctionnalités au meilleur coût, et dans un encombrement réduit. L'intégration dans les systèmes d'information et de commandement fait que les systèmes de détection de tirs apportent une valeur ajoutée dans la reconnaissance et la protection des Forces.

Abstract

From the initial need to protect peace keeping forces in Sarajevo, Gunshot Detection Systems have reached maturity and are being more and more used. The level of maturity of the PILAR systems has been achieved after the initial deployment in the late 90s and the marketing of the second generation of systems that have been selected and intensively used by US SOCOM and more than 20 countries. Using technologies derived from sound level measurement, the detectors have been militarized to operate in harsh conditions and provide precise shooter localization on multiple platforms. With an expanding market the challenge is now to provide more functionalities at reduced cost and size to maintain leadership. Integration within up-to-date information systems makes gunshot detection systems contribute to the global situation awareness.

Le contexte opérationnel

La problématique de la détection de tirs consiste à améliorer les performances de l'oreille humaine. À l'instar de l'optronique qui cherche à donner la capacité de voir de nuit, on cherche à affranchir le fantassin des phénomènes de masquage ou d'échos qui empêchent la localisation de l'origine du tir à l'oreille et qui est d'autant difficile que le fantassin se trouve en état de stress sur le théâtre d'opération. Il s'agit aussi de rendre cette information utilisable par les tiers et donc de la numériser et d'en améliorer la précision.

Bénéficier de l'effet de surprise et pouvoir atteindre sans être touché constitue un axiome de base lors de conflits armés. Mais comment agir si on ne sait pas d'où vient le tir ?

De plus, au-delà de la détermination de la direction ou de la distance pour indiquer l'origine du tir, d'autres aspects opérationnels sont à prendre en compte comme la facilité d'installation et d'utilisation, la connectivité avec d'autres équipements et la diffusion de l'information sur le champ de bataille,...



Photo 1 : Antenne acoustique déployée en Irak

Destiné à être utilisé avec le minimum de formation, sans réglage, donnant des informations d'une manière immédiatement compréhensible en situation de stress, on comprend aisément que l'ergonomie d'un système de détection doit être un des points clés.

De même, les facteurs poids, encombrement, et par conséquence autonomie électrique sont autant de paramètres d'acceptation. D'autres informations pourront être ajoutées dans la mesure du possible : les coordonnées GPS de l'origine du tir, le calibre de l'arme, qui relèvent de problématiques différentes, de l'intégration d'un système de positionnement d'une part, de l'exploitation du signal acoustique d'autre part.

Enfin, il convient de différencier les exigences selon l'application : protection du fantassin, équipement du véhicule blindé, autoprotection de l'hélicoptère ou surveillance de base pour le domaine de la défense, et le pendant sécuritaire civil avec l'utilisation des mêmes porteurs lors d'événements majeurs, la protection de VIP ou encore d'installations sensibles...

Le contexte historique

Les premiers pas ratés de la détection ou le «syndrome irlandais»

Dans les années 1970, les Britanniques avaient essayé de se doter de tels équipements dans le cadre de la lutte contre l'IRA. Malheureusement, les résultats étaient très mitigés car les rues de Belfast généraient beaucoup plus d'échos que le système n'était capable de filtrer. Comme bien souvent dans le domaine militaire, ces résultats ont pénalisé les produits développés par la suite car il subsistait des rapports qui concluaient à l'inadéquation de la technologie acoustique ! Encore maintenant, certains observateurs ont des doutes sur les possibilités offertes par l'acoustique alors que des systèmes comme le PILARw ont été déployés avec succès sur de nombreux théâtres et que leur emploi se généralise. Il n'en reste pas moins vrai que la combinaison avec des capteurs complémentaires peut être encore plus performante que la seule technologie acoustique.

De 1995 à 1998, les premières applications sur le terrain



Photo 2 : Site urbain entouré de collines, très exposé à la menace de snipers

Lors des événements de Sarajevo, les Forces Spéciales Françaises en collaboration avec la STAT (Section technique de l'Armée de Terre) ont contacté O1dB-Metravib, afin d'étudier un appareil qui permettrait de localiser les snipers. Après une rapide réflexion scientifique,

il a été décidé d'adapter un système existant, destiné à la détection d'intrusion de véhicule, à la détection de tirs. Afin de récolter des exemples de signaux réels à l'aide d'un prototype, Frédéric Molliex est alors parti volontairement à bord d'un avion militaire, habillée en soldat de l'ONU. Ces tests réels ont été indispensables pour optimiser le travail d'analyse en laboratoire afin de confirmer la maturité de la technologie acoustique pour ce type d'application. Le RETEX de cette mission intitulée SERRIA-BRAVO fut un succès. La collaboration entre la DGA, la STAT, les Forces Spéciales et O1dB-Metravib s'est donc intensifiée afin de finaliser au plus vite une première version du produit pour la mettre à disposition sur le terrain. C'est le début de l'histoire du PILAR (Produit d'Identification et de Localisation d'Armes à feu).

Très rapidement, les équipes techniques du Service Détection acoustique des menaces (DAM) se sont orientées vers une technologie «classique» : une antenne acoustique composée de plusieurs microphones qui permet une triangulation sur les deux ondes acoustiques des tirs (onde de la balle et onde de la détonation). Afin de déterminer les informations de localisation en azimut et en élévation, l'antenne comporte trois microphones dans un plan horizontal et un microphone placé en hauteur, ce qui lui donne une forme tétraédrique.



Photo 3 : Antenne microphonique prototype installée sur un VAB de l'armée française

Actuellement, les performances atteignables par ce type d'antenne autorisent une précision de l'ordre de +/- 2 à 5° pour les deux grandeurs. La distance s'obtient par la différence de temps d'arrivée entre l'onde de Mach (celle du projectile) et l'onde de bouche (celle résultant de la déflagration de la poudre propulsive) corrigée de la distance de passage de la balle et de la loi de vitesse de la munition. Lorsqu'on dispose de plusieurs antennes comme dans le cas de la protection d'une base, la précision de la distance est améliorée par triangulation à partir des différents points de mesure (fusion homogène). Relativement aux autres grandeurs, la distance est obtenue avec une erreur plus grande. Sur un plan opérationnel, la distance est un paramètre moins critique que la direction : en effet, lorsque la direction est bonne, il est possible de scruter avec des jumelles ou tout autre moyen optique le cône de menaces et finalement de procéder visuellement à la phase de localisation plus fine et d'identification de la menace.

Le développement de nouveaux systèmes au début des années 2000

Deux variantes de l'équipement sont alors développées :

- un système statique, pour la protection d'un espace fixe tel qu'un *check-point*, une base ou un bâtiment sensible ;
- un système pour véhicule, qui peut fonctionner en mouvement ou à l'arrêt. On ne se rend pas compte des niveaux de bruit élevés que l'on rencontre dans les véhicules militaires, et de plus, avec les casques radio ou intercoms, et l'isolation apportée par les surblindages maintenant généralisés, la perception des bruits extérieurs est très réduite.

Les équipages sont dès lors incapables de localiser la source de tirs et ne réalisent pas ou trop tard la présence de tirs : il n'est pas rare que l'on constate au retour de mission de véhicules blindés de nombreux impacts qui n'ont pas été perçus par l'équipage. Et un tir « raté », passant de peu à côté du véhicule sera quand à lui totalement ignoré...



Photo 4 : Système intégré sur véhicule de transport de troupes

Grâce à la mise sur le marché des premières versions du PILAR, et aussi grâce à la communication qui se fait dans le monde particulier des Forces Spéciales, le système de détection a été évalué au travers d'un Foreign Comparative Testing (FCT), procédure spécifique aux USA qui permet d'évaluer des produits étrangers en cas de lacune capacitaire sur le territoire US.

Le succès de ce test va entraîner une collaboration très étroite avec les US SOCOM (Special Operations Command) qui sont des utilisateurs à la fois exigeants et pragmatiques. Leur credo est de valider que les matériels répondent au moins à 80% de leurs besoins en conditions opérationnelles. Les systèmes existants ont donc été qualifiés aux sévères normes MIL-STD puis la gamme a été complétée avec, par exemple, un couplage avec l'optronique réalisé avec le système PIVOT, soit une tourelle équipée d'une caméra et, en option, d'une caméra thermique automatiquement dirigée dans la direction de l'origine d'un tir. Cela permet de valider la menace et d'affiner encore la position du tireur.

La voie du futur : miniaturisation et intégration de logiciels

Une tendance de fond est la généralisation de ces équipements, ce qui va de pair avec la réduction des tailles, poids, consommation et coût.

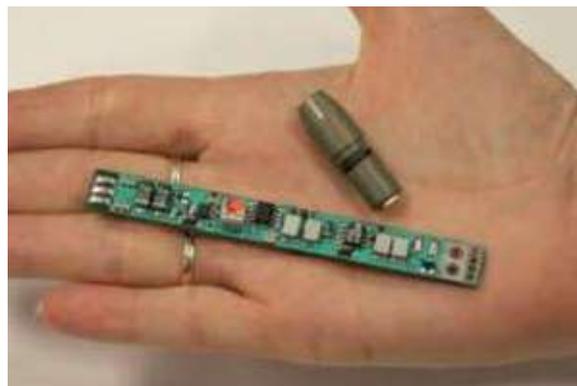


Photo 5 : Microphone miniature et carte de conditionnement

En effet, ce qui est évident pour un fantassin qui doit transporter son énergie, le devient également pour les véhicules qui doivent embarquer tout ce dont le fantassin a besoin, équipements incluant l'armement mais aussi les tenues, le ravitaillement etc.. pour des missions pouvant durer plusieurs jours.



Photo 6 : Système miniaturisé pour montage sur arme

Et donc, la multiplication des systèmes crée des problèmes de place, de consommation électrique, voire de sources de chaleur supplémentaires alors que tous les véhicules, souvent anciens, ne sont pas encore dotés de la climatisation ni d'un volume et d'une charge utile suffisants. De même, les besoins évoluent, les menaces diffèrent d'un théâtre à l'autre et le spectre de menaces à détecter doit s'élargir. Un détecteur acoustique ne doit pas se limiter aux tirs mais aussi devenir les oreilles du véhicule et de son équipage. Enfin, la multiplication des équipements, bien sûr tous indispensables, crée un problème budgétaire. La réduction des coûts se comprend dans le sens où des systèmes fabriqués seulement par dizaines pourraient bénéficier de modes de fabrication plus efficaces s'ils étaient fabriqués en grandes quantités. En retour, la réduction du coût permet d'équiper plus largement les forces et donc de fournir une meilleure protection des combattants.

Sur un plan opérationnel, le besoin de communication entre unités, la vision que le commandement souhaite avoir de la situation sur le terrain font que les capteurs doivent être capables de s'intégrer dans une chaîne de transmission d'information pour ce que l'on appelle le suivi

des positions ennemies « Red Force Tracking » (RFT). Et forcément, un détecteur de tir donnant la position de l'ennemi, contribue par essence à ce RFT. Il doit donc pouvoir s'intégrer simplement dans les systèmes d'information de plus en plus complexes qui font partie des véhicules de dernière génération.

Le contexte montre que l'aspect acoustique n'est qu'une partie de la réussite d'un produit, la stabilité des performances étant plus importante que la recherche pure de la performance (pour autant que la performance soit suffisante pour que le service soit rendu).

Bien sûr, il n'est pas souhaitable que les conflits durent ou se multiplient, et la recherche technologique pourra in fine, servir pour des applications civiles. Si l'analyse acoustique peut compléter l'analyse vidéo et cela pour des applications de protection des infrastructures, il y a encore beaucoup à faire pour obtenir par calculateur la finesse d'analyse de l'oreille et du cerveau humain pour identifier toutes les signatures acoustiques...

Le principe de base de la localisation d'un tir d'arme à feu

Lors du tir d'une arme à feu, la localisation peut être effectuée conjointement :

- à partir du bruit de la balle appelée onde de Mach car pour la plupart des armes de guerre, la vitesse de balle en sortie canon est supersonique (2 à 3 fois la vitesse du son) ;
- à partir du bruit de bouche généré par l'explosion de la poudre de munition dans le canon de l'arme.

La propagation de ces deux phénomènes physiques est représentée sur le schéma ci-dessous :

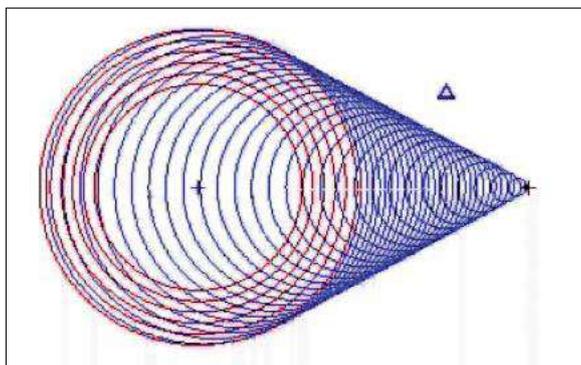


Fig. 1 : Propagation conique de l'onde de Mach (en bleu) et propagation sphérique de l'onde de bouche (en rouge)

L'onde de mach est une onde conique dont le demi-angle au sommet dépend de la vitesse instantanée de la balle par la relation :

$$\sin(\alpha) = \frac{1}{M} = \frac{C_0}{V_{bal}}$$

Le signal temporel de la pression acoustique captée par un microphone à proximité de la trajectoire de la balle est représenté sur le chronogramme ci-dessous, on y distingue les deux ondes qui sont différenciées par leurs caractéristiques fréquentielles :

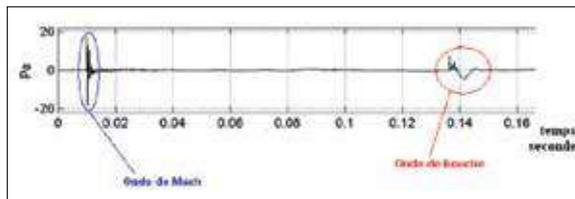


Fig. 2 : Chronogramme du signal temporel de la pression acoustique captée par un microphone à proximité de la trajectoire de la balle

Il est à noter qu'un tir n'est pas systématiquement caractérisé par ces deux ondes, une seule d'entre elles peut être présente (Onde de mach seule dans le cas d'un tir avec un silencieux, et onde de bouche seule dans le cas d'un tir non agressif ou d'un tir avec une munition subsonique).

Cette signature acoustique du tir est détectée, puis enregistrée à l'aide d'une structure munie de plusieurs microphones (antenne acoustique) et l'on effectue ensuite un traitement basé sur la détermination des décalages temporels entre les différents microphones pour caractériser le vecteur normal au front d'onde acoustique pour l'onde de Mach et/ou l'onde de bouche.

La combinaison de ces informations permet le calcul avec une bonne précision de la position relative du tireur par rapport à l'antenne acoustique (gisement, site, et distance) ainsi que la trajectoire de la balle et l'estimation du calibre.

Pour l'estimation du calibre, on utilise l'onde de Mach qui lorsqu'elle arrive en un point de mesure donné (antenne acoustique) a une forme caractéristique en N. Les caractéristiques de cette « onde en N » permettent l'estimation du calibre de l'arme.

En utilisant le modèle de Whitham [1] :

$$\frac{P_{max}}{P_0} = \frac{k \cdot (M^2 - 1)^{1/8} \cdot d}{b^{3/4} \cdot l^{1/4}}$$

$$T = \frac{k' \cdot M \cdot b^{1/4} \cdot d}{C \cdot (M^2 - 1)^{3/8} \cdot l^{1/4}}$$

Sur ce modèle, le pic de pression Pmax et la durée T de « l'onde en N » sont reliés à la longueur du projectile l, à son diamètre d (ou calibre), à la distance de passage de balle b, au nombre de Mach M (V_{Balle}/C, C vitesse du son and V_{balle} vitesse de la balle), à la pression ambiante P₀, k and k' sont des constantes.

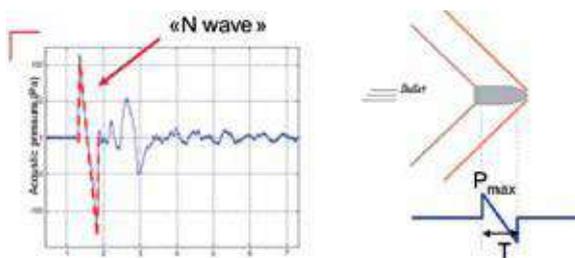


Fig. 3 : Modèle de l'onde de Mach

Le synoptique global du traitement réalisé dans le système de détection et de localisation de tir d'arme à feu est schématisé ci-dessous :

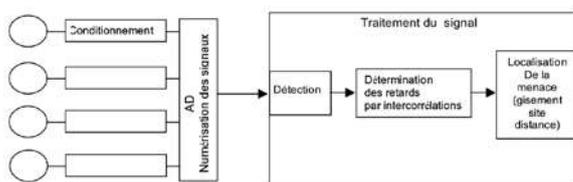


Fig. 4 : Synoptique global du traitement réalisé dans le système de détection et de localisation de tir d'arme à feu

Le système acoustique de localisation de tir d'arme à feu n'est pas uniquement destiné à surveiller un site, mais peut être utilisé également pour l'autoprotection d'un porteur (véhicule blindé, bateau, hélicoptère,...). Dans ce cas, les traitements des signaux sont, bien entendu, complexifiés puisque les ondes acoustiques caractéristiques du tir de l'arme à feu (onde de Mach et onde de bouche) doivent être extraites d'un environnement sonore très important.



Fig. 5a : Essais de tir sur Puma muni de capteurs acoustiques

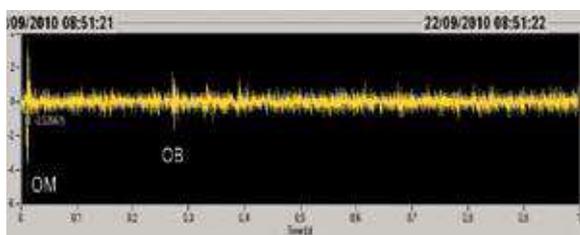


Fig. 5b : Ondes caractéristiques d'un tir, noyées dans le bruit du porteur

Pour un hélicoptère par exemple, la vitesse de l'extrémité d'une pale du rotor principal peut générer des ondes acoustiques similaires à une onde de Mach.

Les spécificités des développements pour les applications "Défense"

Les technologies employées dans un système de détection de tir sont évidemment très proches de celles utilisées dans des appareils de métrologie acoustique. Par exemple, un système PILARw est une sorte d'analyseur temps réel à 4 voies qui dispose d'algorithmes particuliers et ceci est complètement masqué pour l'utilisateur. En effet, ce type d'équipement étant utilisé en situation de combat potentiellement très dangereuse et donc de stress maximal, il est primordial qu'il soit le plus simple possible à utiliser sans nécessiter de connaissances particulières (la formation doit pouvoir elle-même être très réduite) dans un environnement très contraint : dans toutes les conditions extérieures possibles, dans un véhicule en mouvement, de jour comme de nuit, en zone urbaine ou dans le désert. Ces conditions ne doivent également pas perturber les performances et les systèmes sont testés dans des conditions météo bien plus sévères que les sonomètres par exemple (températures extrêmes de -40° à $+70^{\circ}\text{C}$, vent, pluie, sable, chocs). On teste également leur résistance au transport dans des conditions extrêmes (soutes d'avion non pressurisées, atterrissage en piqué, transport terrestre sur piste), et leur fonctionnement à l'arrivée en n'importe quel point du globe.

En termes de niveaux acoustiques, nous avons des niveaux sonores très élevés de l'ordre de 160 dB, quand une balle passe à proximité d'une antenne, ou au contraire de niveaux très faibles lorsque l'on doit reconnaître une détonation à très grande distance. Mais la plus grande difficulté réside dans le traitement de signal lorsque par exemple nous avons un rapport signal à bruit très réduit, dans le cas d'un tir noyé dans le bruit de fond d'un hélicoptère. Les algorithmes doivent prendre en compte la très grande dispersion des signatures acoustiques à traiter en fonction du type de calibre, du type de balles, du type d'attaques et du type d'environnement où les antennes acoustiques sont déployées. Pour ces raisons, il est difficile de décrire en détail le fonctionnement des systèmes PILARw car ce serait dévoiler une part importante de notre savoir faire. À titre d'exemple, grâce au travail de nos spécialistes, nos systèmes sont les seuls sur le marché à classer le calibre de l'arme. Sur un plan scientifique, cela semble assez facile avec la littérature disponible mais en réalité, nous avons mis plusieurs années à obtenir des résultats satisfaisants.

Par conséquent, la vérification des résultats est un point essentiel. Un dégrossissage peut se faire en laboratoire en utilisant les banques de données dont nous disposons mais le verdict final revient toujours au terrain. En agrégeant les données récoltées depuis des années, nous disposons maintenant de plus de 25 000 tirs – à balles réelles puisqu'on utilise l'onde de Mach du projectile – qui représentent toutes les combinaisons de conditions possibles : angle et distance de tirs, calibres et armes différentes, conditions météorologiques, types de véhicules et vitesse de roulage etc...

Les challenges pour progresser et des enjeux réels

À partir des équations de base qui sont bien connues, nous avons mis l'accent sur les spécificités liées à une application de type Défense. Comme tout développement technique, la confrontation avec la réalité du terrain est éminemment plus complexe dans le monde de la Défense. Par exemple, s'assurer que le bruit propre d'un hélicoptère donné ne va pas dégrader les performances d'un détecteur acoustique est autrement plus compliqué de réaliser la même opération sur des véhicules civils. L'accès aux porteurs, leur instrumentalisation nécessitent des procédures à respecter et donc des études de qualification qui induisent des délais et des coûts importants. Néanmoins, en raison de l'intérêt opérationnel, certaines études ont été réalisées permettant de développer des outils de simulation afin de superposer des signaux de tir à des bruits d'hélicoptère pour déterminer les performances des systèmes en limitant le nombre d'heures de vol.

Car l'intérêt aujourd'hui pour la technologie acoustique est bien réel, le détecteur de tir est un des rares dispositifs simples qui permet d'indiquer avec précision la localisation d'un combattant ennemi, et de l'intégrer facilement dans les systèmes d'information des Armées dans le concept généralement appelé la NEB (Numérisation de l'Espace de Bataille) et qui permet la transmission et le partage des informations aux différents niveaux de la chaîne de commandement. Finalement, après avoir été un parent pauvre des technologies militaires, l'acoustique, au prix de la démonstration réussie de sa capacité opérationnelle, va prendre son rang dans les technologies reconnues pour des applications exigeantes sur tous les plans en se diversifiant sur l'ensemble des applications, bases, véhicules terrestres, aéroportées et équipement individuel.

Références bibliographiques

[1] A. Permuy et P-H. Vimort, Brevet d'invention 94 06729 : Procédé et système pour localiser une arme à feu à partir d'une détection acoustique, Aout 1996

[2] R. Stoughton, "Measurement of small-calibre ballistic shock waves in air", JASA, August 1997

