

CFA/VISHNO 2016

Effets de la Turbulence sur des Impulsions Acoustiques se Propageant près du Sol

S. Cheinet^a, M. Cosnefroy^a, D. Wilson^b, V. Ostashev^c, S. Collier^d et J. Cain^d

^aISL, 5 Rue General Cassagnou, 68300 Saint-Louis, France

^bU.S. Army Engineer Research and Development Center, 72 Lyme Road, Hanover, NH03755, USA

^cCIRES/CU and NOAA/ESRL and US Army/ERDC, 325 Broadway, CO80305 Boulder, France

^dArmy Research Laboratory, 2800 Powder Mill Rd, Adelphi, MD 20783, USA
sylvain.cheinet@isl.eu



LE MANS

Les systèmes de détection acoustique sont utilisés pour détecter des impulsions sonores telles que des tirs ou explosions. La performance de ces systèmes fluctue, car ces sons se propagent à travers des conditions environnementales qui varient près de la surface (nature du sol, turbulence, météorologie). La présentation est issue d'un effort conjoint entre l'ISL, l'ARL et le CRREL, dont l'objectif est d'améliorer la compréhension amont de ces effets sur un champ sonore à caractère impulsif. Des données expérimentales sont présentées, qui sont basées sur la mesure d'impulsions acoustiques à distance d'une source sonore reproductible. Une analyse originale de ces données est proposée, avec en soutien des études analytiques et des simulations numériques, pour étudier comment les conditions environnementales modulent les variations des impulsions sonores.

1 Introduction

Dans le domaine Défense et Sécurité, l'acoustique procure une méthode de détection passive, relativement peu coûteuse et omnidirectionnelle des événements sonores. Les systèmes de détection acoustique sont donc conçus pour détecter, localiser voire identifier les sources des bruits émis : explosions, véhicules, etc. Jusque dans les années 90, la faisabilité de systèmes de détection acoustique était investiguée. A présent que cette faisabilité est démontrée, la maîtrise des effets de propagation est l'un des enjeux de R&D du domaine. En effet, la propagation du son en champ lointain (à laquelle on s'intéresse pour des objectifs de détection) implique des modifications de l'onde acoustique en lien avec son environnement. Les conditions environnementales altèrent ainsi les signaux mesurés par les systèmes, donc la performance de ces systèmes.

La référence [1] étudie la sensibilité de la performance des systèmes antennaires de détection / localisation de tir aux conditions environnementales. La portée de détection des explosions varie d'un facteur 3 en fonction des effets de réfraction (stratification en vent et température, turbulence). Pour des tirs de projectile supersonique, la turbulence cause une variabilité notable de l'onde de bouche (associée à l'arme) et de l'onde de Mach (associée au projectile, Fig. 1), qui en retour cause une incertitude sur l'azimut et la distance du tireur.

Proche de la surface, l'atmosphère est toujours plus ou moins turbulente, et les caractéristiques physiques de cette turbulence varient considérablement avec les conditions météorologiques et la nature du sol. Il est donc important de documenter les perturbations acoustiques liées aux effets de l'atmosphère, et en particulier, de la turbulence proche de la surface, pour adapter les traitements algorithmiques et la forme des systèmes de détection de tir (ex : taille de l'antenne), et réduire leur sensibilité voire améliorer leurs performances.

Or la compréhension de ces perturbations reste relativement parcellaire. L'arsenal des outils et connaissances disponibles sur le sujet (données expérimentales, études théoriques, modèles numériques) fait surtout ressortir la complexité des phénomènes en jeu, avec des interactions multiples selon les tailles de tourbillon et les longueurs d'onde acoustiques. La complexité du sujet ne permet qu'une maîtrise partielle du couplage de ces processus avec d'autres : réfraction moyenne liée à la stratification, absorption atmosphérique, réflexion sur le sol, éventuellement non-linéarité de la propagation proche de la source. En outre, cet arsenal est essentiellement centré sur les signaux acoustiques mono-fréquentiels ou dans des gammes de fréquences étroites. L'impact de la turbulence sur les caractéristiques physiques des impulsions sonores (Fig. 1) est moins documenté, et ne permet d'appréhender la variabilité observée que de manière incomplète.

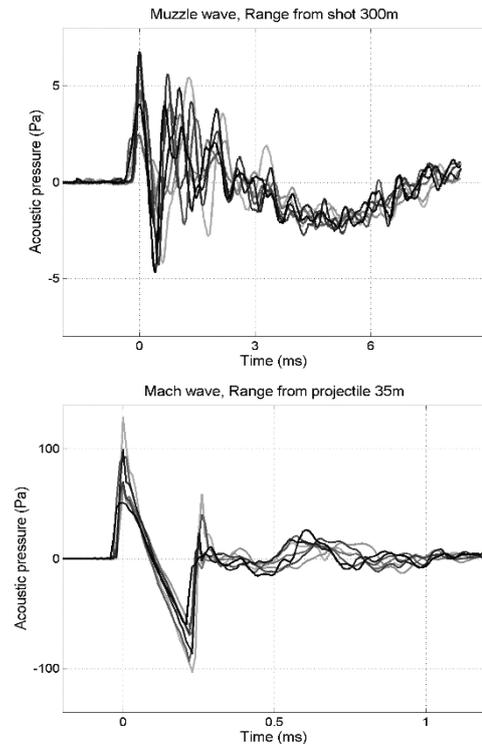


Fig. 1: (Haut) Onde de bouche à 300m de l'arme, et (Bas) onde de Mach à 35 m du point émissif de l'axe de tir, pour 7 tirs séparés par quelques secondes, toutes autres conditions identiques (arme, projectile, capteur etc). Les mesures sont synchronisées au maximum de pression. D'après [1].

L'Army Research Laboratory (ARL), le Cold Region Research and Engineering Laboratory (ERDC/CCREL) et l'Institut Franco-Allemand de Recherches de Saint-Louis (ISL) mènent un projet en collaboration, dont l'objectif est d'étudier les effets de la turbulence sur les impulsions acoustiques se propageant près du sol. Compte tenu du caractère non déterministe de la turbulence, le principe du projet est d'examiner la variabilité statistique du champ acoustique. La statistique considérée est celle à laquelle les fluctuations turbulentes proche de la surface prennent un caractère quasi-stationnaire – typiquement sur une durée de 10 - 30 mn. Les processus de champ proche ne sont pas considérés.

Ce document présente les outils développés et mis en œuvre dans le cadre de ce projet. La Section 2 introduit une série de mesures expérimentales originales, et analyse des résultats préliminaires. Une approche uniquement expérimentale est inopérante face à la versatilité des conditions de propagation. La Section 3 discute des outils d'analyse théorique et de simulation numérique qui sont développés dans le cadre du projet. La Section 4 conclut ce document.

2 Approche expérimentale

Cette section décrit l'approche employée pour acquérir des données expérimentales sur la propagation d'impulsions proche du sol. Le principe général des mesures est d'utiliser une source acoustique impulsienne et reproductible, pour mesurer concomitamment les caractéristiques de l'environnement et le front d'onde acoustique propagé. Afin d'illustrer ce principe, une série de mesures est présentée, qui a été effectuée en Avril 2013 sur le terrain d'expériences de l'ISL. D'autres mesures sont réalisées sur le même principe, avec d'autres sources et d'autres caractéristiques de métrologie.

Source

Dans l'exemple considéré, la source acoustique est un haut-parleur proche du sol, de manière à ce que l'onde réfléchi soit quasiment confondue avec l'onde directe. La pression acoustique mesurée à 1 m a été étudiée et est très reproductible. Le pic dominant de l'émission dure environ 1.7 ms, avec des fréquences caractéristiques entre 150 et 1200 Hz (longueurs d'onde de quelques dizaines de centimètres à quelques mètres). Cette impulsion sonore est répétée toutes les 6 s.

Environnement

L'environnement de mesure est une zone bien dégagée, de 120 m x 150 m, située dans une forêt. Deux types de sol sont accessibles : un sol herbeux et un sol goudronné sur une petite route. Plusieurs distances de propagation ont été considérées. Au moment des mesures, la météo est avec un vent léger, un beau temps et des températures de l'ordre de 25 °C. En estimant le flux de chaleur sensible et la vitesse de friction, les métriques classiques de la turbulence peuvent être estimées en fonction des conditions météo grâce aux relations de similarité de Monin-Obukhov. La présence de la forêt pose cependant une restriction à l'usage de ces relations. Les caractéristiques de la turbulence sont donc mesurées avec un anémomètre sonique 3D (Campbell CSAT), avec une fréquence d'acquisition de 20 Hz. Ces mesures permettent de caractériser la gamme inertielle-convective de la turbulence atmosphérique. Cette gamme comprend les échelles de quelques centimètres à quelques mètres. Elle inclut la plupart des tailles de tourbillons qui agissent sur l'onde acoustique – et notamment les plus petites.



Fig. 2: Photographie de l'antenne acoustique sur le site de mesure, avec les 8x8 microphones.

Mesures acoustiques

Les mesures acoustiques sont réalisées avec une antenne de 8 x 8 microphones synchrones, placés sur une grille cartésienne de 20 cm de côté (Fig. 2). Les plus hautes mesures sont réalisées à une hauteur de 1.86 m. La fréquence d'acquisition de 51.2 kHz est équivalente ou supérieure à celle utilisée dans les systèmes de détection acoustique discutés en Sec. 1. Avec cet échantillonnage, les mesures acoustiques ont une incertitude temporelle de 2×10^{-5} s, soit moins de 7 mm. Un aspect important est que la mesure est synchronisée avec le déclenchement de la source – un des 64 microphones est en fait détaché et placé à 1 m de la source. Ce dispositif permet de mesurer le temps de propagation du signal.

La Fig. 3 illustre 78 impulsions mesurées avec ce protocole à une distance de 86 m lors d'une acquisition d'environ 10 minutes au-dessus de la route. Deux techniques ont été évaluées pour quantifier le temps d'arrivée (TA): (i) la détection d'un pic de pression acoustique, ou (ii) la meilleure corrélation croisée avec l'impulsion à la source. Les deux méthodes donnent des résultats très comparables. Les fluctuations de TA atteignent ± 1 ms, soit des divagations spatiales du front d'onde de ± 34 cm. Quelques enregistrements sont omis lorsque le rapport signal sur bruit est dégradé, ce qui peut expliquer les quelques discontinuités qui semblent apparaître. La Fig. 3 montre aussi la pression acoustique avec resynchronisation au TA. Une variabilité demeure encore de mesure à mesure. La forme d'ensemble du signal reste reconnaissable (pic positif suivi d'un pic négatif, pas d'arrivées multiples évidentes), mais des recompositions de forme (étalement etc) sont clairement identifiables, et l'amplitude du signal fluctue d'un facteur 2. Les temps caractéristiques des évolutions de TA et de forme du signal ne sont pas faciles à mettre en évidence avec la Fig. 3. Ils semblent relativement similaires, et de l'ordre de quelques dizaines de secondes.

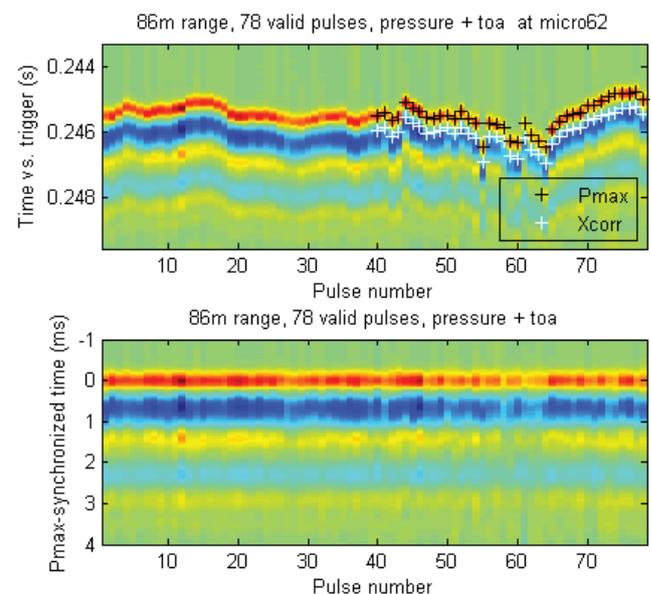


Fig. 3: Pression acoustique avec le temps lors de mesures à 86 m sur route. Les croix blanches et noires indiquent les TA mesurés selon les deux méthodes examinées (leur décalage est une question de convention). La figure du bas montre la même analyse, mais avec une resynchronisation au temps d'arrivée. Les couleurs varient de bleu foncé (-0.8 Pa) à rouge foncé (0.8 Pa).

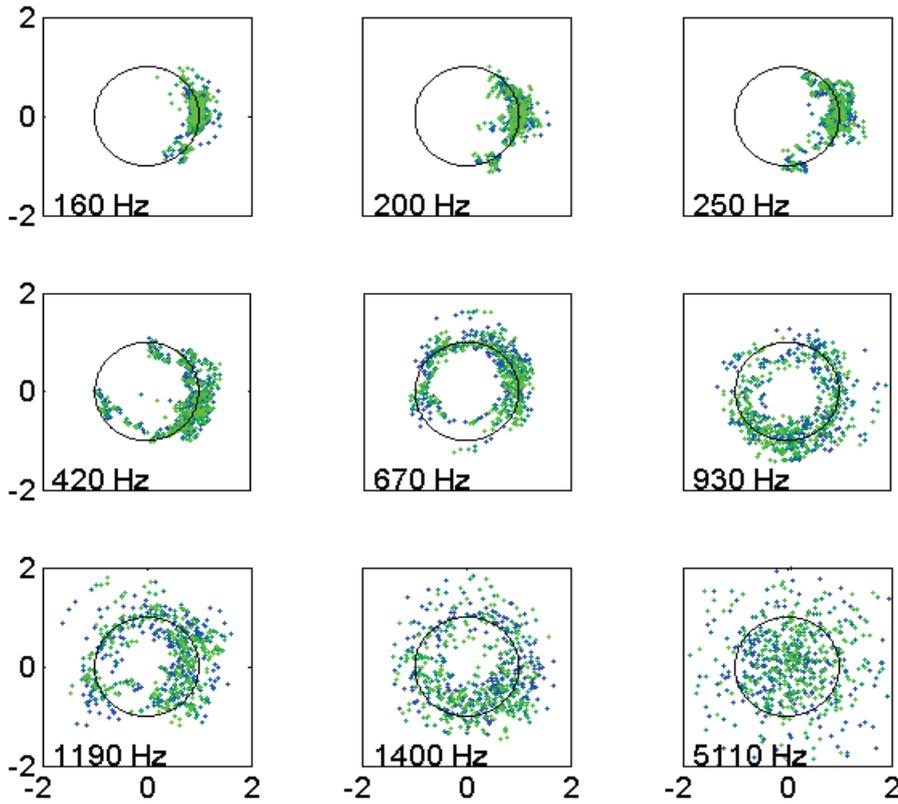


Fig. 4: Valeurs combinées de la phase et de l'amplitude (normalisée à sa moyenne) de la pression complexe, pour les 78 impulsions mesurées, à différentes fréquences. Le cercle unité est indiqué. Les 8 couleurs montrent les 8 microphones utilisés pour cette analyse, qui sont ceux du haut de l'antenne.

La Fig. 4 illustre la pression acoustique complexe, telle que mesurée en 8 microphones pour les 78 impulsions obtenues sur route à 86 m. La pression mesurée est transformée en fréquences, la moyenne est calculée, et on considère le rapport de la pression complexe à la moyenne de l'amplitude. A basse fréquence, la variabilité de l'onde prend la forme de déphasages, avec une amplitude normalisée relativement proche de 1. Ces déphasages peuvent être vus comme le résultat des divagations des diverses impulsions [2]. La fréquence augmentant, les déphasages deviennent de plus en plus importants, car une même divagation spatiale couvre de plus en plus de longueurs d'onde. Au-delà de 1000 Hz, la phase est totalement aléatoire. Les fluctuations d'amplitude et de log-amplitude augmentent aussi avec la fréquence. La fréquence de 5110 Hz est en dehors des fréquences émises par la source, et caractérise le type de statistique obtenu pour le bruit ambiant.

Les résultats expérimentaux de la Fig. 4 correspondent aux résultats obtenus par [3] avec des mesures fréquentielles. L'originalité de l'approche expérimentale employée ici est d'utiliser des impulsions sonores. Le recours aux sons impulsifs ne rend compte de la continuité temporelle des évolutions que d'une manière limitée (ici, échantillonnage toutes les 6 s). En revanche, il permet de couvrir différentes fréquences donc différents régimes de propagation distincts avec le même jeu de données. En outre, les diagnostics sur la variabilité de la forme d'onde et sur les temps d'arrivée apparaissent de manière intuitive (Fig. 3).

Les études théoriques peuvent éclairer un certain nombre d'aspects de ces mesures expérimentales. Classiquement, on peut ainsi introduire deux paramètres qui caractérisent le régime de propagation [2]:

$$\Lambda \propto \left(\frac{\sqrt{\lambda L}}{L_{max}} \right)^2, \quad (1)$$

$$\Phi^2 \propto k^2 C_n^2 L L_{max}^{5/3}, \quad (2)$$

où k est le nombre d'onde à la longueur d'onde λ considérée, C_n^2 est le paramètre de structure de l'indice de réfraction acoustique, L est la distance de propagation et L_{max} est l'échelle externe de la turbulence (la borne maximale de la gamme inertielle-convective). Des coefficients numériques d'ordre 1 apparaissent dans ces équations dans la littérature, mais l'incertitude sur L_{max} est telle que leur introduction n'est pas indispensable ici.

Dans les mesures illustrées, on attend que les fréquences relativement basses devraient vérifier $\Lambda \approx 1$ et $\Phi < 1$ (extension de Rytov selon [2]), tandis que les fréquences hautes devraient vérifier $\Lambda < 1$ et $\Phi > 1$ (fortes fluctuations). Quand Φ n'est pas très supérieur à 1, Φ^2 renseigne directement sur la variance des fluctuations de phase. L'Eq. (2) rend ainsi compte de l'augmentation des fluctuations de phase avec la fréquence (Fig. 4). De même, l'augmentation des fluctuations de log-amplitude avec la fréquence, et la décroissance du module de la pression complexe moyenne (centre de gravité sur la Fig. 4) peuvent faire l'objet de comparaison entre les observations et les solutions théoriques.

Grâce à la mesure antennaire, les statistiques corrélées en plusieurs points peuvent aussi être examinées. Entre autres, la fonction de structure de la phase (proportionnelle à l'angle d'arrivée de l'impulsion sonore) et la cohérence entre deux points et deux fréquences ont été évaluées. Là encore, l'analyse peut donner lieu à des comparaisons avec les prévisions théoriques. Des investigations sont en cours pour consolider et élargir ces comparaisons. La principale difficulté de ces investigations expérimentales réside dans le couplage des processus physiques à l'œuvre (sol d'impédance finie, absorption gazeuse, réfraction moyenne, anisotropie de la turbulence etc), et leur caractérisation.

3 Théorie et modélisation

Le projet en cours inclut aussi des efforts d'analyse théorique et numérique. Cette approche permet d'explorer l'impact de la turbulence (entre autres) dans des conditions certes idéalisées mais bien maîtrisées et reproductibles. Dans les exemples ci-dessous, on considère ainsi un sol parfaitement réfléchissant (ou l'absence de sol), pas de réfraction moyenne, une turbulence quasi-stationnaire, homogène et isotrope, avec un comportement spectral bien défini etc.

D'un point de vue analytique, une étude a consisté à exprimer une solution pour la fonction de corrélation d'un signal acoustique large bande en deux points et deux instants distincts, en présence de réfraction moyenne et turbulence - avec des fluctuations en vent et température corrélées dans le temps [4]. La solution se base sur une généralisation de l'équation parabolique stochastique en présence de turbulence avec l'approximation de Markov sur l'interaction onde-turbulence. Cette solution théorique générale permet l'analyse des caractéristiques statistiques des signaux propagés, et permet aussi des études numériques sur les rôles combinés des processus physiques. Avec les relations de similarité, cette solution peut être exprimée en fonction des conditions météo (flux de chaleur sensible, vitesse de friction), la comparaison aux observations disponibles est satisfaisante [4].

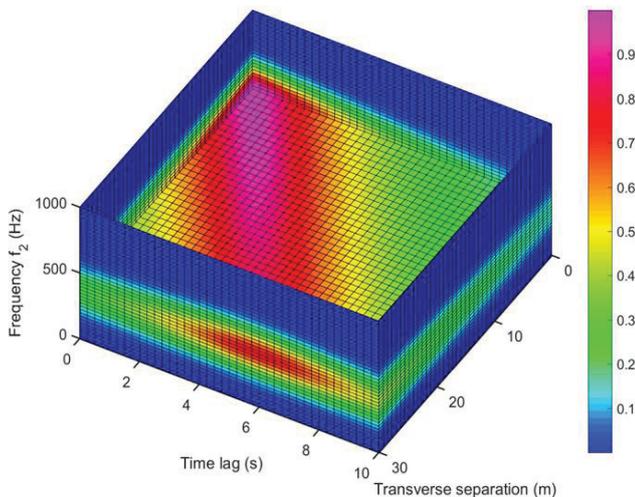


Fig. 5: Cohérence en fonction des séparations spatiale (transverse), temporelle et fréquentielle. La fréquence de base est 400 Hz, la distance de propagation est 200 m.

En pratique, la solution pour la fonction de corrélation s'exprime comme la transformée de Fourier 2D de la fonction de cohérence entre deux fréquences, deux points et deux instants. Dans le cas d'une propagation en ligne de vue, une approximation de perturbations douces (Rytov) permet de dériver une solution analytique pour cette fonction de cohérence [5]. La Fig. 5 montre la décroissance de cette cohérence en fonction des séparations spatiale (transverse à l'axe de propagation), temporelle et fréquentielle, pour une propagation perpendiculaire au vent, avec vent modéré. Aux séparations nulles, la cohérence vaut un. La décroissance est moins forte lorsque les séparations spatiale et temporelle s'ajustent avec la vitesse du vent transverse. Le temps de cohérence obtenu sur la Fig. 5 renseigne sur la cadence de répétition utilisée dans les observations.

A partir de ces relations, la cohérence temporelle de signaux acoustiques peut être étudiée de manière analytique ou numérique. On peut caractériser l'effet de la turbulence sur une impulsion en fonction des conditions météo [5]. La Fig. 6 illustre la forme moyenne d'une impulsion initialement gaussienne se propageant à travers la turbulence. La pression maximale moyenne (normalisée à l'atténuation géométrique) décroît, avec un étalement progressif.

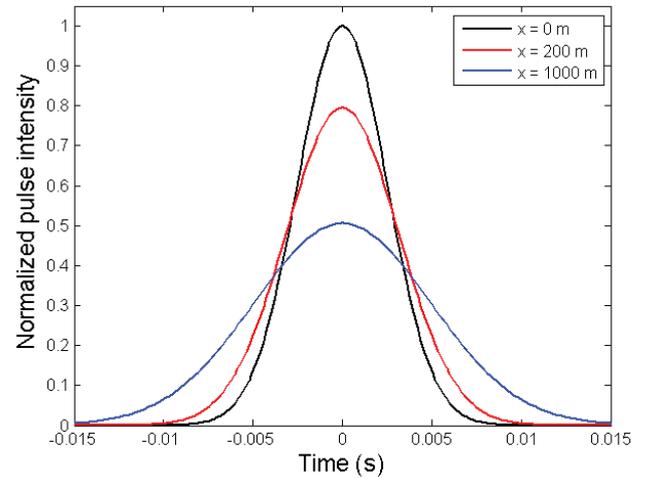
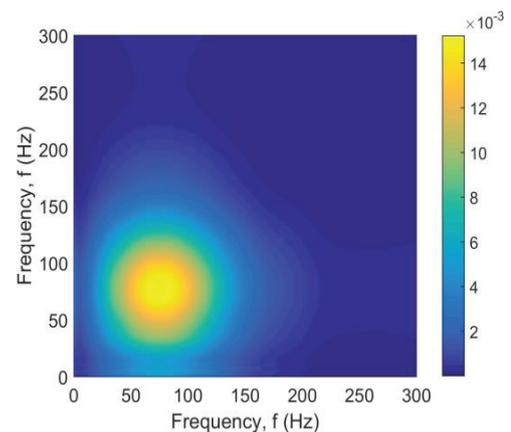


Fig. 6: Intensité normalisée d'une impulsion gaussienne à travers la turbulence, avec la distance de propagation notée x . Le calcul est pour des conditions ensoleillées avec un vent modéré, à une hauteur de 8 m.

En ignorant les variations temporelles, la formulation proposée dans l'étude [4] permet d'établir une relation pour la fonction de corrélation entre deux points et deux fréquences, avec une solution numérique accessible en différences finies [6, 7]. Cette solution est comparable à des observations. La Fig. 7 utilise une série de 20 tirs de canon à gaz réalisée à Blossom Point (Maryland, USA) en juin 2015. La propagation est dans le sens opposé au vent, les diagnostics sont réalisés à 1 m au-dessus du sol. Le modèle a été initialisé avec la corrélation mesurée à 100 m, distance à laquelle la corrélation est maximale (0.4) pour les deux fréquences valant 140 Hz. La figure compare les corrélations mesurée et simulée à une distance de propagation de 500 m. A cette distance, la corrélation maximale est aux environs de 70 Hz, dans le modèle et les observations. La différence de forme peut s'expliquer par les effets de la réflexion sur le sol, non pris en compte dans le modèle. La différence d'amplitude fait aussi sans doute intervenir des approximations dans les champs atmosphériques et dans la résolution spectrale utilisée pour le modèle.



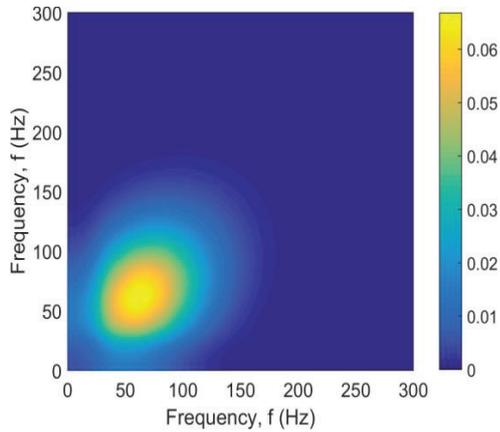


Fig. 7 : Fonction de corrélation entre deux points (séparés transversalement à l'axe de propagation) et deux fréquences. (Haut) observée à partir de 20 tirs de canon à gaz, pour une séparation de 1.65 m, (Bas) simulée numériquement, pour une séparation de 2 m.

Les investigations mettent en évidence la sensibilité des résultats analytiques au positionnement relatif de l'axe source-capteur par rapport à la direction du vent. Ceci suggère d'explorer cette sensibilité de manière approfondie dans les observations, éventuellement en ayant recours à des sources omnidirectionnelles. Réciproquement, les observations permettent de discriminer (i) les contributions issues des divagations de l'impulsion (variations du TA) et (ii) les recompositions de forme de l'impulsion (Sec. 2). Une correspondance analytique peut être étudiée [2]. Cette correspondance implique d'interpréter la moyenne statistique intégrée dans l'approche stochastique. Cette moyenne ne fait pas explicitement la distinction entre divagation et changement de forme.

Les solutions analytiques accessibles sont attachées à des restrictions. Par exemple, l'hypothèse de perturbations douces pose une limite haute en fréquence. Le recours à la simulation numérique permet de dépasser cette limitation, mais le choix du modèle est encore critique. Ainsi, d'après [8], la turbulence diffuse à des angles qui augmentent avec la longueur d'onde. Pour des impulsions sonores, des composantes basses fréquences peuvent être diffusées à plus grand angle, et le recours à une équation de propagation de type parabolique (qui suppose une diffusion en pointe avant) est à confirmer.

Le modèle de propagation ITM (ISL Time-domain Model) résout l'équation d'Euler linéarisée et l'équation de conservation de la masse dans l'atmosphère [8, 9]. Les conditions atmosphériques apparaissent dans ces équations à travers le vent, la densité et la vitesse du son. Les variables pronostiques sont la pression et la vitesse particulière acoustiques ; elles sont calculées par différences finies dans le domaine temporel, sur des maillages 3D cartésiens. Les sources acoustiques sont décrites par exemple en prescrivant la série temporelle de la pression acoustique au point source.

La capacité du modèle ITM à décrire les effets de la turbulence sur la propagation acoustique a été documentée. Le principe de l'analyse statistique est d'effectuer des tirages aléatoires de champs turbulents, et de faire propager l'onde à travers ces réalisations (approche de type Monte Carlo). L'étude [8] montre que les effets de diffusion à grand angle (i.e. pour les basses fréquences) sont bien pris en compte. L'étude [9] montre que les effets en ligne de vue sont aussi bien représentés, y compris la saturation des fluctuations

d'amplitude pour les hautes fréquences à grande distance de propagation. La Fig. 8 illustre par exemple l'analogie entre les comportements simulés avec ITM et observés (Fig. 4) en fonction de la fréquence, et révèle le type de sensibilité attendue avec la distance de propagation. Les simulations ITM peuvent prendre en compte d'autres effets de propagation, par exemple un sol d'impédance finie et/ou la réfraction moyenne.

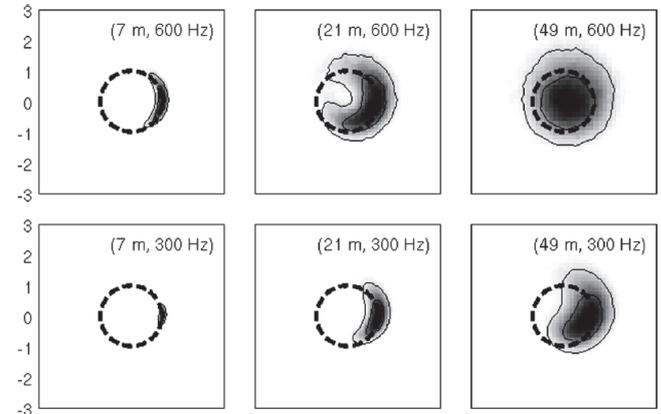


Fig. 8: Même analyse que Fig. 4, mais dans des simulations numériques d'ITM en 2D, pour des ondes monofréquentielles et un domaine fortement turbulent sans sol. La statistique inclut 1024 réalisations. D'après [9].

Le recours à la simulation numérique de type « différences finies en domaine temporel » n'est pas sans poser des difficultés. En particulier, la simulation des hautes fréquences requiert une résolution spatiale importante, ce qui restreint la taille des domaines de calcul accessibles (distance de propagation, recours à des simulations 2D). Pour des impulsions sonores, il est possible de limiter la fenêtre de calcul à la tranche qui inclut le front d'onde, et de faire glisser ce domaine de calcul avec la progression du front d'onde [10]. Cette technique de fenêtre glissante permet d'accéder à des simulations 3D sur des distances de propagation pertinentes dans le contexte des études en cours. La limitation angulaire rencontrée en équation parabolique demeure, sous forme d'une dimension latérale minimale. Les composantes diffusées à grand angle ne peuvent ré-intégrer la direction considérée qu'avec retard. Limiter la taille latérale du domaine revient alors à éliminer des contributions acoustiques retardées. Ceci n'est pas problématique pour des régimes de propagation dans lesquels l'impulsion initiale reste bien identifiable.

À des fins d'illustration, deux simulations d'ITM 3D ont été réalisées, avec et sans turbulence, avec la technique de fenêtre glissante. La source est située à 1m de hauteur, en haut à gauche de la figure, l'émission a une fréquence caractéristique de 500 Hz, le sol est supposé parfaitement réfléchissant. La Fig. 9 illustre l'enveloppe spatiale du champ de pression acoustique après sa propagation sur 100 m. Sans turbulence, la sphéricité et l'homogénéité du front d'onde est bien représentée. Avec turbulence, ces deux paramètres sont altérés, avec (i) une non-sphéricité et donc des fluctuations locales de l'angle d'arrivée, et (ii) des fluctuations du niveau de pression d'un facteur 2-3. La richesse des diagnostics accessibles avec cette approche de simulation est prometteuse.

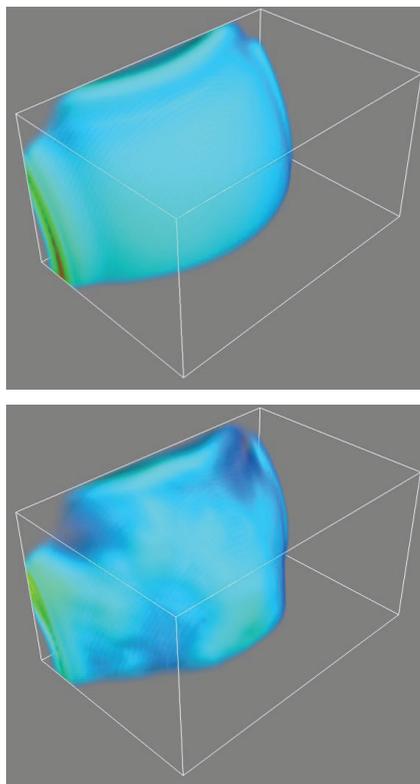


Fig. 9: Enveloppe spatiale de la pression acoustique après 100 m de propagation, simulée par ITM 3D avec fenêtre glissante. Le niveau de couleur (de bleu foncé à vert) donne la pression acoustique. (Haut) sans turbulence, (Bas) avec turbulence. Les axes transverses ont des dimensions de 9 m x 5 m. L'axe longitudinal (épaisseur réelle de 60 cm) est étiré pour mieux visualiser la sphéricité du front d'onde.

4 Conclusion

Les effets de la turbulence sur les impulsions sonores altèrent notablement la performance de détection/localisation des systèmes utilisés dans les contextes de Sécurité - Défense. L'ARL, le CRREL et l'ISL mènent un projet en collaboration pour étudier ces effets. Cet article décrit de manière succincte les outils mis en œuvre dans le cadre de ce projet et présente leurs enjeux et leurs complémentarités. Des mesures expérimentales sont réalisées, avec des sources impulsionnelles reproductibles et dans des conditions environnementales contrôlées. Ces mesures originales permettent de distinguer deux composantes de variabilité d'une impulsion sonore après propagation : (i) les fluctuations de temps d'arrivée de l'onde (divagation), et (ii) les fluctuations de forme du signal (étalement). Des analyses théoriques sont menées pour préciser la sensibilité de la propagation dans des conditions idéalisées et reproductibles. Une équation stochastique sur la fonction de cohérence généralisée (deux points, deux instants) est exprimée. Sa résolution, analytique ou numérique, permet de représenter l'altération moyenne d'un signal impulsionnel sous l'approximation parabolique. Un modèle de la propagation en différences finies et domaine temporel est développé, évalué et utilisé, qui apporte aussi des diagnostics déterministes riches.

Remerciements

Les auteurs remercient Loïc Ehrhardt (ISL) pour les discussions intéressantes sur cette étude. Le projet décrit dans cette étude a été partiellement financé par les contrats RDECOM numéro W911NF-12-1-0297 suivi par V. Asharya, numéro W911NF-15-2-5225 suivi par J. Becker, et au travers d'un programme de post-doctorat à l'ARL suivi par ORAU. Les échanges entre l'ARL, le CRREL et l'ISL se font dans le cadre du groupe OTAN SET-189.

Références

- [1] Cheinet, S. and Th. Broglin, 2015, Sensitivity of shot detection and localization to environmental propagation, *Appl. Acoustics*, 93, 97-105.
- [2] Flatté, S. M., R. Dashen, W. H. Munk, K. Watson and F. Zachariasen, 1979, *Sound Transmission through a Fluctuating Ocean* (Cambridge University Press, Cambridge), Chaps. 6-8.
- [3] Norris, D. E., D. K. Wilson and D. W. Thomson, 2001, Correlations between acoustic travel-time fluctuations and turbulence in the atmospheric surface layer, *Acta Acust. Acust.*, 87, 677-684.
- [4] Ostashev, V. E., D. K. Wilson, S. N. Vecherin and S. L. Collier, 2014, Spatial-temporal coherence of acoustic signals propagating in a refractive, turbulent atmosphere, *J. Acoust. Soc. Am.*, 136, 2414-2431.
- [5] Ostashev, V. E., D. K. Wilson, S. L. Collier, J. Cain and S. Cheinet, 2016, Frequency coherence and pulse propagation in a turbulent atmosphere, *J. Acoust. Soc. Am.*, submitted.
- [6] Cain, J. E., S. L. Collier, S. Cheinet, V. E. Ostashev, and D. K. Wilson, 2015, Statistical moments of a wideband acoustic signal, *Proceedings of Meetings on Acoustics*, 21.
- [7] Cain, J. E., S. L. Collier, V. E. Ostashev, and D. K. Wilson, 2015, Statistical studies of impulse propagation through the atmosphere, *J. Acoust. Soc. Am.*, 138, 1829.
- [8] Cheinet, S., L. Ehrhardt, D. Juvé and Ph. Blanc-Benon, 2012, Unified modeling of turbulence effects on sound propagation, *J. Acoust. Soc. Am.*, 132, 2198-2209.
- [9] Ehrhardt, L., S. Cheinet, D. Juvé and Ph. Blanc-Benon, 2013, Evaluating a linearized Euler equations model for strong turbulence effects on sound propagation, *J. Acoust. Soc. Am.*, 133, 1922-1933.
- [10] Zheng, Z. C. and G. Ke, 2015, Accuracy and efficiency of a moving-zone method in the time domain simulation, *Appl. Acoustics*, 92, 1-5.