

Projet de Fin d'Études (PFE) 2023-2024

Le bruit en ville



<https://www.bruitparif.fr/les-meduses>

Elève ingénieure en 5ème année
Département Aménagement et Environnement, Option RÉSEAU
École Polytechnique de l'Université de Tours
Année 2023-2024

Sous la direction de Hervé BAPTISTE

Sarah MARCHAL

Le bruit en ville

**Étude de la mise en place d'un
réseau de capteurs sonores en milieu
urbain pour la localisation d'une
source sonore impulsive**

Hervé Baptiste

Sarah MARCHAL

2024

Le bruit en ville : localisation d'une source sonore impulsive

Sarah MARCHAL

Polytech Tours, Département Aménagement et Environnement, Option RÉSEAU

15/12/2023

Encadrant : Hervé BAPTISTE 1

AVERTISSEMENTS

Cette recherche a fait appel à des lectures, enquêtes et interviews. Tout emprunt à des contenus d'interviews, des écrits autres que strictement personnel, toute reproduction et citation, font systématiquement l'objet d'un référencement.

L'auteur (les auteurs) de cette recherche a (ont) signé une attestation sur l'honneur de non plagiat.

Formation par la recherche, Projet de Fin d'Etudes en génie de l'Aménagement et de l'Environnement

La formation au génie de l'aménagement et de l'environnement, assurée par le département aménagement et environnement de l'Ecole Polytechnique de l'Université de Tours, associe dans le champ de l'urbanisme, de l'aménagement des espaces fortement à faiblement anthropisés, l'acquisition de connaissances fondamentales, l'acquisition de techniques et de savoir-faire, la formation à la pratique professionnelle et la formation par la recherche. Cette dernière ne vise pas à former les seuls futurs élèves désireux de prolonger leur formation par les études doctorales, mais tout en ouvrant à cette voie, elle vise tout d'abord à favoriser la capacité des futurs ingénieurs à :

- Accroître leurs compétences en matière de pratique professionnelle par la mobilisation de connaissances et de techniques, dont les fondements et contenus ont été explorés le plus finement possible afin d'en assurer une bonne maîtrise intellectuelle et pratique,
- Accroître la capacité des ingénieurs en génie de l'aménagement et de l'environnement à innover tant en matière de méthodes que d'outils, mobilisables pour affronter et résoudre les problèmes complexes posés par l'organisation et la gestion des espaces.

La formation par la recherche inclut un exercice individuel de recherche, le projet de fin d'études (P.F.E.), situé en dernière année de formation des élèves ingénieurs. Cet exercice correspond à un stage d'une durée minimum de trois mois, en laboratoire de recherche, principalement au sein de l'équipe Dynamiques et Actions Territoriales et Environnementales de l'UMR 7324 CITERES à laquelle appartiennent les enseignants-chercheurs du département aménagement.

Le travail de recherche, dont l'objectif de base est d'acquérir une compétence méthodologique en matière de recherche, doit répondre à l'un des deux grands objectifs :

- Développer toute ou partie d'une méthode ou d'un outil nouveau permettant le traitement innovant d'un problème d'aménagement
- Approfondir les connaissances de base pour mieux affronter une question complexe en matière d'aménagement.

Afin de valoriser ce travail de recherche nous avons décidé de mettre en ligne sur la base du Système Universitaire de Documentation (SUDOC), les mémoires à partir de la mention bien.

Remerciements

Je souhaite avant tout, remercier mon tuteur pour ce projet de fin d'études et mon responsable encadrant Mr Hervé BAPTISTE qui m'a soutenu, dirigé et éclairé sur le sujet tout au long de ce travail.

À Éliott LENARD, élève-ingénieur en « Aménagement et Environnement », d'avoir débuté ce projet à mes côtés en réalisant l'état de l'art et donné ses idées pour la continuité du rendu final

Je tiens aussi à remercier Mme Mathilde GRALEPOIS, qui m'a aiguillée sur les directions générales et la structure de ce projet de fin d'études, mais aussi sur l'enseignement de la méthodologie de la recherche.

Enfin, je tiens à remercier Mr José SERRANO, Mme Sofia GUEVARA VIQUEZ et Mme Diana LOPEZ DOMINGUEZ, pour avoir transmis leur savoir sur la méthodologie de la recherche.

Sommaire

Sommaire

Tables des figures.....	6
1. L'onde sonore en milieu urbain	9
1.1 Principes de base sur l'acoustique	9
1.2 Les défis de la propagation acoustique en milieu urbain.....	11
1.3 Hypothèses de travail	16
1.4 Choix du matériel.....	19
1.5 Configuration du réseau de microphones	20
2. État de l'art des techniques	21
2.1 Technique de base de positionnement	21
2.2 Techniques de localisation du bruit impulsif.....	23
2.3 Traitement d'amélioration de l'imprécision	28
2.4 Méthode de localisation à partir du TDOA	30
2.5 Choix de la méthode.....	32
3. Protocole mis en place	34
3.1 La collectes des données	34
3.2 Le traitement des données	38
3.3 Résultats et discussions	43
4. Conclusion	50
5. Annexes.....	51
6. Bibliographie	66
7. Webographie	69

Tables des figures

Figure 1 Représentation de la propagation d'une onde progressive longitudinale. Illustration d'un haut-parleur provoquant une vibration transmise par les molécules dans l'air jusqu'à la membrane de l'oreille. [1']	9
Figure 2 Illustration de l'interaction d'un son avec l'appareil auditif humain arrivant plus vite à l'oreille droite que celle de gauche entraînant des différences de temps et d'intensité vus sur les spectres sonores [17].....	11
Figure 3: Illustration de la séparation de la zone de Fresnel associée au champ proche et de Fraunhofer associée champ lointain. La délimitation de ces champs se trouve vers $2D^2/\lambda$. Avec D, la distance de la membrane source du bruit, et λ la longueur d'onde [2']	11
Figure 4 Illustration de la géométrie de la propagation acoustique. A gauche, la source en champ proche avec le front d'onde sphérique et à droite la source en champ lointain avec le front d'onde approximativement plans aux récepteurs. [6]	12
Figure 5 Effets de la morphologie urbaine sur la distribution du bruit issue de la route. On note en noir le bâti, et un dégradé correspondant à des intervalles de dB (A), vert pour moins de 50 dB (A), orange entre 50 et 65 dB (A), et rouge pour supérieur à 65 dB(A) [12]	13
Figure 6 Illustration des phénomènes de réflexion spéculaire, de diffraction par une arête et de diffusion par une surface irrégulière [2]	14
Figure 7 : Illustration des effets de réfraction. De haut vers le bas : gradient vertical positif de température (sans vent), gradient vertical négatif de température (sans vent), gradient vertical de température (sans effets thermiques) [2].....	15
Figure 8 Exemple de la distribution des probabilités cumulées des erreurs de localisation de la source à cause de la météo. Ici, l'axe Est-Ouest est très influencé par la température et la vitesse du vent, réduisant la précision de la géolocalisation [2].....	15
Figure 9 Illustration géométrique du front d'onde plan de la source sonore Tx arrivant à deux capteurs Rx1 et Rx2. A gauche, en champ proche avec l'onde sphérique et à droite en champ proche avec l'onde plane [15]	16
Figure 10 Motifs polaires des différentes directivités des microphones. [3'].....	19
Figure 11 a) Réseaux linéaires uniformes (ULA) et b) Réseaux non linéaires non uniformes NUNLA où d et v sont les distances du microphone inter éléments.	20
Figure 12 Schématisation du processus de triangulation [5]	22
Figure 13 Illustration de la méthode de calcul de la direction d'une source sonore, t1 et t2 sont les temps et d1 et d2 représentent les distances, [1].....	23
Figure 14 Schéma des différences de temps d'arrivée (TDOA) avec deux microphones [5]	25
Figure 15 Schéma des différences de temps d'arrivée (TDOA) avec deux microphones [5]	26
Figure 16 Illustration de l'ambiguïté spatiale avant/arrière avec un réseau linéaire	27
Figure 17 Schéma des étapes de la GCC	29
Figure 18 Illustration de la direction d'arrivée de la source sonore planaire avec deux microphones, l'angle d' incidence est θ , et l'espacement entre 2 capteurs est d	30
Figure 19 Méthode des hyperboles [9]	31
Figure 20 : Informations et caractéristique des éléments utilisés dans l'expérience	35
Figure 21 : Illustration de la configuration géométrique (a) et du montage expérimental (b).....	36
Figure 22 Illustration du bruit marqueur de début et impulsif expérimentaux	37
Figure 23 : Illustration du processus de traitement des données.....	39
Figure 24 Méthode 1, étape d'alignement des signaux sur Audacity	40

Figure 25 Méthode 1, étape de mesure du décalage temporel des signaux sur Audacity	40
Figure 26 : Illustrations de la méthode n°2, les étapes pour la corrélation croisée sur Matlab de deux signaux.....	42
Figure 27: Schéma illustrant la méthode géométrique pour la direction d'arrivée (α et β) avec le TDOA.....	42
Figure 28 Résultats des erreurs relatives aux angles expérimentaux.....	45
Figure 29 Représentation graphique des résultats des erreurs relatives à l'angle alpha expérimental	46
Figure 30 Figure 29 Représentation graphique des résultats des erreurs relatives à l'angle beta expérimental	46
Figure 31 Représentation spatiale des positions expérimentales pour différentes distances entre capteurs.....	49

Introduction

Avec l'avènement des villes intelligentes, les fameuses "smart cities" sont dotées de plus en plus de réseaux de microphones, servant d'oreilles pour 'écouter' la ville. Ces technologies de détection sonore, complémentaires aux réseaux de caméras qui agissent comme les yeux de la ville, jouent un rôle crucial dans la surveillance des niveaux de bruit urbains. Ces capteurs acoustiques sont en mesure de détecter des sons anormaux, soudains, et prédominants par rapport au niveau sonore de l'espace urbain, tels que les bruits impulsifs. Ces types de son excèdent 80 dB et sont décrits comme "*a noise with sharp rise and rapid*", "une montée brusque et une décroissance rapide" selon NIOSH (p. xiv, 1998) [13]. Les smart cities ne sont qu'un contexte possible dans lequel le dispositif peut être mis en place, ici, il n'a pas lieu d'étudier la réglementation concernant la mise en place de ce système. La détection de ce type de son est un enjeu majeur pour la sécurité publique, il est obligatoire de protéger la population en cas de danger. Tout d'abord, un tel procédé permet d'identifier rapidement la source du bruit anormal et de déterminer si cela représente une menace pour la sécurité des habitants, telle qu'une explosion, un accident, un attentat, etc.

Cette identification peut, par exemple, se faire avec un réseau de caméras. On peut imaginer dans le contexte d'une smart city, lorsqu'un bruit impulsif est détecté par le réseau de capteurs sonores, ces derniers analysent le son pour déterminer la direction de celui-ci. Puis une caméra située à proximité peut automatiquement s'orienter vers cette zone spécifique afin de visualiser la situation facilitant ainsi la détermination rapide de la nature du risque. La localisation des bruits impulsifs aide les autorités compétentes tels que les services d'urgence, comme le SAMU et les pompiers, à intervenir rapidement pour réduire les dommages physiques, psychologiques et matériels, tout en gérant les perturbations en évacuant les zones à risque et en alertant les résidents et commerces voisins.

Cependant, la localisation précise d'une source sonore en zone urbaine peut être difficile en raison des multiples sons qui peuvent masquer le signal d'une source sonore. En effet, ceux-ci sont divers et catégorisés dans l'environnement urbain tels que ceux du transport, des chantiers, des comportements humains, ou encore ceux des loisirs culturels. La ville, dont le son est un élément omniprésent, apparaît comme un paysage sonore. En effet, selon Murray Schafer, célèbre compositeur et théoricien canadien de l'écologie sonore, "*le soundscape est une composition de sons qui s'entremêlent. Il est souvent difficile de distinguer les sons individuels, car ils sont confondus et complexes.*"

En outre, la localisation de bruits impulsifs est également compliquée du fait de la présence de nombreuses structures urbaines. En effet, un environnement urbain densément peuplé est composé de multiples obstacles comme la présence des bâtiments, des véhicules, des ponts, etc. Cette "canopée" urbaine entrave la propagation des ondes sonores par des phénomènes physiques tels que : la réflexion des ondes sonores sur les surfaces environnantes, ou bien celui de la réverbération, qui rend la précision de la localisation de la source sonore plus ardue.

Par ailleurs, le monde est en constante évolution étant donné l'augmentation de la population et de l'expansion urbaine. Les villes modernes sont à l'image d'objets massifs créant leur champ gravitationnel, elles sont le sujet d'un exode rural. En effet, elles concentrent des centres économiques, culturels et sociaux. Par conséquent, cela entraîne sans cesse la construction de nouveaux bâtiments, la rénovation de quartiers, et l'expansion des infrastructures urbaines pouvant ajouter plus de bruit à l'acoustique urbaine. En conséquence, la population d'une région se rapproche de plus en plus de la ville qui représente son centre d'équilibre le plus proche, et se trouve de plus en plus interconnectée avec elle. Par conséquent, ces villes sont de plus en plus grandes et denses. Cependant, définir un milieu urbain n'est pas le sujet ici, c'est pourquoi dans ce projet, nous considérons que le milieu est assez dense pour être considéré comme milieu urbain. D'une part, l'apparition de nouveaux immeubles apparaît comme des

obstacles à la propagation acoustique. D'autre part, le développement perpétuel des villes entraîne et engendre de nouvelles sources de bruit qui densifient le paysage sonore.

Le fait que l'expansion et l'acoustique urbaine ne cessent de se complexifier et qu'il est nécessaire de protéger la population d'une ville en cas d'incidents de sécurité, une question vient à se poser : bien que les villes soient de plus en plus vivantes, par quel moyen peut-on localiser la source d'un bruit impulsif rapidement afin garantir la sécurité publique ?

L'objectif de ce projet de fin d'études est de répondre à cette problématique en se rapprochant d'un protocole expérimental optimal pour satisfaire la finalité. Comme évoquée précédemment, la finalité concerne la localisation d'un incident de sécurité par les capteurs sonores puis l'orientation d'une caméra (parmi un réseau de caméras) vers cette zone précise pour déterminer rapidement la nature du risque. Cela permet ainsi l'envoi approprié des services d'urgence adaptés à la situation.

Afin d'étudier le sujet et de répondre aux interrogations suscitées par celui-ci, nous allons nous appuyer sur une variété d'ouvrages. Tout d'abord, nous allons amorcer une étude approfondie des termes essentiels afin de comprendre physiquement le phénomène de propagation des ondes. Puis, nous établirons un état de l'art permettant d'identifier et de recenser les différentes méthodes existantes de localisations d'ondes sonores. Enfin, grâce aux choix, aux hypothèses soutenues et aux techniques favorisées, nous proposerons et réaliserons un protocole qui s'inspire de protocoles existants, ou des procédés explicites, afin de trouver une solution physique à la problématique.

1. L'onde sonore en milieu urbain

1.1 Principes de base sur l'acoustique

1.1.1 Définition d'une onde sonore et propagation

Un son est un phénomène physique, c'est une vibration qui se transmet de proche en proche, et donc qui se propage dans l'air ou dans tout autre milieu matériel, comme l'eau ou les solides. L'émission acoustique, mesurée en décibels, est caractérisée par plusieurs propriétés, telles que la fréquence, l'amplitude et la durée. La fréquence est la mesure de la rapidité avec laquelle les vibrations se produisent, comme par exemple, le nombre de signaux sonores d'un détecteur de fumée sur une période donnée. De plus, la fréquence détermine la hauteur du son, grave pour les faibles fréquences ou aigu pour les hautes fréquences. L'amplitude mesure l'intensité ou le volume du son, tandis que la durée mesure la longueur de temps pendant laquelle le son est présent. Ces vibrations sont produites par des objets en mouvement tels que le mouvement d'une corde, le mouvement des membranes de haut-parleurs, des déplacements de colonnes d'air ou encore des instruments de musique.

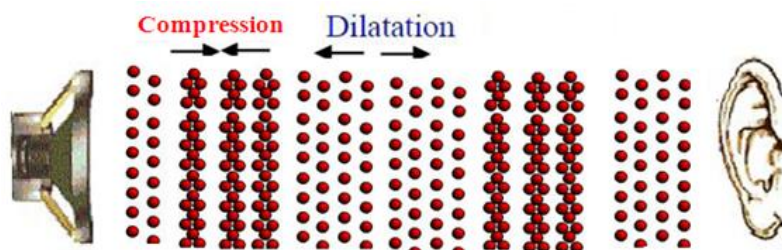


Figure 1 Représentation de la propagation d'une onde progressive longitudinale. Illustration d'un haut-parleur provoquant une vibration transmise par les molécules dans l'air jusqu'à la membrane de l'oreille. [1]

Lorsqu'un objet vibre, il déplace l'air autour de lui, créant ainsi une onde sonore. Ce phénomène est représenté par la figure 1. Les ondes sonores, qui sont des ondes mécaniques, se propagent de proche en proche, correspondent à des perturbations oscillatoires de compression et raréfactions (dilatations). La propagation acoustique s'effectue dans un fluide tel que le gaz tel que l'air ou des liquides comme l'océan, mais également des milieux solides comme les murs, les planchers, structures métalliques, et tout autre milieu élastique. Les molécules du fluide transmettent l'énergie par choc aux molécules proches qui reculent dans le sens de la propagation. Ces ondes se propagent alors dans toutes les directions, mais leur vitesse de propagation dépend des propriétés physiques du milieu dans lequel elles se déplacent, tels que la température, la pression et la densité. Prenons l'exemple de la vitesse du son dans l'air à une température de 20 °C, qui est d'environ 340 mètres par seconde tandis que dans l'eau est pratiquement 4 fois plus rapide.

Pour ainsi dire, les ondes sonores sont des ondes mécaniques longitudinales dont les particules locales se déplacent de manière parallèle à la direction de propagation de l'onde sans transport de matière. La forme d'onde des ondes sonores peut être représentée mathématiquement par des équations, telles que l'équation d'onde, ou de d'Alembert, et l'équation de Helmholtz. Ces équations décrivent comment les variations de pression se propagent à travers le milieu élastique, en fonction du temps et de la distance [14].

1.1.2 La Localisation sonore

La localisation sonore est décrite comme "la capacité d'un système auditif à déterminer la position spatiale d'une source sonore au moyen de différents indices physiques" [4]. En prenant exemple sur l'audition humaine, les indices sont divisés en deux types :

- Les indices binauraux, ils se réfèrent à l'utilisation de deux oreilles pour percevoir le son et permettent une audition stéréophonique. La notion binaurale se fait selon deux critères principaux le long du plan horizontal [30], illustrés sur la figure 2.
D'abord, la différence de niveau interaural (ILD) est la différence d'intensité (différence amplitude du signal) sonore perçue entre les deux oreilles (si un son provient de la droite, il sera plus fort dans l'oreille droite que dans l'oreille gauche et vice-versa). Très marqué par les sons aigus (haute fréquence), cela se résume notamment à "l'effet d'ombre" [17], c'est-à-dire la tête elle-même agit comme une barrière physique, réduisant l'intensité du son qui atteint l'oreille opposée.
Puis la différence de délai interaural (ITD) qui est la différence de temps entre le moment où un son atteint une oreille et le moment où le même son atteint l'autre oreille.
Même une très faible différence, mesurée en millisecondes, aide à localiser la source du son dans l'espace. Donc cela permet de localiser la direction et d'obtenir la différence de distance d'une source sonore, car chaque oreille reçoit le son à un moment légèrement différent et avec une intensité différente. Les enregistrements binauraux sont réalisés en utilisant deux microphones, généralement espacés pour simuler la distance entre les deux oreilles humaines.
- Le plan vertical concerne les indices monauraux qui peuvent être déterminés même avec une seule oreille. Les sons qui nous parviennent sont affectés par des réflexions sur des structures comme nos épaules ou les parties externes de nos oreilles, modifiant le son (le spectre sonore) qui entre dans nos oreilles. Ces modifications créent des augmentations ou des diminutions dans certaines fréquences, nous aidant à situer la source du son en hauteur. [4]
Par ailleurs, l'indice monoral peut représenter le son enregistré avec un seul microphone et est destiné à être entendu de la même manière par les deux oreilles, sans distinction spatiale.

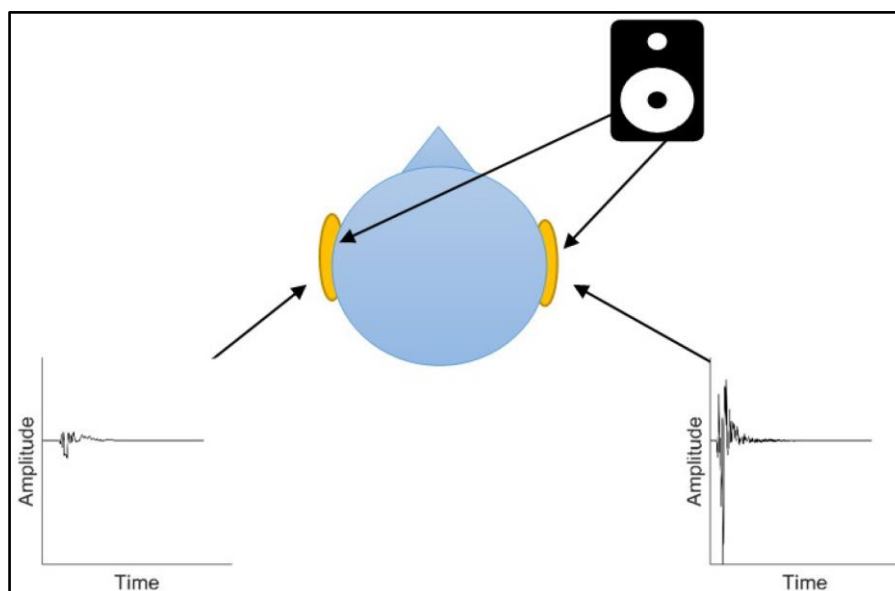


Figure 2 Illustration de l'interaction d'un son avec l'appareil auditif humain arrivant plus vite à l'oreille droite que celle de gauche entraînant des différences de temps et d'intensité vus sur les spectres sonores [17]

1.2 Les défis de la propagation acoustique en milieu urbain

- La propagation acoustique

L'étude de la façon dont le son se propage a d'abord été initiée dans le domaine de l'acoustique des salles dans les années 1900, mais il a été étendu plus tard aux espaces urbains connus sous le nom d'acoustique urbaine. Ce terme a été introduit pour la première fois par un ingénieur acoustique français du nom de Jean-François Augoyard dans les années 1970. La modélisation des champs sonores est un aspect clé de cette recherche. La notion de champ sonore est définie comme étant la région spatiale dans laquelle les ondes sonores se propagent, permettant la mesure des propriétés physiques du son telles que la pression acoustique, la fréquence, l'intensité et la direction de propagation. Cela a permis de décrire ces champs sonores mathématiquement afin de comprendre la propagation des ondes sonores dans l'environnement. Plus précisément, le champ sonore comprend donc la distribution dans l'espace de l'intensité sonore, il peut être séparé en deux parties distinctes : le champ proche et le champ lointain. La figure 3 illustre cette séparation et montre la forme géométrique de l'onde sonore associée en figure 4.

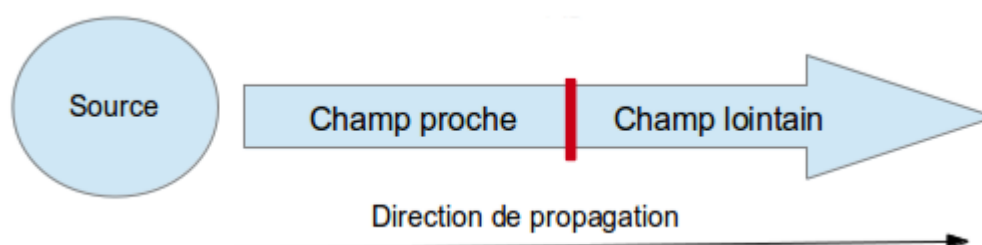


Figure 3: Illustration de la séparation de la zone de Fresnel associée au champ proche et de Fraunhofer associée champ lointain. La délimitation de ces champs se trouve vers $2D^2/\lambda$. Avec D , la distance de la membrane source du bruit, et λ la longueur d'onde [2]

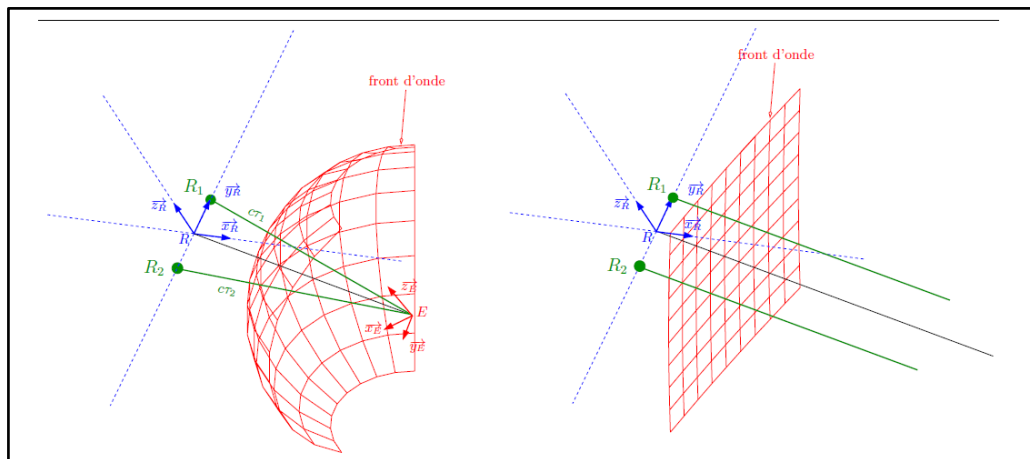


Figure 4 Illustration de la géométrie de la propagation acoustique. A gauche, la source en champ proche avec le front d'onde sphérique et à droite la source en champ lointain avec le front d'onde approximativement plans aux récepteurs. [6]

Le champ proche, ou encore zone de Fresnel, est l'espace situé près de la source sonore lorsque l'onde sonore n'a pas encore atteint sa forme d'onde plane comme sur la figure 4. Il y a des phases différentes en fonction de la position, ce qui peut entraîner des interférences constructives ou destructives. L'intensité sonore est plus élevée et varie plus rapidement en fonction de la distance de la source sonore. Cette variation est décrite par le principe de Huygens-Fresnel. Dans cette zone, la propagation de l'onde sonore doit être considérée comme sphérique, puisque son front d'onde ne peut être approché par un plan. La modéliser comme une onde plane engendre des erreurs non-négligeables pour géolocaliser sa source, néanmoins localiser la source sonore avec une forte précision n'est pas le but ici.

Le champ lointain, surnommé aussi la zone Fraunhofer, quant à lui, est la région située loin de la source sonore où le front de l'onde peut être considéré comme plan (même si une onde n'est jamais plane totalement), et donc considérer l'onde comme étant plane. La répartition spatiale de l'intensité sonore est, de ce fait, uniforme.

Après avoir vu la notion de champ sonore dans lequel se propagent spatialement les ondes sonores, nous allons voir comment l'environnement peut affecter ces dernières.

- Effets indésirables du milieu urbain

La ville est un élément qui rend particulièrement difficile la localisation des sources d'ondes sonores. Le milieu urbain altère la propagation des ondes sonores, car il est composé de multiples obstacles en raison de la présence de bâtiments, de véhicules, et d'autres éléments urbains. En effet, selon une étude sur les bruits routiers, la répartition des bruits de transport dépend de la morphologie urbaine, comme on peut le voir sur la figure 3 dans lequel on observe la répartition l'intensité sonore du bruit en dB selon six géométries urbaines différentes. Dans les formes urbaines (3), (4) et (5),(6) de la figure 3, on observe directement une réduction du niveau sonore élevé grâce à la présence de bâtiments qui agissent comme des barrières acoustiques naturelles, réduisant le bruit pour les zones situées derrière eux.

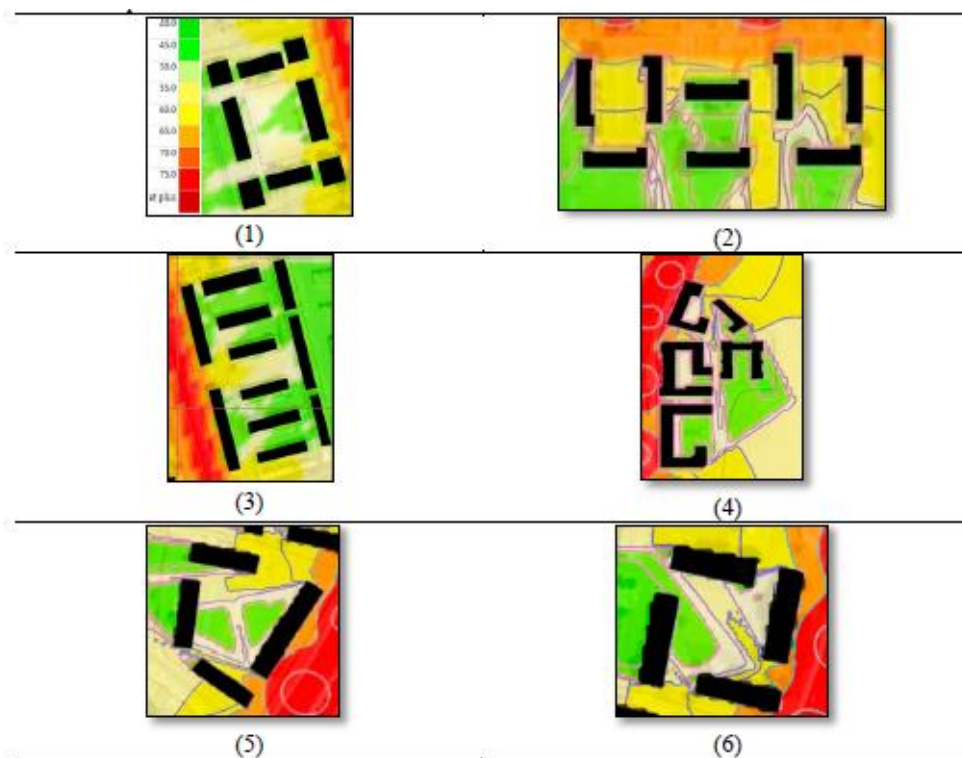


Figure 5 Effets de la morphologie urbaine sur la distribution du bruit issue de la route. On note en noir le bâti, et un dégradé correspondant à des intervalles de dB (A), vert pour moins de 50 dB (A), orange entre 50 et 65 dB (A), et rouge pour supérieur à 65 dB(A) [12]

La forme urbaine possède des critères tels que la hauteur des bâtiments, la largeur des rues et la géométrie urbaine. De ce fait, la composition du tissu bâti donne lieu à un indicateur majeur, la compacité urbaine [12]. Cette caractéristique est décrite comme le rapport de la somme de la surface bâtie sur la surface totale. L'augmentation de zones "protégées", i.e. des zones calmes, résulte d'une augmentation de la compacité par le biais d'obstacles. Ainsi, une plus grande compacité urbaine entraîne une réduction de la surface couverte par la propagation de l'onde. Par conséquent, le milieu urbain a un impact majeur sur la propagation du son. Il possède quatre principaux effets sur la propagation des ondes sonores : la réflexion, la diffraction, l'absorption et la diffusion.

En effet, quand une onde sonore rencontre un bâtiment ou un autre obstacle, elle peut être réfléchiée et renvoyée dans une tout autre direction. Mais ce phénomène peut se répéter plusieurs fois. Cela entraîne des délais temporels, entre les ondes sonores réfléchiées et les ondes sonores directes, qui peuvent créer des interférences destructives ou constructives. Cela peut altérer l'amplitude et le spectre de la source sonore. De plus, la réflexion des ondes sonores peut entraîner une augmentation du niveau sonore dans certaines zones et modifier les niveaux de pression acoustique. De ce fait, il est important d'éviter ce phénomène lors de l'installation des capteurs.

En outre, la diffraction, illustrée en figure 3bis (b), se produit lorsque l'onde sonore rencontre un objet ou une ouverture qui est de la même taille ou plus petite que sa longueur d'onde. Effectivement, les bâtiments et autres obstacles peuvent avoir des dimensions similaires à la longueur d'onde des ondes sonores, notamment pour les rues étroites ou les immeubles sont très proches les uns des autres. Ce phénomène implique que les ondes sonores peuvent se

courber autour de l'obstacle ou de l'ouverture puis interfèrent avec les ondes directes provenant de la source. Donc le son peut sembler provenir de différentes directions, ce qui rend la géolocalisation de la source sonore complexe.

Par ailleurs, l'absorption d'une onde sonore réduit l'amplitude de l'onde, elle perd de l'énergie au fur et à mesure qu'elle se répand. En effet, l'onde sonore peut être affaiblie et sa forme peut être altérée, et donc ne pas correspondre à la base du récepteur. L'absorption masque les informations sur la distance de la source sonore. De plus, ce phénomène peut modifier la fréquence du son, en la réduisant ou en la supprimant entièrement.

Enfin, le phénomène de diffusion, illustré en figure 6 (c), en milieu peut se produire en particulier sur les façades des bâtiments qui ont de nombreuses irrégularités (cavité, parois, courbes) ou bien par des objets tels que des voitures en circulation, l'onde sonore subit des réflexions et diffractions multiples. Lors d'une rencontre avec une surface plane, l'onde sonore est réfléchiée de manière spéculaire, illustrée en figure 6 (a), mais avec une surface irrégulière, elle est en plus diffractée par la suite. [2]

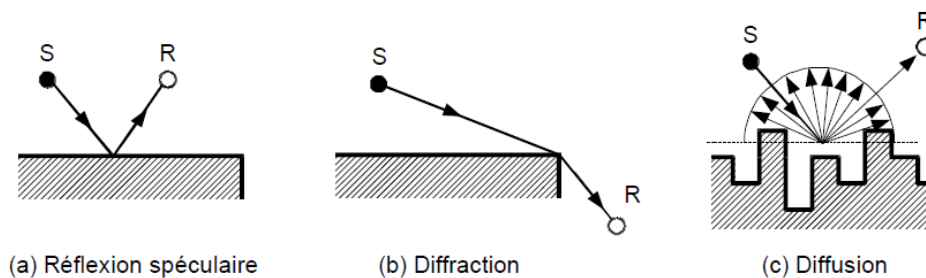


Figure 6 Illustration des phénomènes de réflexion spéculaire, de diffraction par une arête et de diffusion par une surface irrégulière [2]

Enfin, la réfraction des ondes sonores peut rendre difficile la localisation de leur source, car ce phénomène peut causer la déviation des ondes sonores. En effet, les conditions météorologiques, vu figure 8, influencent la marge d'erreur de localisation d'une source sonore et sa propagation acoustique. Les champs de températures et de vitesse du vent non constants, la compacité de l'espace urbain et d'autres facteurs naturels, font varier la vitesse et la trajectoire de propagation de l'onde [2]. Les ondes sonores peuvent se courber, comme illustrées dans la figure 7 soit vers le sol (conditions favorables à la propagation, avec un gradient de célérité vertical positif) ou soit vers le ciel (conditions défavorables à la propagation, avec un gradient de célérité vertical négatif). Ce qui est contraire à une trajectoire rectiligne en cas de conditions atmosphériques homogènes.

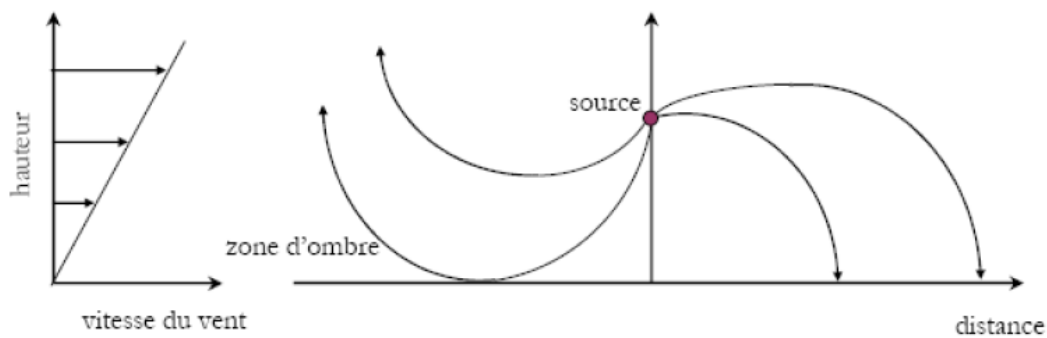


Figure 7 : Illustration des effets de réfraction. De haut vers le bas : gradient vertical positif de température (sans vent), gradient vertical négatif de température (sans vent), gradient vertical de température (sans effets thermiques) [2]

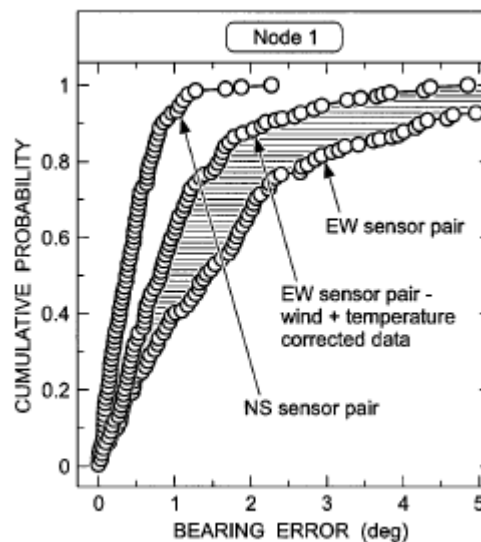


Figure 8 Exemple de la distribution des probabilités cumulées des erreurs de localisation de la source à cause de la météo. Ici, l'axe Est-Ouest est très influencé par la température et la vitesse du vent, réduisant la précision de la géolocalisation [2]

C'est pour l'ensemble de ces raisons qu'un obstacle sur le chemin de propagation d'une onde entraîne de suite des complications, notamment entraînant notamment un accroissement du potentiel d'erreur dans la détermination de l'origine de l'onde. À l'inverse, il est aussi important d'éviter l'amplification des sons due aux canyons urbains [12], qui sont constitués de bâtiments réverbérant, relativement proches les uns des autres, emprisonnant ainsi les ondes sonores. Cette situation contribue également à l'élargissement de la marge d'erreur lorsqu'il s'agit de localiser avec précision la source sonore.

1.3 Hypothèses de travail

- Hypothèse de l'onde plane en espace bidimensionnel

Comme vu précédemment, le concept du champ lointain repose sur l'hypothèse que les capteurs sont placés à une distance suffisante de la source sonore, permettant ainsi d'approximer la propagation des ondes comme étant quasi-planaires, malgré leur nature sphérique originelle. Ainsi, les ondes sonores atteignant chaque microphone peuvent être considérées comme parallèles les unes aux autres. La direction perpendiculaire au réseau est appelée la direction de large bande ou simplement la large bande du réseau. Tous les angles de direction d'arrivée (DOA) seront mesurés par rapport à cette direction. [18]

Ce phénomène est illustré dans la figure 9 [15]. On constate qu'une source Tx propage une onde sonore qui est réceptionnée par deux capteurs sonores Rx1 et Rx2. Celle-ci est sphérique à gauche dans lorsque Rx1 et Rx2 sont proches de la source tandis que celle-ci est plane quand Rx1 et Rx2 sont éloignés.

Afin que l'hypothèse du champ lointain soit admise, il est nécessaire d'avoir une distance entre la source et les capteurs au moins quatre fois supérieure à la distance entre les capteurs sonores. [19]

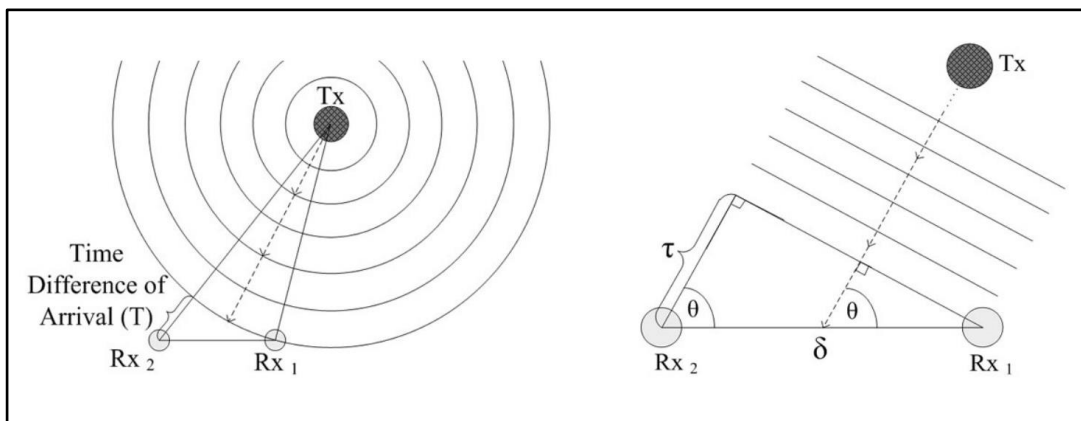


Figure 9 Illustration géométrique du front d'onde plan de la source sonore Tx arrivant à deux capteurs Rx1 et Rx2. A gauche, en champ proche avec l'onde sphérique et à droite en champ lointain avec l'onde plane [15]

Bien que l'hypothèse de l'onde plane limite la précision, cela permet de calculer plus rapidement la localisation de la source. De manière générale, elle simplifie considérablement les modèles mathématiques et algorithmiques utilisés pour la localisation sonore. Les ondes planes, en raison de leur propagation linéaire et uniforme, permettent d'appliquer des méthodes de traitement du signal plus directes et moins complexes. Cela se traduit par une réduction des coûts computationnels et une augmentation de la vitesse de traitement, des aspects particulièrement importants dans les applications en temps réel. Enfin, il n'est pas question de calculer une précision de localisation au centimètre près étant donné que nous avons l'aide de la caméra pour affiner et confirmer cette localisation de bruits impulsifs.

Concernant la dimension de l'espace d'analyse, l'étude est notamment considérée dans un espace bidimensionnel (2D) afin de réduire la complexité des calculs. Cela permet de se concentrer sur les aspects fondamentaux de la localisation sonore sans être submergé par les complexités géométriques et les calculs trigonométriques qui seraient nécessaires dans un espace tridimensionnel (3D).

L'hypothèse prise pour l'espace en bidimensionnel peut être justifiée dans le cas d'une réelle application en milieu urbain.

Il est très probable que la source sonore assimilée à un bruit impulsif assimilé tel un tir de coup de feu s'effectue à environ 1 mètre de hauteur du sol.

Cependant, les microphones eux seront placés environ à 2,5 mètres du sol, donc il y a une différence de hauteur de 1,50 mètre entre l'émetteur et les récepteurs.

Précédemment, on a émis l'hypothèse que la source sonore est plane, donc éloignée des capteurs. Comme la distance entre la source sonore et les microphones est significativement plus grande que la différence de hauteur (1,50 mètre), l'effet de cette hauteur sur le TDOA peut être négligeable. Cela est dû au fait que l'angle de propagation du son par rapport à l'axe horizontal devient très petit, rendant l'approximation 2D raisonnable.

- Caractérisation du bruit impulsif

Afin de localiser une seule source, celle d'un bruit anormal, on décide de l'assimiler à un son fort, inattendu, rapide synonyme de bruit impulsif dans la littérature anglaise [12] [25].

Un bruit impulsif est soudain et prédomine par rapport au bruit ambiant, il est causé par une impulsion sonore, dans la plupart des cas, cela correspond à une augmentation instantanée de la pression sur la plage de fréquence captée par l'oreille humaine, soit entre 20 Hz et 20 kHz. L'oreille animale subit plus de dégâts d'un bruit impulsif que d'un bruit continu, cela proviendrait du fait que de nombreux bruits impulsifs sont générés par l'homme et par conséquent ne sont pas naturels.

En effet, le bruit impulsif est souvent généré par une collision de matériaux, donc, ils sont nombreux dans les secteurs tels que l'industrie, le transport, l'armée, etc. Le département américain de la santé et des services de santé définissent en juin 1998 un bruit impulsif comme une élévation imprévisible et une redescente rapide, avec au plus une durée de 1 seconde. D'après eux, un bruit impulsif devient continu lorsque l'intervalle inter-pulsionnel est inférieur à 1 seconde [12]. Cependant, nous considérerons ici, comme "la plupart des chercheurs considèrent un bruit impulsif comme un seul pic de pression ayant une durée de l'ordre de la milliseconde ou de la microseconde, sans considérer l'intervalle inter-pulsionnel" (Davis & Clavier, 2017).

Il n'existe cependant pas d'échelle d'intensité absolue pour définir à partir de quand un bruit est considéré comme impulsif. En effet, le décibel, peu compris par le grand public, est utilisé afin de quantifier des événements sonores en se rapprochant du ressenti, en température, le décibel se rapprocherait du Fahrenheit. Or d'après la loi psychophysique de Werber-Fechner, la sensation mentale d'un être vivant en réaction à un phénomène correspond au logarithme de la grandeur physique du matériel stimulé. Ainsi, pour utiliser cette échelle logarithmique, il est nécessaire de choisir un référentiel, ce dernier est sélectionné en fonction du milieu de l'étude, ici, il est de 140 dB. Ce niveau d'intensité correspond au niveau d'intensité minimale que peut produire une arme à feu. Cet élément a été choisi comme étant l'élément produisant un bruit impulsif de la plus faible intensité voulant être détecté dans un milieu urbain.

Les capteurs sonores vont réagir au-delà de ce seuil de décibels choisi. En effet, le but n'est pas que la caméra change de direction face à un simple bruit de klaxon tout près d'un capteur sonore, mais seulement en cas de bruit impulsif dangereux pour la population. Par ailleurs, identifier le type de bruit fort n'est pas nécessaire, car une fois sa direction d'arrivée trouvée, la caméra permet de voir et donc de déterminer rapidement la nature du risque pour l'envoi d'autorités compétentes le plus adapté à l'incident.

Bien évidemment, le bruit impulsif, la source sonore à localiser ne communique pas avec les récepteurs comme c'est le cas avec les systèmes GPS, les sonars, de ce fait la distance entre la source et les récepteurs n'est évidemment pas connue, c'est ce que l'on cherche.

Enfin, un élément important à retenir, est que le bruit impulsif possède une caractéristique imprévisible d'apparition. De ce fait, il est impossible de savoir le temps d'émission de ce signal sonore, de ce fait la métrique du TOA (Time of Arrival) basée sur la mesure du temps qu'un signal

Le bruit en ville : localisation d'une source sonore impulsive

Sarah MARCHAL

Polytech Tours, Département Aménagement et Environnement, Option RÉSEAU

15/12/2023

Encadrant : Hervé BAPTISTE 17

met pour se propager de l'émetteur au récepteur, est directement mis de côté. De plus, comme évoqué précédemment, on sait seulement que la puissance en dB du signal est au minimum de 140 dB, néanmoins, on ne connaît pas exactement la puissance émise du signal. Donc la métrique du RSS (Received Signal Strength) qui utilise la puissance du signal reçu, la distance est déterminée en fonction de l'atténuation de la puissance du signal émis est également rejetée.

- Perturbations du milieu urbain négligées

L'environnement acoustique peut se distinguer de deux situations : l'environnement libre (appelé anéchoïque) dans lequel les capteurs reçoivent le trajet direct sans obstacles et l'environnement réverbérant où les microphones reçoivent plusieurs copies réfléchies et atténuées du trajet direct. Comme vu précédemment, le milieu urbain concerne la deuxième situation. Notamment, car il affecte le phénomène des propagations des ondes sonores à cause des différentes perturbations présentes dans cet espace (la morphologie urbaine, les obstacles avec les phénomènes de réverbérations, diffraction, les conditions atmosphériques, mais également les bruits ambiants).

On décide de négliger ces perturbations pour plusieurs raisons :

- L'objectif principal est de déterminer la direction générale de la source sonore, plutôt qu'une localisation précise au centimètre près. Ceci est suffisant si l'on utilise ensuite une caméra à champ de vision large pour affiner la localisation. La caméra, une fois la direction approximative déterminée par une technique de localisation, peut balayer la zone et localiser visuellement l'événement.
- En milieu urbain, les multiples perturbations peuvent grandement complexifier la localisation précise d'une source sonore. Cependant, si l'on n'a pas besoin d'une grande précision, ces facteurs peuvent être négligés, car ils compliqueraient inutilement le processus sans apporter une amélioration significative à la localisation générale recherchée.
- Enfin, dans un espace ouvert, comme une place publique, le son direct de la source sonore impulsive atteint les capteurs avant que les effets de réverbération ne deviennent significatifs. Cela permet de se fier aux premières arrivées de son pour la technique de localisation sans se préoccuper outre mesure des réverbérations qui arrivent plus tard.

En conclusion, en utilisant une méthode de localisation et une caméra pour la confirmation visuelle, on postule que ce choix de négliger les perturbations n'empêchera pas de localiser une source sonore en milieu urbain. Cette approche est pragmatique et suffisante pour des applications qui ne requièrent pas une précision extrême, mais plutôt une identification rapide et directionnelle de la source sonore.

1.4 Choix du matériel

Pour mettre en place ce dispositif de localisation sonore, il est important d'avoir un réseau de capteurs suffisamment performant, et donc des microphones qui assurent de ne pas perdre d'informations déterminantes pour la géolocalisation de la source. Par conséquent, il est important de prêter attention à 3 caractéristiques des microphones : la directivité, la sensibilité, et enfin sa plage de fréquence.

La directivité d'un microphone fait référence à sa sensibilité aux sons provenant de différentes directions. Cette caractéristique est représentée graphiquement par ce qu'on appelle un diagramme polaire. Cette représentation montre comment la sensibilité du microphone varie en fonction de l'angle d'arrivée du son. Cette directivité peut être de 5 types différents, comme vu sur la figure 10. Les plus connues concernent omnidirectionnelle, bidirectionnelle et cardioïde [16]. Par exemple, certains microphones sont très sensibles aux sons qui viennent directement devant eux, souvent appelés "unidirectionnelle" ou "cardioïde", tandis que d'autres peuvent être plus sensibles aux sons venant de l'avant et de l'arrière (bidirectionnel). Dans l'idéal des microphones avec une directivité omnidirectionnelle serait le plus simple et surtout permettrait d'avoir des conditions les plus optimales. En effet, grâce à ce modèle, la direction du microphone n'a aucune importance puisqu'elle capte le même niveau de signal dans toutes les directions. Alors le microphone peut être orienté dans n'importe quelle direction. Cependant, il est aussi possible d'utiliser des microphones avec une directivité hypocardiïde, qui capte les sons de l'avant et moins les sons provenant des côtés.

Par ailleurs, on peut s'interroger sur la possibilité à titre expérimental d'utiliser des microphones provenant de smartphones utilisés comme capteur sonores. Il est difficile de trouver une source confirmant la réelle directivité des microphones de smartphones, car celle-ci peut changer d'un téléphone à l'autre. Néanmoins, on peut estimer, de manière générale, que la directivité des smartphones est suffisante, car une étude a démontré qu'un iPhone 5s (2015) possédait un microphone omnidirectionnel [36]. Les smartphones utilisés pour l'expérience seront alors jugés suffisants, car ils datent tous de 2020.

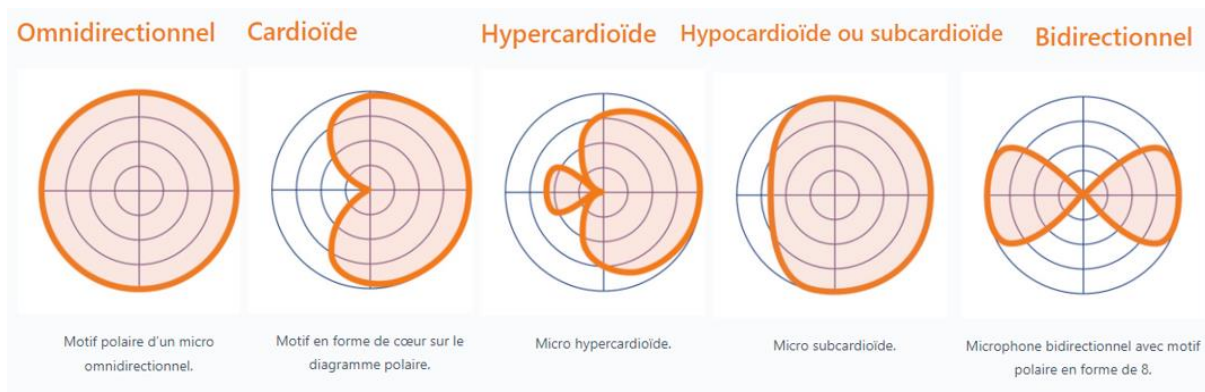


Figure 10 Motifs polaires des différentes directivités des microphones. [3]

La sensibilité d'un microphone, mesurée en millivolts par Pascal (mV/Pa), se réfère à sa capacité à convertir les ondes sonores en signaux électriques. En termes techniques, elle est définie comme la tension électrique produite par un microphone en réponse à un certain niveau de pression acoustique. Or dans notre cas d'étude, cette pression sonore correspond aux bruits communs d'un espace urbain de l'ordre de 70 dB.

Bien souvent, les microphones de grandes tailles possèdent une sensibilité plus importante permettant de détecter des sons plus faibles ou plus éloignés.

Le bruit en ville : localisation d'une source sonore impulsive

Sarah MARCHAL

Polytech Tours, Département Aménagement et Environnement, Option RÉSEAU

15/12/2023

Encadrant : Hervé BAPTISTE 19

Enfin, les microphones doivent pouvoir capter une très large plage de fréquence, ils doivent capter des fréquences comprises entre 500 Hz à plus de 20 kHz. (20 kHz équivalents à la fréquence maximale audible par l'humain vu précédemment). En effet, le bruit d'une arme à feu se focalise habituellement dans les hautes fréquences, soit au-dessus de 1 kHz [24], et peut atteindre 5 kHz pour un revolver [26]. Si la fréquence de l'onde émise est trop élevée, le microphone risque de saturer, et ainsi, il sera impossible de géolocaliser la source de l'onde. De même, cela risquerait d'endommager les microphones. Il reste cependant à noter, que la plage de fréquence que doivent capter les microphones doit dépendre du milieu urbain. En effet, la fréquence d'une onde provenant d'une usine, ou d'une place publique n'est pas la même. Ainsi, le réseau de microphones doit être adapté à l'environnement dans lequel il est installé.

1.5 Configuration du réseau de microphones

- Les différentes configurations d'un réseau

À propos de la configuration spatiale du réseau de capteurs acoustiques, celle-ci peut avoir une influence sur la performance de la direction d'arrivée de la source sonore.

Selon les besoins, il existe une infinité de géométries et d'arrangements possibles pour les réseaux de microphones. Au fil des ans, davantage d'attention a été portée aux réseaux dont les éléments sont placés en ligne droite avec une distance inter éléments sont équidistants, cela s'appelle un réseau linéaire uniforme (ULA, Uniform Linear Array). D'autres études se sont portées sur les réseaux linéaires non uniformes de microphones (NULAs, Non-Uniform Linear Array), tandis que peu d'études se sont concentrées sur les réseaux non uniformes non linéaires de microphones (NUNLA, Non-Uniform Non-Linear Array). [23] Bien qu'il existe une infinité de géométrie pour la configuration NUNLA, l'analyse est plus complexe, mais elle reflète souvent de meilleurs résultats que les autres. [22] Ces différentes configurations géométriques sont illustrées sur la figure 11.

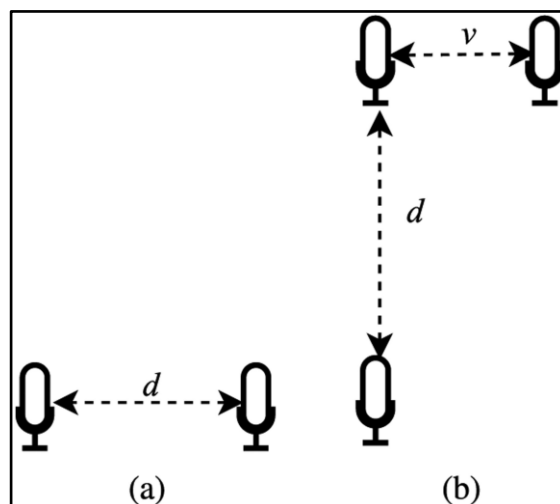


Figure 11 a) Réseaux linéaires uniformes (ULA) et b) Réseaux non linéaires non uniformes NUNLA où d et v sont les distances du microphone inter éléments.

Nous verrons dans l'expérience faite en partie 3, que la configuration la plus simple en réseau linéaire uniforme (ULA) a été choisie pour simplifier les calculs et avoir une plus longue distance source-capteur.

2. État de l'art des techniques

La localisation d'une source sonore, en particulier dans un environnement urbain complexe, est un processus en deux étapes dans notre cas. Il commence par la détermination de la direction d'arrivée (DOA) du son grâce aux capteurs sonores, suivie de la localisation physique précise de la source sonore par les caméras avec un large champ visuel (180°).

De manière générale, les méthodes classiques pour déterminer la localisation de sources sonores se fondent principalement sur trois catégories. [16]

La première concerne la méthode à faible résolution, elle se concentre sur la maximisation de la réponse en puissance provenant de la source (SPR). [23]

Cette maximisation est réalisée grâce à l'utilisation d'un dispositif appelé formateur de faisceau (beamforming), qui combine des retards et des additions de signaux pour optimiser la capture du son en provenance de la direction souhaitée.

La seconde se rapporte à la méthode spectrale à haute résolution qui traite les signaux reçus par le réseau pour calculer une matrice de corrélation de phase spectrale. Une analyse statistique est ensuite effectuée sur la matrice pour trouver la meilleure solution pour l'emplacement source. (les algorithmes associés connus dans la littérature sont ESPRIT, MUSIC, etc.) [24]

La troisième méthode concerne soit la différence de niveau sonore (ILD), soit la différence de temps d'arrivée avec l'estimation du retard entre des paires de microphones (TDOA). Le TDOA concerne également les méthodes d'intercorrélation généralisées (GCC, Generalized Cross correlation) qui sont simples et très utilisées dans le domaine de localisation sonore.

Néanmoins, la première méthode nécessite souvent d'une multitude de microphones, une méthode directement coûteuse en termes de matériel. Tandis que la deuxième catégorie emploie des algorithmes complexes et nécessitent plus de puissance de calcul que les méthodes conventionnelles. C'est pourquoi dans cette étude, on se focalise sur la dernière méthode avec les techniques de ILD et TDOA qui utilisent des principes plus simples. Une technique de position basique sera également vue.

Par ailleurs, la localisation sonore comprend trois dimensions spatiales, soit l'azimut (la direction), l'élévation (la hauteur), et la profondeur (la distance). Dans ce contexte, seul le plan azimutal et la profondeur sont pris en compte, car l'hypothèse d'un espace bidimensionnel a été choisie dans la section 1.3.

2.1 Technique de base de positionnement

Les techniques mathématiques les plus avancées pour établir l'emplacement exact d'un point spécifique reposent sur la triangulation et la trilatération. Elles sont généralement utilisées pour des positions absolues ou relatives, basées sur la géométrie. En se basant sur au moins deux points référencés dont les positions sont déjà connues, il est possible de déterminer la position d'un autre point. Pour ce faire, plusieurs méthodes mathématiques peuvent être employées, notamment :

- L'application des identités trigonométriques.
- L'usage de la loi des sinus.
- L'implémentation du théorème de Pythagore.

Le bruit en ville : localisation d'une source sonore impulsive

Sarah MARCHAL

Polytech Tours, Département Aménagement et Environnement, Option RÉSEAU

15/12/2023

Encadrant : Hervé BAPTISTE 21

Triangulation et trilatération

La triangulation est une méthode fondamentale de localisation, en particulier dans les environnements intérieurs, qui s'appuie sur les principes géométriques des triangles. En termes de localisation acoustique, cette technique permet de déterminer la position d'une source sonore en utilisant les angles d'arrivée ou directions d'arrivée (AOA/DOA) des ondes sonores par rapport à un réseau de microphones ou de capteurs. Les formules trigonométriques permettent de calculer la position de la cible à partir de deux angles connus (ou plus) et de la longueur d'un côté du triangle, qui est la distance entre deux points de référence, A et B, avec A et B situés sur le même axe horizontal, selon la Figure A.

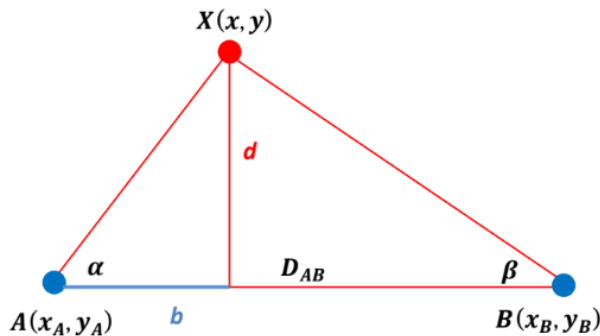


Figure 12 Schématisation du processus de triangulation [5]

La position X de la cible est obtenue grâce aux coordonnées des points A et B et à la distance DAB entre eux, en appliquant les formules suivantes pour les coordonnées x et y de X : [5]

$$\begin{cases} x = x_A + D_{AB} \times \frac{\cos \alpha \times \sin \beta}{\sin(\alpha + \beta)} \\ y = y_A + D_{AB} \times \frac{\sin \alpha \times \sin \beta}{\sin(\alpha + \beta)} \end{cases}$$

Ces équations tirent parti des identités trigonométriques pour résoudre les distances inconnues et sont dérivées en considérant les angles alpha et bêta que la source X forme avec A et B.

Trilatération

La trilatération est une méthode qui utilise la géométrie des triangles d'une manière proche de la triangulation. Cette technique utilise la connaissance de la distance d'un émetteur par rapport à des récepteurs. La technique de la trilatération est écartée directement du choix, car nous ne connaissons pas la distance entre la source et les capteurs. Cette technique s'effectue d'une part grâce au TOA (time of arrival) cependant, il est nécessaire d'une bonne synchronisation temporelle entre les microphones et la source ainsi que le temps d'émissions du signal sonore, cependant celui est inconnu dans notre cas (le bruit impulsif est soudain). D'autre part, la trilatération est réalisable à partir de RSS (Received Signal Strength), en obtenant la distance convertie par la différence entre la puissance du signal émis et celle reçue, néanmoins la puissance émise n'est pas connue dans notre cas.

2.2 Techniques de localisation du bruit impulsif

Afin de géolocaliser la source d'une onde sonore, il faut tout d'abord trouver une méthode permettant d'obtenir la direction de propagation d'une onde sonore. Dans le cas du bruit impulsif, on rappelle que la source sonore ne communique pas avec les capteurs sonores, et que ce son est soudain, fort, et rapide.

De ce fait, deux méthodes couramment utilisées ont été retenues, l'ILD (Interaural Level Differences) et le TDOA (Time Difference of Arrival). Elles se distinguent des autres méthodes, car elles reposent sur des variables de durée ou d'intensité.

ILD

La méthode de l'Interaural Level Differences (ILD) (Blauert, 1997; Stevens & Newman, 1936), également connue sous le nom de différence de niveau interaurale, concerne la différence de niveau sonore qui est perçue par chaque oreille notamment vue dans la section 1.1.2.

La méthode Time Difference of Arrival (TDOA) (Knapp et Carter, 1976) concerne la différence de temps d'arrivée que nous avons vu précédemment. Cette méthode est également appelée ITD (Interaural Time Difference), décrite dans la partie 1.1.2, pour une localisation tridimensionnelle avec des réseaux de capteurs non linéaires pour des courtes distances. La différence entre ces méthodes TDOA et ILD est illustrée par la figure 13, respectivement avec la différence de phase et d'amplitude des signaux.

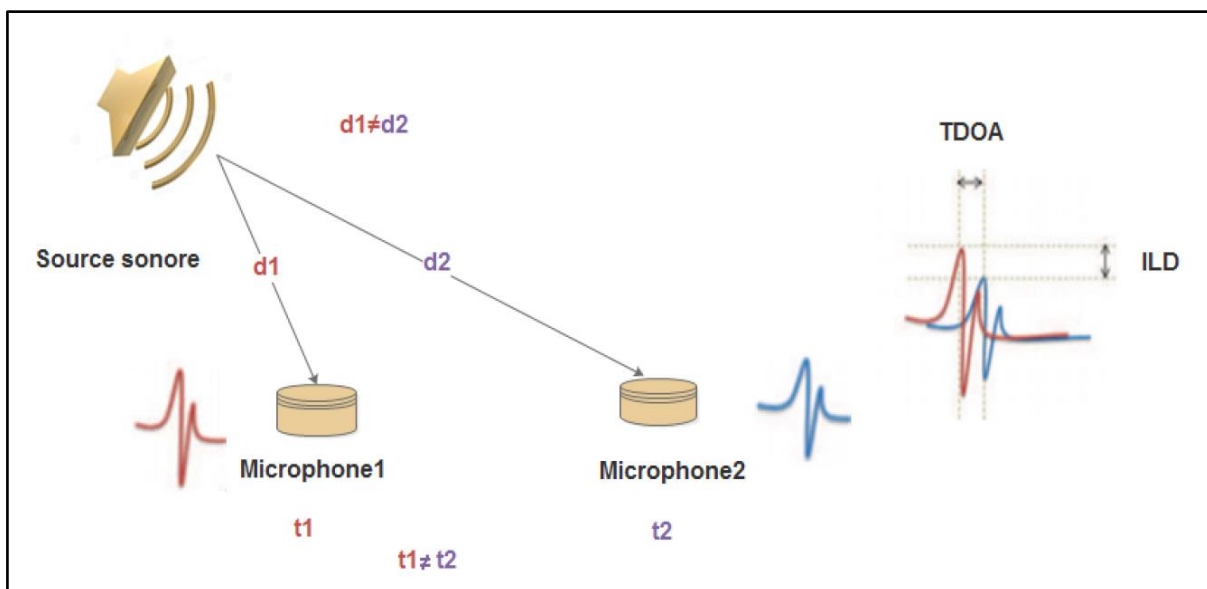


Figure 13 Illustration de la méthode de calcul de la direction d'une source sonore, t_1 et t_2 sont les temps et d_1 et d_2 représentent les distances, [1]

La méthode ILD, consiste à mesurer la différence d'intensité sonore entre les signaux captés par deux récepteurs, tels que des microphones ou des oreilles.

En effet, l'intensité sonore, en décibels, est considérée comme un des principaux indicateurs de la perception d'une source sonore. Cependant, selon la loi de l'inverse du carré, "inverse-square law" [7] vue ci-dessous :

$$I = \frac{P}{4\pi r^2}$$

où :

- I est l'intensité sonore (W/m^2),
- P est la puissance acoustique totale émise par la source sonore (W),
- r est la distance entre la source sonore et le point de mesure (m),

L'intensité sonore d'un son dans un champ libre (sans obstacles, réflexions ou absorptions) diminue proportionnellement au carré de la distance entre la source sonore et le récepteur. Si la distance entre la source sonore et le récepteur est doublée, l'intensité sonore est réduite par un facteur de quatre.

Par conséquent, lorsque la source sonore est éloignée, la différence d'intensité entre les récepteurs est trop faible pour être détectée avec précision, ce qui rend la localisation complexe. On constate que cette méthode est utile pour localiser seulement dans le cas où la source sonore est proche, mais sa précision diminue avec l'augmentation de la distance.

L'amplitude d'une onde sonore est liée à son l'intensité (la différence d'amplitude est liée avec la différence d'intensité). La différence d'amplitude est significative dans le cas des ondes sphériques (sources proches dans la zone de Fresnel), mais devient négligeable avec des ondes planes (sources éloignées dans la zone de Fraunhofer) car l'amplitude est considérée comme uniforme, rendant l'ILD inapplicable pour ces dernières. Donc, dans notre cas, l'onde est considérée comme plane, donc la méthode l'ILD est rejetée.

De plus, pour localiser efficacement une source sonore en utilisant l'ILD, il est essentiel de connaître son niveau sonore initial. Sans cela, il est compliqué de déterminer la distance de la source, car l'intensité perçue dépend de l'intensité originale de la source. Cependant, dans notre cas, nous ne savons pas l'intensité exacte du bruit impulsif (à partir de 140 dB) à localiser et nous n'avons pas de moyen de la connaître.

TDOA

Basé sur la méthodologie de l'estimation du retard (TDE), le TDOA (Time Difference of Arrival) (Knapp et Carter, 1976) est l'une des techniques les plus utilisées pour déterminer la différence de temps d'arrivée d'une onde entre deux récepteurs distincts spatialement. En exploitant cette méthode, il est possible de calculer le TDOA pour chaque paire de récepteurs dans un système.

Au cours de la dernière décennie, la modélisation du fonctionnement auditif a capté l'attention, particulièrement dans le secteur de la robotique. Notamment pour créer des robots imitant les humains en intégrant des technologies telles que la vision, imitée par des caméras, l'audition, reproduite à l'aide de microphones. [29] [31] [32]

Cette technique est notamment utilisée dans diverses applications notamment dans le but de localiser une personne âgée dans une maison [1] mais également dans le cas de systèmes d'aides auditives binaurales aux personnes ayant une perte auditive afin de localiser leur interlocuteur [27],[28]. Cette méthode est également utile dans le domaine des télécommunications, par exemple pour cibler automatiquement une personne qui prend la parole à l'aide d'une caméra dans un environnement de vidéoconférence. [33]

Si les positions de chaque récepteur sont connues, on peut en déduire l'emplacement de la source à condition que tous les récepteurs soient synchronisés temporellement, mais uniquement entre eux [5]. Dans un espace tridimensionnel, il faut au moins quatre capteurs pour obtenir une solution unique, cependant dans les hypothèses précédemment, on a choisi un plan bidimensionnel dans lequel trois capteurs suffisent.

Pour obtenir le temps relatif d'arrivée entre deux capteurs ou plus, on mesure le décalage temporel appelé τ (tau) entre l'arrivée de l'onde à un capteur sonore et son arrivée à un autre capteur sonore distinct spatialement sur la figure 1. On observe directement que l'onde sonore parcourt une plus grande distance d_2 que d_1 dans la figure 1 bis, et donc elle met plus de temps à arriver au capteur n°2 le plus loin. En exploitant cette différence d'arrivée TDOA1-2 entre 2 capteurs (n°1 et n°2) ainsi que la connaissance de la vitesse du son, environ 343 m/s dans l'air à 20 °C (à noter que la vitesse du son est une variable qui se doit d'être ajustée, selon les conditions météorologiques de température extérieure in situ ou intérieure in vivo). On peut en déduire la différence de distances d_1-2 avec cette formule :

$$\text{TDOA}_{1-2} = t_2 - t_1 = \frac{d_2 - d_1}{v} = \frac{d_{1-2}}{v}$$

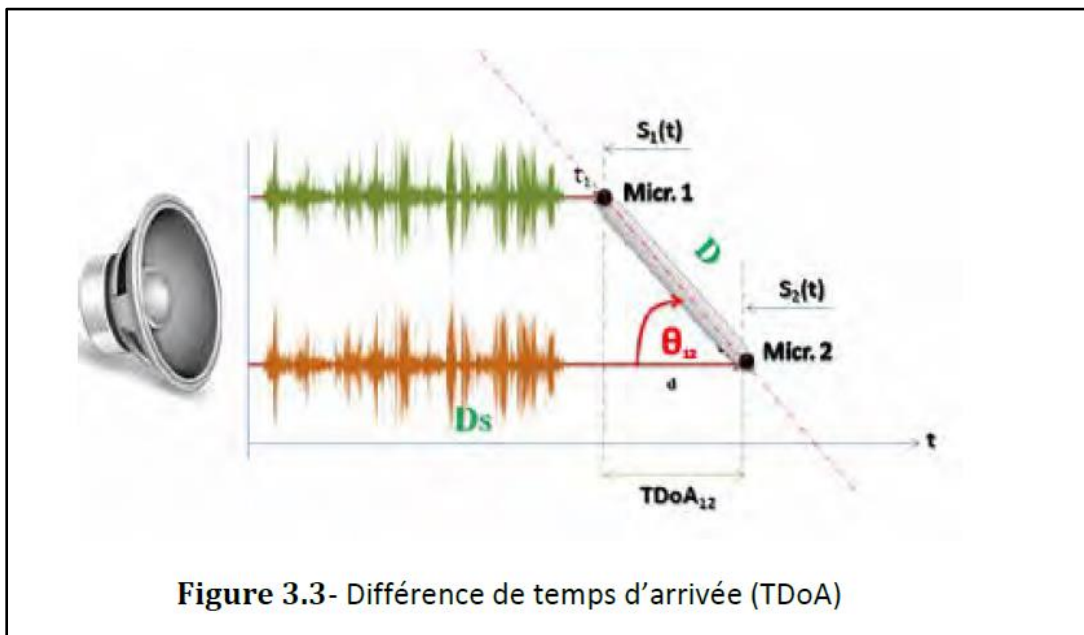


Figure 14 Schéma des différences de temps d'arrivée (TDOA) avec deux microphones [5]

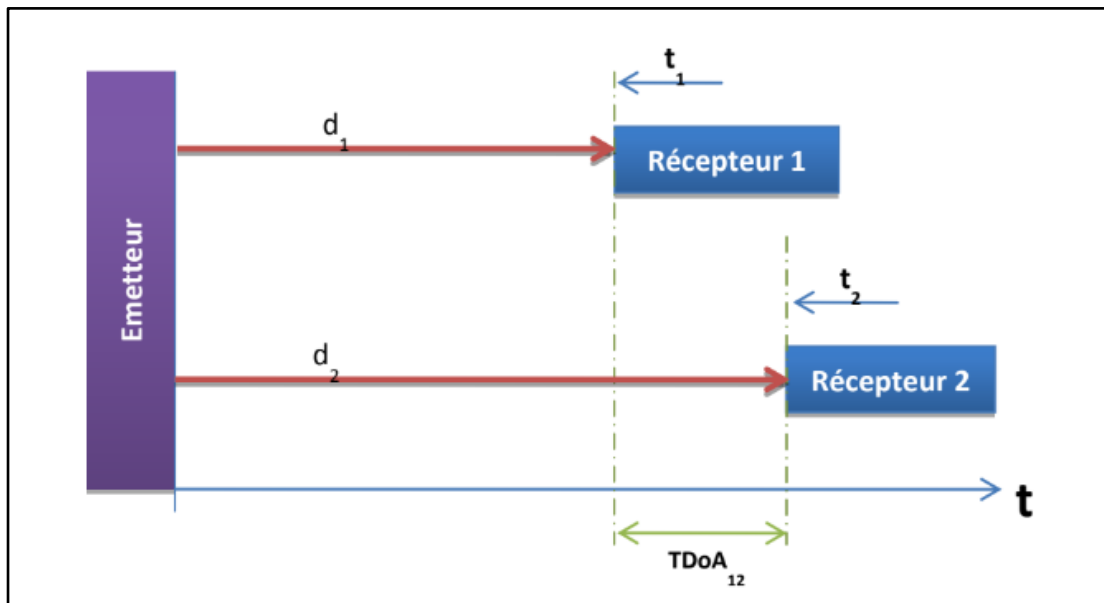


Figure 15 Schéma des différences de temps d'arrivée (TDOA) avec deux microphones [5]

Chaque onde sonore possède une signature ou un motif unique qui la caractérise. Dans le contexte de notre étude, étant donné que tous les récepteurs ciblent la même source sonore, ils reçoivent des ondes avec des motifs identiques. Ces motifs peuvent varier en amplitude en raison de facteurs tels que l'atténuation de l'onde ou la distance par rapport à la source. Pour estimer le TDOA entre deux récepteurs, une approche initiale consiste à comparer graphiquement l'arrivée de ce motif caractéristique sur chaque récepteur.

L'ambiguïté avant-arrière

Dans la littérature, la notion d'ambiguïté "avant-arrière" est causée par la symétrie des signaux reçu par le réseau de microphones, notamment avec le cas deux microphones alignés revient souvent. [18] Ce phénomène est illustré dans la figure 16.

Les angles formés par les sources sont mesurés par rapport à deux largeurs de bande différentes (les lignes de la direction de la source sonore), l'une devant le réseau et l'autre derrière. Comme la distance $[d \cdot \cos\theta]$ supplémentaire parcourue par le signal de l'une ou l'autre source pour atteindre M1 par rapport à M2 est la même, les retards temporels par paire associés à chaque source seront également les mêmes. Cela est sous l'hypothèse que les microphones sont omnidirectionnels, ce qui signifie que le gain du microphone ne change pas la direction du front d'onde acoustique. En général, tous les réseaux linéaires (ULA, NULA) vus dans la partie 1.5 sont seulement capables de distinguer si la source se trouve à un angle par rapport à la ligne du réseau, mais pas exactement où elle se trouve autour de la ligne. (distinction uniquement des angles entre -90° et $+90^\circ$ par rapport à la largeur de bande du réseau.

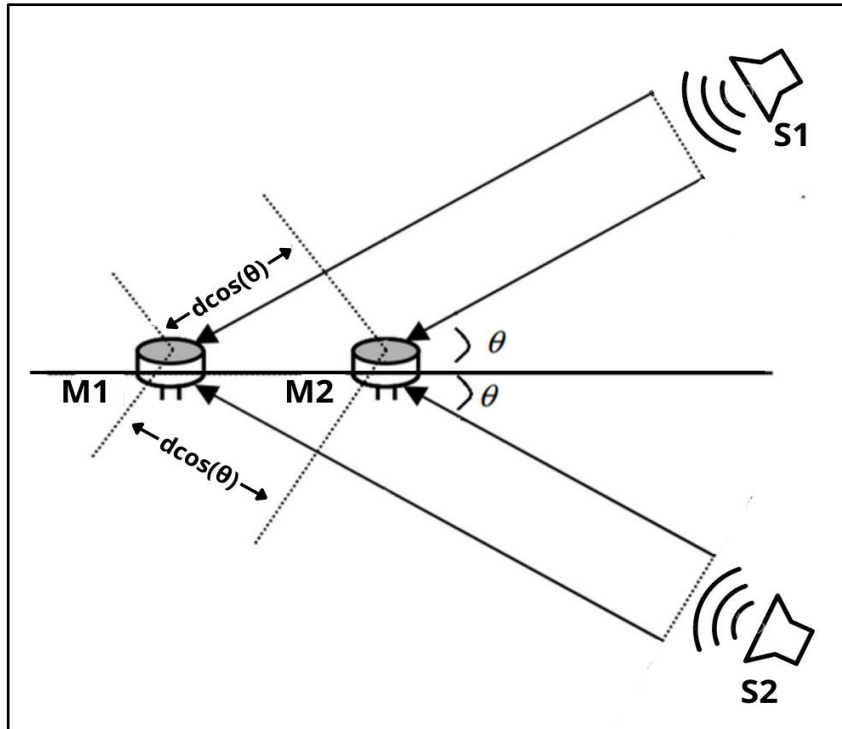


Figure 16 Illustration de l'ambiguïté spatiale avant/arrière avec un réseau linéaire

Plusieurs configurations de réseau de microphones peuvent résoudre le problème d'ambiguïté gauche-droite avec des réseaux non linéaires (voir partie 1.5) tels que la forme de triangle (en L), circulaire, sphérique, ellipse, etc. [23]

Si l'on prend un troisième microphone placé linéairement et de manière uniforme, cela permet de fournir une mesure supplémentaire du temps d'arrivée, qui peut aider à affiner l'analyse de la DOA. Néanmoins, cette configuration, avec des capteurs omnidirectionnels, ne résout pas complètement l'ambiguïté, car la symétrie des signaux reçus reste un problème. Les sons provenant de directions symétriques par rapport à la ligne de microphones produisent des TDOAs similaires. Néanmoins, cette configuration peut être utilisée pour capter des sons uniquement de l'avant avec par exemple des capteurs cardioïde (voir partie 1.4).

Grâce à ces informations, on peut en déduire que la configuration du réseau de microphones dépend de la zone d'étude telle une rue ou place publique et de sa géométrie. La configuration linéaire avec les microphones placés en ligne droite est adaptée pour une rue, contre un mur afin de localiser une source sonore devant le réseau de capteurs cardioïdes couvrant 180° d'angles. Par ailleurs, si on est dans le cas d'une place publique, la configuration en triangle au coin d'un mur peut être possible afin d'avoir le plus de chance de capter une source sonore éloignée (car hypothèse de l'onde plane voir section 1.3). Ce qui ne serait pas le cas pour un réseau placé au milieu de cette même place, car il aurait moins de chance d'être éloigné de la source. Néanmoins, si la place publique est très grande alors la disposition non linéaire des capteurs omnidirectionnels peut être envisageable.

2.3 Traitement d'amélioration de l'imprécision

Nous avons vu précédemment qu'il est possible de déterminer graphiquement le décalage temporel entre deux signaux. Toutefois, cette méthode visuelle, bien qu'utile, peut manquer de précision. Pour améliorer la précision de la détermination du TDOA, on peut recourir à la méthode classique de l'intercorrélation ou corrélation croisée (cross correlation).

La corrélation croisée (CC)

Cette technique mathématique de la corrélation croisée (CC) mesure le degré de similitude entre deux signaux en fonction du décalage temporel appliqué à l'un d'eux. La fonction d'intercorrélation pour deux signaux quantifie ces ressemblances, elle indique à quel point les motifs des deux ondes se superposent à un instant t donné [1]. Une valeur élevée signifie que la correspondance est excellente (les motifs des deux ondes se superposent presque parfaitement à cet instant précis), tandis qu'une valeur proche de 0 indique peu ou pas de correspondance.

En pratique, pour déterminer le TDOA entre deux signaux, on cherche le décalage temporel, τ , qui maximise la fonction de corrélation (similitude maximale). [1]

Pour des signaux continus, la figure 2 représente cette fonction d'intercorrélation avec le premier signaux $s_1(t)$ et le deuxième signal $s_2(t)$ en retard par rapport à $s_1(t)$ car décalé de τ unités temporelles. Cependant, la formule que l'on utilise est légèrement différente sur la figure 3, car les signaux analysés sont échantillonnés. En effet, la fonction d'intercorrélation est définie par une somme sur les indices des échantillons, plutôt que par une intégrale. L'échantillonnage (notamment avec le théorème de Nyquist-Shannon) permet donc de transformer des signaux continus en signaux discrets pour que le traitement numérique puisse avoir lieu.

$C_{s_1s_2}(t) = \int_{-T}^{+T} s_1(t)s_2(t - \tau)d\tau$	$C_{s_1s_2}(\tau) = \sum_{-T}^{+T} s_1(n)s_2(n - \tau)$
---	---

Formules de l'intercorrélation croisée pour signaux continus à gauche entre deux signaux et à droite pour des signaux échantillonnés [1]

Une fois que le maximum de l'intercorrélation entre s_1 et s_2 est déterminé, le retard τ entre ces deux signaux, nous pouvons déterminer l'endroit en appliquant la fonction d'argument du maximum qui retourne l'argument τ pour lequel la fonction d'intercorrélation atteint sa valeur maximale :

$$\tau = \text{Argmax}(C_{s_1s_2})$$

Bien que cette technique possède une précision tout à fait acceptable dans certaine expérience simple [1], celle-ci peut être compromise par divers éléments, notamment la tendance du signal sonore à présenter une autocorrélation ainsi que les interférences causées par des réflexions acoustiques dans l'environnement urbain par exemple [5].

La corrélation croisée généralisée avec le filtre PHAT (GCC PHAT)

Pour améliorer la corrélation croisée classique en milieu urbain, une alternative consiste à utiliser la Generalized Cross-Correlation (GCC) [3] (Knapp et Carter,1976), un dérivé plus précis. Elle associe la CC à un filtre conçu pour réduire le bruit ambiant et les réverbérations perturbatrices lors de la transmission du signal, ce qui est souvent le cas en milieu urbain [3]. La GCC vise à affiner le pic de CC entre les signaux en réduisant l'influence du bruit, améliorant ainsi le rapport

signal-sur-bruit (SNR). Cela se fait en appliquant une fonction de pondération (weighting function) spécifique dans le domaine fréquentiel pour optimiser la détection du décalage temporel.

Fonctionnement de la corrélation croisée généralisée

La GCC débute par la transformation des signaux du domaine temporel au domaine fréquentiel à l'aide de la transformée de Fourier rapide (FFT) pour obtenir le spectre de puissance croisée. (plus facile de travailler avec les composantes fréquentielles des signaux). Ensuite, un filtre de pondération est appliqué pour atténuer le bruit qui permet de "blanchir" le signal d'entrée (c'est-à-dire en atténuant les composantes de bruit, cela minimise l'impact d'interférence sonore). Après cette étape, la GCC calcule la CC dans le domaine fréquentiel en multipliant les spectres de Fourier inverse des signaux pour revenir au domaine temporel. Enfin, elle recherche le pic principal dans la fonction de CC résultante. Ces étapes sont résumées avec un schéma récapitulatif en figure 17.

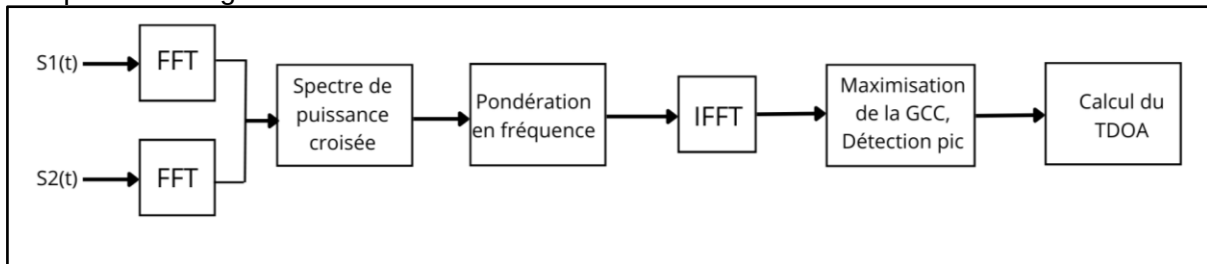


Figure 17 Schéma des étapes de la GCC

Le filtre PHAT (Phase Transform)

Pour la GCC, les fonctions de pondération fréquentielles les plus courantes sont vues dans Knapp et Carter, 1976 [6]. Le filtre PHAT "blanchit" le signal normalisant le spectre de puissance sur toutes les fréquences, minimisant ainsi les biais liés aux variations de puissance et en se concentrant davantage sur la phase¹ que sur l'amplitude du signal.

Parmi les nombreux filtres existants, de nombreuses thèses soutiennent celui du filtre PHAT notamment dans cette thèse [5] qui compare la performance des filtres, vu en annexe n°1. Les résultats montrent que la méthode GCC-PHAT est la meilleure du point de vue minimisation de l'erreur de ranging². C'est la fonction avec la plus grande résolution temporelle, cela veut qu'elle permette de détecter de très petits écarts de temps, car la mesure de précision du temps est élevée.

Un tableau de comparaison a été élaboré afin de comparer la CC et la GCC PHAT avec des critères (Hightower et al. en 2001), il est présent annexe n°6. En conclusion, l'algorithme GCC-PHAT est le moyen le plus optimisé pour estimer la direction d'arrivée.

Après avoir vu le principe du TDOA et de ses traitements d'amélioration de l'imprécision du décalage temporel, nous allons voir ensuite quelles sont les méthodes de localisation à partir

¹ La phase est souvent moins affectée par des changements d'environnement que l'amplitude, donc se concentrer sur la phase, on peut obtenir une estimation plus fiable/précise

² Les inexactitudes dans la mesure du TDOA entraînent des erreurs dans la détermination de la distance, appelée "ranging", où la distance estimée peut varier par rapport à la distance réelle.

Le bruit en ville : localisation d'une source sonore impulsive

Sarah MARCHAL

Polytech Tours, Département Aménagement et Environnement, Option RÉSEAU

15/12/2023

Encadrant : Hervé BAPTISTE 29

2.4 Méthode de localisation à partir du TDOA

À partir du calcul du décalage temporel, deux manières sont possibles pour calculer la position de la source. La première méthode est purement trigonométrique et géométrique afin de déterminer la direction d'arrivée. Puis la deuxième concerne des équations hyperboliques non linéaires afin de déterminer la position exacte.

2.4.1 Méthode trigonométrique/géométrique pour la direction d'arrivée

Afin d'illustrer le calcul de la direction d'arrivée de la source dans un réseau de microphones, voici la figure 18 dans lequel deux microphones omnidirectionnels réceptionnent une onde sonore plane (avec l'hypothèse du champ lointain vu en section 1.3) sous un angle d'incidence tel que le front d'onde arrive d'abord au premier microphone 1 puis 2 avec un retard temporel de τ .

Alors que l'angle d'incidence peut être déterminé en utilisant au moins deux capteurs, évaluer la distance entre la source sonore et le réseau de microphones est difficile, voire impossible, lorsque la source se trouve dans le champ lointain du réseau. [35]
C'est pourquoi la méthode géométrique est uniquement privilégiée pour obtenir la direction d'arrivée et non la position exacte de la source.

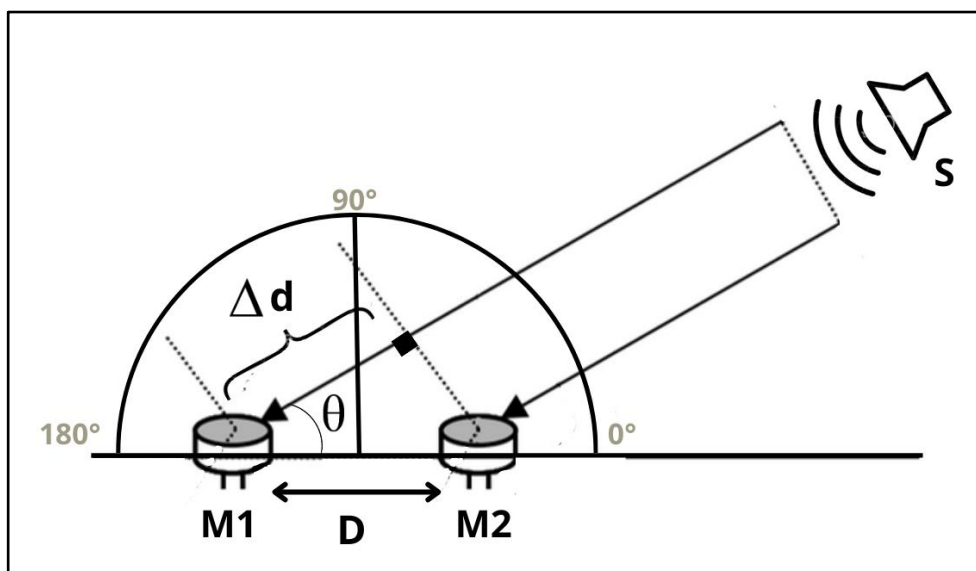


Figure 18 Illustration de la direction d'arrivée de la source sonore plane avec deux microphones, l'angle d'incidence est θ , et l'espacement entre 2 capteurs est d

Dans le champ lointain (vu en partie 1.3), la distance entre la source et les capteurs est suffisamment grande pour que les ondes puissent être considérées comme parallèles. Cette hypothèse simplifie le problème en permettant d'utiliser la géométrie triangulaire pour relier la direction d'arrivée DOA et la différence de temps d'arrivée TDOA, comme nous allons le démontrer avec cet exemple suivant. On peut alors établir des équations pour calculer l'angle d'incidence.

Comme vu précédemment dans la section 2.3 du TDOA :

$$\Delta d = d_1 - d_2 = \tau_{12} \times c$$

Avec c la célérité du son dans l'air à 20 °C, d_1 et d_2 les distances respectivement dans la source et M1 et M2.

Afin de déterminer l'angle d'arrivée θ , on applique les formules de la trigonométrie ($\cos \theta = \text{côté adjacent} / \text{côté de l'hypoténuse}$), pour un triangle de côté adjacent Δd et l'hypoténuse D (l'espacement entre les capteurs), on obtient :

$$\cos(\theta) = \frac{\Delta d}{D} = \frac{\tau_{12} \cdot c}{D} \quad \text{donc} \quad \theta = \cos^{-1} \left(\frac{\tau_{12} \cdot c}{D} \right)$$

2.4.2 Méthode des hyperboles pour la position

Il existe une autre méthode alternative à celle de la géométrie : la multilatération qui repose sur l'intersection d'hyperboles non linéaires en 2D formées à partir des différences de temps d'arrivée des signaux (TDOA) [8]. Elle est largement adoptée dans diverses applications en temps réel de nos jours.

Pour déterminer une position en deux dimensions, il faut au moins trois récepteurs, comme indiqué dans [10]. À noter, que les capteurs ne doivent pas être alignés pour cette expérience (risque d'ambiguïté).

Une fois que les décalages temporels sont estimés, ils sont convertis en différences de distances. Chaque paire de microphones forme les foyers d'une hyperbole, où la différence de temps d'arrivée du son traduit une distance constante de la source sonore à ces points, représentable par une équation hyperbolique. Voici un exemple pour illustrer cette méthode dans la figure 19 avec trois microphones placés à des points différents d'un plan, avec les coordonnées connues (x_1, y_1) , (x_2, y_2) , (x_3, y_3) et la source du son en position inconnue (x, y) .

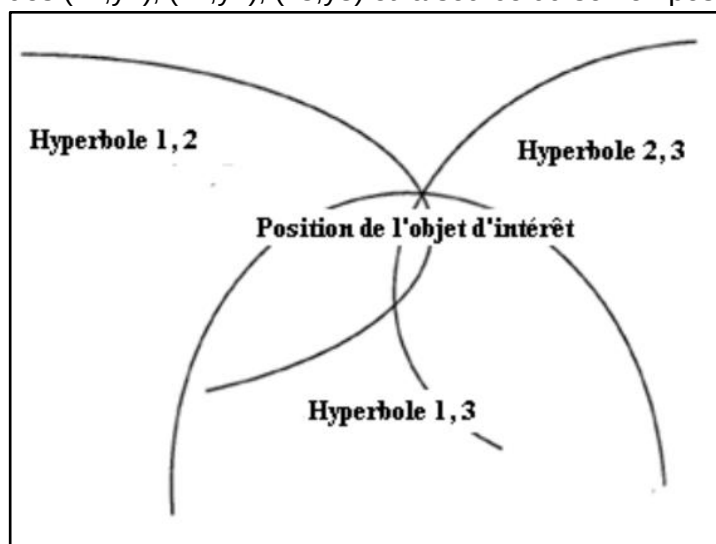


Figure 19 Méthode des hyperboles [9]

La différence de distance basée sur le TDOA pour les paires (1,2) , (1,3) ,(2,3) peut donc s'exprimer par une équation hyperbolique de la forme suivante :

$$v \cdot t_{1,2} = \sqrt{(x - x_1)^2 + (y - y_1)^2} - \sqrt{(x - x_2)^2 + (y - y_2)^2}$$

$$v \cdot t_{1,3} = \sqrt{(x - x_1)^2 + (y - y_1)^2} - \sqrt{(x - x_3)^2 + (y - y_3)^2}$$

$$v \cdot t_{2,3} = \sqrt{(x - x_2)^2 + (y - y_2)^2} - \sqrt{(x - x_3)^2 + (y - y_3)^2}$$

L'intersection de ces hyperboles indique la position de la source sonore dans le modèle 2D. Pour trouver cette intersection, il faut résoudre ces équations simultanément. Cependant, la principale difficulté réside dans la nature non linéaire de la relation entre les TDOAs mesurées et les coordonnées cartésiennes de la position. Lorsqu'une solution analytique n'est pas possible, ce sont bien souvent des méthodes itératives numériques qui sont employées, mais qui impliquent des approximations. Une méthode itérative courante est l'approche des moindres carrés non linéaires afin de minimiser l'erreur entre les équations hyperboliques et les mesures de TDOA. L'un des meilleurs algorithmes concernant cette technique est nommé Levenberg Marquardt, qui est très rapide, [47], [48], (d'autres algorithmes connus : Taylor, Chan, LS). Un des désavantages majeurs de l'emploi de la méthode TDOA réside dans le fait qu'en présence de signaux bruyants, deux hyperboles peuvent se croiser en plusieurs points, même si la source du signal est unique.[49]

2.5 Choix de la méthode

Au commencement de la création d'un système de localisation, il est essentiel de définir clairement les objectifs et les exigences de performance. Cette étape initiale est cruciale pour orienter le choix de la méthode la plus appropriée.

De nombreuses études académiques, dont celle notable de (Hightower et al. en 2001), ont classifié les critères de performance pour l'évaluation de l'efficacité des systèmes de localisation : complexité, robustesse, évolutivité, coût, taux d'erreurs, exactitude et précision.

Parmi ces critères, certains ont été retenus : le coût, la complexité, la précision. On rappelle que notre étude concerne la localisation d'une source sonore tel un bruit impulsif (tir de coup de feu) dans un milieu urbain. Le but est de localiser la source sonore de manière précise sans une fiabilité extrême, car le suivi acoustique des caméras permet d'affiner la localisation et d'évaluer le degré d'urgence de la situation. Le coût est également important, il faut qu'il respecte le budget limité des collectivités territoriales (un faible coût de maintenance, d'installations et de consommation énergétique). De plus, le but n'est pas de défigurer le paysage d'une ville, il est nécessaire d'avoir un dispositif discret et peu encombrant. Enfin, l'efficacité en temps réel est primordiale, il faut un système relativement simple qui permet d'avoir rapidement la localisation de l'incident afin de prévenir les autorités compétentes le plus vite possible.

Dans la littérature, différents principes de localisation de sources sonores sont exposés. Parmi ceux-ci, la technique basée sur la différence de temps d'arrivée (TDOA) est particulièrement performante. En effet, les recherches sur la localisation de sources, menées ardemment au cours des vingt dernières années, révèlent que la méthode de la différence de temps d'arrivée (TDOA) reste largement favorisée pour plusieurs raisons.

D'une part, elle qui ne requiert pas une multitude d'éléments dans un réseau. Grâce à l'usage de plusieurs microphones, on peut localiser une source sonore avec une précision acceptable, voire grande. D'autre part, cette technique ne nécessite pas de calculs complexes par rapport à d'autres techniques, rendant ainsi son utilisation idéale pour des applications en temps réel. De ce fait, cette technique se distingue en raison de plusieurs atouts : sa simplicité en termes de calcul, sa rapidité d'exécution et son coût global nettement plus abordable comparé à d'autres méthodes (peu de microphones sont utilisés dans le réseau).

Bien que nous ayons émis l'hypothèse que les perturbations du milieu sont négligées, il ne faut pas oublier que dans un environnement urbain, cette méthode perd en précision due aux obstacles, réverbérations et bruits ambiants. C'est pourquoi, dans ce milieu complexe, la GCC PHAT, robuste aux environnements réverbérants est choisie pour améliorer la précision en raison de sa commodité de mise en œuvre et de ses résultats précis sous des SNR élevée.

Grâce à la méthode choisie, le TDOA, nous allons pouvoir établir une méthodologie afin de réaliser un protocole expérimental permettant d'obtenir la direction d'arrivée d'une source sonore.

3. Protocole mis en place

On rappelle que la finalité consiste à localiser rapidement une source sonore tel un bruit impulsif afin garantir la sécurité publique en cas d'incident en ville. Dans ce contexte, la localisation s'effectue à l'aide d'un réseau de microphones qui détermine la direction d'arrivée de la source, puis une caméra affine cette localisation.

Afin de répondre à ce problème, un état de l'art a été établi afin de choisir une méthode de localisation (direction d'arrivée) selon des critères : le TDOA basé sur la différence de temps d'arrivée.

Pour valider et affiner cette méthode, un protocole expérimental idéal a été conduit. L'expérience s'est déroulée dans une pièce de maison où 3 microphones ont été utilisés afin de capter l'angle d'arrivée d'une source sonore émise artificiellement et imitant un bruit impulsif. L'objectif de cette expérimentation est double : premièrement, évaluer la précision de la méthode TDOA dans la détection de la direction d'arrivée. Deuxièmement, comprendre dans quelle mesure cette précision est influencée par deux facteurs peu étudiés dans la littérature et liés à l'hypothèse du champ lointain (voir section 1.3): la distance entre les microphones eux-mêmes, et la distance séparant ces microphones de la source sonore. Ces deux paramètres sont particulièrement utiles pour optimiser la configuration du réseau de capteurs lors d'une application réelle dans une ville telle une grande rue ou une place publique.

Le protocole établi pour obtenir la direction d'arrivée d'une source sonore impulsive en champ lointain se répartit en trois étapes : la collecte des données, le traitement des données et l'usage de ces données.

3.1 La collectes des données

La collecte des données nécessite une préparation attentive afin de minimiser l'erreur relative sur le calcul des angles d'arrivée. Nous détaillerons dans cette partie, l'environnement expérimental (caractéristique, configuration et le montage), les paramètres d'enregistrements, les types de microphones utilisés et le protocole expérimental.

- Environnement expérimental

Les caractéristiques des différents éléments utilisés dans l'expérience sont recensées dans le tableau ci-dessous :

Élément	Caractéristique
Source sonore : bruit impulsif	Frappement vif d'un marteau et d'un gros morceau de métal
Microphone	Deux smartphones Samsung S21+ identiques (n°1 et 2) et un smartphone Samsung A22 (n°3)
Matériel informatique	Logiciel Matlab et Audacity
Applications d'enregistrement	Enregistreur vocal par défaut : version

Le bruit en ville : localisation d'une source sonore impulsive

Sarah MARCHAL

Polytech Tours, Département Aménagement et Environnement, Option RÉSEAU

15/12/2023

Encadrant : Hervé BAPTISTE 34

	21.4.15.01, identiques pour les 3 récepteurs
L'environnement (salle à manger/salon)	20,8°C / 14 x 5,7 x 2,5 m/ Peu de bruits ambiants
Objet	Table, minibar, canapé, chaise, cheminée
Trajectoire de l'onde sonore dans le scénario	

Figure 20 : Informations et caractéristique des éléments utilisés dans l'expérience

Dans la section 1.3, nous avons formulé plusieurs hypothèses de travail. Nous avons considéré l'absence de perturbations du milieu, se rapprochant d'un environnement de champ libre, caractérisé par des trajets directs (sans obstacles) entre la source et le capteur. Cela a permis de conduire l'expérience dans des conditions les plus optimales. Ainsi, pour mettre en œuvre ce protocole, j'ai choisi un lieu paisible, exempt de bruits et d'obstacles, afin de réduire au minimum les sources potentielles d'erreur.

- Configuration de l'expérience

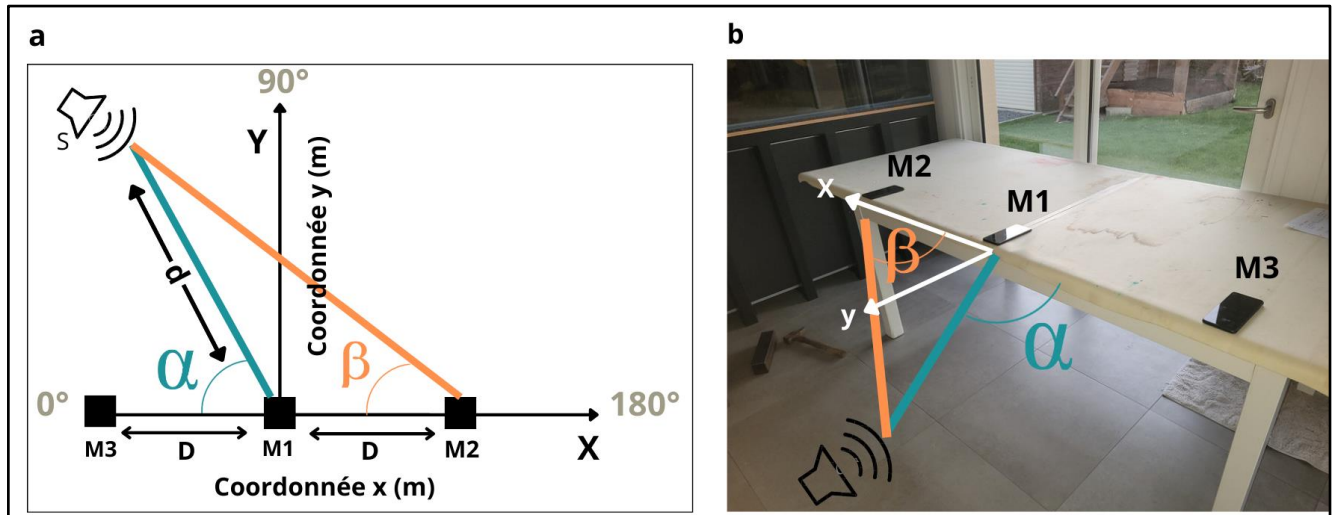


Figure 21 : Illustration de la configuration géométrique (a) et du montage expérimental (b)

Le réseau est constitué de 3 capteurs sonores placés en ligne droite avec une distance identique, d , entre les microphones adjacents. Ceci est illustré avec la figure 21, le réseau est caractérisé de linéaire uniforme (ULA), vu en partie 1.5 afin de simplifier les calculs. La direction d'arrivée est obtenue par deux angles α et β .

Concernant l'hypothèse prenant en compte l'espace étudié en dimension bidimensionnel (2D), j'ai placé les capteurs acoustiques et la source sonore à la même hauteur de 0,74 m afin de garantir que ces éléments soient sur un même plan horizontal.

On a également supposé que la source sonore se trouve dans le champ lointain du réseau. Donc la distance de la source, S , par rapport au réseau est bien plus grande que la distance entre les microphones. Une grande pièce a dû être alors nécessaire pour la réalisation de l'expérience. De plus, nous avons donc approximé le front d'onde émanant de la source comme planaire. Cette hypothèse simplifie le problème en permettant d'utiliser la géométrie triangulaire pour relier le DOA avec le TDOA, que l'on verra dans l'étape du calcul de l'angle.

- Paramètres d'enregistrement

- La fréquence d'échantillonnage doit être suffisamment élevée pour capturer avec précision le spectre de fréquences de la source sonore. Selon le théorème de Nyquist, elle devrait être au moins le double de la fréquence maximale du signal à enregistrer. Afin de remplir cette condition, j'ai pris la fréquence d'échantillonnage la plus élevée possible de l'application d'enregistrement de 48 KHz. Bien que cela augmente la taille du fichier audio, cela permet surtout une amélioration de la précision donnant une résolution temporelle³ plus élevée, ce qui est crucial pour localiser précisément la source du signal avec le TDOA [34].

³ Plus petite variation de temps que le système peut détecter ou mesurer

Le bruit en ville : localisation d'une source sonore impulsive

Sarah MARCHAL

Polytech Tours, Département Aménagement et Environnement, Option RÉSEAU

15/12/2023

Encadrant : Hervé BAPTISTE 36

Par ailleurs, la même fréquence d'échantillonnage a été utilisée sur les mêmes applications d'enregistrement des 3 smartphones pour simplifier le traitement des données en gardant une cohérence des données.

- Afin de simplifier le traitement du signal, l'enregistrement du son doit se faire en mono et non stéréo pour plusieurs raisons.
En mono, chaque enregistrement provient d'une seule source audio, ce qui assure une uniformité dans les données recueillies. Chaque téléphone capte le son de manière identique, permettant une comparaison plus précise entre les enregistrements. Tandis que le stéréo utilise deux canaux (gauche et droite), ce qui peut introduire des complexités inutiles dans l'analyse des signaux. En effet, il faudrait gérer et aligner les données de chaque canal. De plus, le stéréo peut introduire des différences de phase et pourrait fausser les mesures de TDOA.
- Synchronisation des enregistrements

La synchronisation des capteurs sonores entre eux pour éviter les décalages d'enregistrement est primordial. En effet, il est important de noter que la précision requise pour la TDOA est généralement de l'ordre de la milliseconde. Au début de l'enregistrement (avant le bruit impulsif), j'effectue un claquement de mains sec au milieu des capteurs sonores comme dans une étude [1] afin d'obtenir un repère du début. Ce pic sonore permet alors d'aligner (sur un outil de traitement du signal comme Matlab) les pistes audio lors de l'analyse. Bien que cette méthode puisse ne pas être parfaitement précise, elle peut être suffisante pour de nombreuses applications. Voici une illustration sur Audacity de ce bruit marqueur du début de l'enregistrement sur la figure 22.

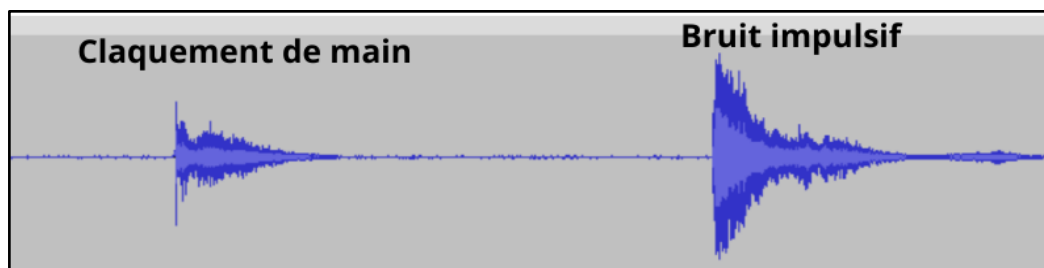


Figure 22 Illustration du bruit marqueur de début et impulsif expérimentaux

- Type de microphones utilisés

Concernant le matériel des capteurs sonores, un choix simple et non coûteux est d'utiliser les microphones des 3 smartphones dont leur directivité a été jugée suffisante (vu en partie 1.4). De manière générale, les téléphones ont des microphones de directivités variables (non symétrique) mais ceux-ci sont souvent omnidirectionnels [5]. Les 3 téléphones sont tous de la marque Samsung, dont l'un est de la gamme A et les deux autres de gamme identique qui est la gamme S21+ jugée de "bonne directivité" [6]. De plus, un site permet de confirmer cette directivité (centrée notamment sur l'avant) suffisante avec un diagramme polaire vu en annexe n°2 d'un téléphone sorti juste après (le Samsung S22) [7].

- Le protocole expérimental

Dans l'expérience, on déterminera deux angles expérimentaux α et β (vu dans la figure 21) avec respectivement avec une paire de microphones différents et une paire de microphones identiques.

Cependant, afin de pouvoir analyser ces angles expérimentaux, il faut pouvoir les comparer avec des angles réels que l'on doit calculer à partir des positions de la source sonore connues dans l'expérience à l'état initial. Lors de la disposition géométrique, l'angle α a été volontairement choisi de façon à être constant afin de simplifier les calculs.

- Trois smartphones, dont deux exactement identiques, sont préparés et vérifiés pour s'assurer de leur fonctionnement correct. Une table est choisie comme support pour les microphones, positionnés à une hauteur h . Les téléphones sont positionnés de façon à ce que le microphone situé en bas des téléphones soit dirigé vers la source sonore. Chaque microphone est séparé d'une distance identique. Le microphone M1 est désigné comme le microphone de référence à l'origine.

- À partir du microphone M1, à l'aide d'un mètre ruban, une droite est tracée au sol, formant un angle α constant de 76° par rapport à l'axe horizontal x du repère (dans le sens anti-horaire). Des repères sont placés le long de cette droite à intervalles réguliers de 1 mètre allant de 1 jusqu'à 10 mètres, indiquant les différents points où la source sonore sera émise artificiellement à la même hauteur h que les microphones.

- Les enregistrements sont initiés avec la première distance D1 inter-microphone puis le bruit impulsif est émis à chaque repère défini précédemment tous les 1 mètres sur la droite de l'angle α . Après avoir complété les enregistrements pour la distance D1 (0,3 m), on le fait pour la distance D2 (0,6 m) et enfin D3 (1 m).

3.2 Le traitement des données

Après la collecte soignée des données sonores à l'aide de la configuration expérimentale à trois microphones, nous entrons dans une phase cruciale de notre projet : le traitement des données. Cette étape est essentielle pour transformer les enregistrements sonores bruts en angles d'incidence, nous permettant ainsi de déduire la direction d'arrivée de la source sonore.

- Description du processus de traitement des données

La figure 23 illustre de manière générale les étapes clés du système conçu pour obtenir la direction d'arrivée d'une source sonore. Ce dispositif intègre trois smartphones utilisés comme microphones pour la capture du bruit impulsif et un ordinateur dédié aux traitements des données.

On rappelle que la méthodologie adoptée ici est centrée sur l'application du principe du Time Difference of Arrival (TDOA) comme choisi dans l'état de l'art en section 2.5, pour déterminer la direction de la source.

Afin de déterminer le décalage temporel TDOA entre les signaux reçus, deux méthodes sont employées, notamment l'analyse graphique et la corrélation croisée (CC). Ensuite, l'application d'une méthode géométrique permet d'estimer l'angle d'arrivée de la source sonore.

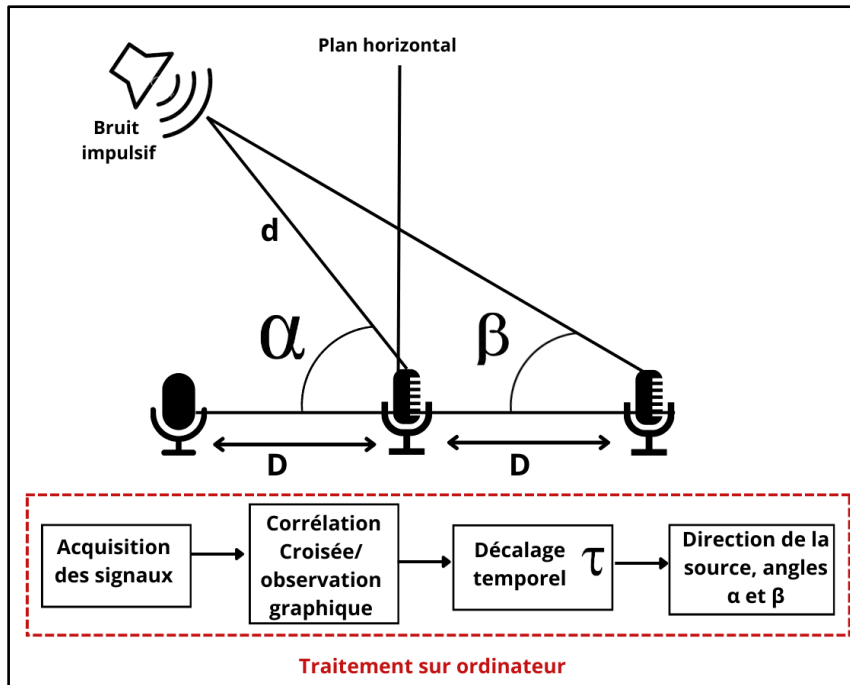


Figure 23 : Illustration du processus de traitement des données

Pour le prétraitement des données, la procédure vise d'abord à une vérification des signaux sur le logiciel Audacity. Par ailleurs, comme les perturbations environnementales ont été négligées et que l'expérience a été effectuée dans un environnement favorable, l'utilisation de filtres dans le prétraitement n'est pas jugée nécessaire. En effet, les enregistrements capturés sont de qualité suffisante pour une analyse précise. Il est important de noter que cette approche est spécifique à notre configuration expérimentale et à nos hypothèses de travail. Dans des conditions moins idéales, c'est-à-dire dans un environnement réel (milieu urbain), l'utilisation de filtres pourrait s'avérer indispensable pour obtenir des résultats précis.

- Méthodes d'analyse pour calculer le décalage temporel TDOA

Afin de déterminer le décalage temporel entre deux signaux, deux méthodes sont employées : celle toute simple en comparant graphiquement les décalages des signaux "à la main" et celle basée sur la corrélation croisée (vu en section 2.3).

1) Méthode n°1 graphique :

Pour obtenir le décalage temporel de manière graphique, j'utilise le logiciel Audacity. Pour commencer, afin de synchroniser une paire de signaux, j'utilise le bruit d'un claquement de main (expliqué précédemment) avec une méthode vue à la figure 24. Je repère un motif similaire dans les deux signaux, comme un pic très ressemblant, ensuite je fais en sorte que ce pic caractéristique commence au même moment et je place un marqueur à cet endroit précis sur chacun des signaux pour les aligner correctement à rapport à ce pic.

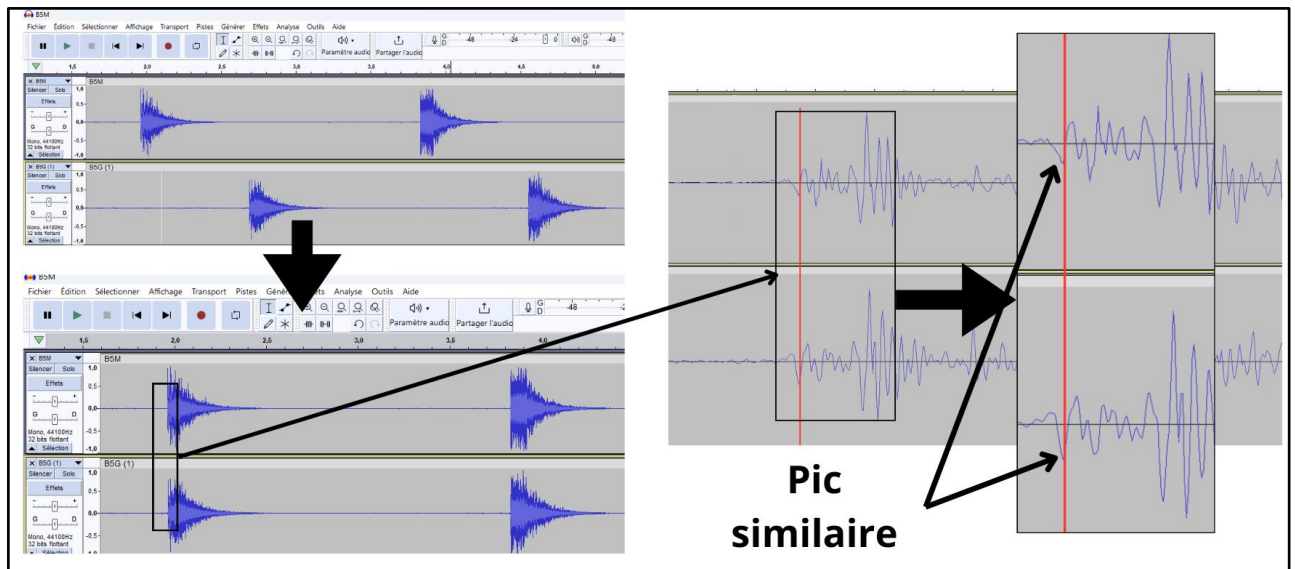


Figure 24 Méthode 1, étape d'alignement des signaux sur Audacity

Ensuite, une fois les signaux, je mesure le décalage temporel du bruit impulsif. Dans les paramètres de sélection, je sélectionne "durée et fin de sélection", je place à l'œil nu un curseur au début d'un événement distinct (un pic) dans la première piste audio (tel un début de pic). Ensuite, je déplace le curseur vers le point correspondant dans la deuxième piste audio. La différence de temps entre ces deux points représente le décalage temporel. Audacity m'indique combien d'échantillons sont présents dans cette portion de temps. Ensuite, pour calculer le temps de retard en seconde, je divise le nombre d'échantillons par la fréquence d'échantillonnage des signaux (48 kHz). Voici un exemple pour illustrer cette méthode dans la figure 25 :

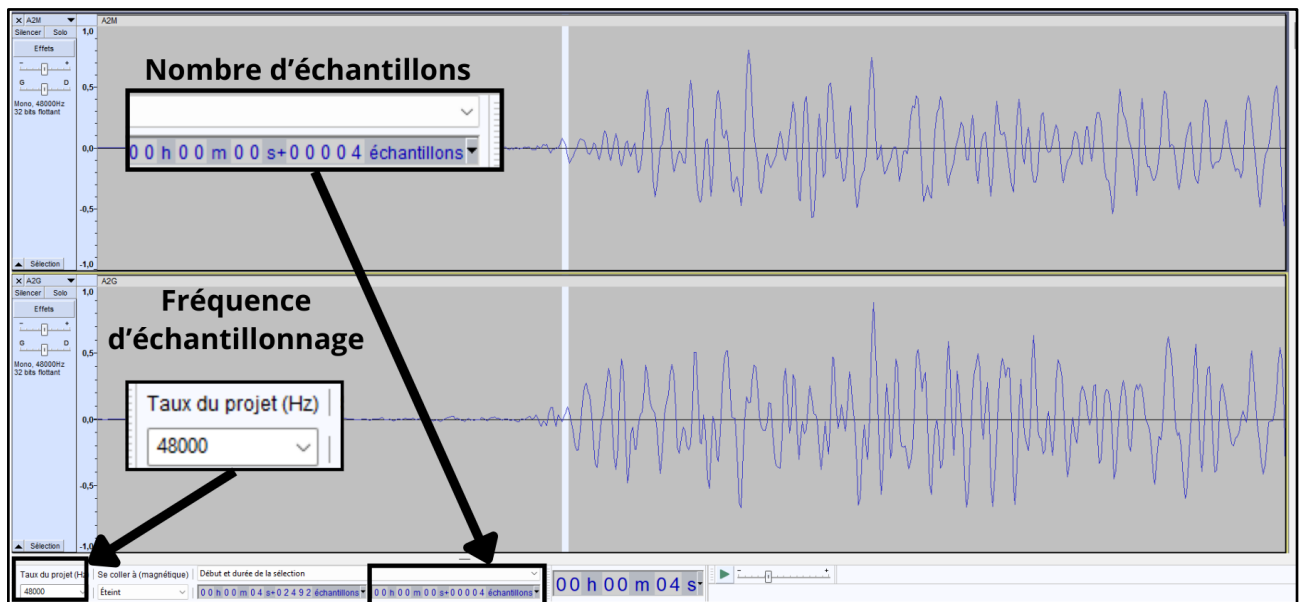


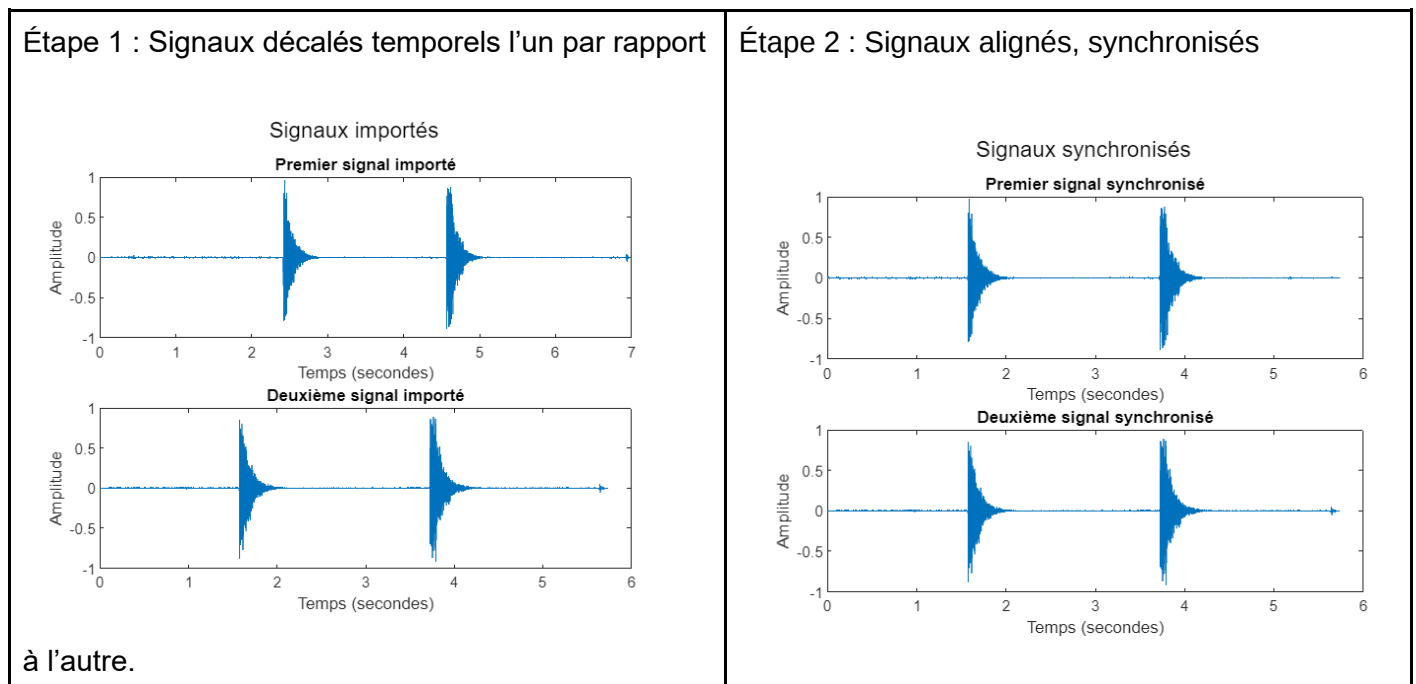
Figure 25 Méthode 1, étape de mesure du décalage temporel des signaux sur Audacity

2) Méthode n°2 avec la corrélation croisée (CC) :

Afin de calculer les décalages temporels, normalement de manière plus précise, un algorithme Matlab a été élaboré pour effectuer la corrélation croisée (vu en section 2.4). Plusieurs essais de code Matlab ont été testés jusqu'à l'élaboration d'un code acceptable pour l'ensemble des enregistrements audio.

Premièrement, il identifie l'endroit du pic du claquement de main avec un seuil dans chaque signal pour les synchroniser. Les signaux sont tronqués, alignés selon leur montée rapide d'amplitude avec une fonction 'aligne signal' (méthode risetime), et ajustés en longueur. Le but est d'isoler le bruit impulsif en dehors du pic initial du claquement de main pour éviter toute interférence dans le calcul du TDOA.

Deuxièmement, la corrélation croisée est ensuite calculée autour du bruit impulsif. Cette corrélation se limite à une plage d'échantillons (+ ou - 100 échantillons) spécifique pour exclure les retards trop élevés et improbables pour l'expérience et réduire l'erreur. Enfin, le décalage temporel (TDOA) est déterminé en seconde en cherchant le maximum de la corrélation croisée. Ces étapes sont illustrées par l'exemple d'une paire de signaux sur la figure 26. Le script complet et expliqué du code Matlab utilisé pour l'expérience est disposé en annexe n°3



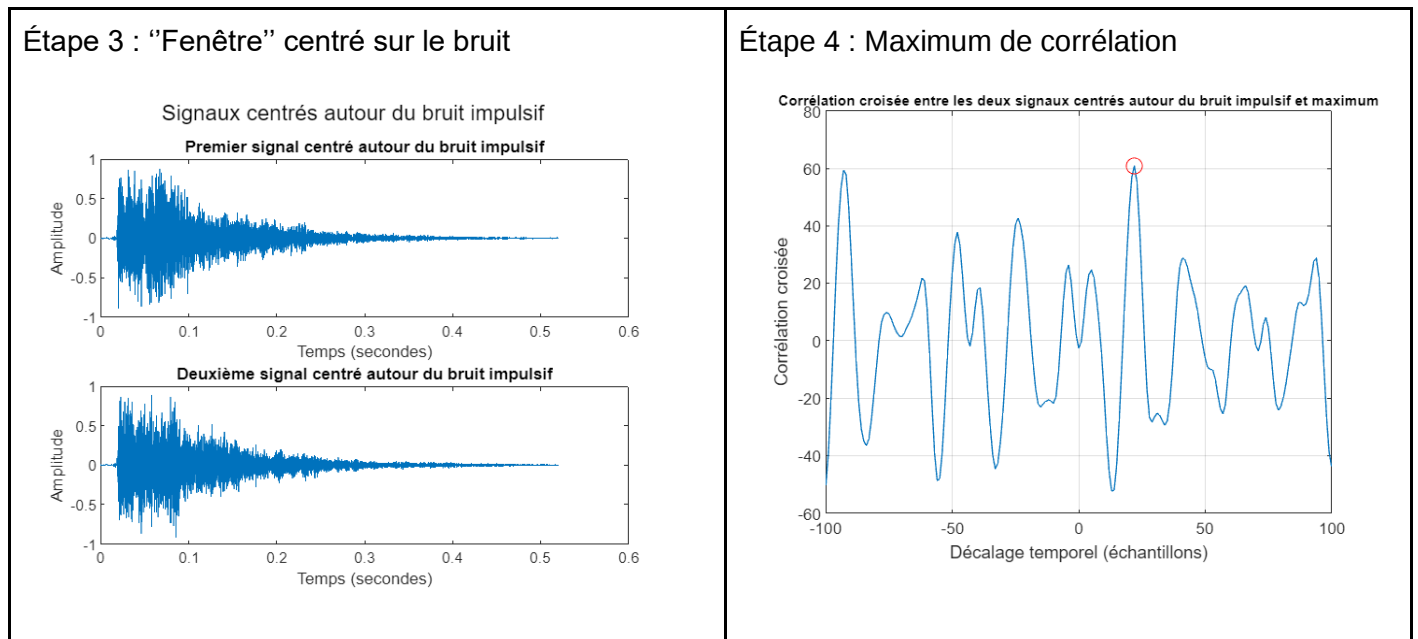


Figure 26 : Illustrations de la Méthode n°2, les étapes pour la corrélation croisée sur Matlab de deux signaux.

Après avoir obtenu les décalages temporels T_s entre les couples de capteur 1,3 et 1,2, le but est ensuite d'obtenir l'azimut correspondant aux angles d'arrivée α et β qui détermine la direction de la source par rapport aux capteurs.

- Méthode géométrique pour la direction d'arrivée à partir du TDOA

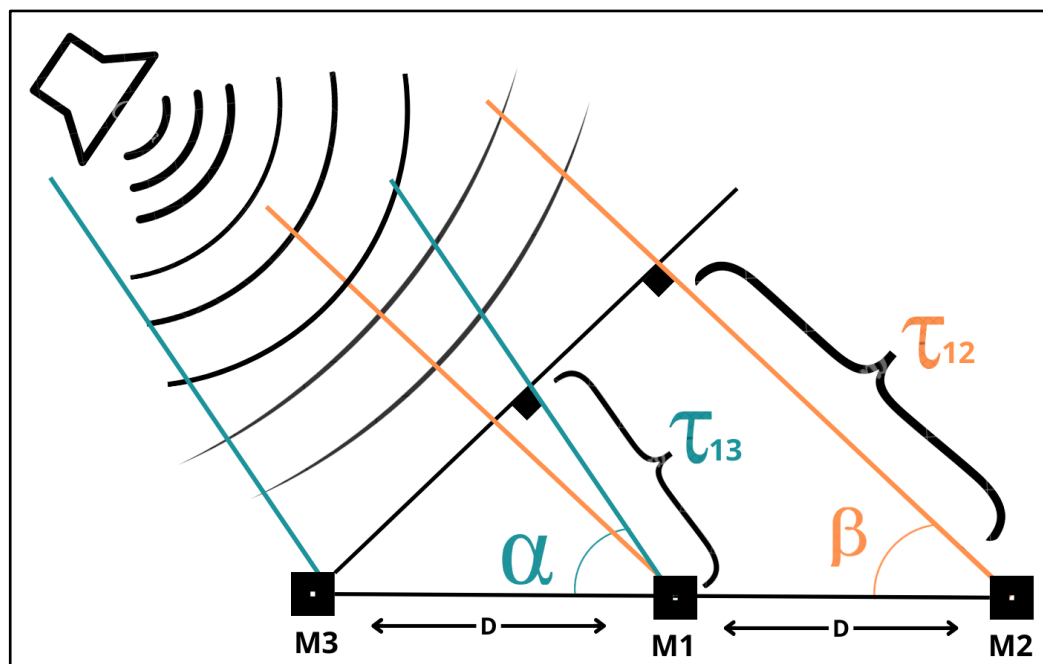


Figure 27: Schéma illustrant la méthode géométrique pour la direction d'arrivée (α et β) avec le TDOA

Avec l'hypothèse de l'onde plane et de la configuration géométrique, on peut déterminer les angles d'arrivée α et β (compris entre 0 et 180°) avec les formules de la trigonométrie pour un triangle rectangle de côté adjacent Δd et l'hypoténuse D , vues en partie 2.4. Voici une illustration afin de mieux comprendre ces calculs avec la **figure 27**.

Angle α

$$\cos(\alpha) = \frac{\Delta d}{D} = \frac{\tau_{13} \cdot c}{D}$$

$$\alpha = \cos^{-1} \left(\frac{\tau_{13} \cdot c}{D} \right)$$

Angle β

$$\cos(\beta) = \frac{\Delta d}{D} = \frac{\tau_{12} \cdot c}{D}$$

$$\beta = \cos^{-1} \left(\frac{\tau_{12} \cdot c}{D} \right)$$

τ : TDOA (différence de temps d'arrivée), décalage temporel calculé précédemment

D : la distance entre les capteurs

c : la vitesse du son dans l'air avec la formule de Laplace : $c = (331 + 0,6 \times T)$ m/s avec T la température de l'air (21,3 °C dans l'expérimentation)

À noter que la température de l'air est le facteur le plus influant sur la vitesse de propagation, c'est pourquoi lors de l'expérience, j'en ai porté une attention particulièrement.

- Validation des données

Une méthode a été mise en place pour valider et analyser le traitement des données.

Pour évaluer la précision des angles d'arrivée expérimentaux (α et β) à partir des décalages temporels calculés, ceux-ci ont été comparés aux angles réels. Comme dit précédemment, ces angles réels ont pu être calculés grâce aux positions connues de la source. L'angle α est constant à 76° tandis que l'angle β est variable.

3.3 Résultats et discussions

Pour rappel, l'expérience consiste à mesurer les angles d'arrivée α et β pour chaque distance D inter-microphone en faisant varier la valeur d distance source-capteur entre 1 et 10 m. Ces angles sont calculés par deux méthodes différentes de TDOA (graphique et corrélation croisée).

Afin d'analyser les valeurs des angles **α et β** , leurs erreurs relatives en % ont été calculés avec la formule :

$$\text{Erreur relative} = \frac{\text{Erreur absolue}}{\text{Valeur réelle}} \times 100\%$$

- **Présentation des Résultats**

Distance D inter- microphon e (m)	Distance d source- microphon e M1 (m)	Méthode n°1		Méthode n°2	
		Erreur relative α (%)	Erreur relative β (%)	Erreur relative α (%)	Erreur relative β (%)
0,3	1	15,14	48,64	1,23	5,03
	2	7,95	23,31	6,54	37,31
	3	37,21	20,85	19,75	38,65
	4	16,16	26,4	7,17	70,57
	5	32,64	21,61	7,51	14,11
	6	3,69	18,88	84,4	15,26
	7	21,76	20,11	0,07	13,4
	8	12,78	32,7	7,52	21,26
	9	13,34	26,65	4,06	11,74
	10	30,92	19,05	49,96	0,47
0,6	1	12,41	68,49	16,2	39,86
	2	1,64	31,34	11,28	40,34
	3	12,17	34,41	2,32	45,83
	4	7,9	26,72	10,49	135
	5	14,56	27,19	43,2	60,33

Le bruit en ville : localisation d'une source sonore impulsive

Sarah MARCHAL

Polytech Tours, Département Aménagement et Environnement, Option RÉSEAU

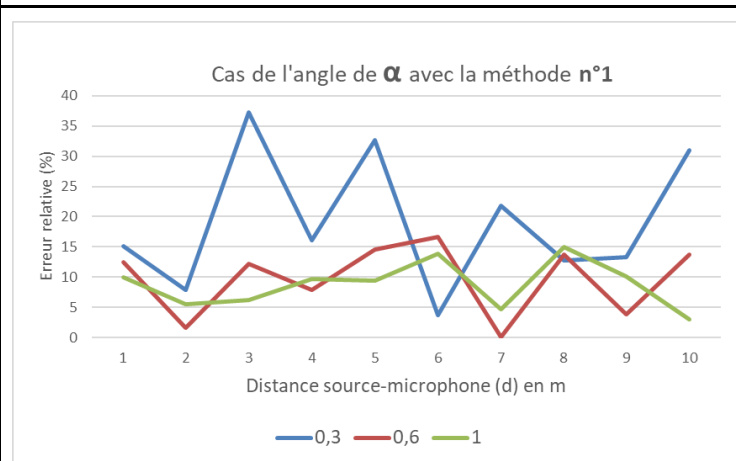
15/12/2023

Encadrant : Hervé BAPTISTE 44

	6	16,65	24,35	113,71	44,79
	7	0,04	9,53	9,79	64,68
	8	13,68	22,33	10,96	15,39
	9	3,87	6,06	9,21	27,62
	10	13,77	20,79	9,28	12,39
1	1	9,91	118,15	5,88	33,87
	2	5,46	68,91	5,47	42,16
	3	6,24	48,05	12,69	25,82
	4	9,7	44,59	2,09	8,36
	5	9,37	16,3	2,02	27,11
	6	13,85	24,6	12,29	33,37
	7	4,74	15,71	0,76	13,15
	8	14,93	6,87	23,23	18,35
	9	10,09	13	27,07	6,66
	10	3,04	11,57	11,04	6,81

Figure 28 Résultats des erreurs relatives aux angles expérimentaux

Graphique n°1



Graphique n°2

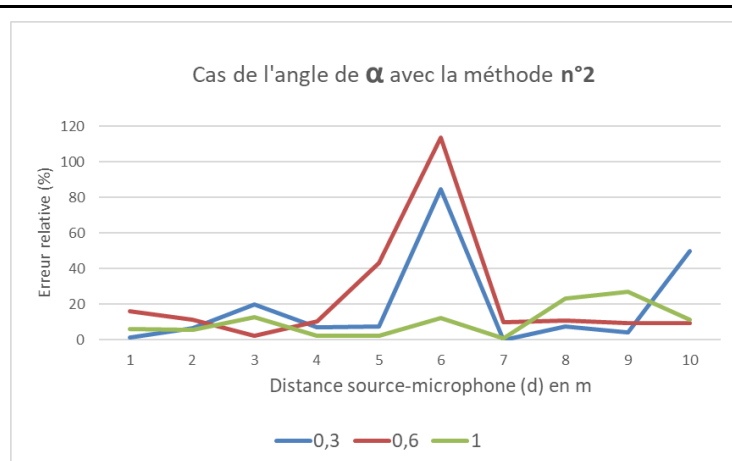
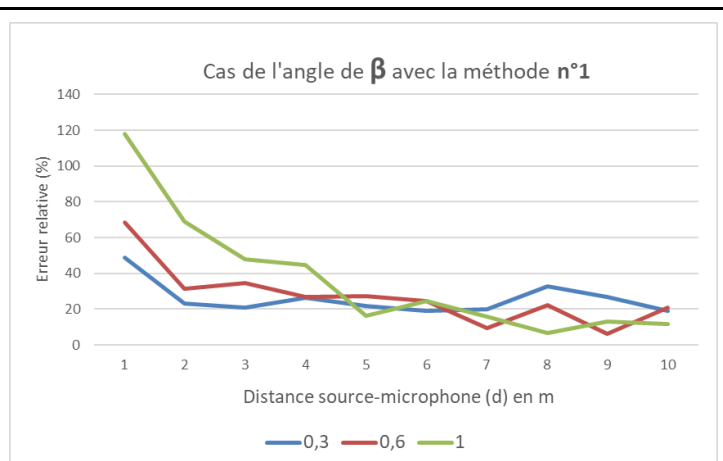


Figure 29 Représentation graphique des résultats des erreurs relatives à l'angle alpha expérimental

Graphique n°3



Graphique n°4

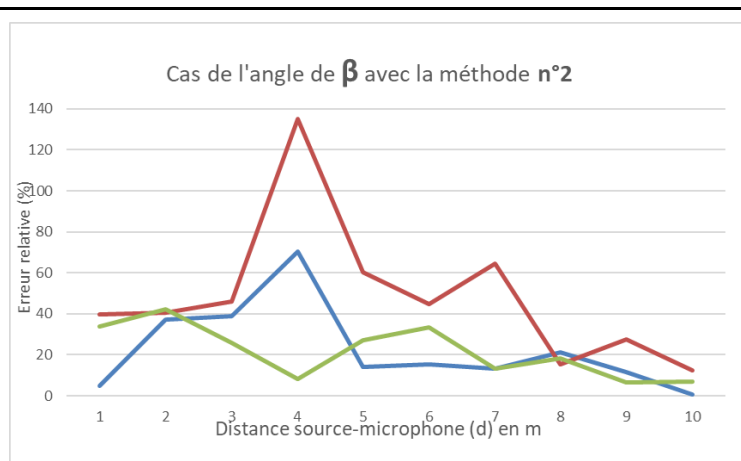


Figure 30 Figure 29 Représentation graphique des résultats des erreurs relatives à l'angle beta expérimental

- Impact des facteurs variables : d et D

- Pour le graphique n°1, il est difficile d'admettre une analyse, on constate que pour n'importe quelle distances D inter-microphone, l'erreur relative semble fluctuer sans une tendance claire à mesure que la distance d source-microphone augmente. Néanmoins, pour une faible distance D à 0,3m, l'erreur relative atteint des hauts pics.

- Pour le graphique n°2, les résultats ne semblent pas très représentatifs, néanmoins on peut observer que pour la plus grande distance D inter-microphone à 1 mètre, pour une distance d qui augmente, l'erreur semble moindre que les autres distances inter-microphone.

- Pour le graphique n°3, ici, on analyse une tendance nette pour la distance D de 0,3 mètre, où l'erreur relative diminue fortement lorsque la source s'éloigne du réseau puis se stabilise.

Le bruit en ville : localisation d'une source sonore impulsive

Sarah MARCHAL

Polytech Tours, Département Aménagement et Environnement, Option RÉSEAU

15/12/2023

Encadrant : Hervé BAPTISTE 46

Pour D à 0,6 et 1 mètre, l'erreur diminue aussi mais moins fortement. Pour la distance D la plus grande à 1 mètre, on constate que les erreurs relatives sont les moins fortes.

Donc, on constate que la précision angulaire est plus élevée pour des distances inter-microphones grandes, notamment lorsque la source s'éloigne de plus en plus du réseau.

-Pour le graphique n°4, on observe que les erreurs sont très élevées pour les distances source-microphone courtes, avec une chute marquée à mesure que la distance augmente.

De manière générale, les erreurs observées semblent les plus élevées à de plus courtes distances source-microphone. On constate qu'une distance inter-microphone plus grande peut contribuer à réduire l'erreur relative et offre donc une meilleure résolution angulaire, surtout à des distances source-microphone plus longues. Cette analyse favorise l'approximation du champ lointain fait précédemment dans lequel il est nécessaire d'avoir un facteur d'au moins 4 entre la distance inter-microphone et la distance source-microphone.

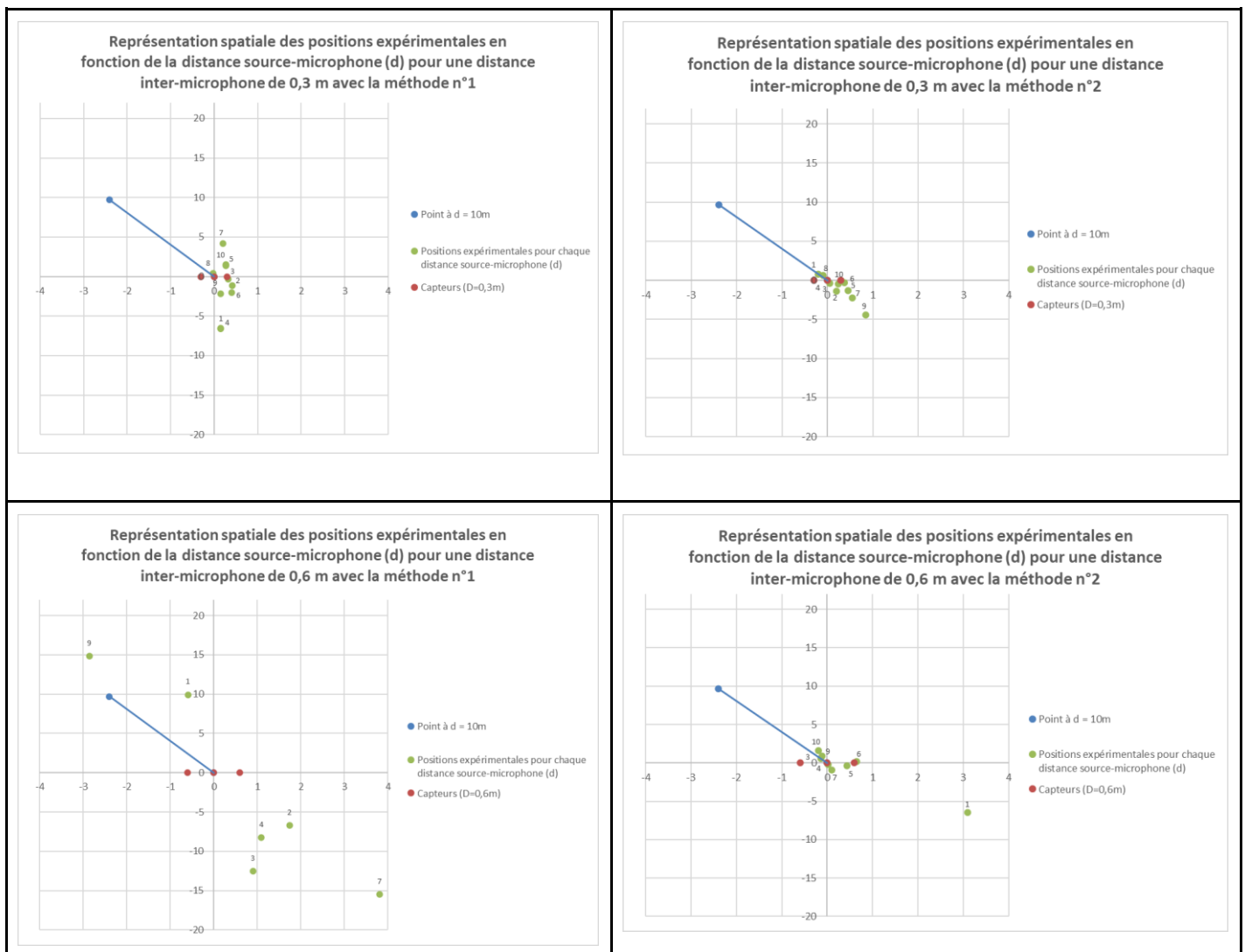
Concernant l'influence des méthodes n°1 et n°2 sur la précision des résultats, on constate que pour l'angle α , les erreurs élevées sont moins nombreuses pour la corrélation croisée, néanmoins, c'est le cas inverse avec l'angle β dans lequel la méthode simple graphique est meilleure. Normalement, la corrélation croisée (la méthode n°2) doit réduire l'incertitude. Néanmoins, on constate que ce n'est pas vraiment le cas. En effet, elle donne parfois des valeurs de décalage donnant des angles très éloignés du réel. Cela peut venir de la façon dont on synchronise les signaux avec la méthode "risetime" de Matlab, qui repère quand les amplitudes augmentent de la même manière. Mais comme les signaux des microphones ne sont pas très nets, les formes des signaux et les pics ne se ressemblent pas toujours, ce qui peut fausser la synchronisation. De plus, quand on utilise la corrélation croisée de Matlab pour le bruit impulsif, elle est moins efficace, car elle cherche des ressemblances qui ne sont pas toujours là entre deux signaux.

De manière générale, on constate que la résolution angulaire est mauvaise. Cela peut s'expliquer par de nombreux facteurs. Premièrement, les réverbérations présentes dans la pièce, bien que négligées pour la simplicité de l'étude, ont inévitablement influencé la mesure du temps d'arrivée des signaux. Deuxièmement, l'utilisation de téléphones portables a introduit des variations dans la qualité des conversions analogique-numérique (CAN), particulièrement avec un troisième téléphone ayant un système CAN différent des deux autres. La qualité moindre des microphones des smartphones et la directivité non spécifiée, non garantie, de ces capteurs ajoutent à l'incertitude des mesures. Enfin, bien que limitée à trois capteurs, l'expérience aurait pu bénéficier d'une meilleure précision avec l'ajout de capteurs supplémentaires.

Par ailleurs, concernant, le délai de traitement pour calculer le TDOA, avec la méthode n°1 graphique, on peut mettre environ moins d'une minute, tandis qu'avec la méthode n°2 avec corrélation croisée, l'algorithme s'effectue en 1,63 secondes (mesuré à partir du "tic" et "toc" de Matlab). Dans tous les cas, le calcul des angles entièrement à partir des méthodes n°1 ou n°2 est très rapide, donc la méthode TDOA est bien adaptée en cas de traitement en temps réel.

- Initiative supplémentaire pour améliorer la clarté visuelle

Pour représenter spatialement l'influence des distances inter-microphone et source-microphone, les positions de la source sonore ont été également calculées avec le croisement des droites de direction d'arrivées d' α et β . En annexe n°5, se trouve l'ensemble des données des équations de droite et des coordonnées de croisement entre les deux droites, c'est-à-dire les coordonnées des positions expérimentales. Voici les représentations spatiales des positions trouvées et aussi de la droite d'arrivée du signal vers les capteurs :



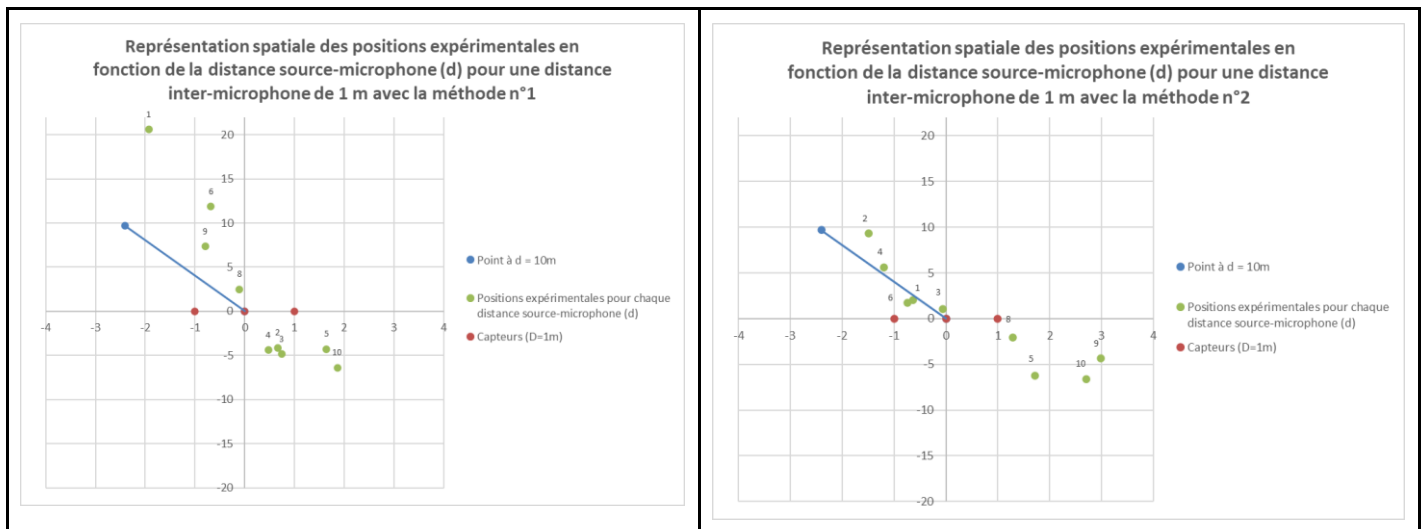


Figure 31 Représentation spatiale des positions expérimentales pour différentes distances entre capteurs

Par observation, la distance entre les capteurs (D) semble être un facteur plus déterminant dans la précision de l'angle d'arrivée que la distance source-capteur (d). En effet, augmenter la distance d a tendance à améliorer la précision de manière plus constante que d'augmenter D .

De plus, il existe une variabilité importante dans les positions expérimentales et certaines positions se trouvent en dessous de l'axe des abscisses x , ce qui est physiquement impossible dans le cadre de notre expérience. En effet, si des points se retrouvent en dessous de l'axe horizontal, c'est que les droites n'ont pas pu se croiser dans l'environnement de l'expérience qui se situe au-dessus de l'axe.

Tout comme le modèle précédent, celui-ci démontre également que la distance entre les capteurs est un paramètre critique dans la précision de la direction d'arrivée et que la configuration qui augmente à la fois la distance source-microphone et capteur-capteur semble donner de meilleurs résultats, mais avec une influence plus marquée de la distance capteur-capteur.

4. Conclusion

Pour conclure, rappelons-nous la problématique qui consiste à trouver un moyen de localiser la source d'un bruit impulsif rapidement afin de garantir la sécurité publique d'une ville. Dans notre cas, nous avons imaginé un réseau de capteurs sonores aidé par un réseau de caméras pour affiner la localisation.

Afin de répondre à la problématique de manière physique, des hypothèses simplificatrices et un état de l'art ont été élaborés afin de sélectionner une méthode de localisation qui permet d'obtenir la direction d'arrivée de la source sonore tout en validant les critères choisis. La méthode TDOA basée sur le retard a été retenue du fait de son efficacité en temps réel, sa discrétion physique, son faible coût matériel et sa simplicité de calcul.

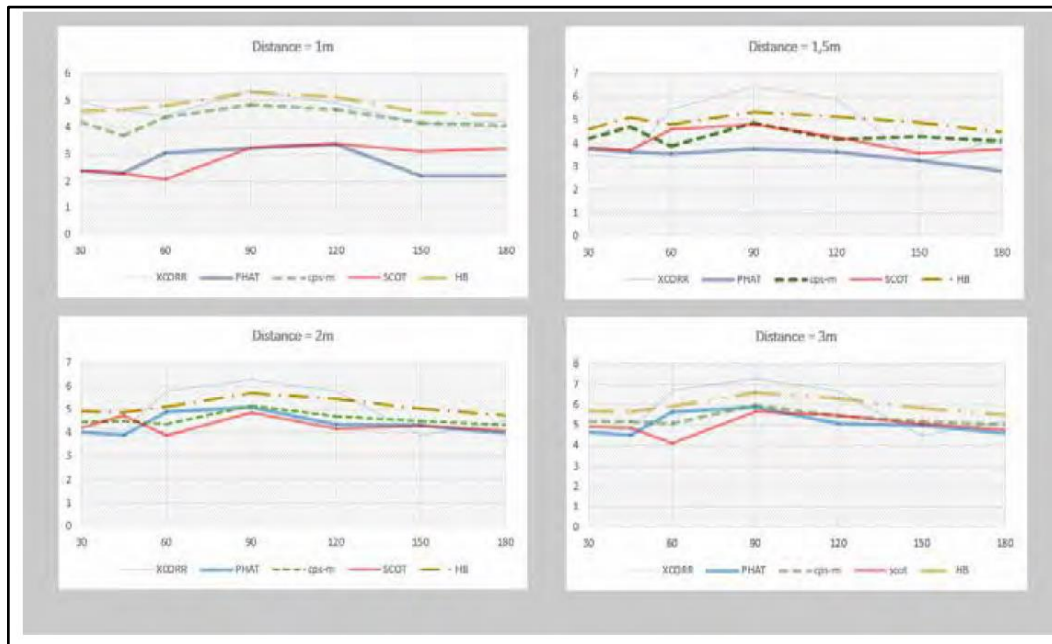
Par la suite, une expérience a été menée afin d'analyser la précision du TDOA et l'influence de certaines variables telles que la distance inter-microphone et la distance source-microphone. Pour une meilleure précision, l'expérience a démontré qu'il semble préférable d'utiliser une distance entre les capteurs sonores plus grande, surtout si la source est éloignée. Pour une application d'un tel réseau dans un environnement urbain, il est conseillé de l'effectuer dans une grande rue ou place publique et contre un mur dans le cas d'un réseau linéaire afin d'éviter l'ambiguïté avant-arrière. Néanmoins, dans les espaces limités, avoir une grande taille de réseau n'est pas toujours adapté aux espaces petits et limités. Il faudrait alors peut-être améliorer la méthode de mesure ou la configuration expérimentale pour ces scénarios. Par ailleurs, afin d'améliorer la précision du TDOA, notamment dans un environnement urbain qui possède de nombreuses perturbations, l'application d'un filtre GCC PHAT est préférable.

Alors que ce travail a permis de trouver une méthode adéquate pour déterminer la localisation d'incidents acoustiques, il convient de se tourner vers l'avenir et les avancées technologiques émergentes pour une nouvelle voie de recherche. On pourrait se demander si l'intégration de l'intelligence artificielle dans la reconnaissance d'images représente une frontière prometteuse pour affiner davantage notre capacité de localisation.

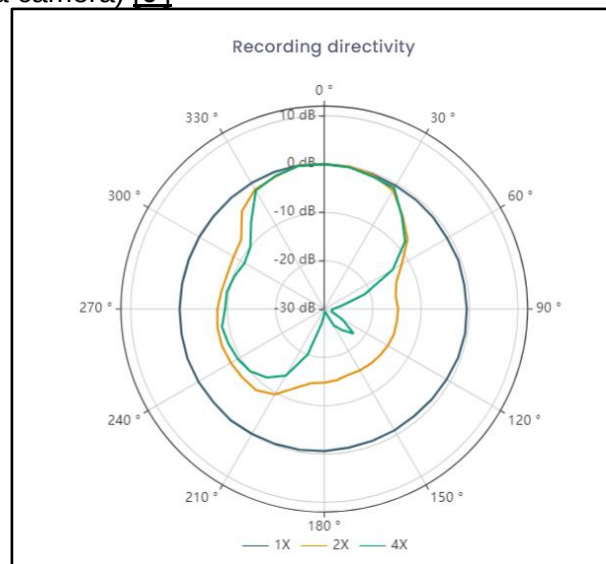
5. Annexes

Annexe n°1 : Comparaison des performances des fonctions de pondération GCC [5]

Graphique des performances des fonctions de pondération GCC



Annexe n°2 Diagramme polaire pour l'enregistrement du samsung S22 (lors d'un enregistrement avec la caméra) [6]



Le bruit en ville : localisation d'une source sonore impulsive

Sarah MARCHAL

Polytech Tours, Département Aménagement et Environnement, Option RÉSEAU

15/12/2023

Encadrant : Hervé BAPTISTE 51

Annexe n°3 : Algorithme sur Matlab pour calculer le décalage temporel avec la corrélation croisée de l'expérience

```
% Importation des données
[data, fs] = audioread("/MATLAB Drive/NOM.mp3");
[data_1, fs_1] = audioread("/MATLAB Drive/NOM2.mp3");

% On s'assure que les deux signaux ont le même taux d'échantillonnage (48000 Hz)
if fs ~= fs_1
    error('Les taux d'échantillonnage des deux fichiers sont différents.');
```

end

```
% Création d'une première figure
figure;

% On trace le premier signal importé
subplot(2, 1, 1);
plot((0:length(data) - 1) / fs, data); % On convertit les échantillons en secondes pour le temps
title('Premier signal importé');
xlabel('Temps (secondes)');
ylabel('Amplitude');
```

```
% On trace le deuxième signal importé
subplot(2, 1, 2);
plot((0:length(data_1) - 1) / fs, data_1); % Utilisation de la même formule pour le temps
title('Deuxième signal importé');
xlabel('Temps (secondes)');
ylabel('Amplitude');
```

```
% Titre général pour la figure
sgtitle('Signaux importés');
```

```
% On définit un seuil de claquement de main à 0.3, une valeur ni trop haute pour ne pas manquer le pic, ni trop basse pour que
le bruit ne perturbe pas l'analyse.
seuil_claquement = 0.3;
```

```
% On trouve l'indice index_claquement qui correspond à la position du pic du claquement de main dans chacun des deux signaux
(on prend la première valeur qui dépasse le seuil)
index_claquement = find(abs(data) > seuil_claquement, 1, 'first');
index_claquement_1 = find(abs(data_1) > seuil_claquement, 1, 'first');
```

```
% On calcule le nombre d'échantillons pour 500 ms
nb_echantillons_500ms = round(0.5 * fs);
```

```
% On extrait le signal depuis le début jusqu'à 500 ms après le claquement de main pour chaque signal dans le but de se
concentrer uniquement sur le claquement de main (pour ensuite les synchroniser)
data_extrait_x = data(1:min(end, index_claquement + nb_echantillons_500ms));
data_extrait_y = data_1(1:min(end, index_claquement_1 + nb_echantillons_500ms));
```

```
% On aligne les signaux avec la méthode 'resample' et l'option StateLevels. Cette méthode permet de trouver le décalage D entre
les deux signaux en se basant sur le moment où ils passent de 5 % à 30 % de leur amplitude maximale (xa et ya sont les signaux
data_extrait alignés)
[xa, ya, D] = alignsignals(data_extrait_x, data_extrait_y, 'Method', 'resample', StateLevels=[0.05 0.3]);
```

```
% On raccourcit le signal (data ou data_1) le plus en retard en supprimant D échantillons du début. On obtiendra ensuite les
signaux data et data_1 synchronisés (data_synchro et data_1_synchro)
if D >= 0
    % Si D est positif ou nul, cela signifie que le second signal est en retard
    data_synchro = data;
    data_1_synchro = data_1(D+1:end);
else
    % Si D est négatif, cela signifie que le premier signal est en retard
    data_1_synchro = data_1;
    data_synchro = data(-D+1:end);
end
```

```
% On ajuste la longueur du signal le plus long pour qu'il corresponde au signal le plus court afin qu'ils aient la même longueur
min_length = min(length(data_synchro), length(data_1_synchro));
data_synchro = data_synchro(1:min_length);
data_1_synchro = data_1_synchro(1:min_length);
```

Le bruit en ville : localisation d'une source sonore impulsive

Sarah MARCHAL

Polytech Tours, Département Aménagement et Environnement, Option RÉSEAU

15/12/2023

Encadrant : Hervé BAPTISTE 52

```

% Création d'une deuxième figure
figure;

% On trace le premier signal synchronisé
subplot(2, 1, 1);
plot((0:min_length - 1) / fs, data_synchro);
title('Premier signal synchronisé');
xlabel('Temps (secondes)');
ylabel('Amplitude');

% On trace le deuxième signal synchronisé
subplot(2, 1, 2);
plot((0:min_length - 1) / fs, data_1_synchro);
title('Deuxième signal synchronisé');
xlabel('Temps (secondes)');
ylabel('Amplitude');

% Titre général pour la figure
sgtitle('Signaux synchronisés');

% On détermine le point de départ après le claquement + 500 ms. Ce point de départ permet de faire démarrer les nouveaux
signaux après la durée du claquement de main pour que ce dernier ne gêne pas les futurs calculs liés au bruit impulsif. On utilise
index_claquement ou index_claquement_1 pour avoir le même délai entre les deux signaux afin de ne pas les désynchroniser
if D >= 0
    % Si D est positif ou nul, cela signifie que le second signal est en retard, donc il faut prendre l'index_claquement du
    premier, car l'échelle de temps du deuxième a changé
    point_depart = index_claquement + nb_echantillons_500ms;
else
    % Si D est négatif, cela signifie que le premier signal est en retard, donc il faut prendre l'index_claquement du
    deuxième, car l'échelle de temps du premier a changé
    point_depart = index_claquement_1 + nb_echantillons_500ms;

end

% On extrait les parties des deux signaux synchronisés à partir de ce point de départ
data_synchro = data_synchro(point_depart:end);
data_1_synchro = data_1_synchro(point_depart:end);

%% A présent notre but sera de former une fenêtre autour du bruit impulsif afin d'effectuer la corrélation croisée uniquement sur
ce segment et non pas sur le reste du signal

% On définit un seuil de claquement de bruit impulsif à 0.4, une valeur ni trop haute pour ne pas manquer le pic, ni trop basse
pour que le bruit de perturbe pas l'analyse
seuil_impulsif = 0.4;

% On détecte le bruit impulsif dans le signal data_synchro et uniquement ce signal (on prend la première valeur qui dépasse le
seuil)
repere_seuil = find(abs(data_synchro) > seuil_impulsif, 1, 'first');

%% On utilise seulement le premier signal pour trouver un seuil "repère" afin de se centrer autour du bruit impulsif, car si on le
fait pour les deux signaux, on aura un "repère" différent, et ils ne seront alors plus synchronisés lors du décalage

% On applique un décalage de -20 ms par rapport au repère seuil (on se place légèrement en retrait du bruit impulsif)
decalage_debut = round(0.02 * fs);

% On applique un décalage de +500 ms par rapport au repère seuil (environ la longueur du bruit impulsif)
decalage_fin = round(0.5 * fs);

% On détermine les indices de début et de fin pour se centrer sur le bruit impulsif
indice_debut_extrait = repere_seuil - decalage_debut;
indice_fin_extrait = repere_seuil + decalage_fin;

% On extrait la partie des signaux centrée autour du bruit impulsif avec les décalages précédents
data_bruit_impulsif = data_synchro(indice_debut_extrait:indice_fin_extrait);
data_1_bruit_impulsif = data_1_synchro(indice_debut_extrait:indice_fin_extrait);

% Création d'une troisième figure
figure;

% On trace le premier signal centré autour du bruit impulsif

```

Le bruit en ville : localisation d'une source sonore impulsive

Sarah MARCHAL

Polytech Tours, Département Aménagement et Environnement, Option RÉSEAU

15/12/2023

Encadrant : Hervé BAPTISTE 53

```

subplot(2, 1, 1);
plot((0:length(data_bruit_impulsif) - 1) / fs, data_bruit_impulsif);

title('Premier signal centré autour du bruit impulsif');
xlabel('Temps (secondes)');
ylabel('Amplitude');

% On trace le deuxième signal centré autour du bruit impulsif
subplot(2, 1, 2);
plot((0:length(data_1_bruit_impulsif) - 1) / fs, data_1_bruit_impulsif);
title('Deuxième signal centré autour du bruit impulsif');
xlabel('Temps (secondes)');
ylabel('Amplitude');

% Titre général pour la figure
sgtitle('Signaux centrés autour du bruit impulsif');

%%% A présent nous allons calculer le TDOA avec la corrélation croisée de MATLAB

% On calcule la corrélation croisée entre les signaux centrés autour du bruit impulsif. La valeur 100 détermine la plage de données
en échantillons que nous considérons. On choisit cette limite car les valeurs au-delà de 100 sont susceptibles d'être des TDOA
(Time Difference of Arrival) trop élevés et physiquement improbables pour l'expérience. Cette approche permet de réduire l'erreur
en écartant ces données atypiques

[cc, lags] = xcorr(data_bruit_impulsif, data_1_bruit_impulsif, 100);

% On trouve le décalage temporel (TDOA) en secondes en cherchant le maximum de la corrélation croisée
[max_corr, max_index] = max(cc);
TDOA = lags(max_index) / fs;

% Création d'une quatrième figure
figure;

% On trace la corrélation croisée
plot(lags, cc);
title('Corrélation croisée entre les deux signaux centrés autour du bruit impulsif et maximum', 'FontSize', 9);
xlabel('Décalage temporel (échantillons)');
ylabel('Corrélation croisée');

% On ajoute d'une grille pour une meilleure lisibilité
grid on;

% On maintient le graphique actuel et on ajoute un cercle au niveau du maximum de la corrélation croisée
hold on;
plot(lags(max_index), max_corr, 'ro', 'MarkerSize', 10);
hold off;

% On affiche le résultat décalage temporel (TDOA)
fprintf('Le décalage temporel (TDOA) entre les deux signaux est de %f secondes\n', TDOA);

```

Annexe n°4: Résultats, angles expérimentaux pour la méthode n°1 et n°2

Angles expérimentaux pour la méthode n°1 :

Distance D inter- microphone (m)	Distance d source- microphon e M1 (m)	Angle α réel (°)	Angle estimé α (°)	Erreur α (°)	Angle réel β (°)	Angle estimé β (°)	Erreur β (°)
0,3	1	77,027	88,687	11,660	61,432	91,31 3	29,882
	2	76,743	70,592	6,151	68,562	84,54 3	15,981
	3	76,572	48,085	28,487	71,091	85,90 6	14,816
	4	76,420	88,769	12,349	72,282	91,35 9	19,077
	5	76,173	101,032	24,859	72,872	88,62 1	15,749
	6	76,161	78,968	2,807	73,405	87,26 1	13,856
	7	76,163	92,737	16,574	73,798	88,63 4	14,836
	8	76,164	85,893	9,729	74,094	49,86 9	24,225
	9	76,149	86,304	10,155	74,307	94,10 7	19,800
	10	76,096	99,631	23,535	74,438	88,62 1	14,183
	1	77,027	86,584	9,557	49,349	83,14 6	33,797

Le bruit en ville : localisation d'une source sonore impulsive

Sarah MARCHAL

Polytech Tours, Département Aménagement et Environnement, Option RÉSEAU

15/12/2023

Encadrant : Hervé BAPTISTE 55

0,6	2	76,743	75,484	1,259	61,201	80,37 9	19,179
	3	76,572	85,893	9,321	65,946	88,63 2	22,686
	4	76,420	82,461	6,041	68,327	86,58 4	18,257
	5	76,173	87,265	11,091	69,685	88,63 2	18,947
	6	76,161	88,838	12,677	70,725	87,94 8	17,223
	7	76,163	76,188	0,025	71,489	78,29 8	6,809
	8	76,164	86,584	10,420	72,065	88,15 3	16,088
	9	76,149	79,102	2,952	72,496	76,88 7	4,390
	10	76,096	86,581	10,485	72,806	87,94 8	15,142
1	1	77,027	84,659	7,631	38,053	83,01 0	44,957
	2	76,743	80,936	4,193	52,796	89,17 9	36,384
	3	76,572	81,350	4,778	59,682	88,36 5	28,683
	4	76,420	83,833	7,413	63,375	91,63 5	28,260

5	76,173	69,032	7,141	65,632	76,33 0	10,698
6	76,161	86,709	10,548	67,286	83,83 3	16,548
7	76,163	79,769	3,606	68,505	79,26 2	10,757
8	76,164	87,537	11,373	69,432	74,20 1	4,770
9	76,149	83,833	7,684	70,138	79,26 2	9,124
10	76,096	73,781	2,315	70,674	78,85 1	8,176

Angles expérimentaux pour la méthode n°2 :

Distance D inter- microphone (m)	Distance d source- micropho- ne M1 (m)	Angle α réel (°)	Angle estimé α (°)	Erreur α (°)	Angle réel β (°)	Angle estimé β (°)	Erreur β (°)
0,3	1	77,027	76,0762938 9	0,9509997 45	61,432	58,34509 717	3,09
	2	76,743	81,765092	5,0223308 48	68,562	94,13971 994	25,58
	3	76,572	61,4567669 1	15,115003 64	71,091	98,56673 227	27,48
	4	76,420	81,8977432 4	5,4778756 24	72,282	123,2891 673	51,01
	5	76,173	70,4524037 6	5,7206642 31	72,872	83,15585 596	10,28
	6	76,161	11,8856501	64,275677 31	73,405	84,60852 685	11,2
	7	76,163	76,2115347 6	0,0487662 47	73,798	83,68456 175	9,89
	8	76,164	81,8977432 4	5,7338959 74	74,094	58,34509 717	15,75
	9	76,149	79,2353958 7	3,0859663 85	74,307	83,02358 975	8,72
	10	76,096	38,0751346 9	38,020799 83	74,438	74,78742 853	0,35
	1	77,027	64,5517427 6	12,475550 88	49,349	69,01768 056	19,67

Le bruit en ville : localisation d'une source sonore impulsive

Sarah MARCHAL

Polytech Tours, Département Aménagement et Environnement, Option RÉSEAU

15/12/2023

Encadrant : Hervé BAPTISTE 58

0,6	2	76,743	85,3993699 6	8,6566088 08	61,201	85,89319 159	24,69
	3	76,572	74,7874285 3	1,7843420 21	65,946	35,72403 917	30,23
	4	76,420	84,4436431 7	8,0237755 51	68,327	160,5683 584	92,25
	5	76,173	43,2650328 4	32,908035 16	69,685	111,7224 833	42,04
	6	76,161	162,759782 5	86,598455 09	70,725	102,4066 045	31,68
	7	76,163	83,6185039 8	7,4557354 67	71,489	117,7242 884	46,24
	8	76,164	84,5096021	8,3457548 36	72,065	83,15585 596	11,09
	9	76,149	83,1558559 6	7,0064264 69	72,496	52,48116 485	20,02
	10	76,096	83,1558559 6	7,0599214 39	72,806	63,78585 855	9,02
1	1	77,027	72,4951175 4	4,5321760 94	38,053	50,94206 092	12,89
	2	76,743	80,9416325 5	4,1988713 93	52,796	75,05940 108	22,26
	3	76,572	86,2946062 6	9,7228357 05	59,682	44,27108 523	15,41
	4	76,420	78,0165573 4	1,5966897 21	63,375	68,67273 569	5,3

Le bruit en ville : localisation d'une source sonore impulsive

Sarah MARCHAL

Polytech Tours, Département Aménagement et Environnement, Option RÉSEAU

15/12/2023

Encadrant : Hervé BAPTISTE 59

5	76,173	74,6308856 3	1,5421823 7	65,632	83,42688 795	17,79
6	76,161	66,7997997 7	9,3615276 32	67,286	44,83257 81	22,46
7	76,163	76,7449792 5	0,5822107 34	68,505	77,51271 6	9,01
8	76,164	58,4761214 1	17,687725 86	69,432	82,17616 947	12,74
9	76,149	55,5405075 1	20,608921 98	70,138	65,46443 284	4,68
10	76,096	67,6968303 5	8,3991041 67	70,674	75,48706 303	4,81

Annexe 5 : Données des équations de droite et de position de la source avec la méthode n°1

Distance D inter- microphone (m)	Distance d source- microphone M1 (m)	Equation droite alpha	Equation droite beta	Intersection X	Intersection Y
0,3	1	$Y = -43,624 \cdot X$	$Y = 43,624 \cdot X + -13,0872$	0,15	-6,54
	2	$Y = -2,838 \cdot X$	$Y = -10,467 \cdot X + 3,1401$	0,41	-1,17
	3	$Y = -1,114 \cdot X$	$Y = -13,972 \cdot X + 4,1916$	0,33	-0,36

	4	$Y = -46,534 \cdot X$	$Y = 42,148 \cdot X + -12,6444$	0,14	-6,63
	5	$Y = 5,129 \cdot X$	$Y = -41,546 \cdot X + 12,4638$	0,27	1,37
	6	$Y = -5,129 \cdot X$	$Y = -20,904 \cdot X + 6,2712$	0,40	-2,04
	7	$Y = 20,919 \cdot X$	$Y = -41,945 \cdot X + 12,5835$	0,20	4,19
	8	$Y = -13,928 \cdot X$	$Y = -1,186 \cdot X + 0,3558$	-0,03	0,39
	9	$Y = -15,483 \cdot X$	$Y = 13,928 \cdot X + -4,1784$	0,14	-2,20
	10	$Y = 5,893 \cdot X$	$Y = -41,546 \cdot X + 12,4638$	0,26	1,55
0,6	1	$Y = -16,753 \cdot X$	$Y = -8,319 \cdot X + 4,9914$	-0,59	9,92
	2	$Y = -3,862 \cdot X$	$Y = -5,899 \cdot X + 3,5394$	1,74	-6,71
	3	$Y = -13,928 \cdot X$	$Y = -41,875 \cdot X + 25,125$	0,90	-12,52

	4	$Y = -7,556 \cdot X$	$Y = -16,753 \cdot X + 10,0518$	1,09	-8,26
	5	$Y = -20,93 \cdot X$	$Y = -41,875 \cdot X + 25,125$	1,20	-25,11
	6	$Y = -49,296 \cdot X$	$Y = -27,909 \cdot X + 16,7454$	-0,78	38,60
	7	$Y = -4,068 \cdot X$	$Y = -4,828 \cdot X + 2,8968$	3,81	-15,49
	8	$Y = -16,753 \cdot X$	$Y = -31,014 \cdot X + 18,6084$	1,30	-21,86
	9	$Y = -5,194 \cdot X$	$Y = -4,293 \cdot X + 2,5758$	-2,86	14,85
	10	$Y = -16,737 \cdot X$	$Y = -27,909 \cdot X + 16,7454$	1,50	-25,09
1	1	$Y = -10,696 \cdot X$	$Y = -8,157 \cdot X + 8,157$	-1,93	20,61
	2	$Y = -6,268 \cdot X$	$Y = -69,804 \cdot X + 69,804$	0,66	-4,13
	3	$Y = -6,574 \cdot X$	$Y = -35,034 \cdot X + 35,034$	0,74	-4,86

4	$Y = -9,255 \cdot X$	$Y = 35,034 \cdot X + -35,034$	0,47	-4,39
5	$Y = -2,609 \cdot X$	$Y = -4,111 \cdot X + 4,111$	1,64	-4,29
6	$Y = -17,391 \cdot X$	$Y = -9,255 \cdot X + 9,255$	0,15	-6,54
7	$Y = -5,541 \cdot X$	$Y = -5,273 \cdot X + 5,273$	0,41	-1,17
8	$Y = -23,251 \cdot X$	$Y = -3,534 \cdot X + 3,534$	0,33	-0,36
9	$Y = -9,255 \cdot X$	$Y = -5,273 \cdot X + 5,273$	0,14	-6,63
10	$Y = -3,438 \cdot X$	$Y = -5,074 \cdot X + 5,074$	0,27	1,37

Annexe n°5 : Comparaison corrélation croisée et filtre GCC PHAT

Méthode	Robustesse aux réverbérations et bruit ambiant/ corrélé	Simplicité	Erreur ⁴ et Précision de mesure	Faisabilité économique	Temps de Réponse
TDOA avec la Corrélation Croisée (CC)	- Méthode spécifique généralement au champ libre (sans obstacles/réflexions), - Méthode limitée dans les champs réverbérants et compromise dans des environnements complexes - Très peu robuste aux réverbérations car plusieurs pics se mélangent - Localisation impossible en présence de réverbération car la fonction de CC affiche un grand nombre de maxima locaux qui se mélangent de manière imprévisible	- Relativement simple, basé sur la corrélation standard, algorithme sophistiqué mais moins complexe à implémenter et à exécuter que d'autres	- Ambiguïté/imprécision dans la localisation car existence d'intersections multiples entre deux hyperboles dans des signaux bruités, malgré une source unique ambiguïté, imprécision - Précision acceptable voire bonne en champ libre	- Faible coût car une utilisation de capteurs généralement en petite quantité (nombre de capteurs de l'ordre de 5) - Pas de nécessité de matériel de haute précision, le TDOA avec la CC peut être réalisé avec une précision suffisante en utilisant du matériel standard, contrarié à d'autres méthodes - Pas de forte consommation énergétique, notion notamment importante pour les systèmes de surveillance à long terme.	- Adaptée pour des traitements en temps réel car faible complexité de calcul - Algorithmes efficaces comme la Transformée de Fourier Rapide (FFT), permet de d'obtenir rapidement les décalages temporels entre différents signaux [20], [21]

⁴ Erreur de positionnement (ranging) en m et précision en %

Le bruit en ville : localisation d'une source sonore impulsive

Sarah MARCHAL

Polytech Tours, Département Aménagement et Environnement, Option RÉSEAU

15/12/2023

Encadrant : Hervé BAPTISTE 64

TDOA et la corrélation croisée généralisée avec le filtre PHAT (GCC PHAT)	- Réduction des bruits corrélés - Forte robustesse contre la réverbération grâce à la pondération de phase, concentration seulement aux fréquences et non aux amplitudes, donc adapté aux environnements bruyants - Robuste contre les sources interférentes dans des circonstances de rapport signal sur interférence (SIR) élevé	- Algorithme un peu plus complexe que le TDOA CC car il implique un traitement supplémentaire pour la fonction PHAT mais cela reste simple	- Amélioration de la précision d'estimation du délai par la réduction du bruit - Haute résolution temporelle et une réduction efficace de l'étalement temporel des signaux - Réduction de l'incertitude du TDOA en évitant la propagation de pic dans le résultat et sa capacité antibrouillage lors du calcul de la CC <u>S</u>	- Faible coût car il n'est pas nécessaire de rajouter plus de microphone ou d'avoir des logiciels/algo très cher.	- Temps d'exécution et d'analyse rapide de manière générale, avec l'ordre de 10 secondes avec GCC PHAT - Légèrement plus lente avec traitement PHAT mais reste rapide - Méthode GCC adéquate pour un traitement en temps réel par rapport à d'autres méthodes en raison de sa simplicité
--	--	--	--	---	--

6. Bibliographie

- [1] Thaljaoui, A., Brulin, D., Val, T., & Nasri, N. (s. d.). Localisation d'une source sonore par un réseau de microphones, 2014
- [2] Judicaël, P., Gwénaél, G., Guillaume D., Ambiances sonores urbaines et interaction et ville-bâtiment, 2012.
- [3] Knapp, C. et Carter, G. (1976). The generalized correlation method for estimation of time delay. *Acoustics, Speech and Signal Processing, IEEE Transactions on*, 24(4):320 – 327.
- [4] SAHKi F, DERRADJI, Y. Localisation de source acoustique par les méthodes d'intercorrélation généralisée, 2017
- [5] Theljeoui. A Système hybride de localisation des perosnens agees dans un habitat intelligent, université de Toulouse 2017
- [6] Alban Portello. Localisation binaurale active de sources sonores en robotique humanoïde. Robotique[cs.RO]. Université Paul Sabatier - Toulouse III, 2013.
- [7] BALLOU et al., G. Ballou, Handbook for Sound Engineers: The New AudioCyclopedia (Howard Sams, Indianapolis, IN), pp. 14-15., 1987
- [8] L. LICHUN et W. FENG, 'Position Estimation by Improved Genetic Algorithm for Hyperbolic Location'. College of Information Engineering, Information Engineering University.
- [9] ALOUI N, Localisation sonore par retournement temporel, 2014
- [10] Hui Liu, H. Darabi, P. Banerjee, Jing Liu - "Survey of Wireless Indoor Positioning Techniques and Systems", *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part C: Applications and Reviews*, Vol. 37, No. 6 , pp. 1067 - 1080, November 2007.
- [11] Harshavardhan, S. , TDOA-Based Multiple Acoustic Source Localization Without Association Ambiguity, 2018, DOI : 10.1109/TASLP.2018.2851147
- [12] Bouzir, T. A. K., & Zemmouri, N. (2017). Effect of urban morphology on road noise distribution. *Energy Procedia*, 119, 376-385. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.07.121>
- [13] Bruits impulsionnels et dangers pour l'audition : L'exemple des armes à feu. (s. d.). Daniel, J. (s. d.). Thèse de doctorat de l'Université Paris 6. Davis, R. R., & Clavier, O. (2017). Impulsive noise : A brief review. *Hearing Research*, 349, 34-36. <https://doi.org/10.1016/j.heares.2016.10.020>
- [14] CARMINATI, R., FEUILLET-PALMA C., Ondes Electromagnétiques, 2018
- [15] Vitaliy, K., Marcos, T., Direction of Arrival Estimation and Localization Using Acoustic Sensor Arrays, Department of Electrical and Computer Engineering, Illinois Institute of Technology, Chicago, USA, Article ID:7657, 4 pages , Vol.1 No.3, 2011 DOI:10.4236/jst.2011.13010

- [16] Muhammad, O. Ahmed, A., Sub-sampling-based 2D localization of an impulsive acoustic source in reverberant environments, *EURASIP Journal on Advances in Signal Processing*, 2014
- [17] Johnston, D., Measuring the Behavioral Response to Spatial Audio within a Multi-Modal Virtual Reality Environment in Children with Autism Spectrum Disorder, 2019, doi.org/10.3390/app9153152
- [18] Krishnaraj, V., Time-Delay-Estimate Based Direction-of-Arrival Estimation for Speech in Reverberant Environments, the Faculty of The Bradley Department of Electrical and Computer Engineering Virginia Polytechnic Institute, 2002
- [19] Burgess, S., Kuan, Y., Minimal Solvers for Unsynchronized TDOA Sensor Network Calibration, 2013
- [20] Tokgoz S, Kovalyov A et Panahi I, « Real-time estimation of date de la direction de l'arrivée de la source de parole à l'aide de trois microphones », dans *Proc. Processus de signalisation de l'atelier IEEE. Syst. Mise en œuvre*, octobre. 2020, pp. 1-5 [doi: 10.1109/SIPS50750.2020.9195217](https://doi.org/10.1109/SIPS50750.2020.9195217).
- [21] Tokgöz, S., Kovalyov, A., Real-Time Estimation of Direction of Arrival of Speech Source Using Three Microphones
- [22] Ganguly A, « Noise-robust speech source localisation and tracking using microphone arrays for smartphone-assess by smartphone-assess to "L'oubli de la source de la parole", mémoire de doctorat, Univ. Texas Dallas, 2018.
- [23] Dae-Hoon, S., Impulsive sound source localization using peak and RMS estimation of the time-domain beamformer output
- [24] Hua Ma. Localisation de sources par méthodes à haute résolution et par analyse parcimonieuse. Autre. Université de Franche-Comté; Ludwig-Maximilians Universität (Munich, Allemagne), 2011.
- [25] Swallow, C., Hemingway, J., *Acoustique des champs de tir*, GRC, Canada, 1999
- [26] Heraldo, G., Acoustic and psychoacoustic analysis of the noise produced by the police force firearm, *Brazilian Journal of Otorhinolaryngology*, Volume 77, Issue 2, , Pages 163-170, 2011, doi.org/10.1590/S1808-86942011000200005
- [27] Mojtaba, V., Richard, H., TDOA-BASED SELF-CALIBRATION OF DUAL-MICROPHONE ARRAYS , *European Signal Processing Conference*, 1 Department of Electronic Systems, Aalborg University, Denmark, 2016
- [28] Serkan, T., Kovalyov, A., Real-Time Estimation of Direction of Arrival of Speech Source Using Three Microphones
- [29] Valin, J., Michaud, F., Localization of Simultaneous Moving Sound Sources for Mobile Robot Using a Frequency-Domain Steered Beamformer Approach, 2004, DOI:10.1109/ROBOT.2004.1307286

- [30] Hansona J.-N., Risouda,,M. , Localisation sonore spatiale
- [31] Hong Hu, Sound Source Localization Sensor of Robot for TDOA Method, Third International Conference on Intelligent Human-Machine Systems and Cybernetics, 2011, 10.1109/IHMSC.2011.75
- [32] Jiadong, W., Xinyuan Q., GCC-PHAT with Speech-oriented Attention for Robotic Sound Source Localization, 2021, DOI: 10.1109/ICRA48506.2021.9561885
- [33] Guerola M & Amparo Real-Time Sound Source Localization in Videoconferencing Environment, 2010
- [34] Carlos Fernández Scola, María Dolores Bolaños Ortega- Direction of arrival estimation – A two microphones approach, 2010
- [35] DJEMAI Mohamed, Localisation de sources par un réseau de microphone, 2017
- [36] Scott H. Hawley; Robert E. McClain, Visualizing Sound Directivity via Smartphone Sensors, 2018, <https://doi.org/10.1119/1.5021430>

7. Webographie

[1] didaquest.org, site sur les ondes mécaniques

[2] CEM : Compatibilité électromagnétique

[3] technoblog, caractéristique d'un microphone

[4] Localisation sonore, Antoine Lorenzi

[5] Electrical engineering, Polar pattern of typical speakers and microphones found in smartphones on sonore

[6] Dxomark audio, site officiel de test, samsung galaxy S21

[7] Dxomark audio, site officiel de test, samsung galaxy S22



Directeur de recherche :

Hervé Baptiste

Sarah Marchal

PFE/DAE5

UIT/Reseau

2023-2024

Le bruit en ville : Étude de la mise en place d'un réseau de capteurs sonores en milieu urbain pour la localisation d'une source sonore impulsive

Résumé :

L'étude de ce PFE visait à développer un moyen rapide de localiser les sources de bruit impulsif en milieu urbain pour renforcer la sécurité publique. Un réseau de capteurs sonores, complété par un réseau de caméras, a été envisagé pour affiner la localisation. Après une étude préliminaire et l'établissement d'hypothèses simplificatrices, la méthode TDOA (Time Difference of Arrival), choisie pour sa rapidité, sa discrétion, son faible coût et sa simplicité de calcul, a été retenue pour déterminer la direction d'arrivée de la source sonore. Des expériences ont été menées pour évaluer la précision du TDOA, montrant qu'une plus grande distance entre les capteurs améliore la précision, surtout pour des sources éloignées. Pour une mise en œuvre en milieu urbain, l'installation est recommandée dans de larges rues ou places, et contre un mur pour les réseaux linéaires, afin de minimiser les ambiguïtés. Cependant, la taille importante du réseau peut ne pas être adaptée aux espaces restreints, nécessitant des améliorations dans la méthode de mesure ou la configuration pour ces environnements.

Mots Clés : Mots clés : localisation de source acoustique, localisation sonore, source sonore, Direction d'arrivée (DOA), Time difference of arrival (TDOA), bruit impulsif