



HAL
open science

Localisation de personnes dans les bâtiments par ondes sismiques

Bahroun Rim

► **To cite this version:**

Bahroun Rim. Localisation de personnes dans les bâtiments par ondes sismiques. Sciences de l'ingénieur [physics]. Institut National Polytechnique de Grenoble - INPG, 2013. Français. NNT : . tel-01002919

HAL Id: tel-01002919

<https://theses.hal.science/tel-01002919>

Submitted on 16 Nov 2015

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



Ecole Nationale
d'ingénieurs de Tunis

UNIVERSITÉ DE GRENOBLE

THÈSE

Pour obtenir le grade de

DOCTEUR DE L'UNIVERSITÉ DE GRENOBLE

Spécialité : **Signal, Image, Parole et Télécoms**

Arrêté ministériel : 07 Août 2006

Et de

DOCTEUR DE L'ÉCOLE NATIONALE D'INGÉNIEURS DE TUNIS

Spécialité : **Télécommunications**

Présentée par

Rim BAHROUN

Thèse dirigée par **Olivier MICHEL**
et codirigée par **Monia TURKI**

préparée au sein **CEA/LETI**
et de **EEAATS - STI**

Localisation de personnes dans les bâtiments par ondes sismiques

Thèse soutenue publiquement le **12 Mars 2013**,
devant le jury composé de :

M. Sofiane CHERIF

Professeur à Sup'com, Tunisie, Président

M. Mohamed NAJIM

Professeur à l'Université de Bordeaux 1, France, Rapporteur

M. Hichem SNOUSSI

Professeur à l'Université de Technologie de Troyes, France, Rapporteur

Mme. Odile ABRAHAM

Ingénieur chercheur à IFSTTAR de Nantes, France, Examinatrice

M. Olivier MICHEL

Professeur à Grenoble INP, France, Directeur de thèse

Mme. Monia TURKI

Maître de Conférences à ENIT, Tunisie, Co-Directeur de thèse

M. Jean-Louis LACOUME

Professeur émérite à Grenoble INP, France, Invité

M. François FRASSATI

Ingénieur chercheur à CEA-LETI, France, Invité

Mme. Rim AMARA

Chercheur à U2S/ENIT, Tunisie, Invitée



Résumé

La répartition des occupants dans un bâtiment est une information importante pour la gestion des bâtiments, la surveillance d'intrus ou le contrôle d'activité des personnes âgées, . . . Dans cette étude, nous nous sommes intéressés à la localisation d'une personne à partir des vibrations provoquées par son déplacement. De telle méthode nécessitent l'instrumentation du bâtiment par des capteurs sismiques. Nous avons, tout d'abord, étudié les méthodes de localisation classiques d'une source sismique. La complexité des phénomènes de propagation en jeu dans un bâtiment a mené à exclure ces méthodes. Ensuite, nous avons établi une étude théorique et expérimentale de la propagation des ondes sismiques dans une dalle en béton. Il en ressort que la seule information fiable dans un tel environnement est la conservation de l'ordre d'arrivée des signaux aux capteurs. Nous avons déduit alors une méthode de localisation basée sur les signes des différences des temps de vol. Cette approche, originale et robuste vis-à-vis des connaissances a priori sur le milieu, a fait l'objet de plusieurs validations numériques et expérimentales. En fin, une extension de cette méthode a été également développée pour permettre la localisation dynamique d'une personne avec une précision de l'ordre de quelques dizaines de centimètres.

Mots-clés : localisation de personnes, poursuite, ondes élastiques, capteurs de vibration, vitesse de propagation, atténuation, dispersion, plaque, dalle en béton, temps d'arrivée,...

Abstract

For many applications, it is important to obtain location information about a resident in an indoor environment. The vibration signature of the human footstep on a floor creates an elastic wave that is induced by the walking motions. Our goal in this study is to localize footsteps using seismic sensors that are fixed on the floor in the indoor environment. Firstly, we studied the existing techniques of seismic source localization. The complexity of the elastic waves propagation in a building led to exclude these techniques. Then, we established a theoretical and experimental study of seismic wave propagation in a concrete slab. It appears that the only reliable information in such an environment is the conservation of the order of arrival of signals to the sensors. So, we deduced an algorithm of footstep localization based on the signs of time differences of signals arrival. This approach has been the subject of many numerical and experimental validations. In the end, an extension of this approach was developed to allow dynamic localization of a person with an accuracy of the order of some tens of centimeters.

Keywords : footstep localization, personnel tracking, elastic waves, seismic sensors, propagation velocity, attenuation, dispersion, thin plate, time of arrival,...

Remerciement

La reconnaissance est la mémoire du cœur.

Hans Christian Andersen

Ce manuscrit est le fruit de trois ans de travail, je tiens en ces quelques lignes à exprimer ma reconnaissance envers tous ceux qui de près ou de loin y ont contribué.

Je tiens dans un premier temps à remercier les membres du Jury : M. Cherif, M. Najim, M. Snoussi et Mme. Abraham pour avoir accepté de présider, de rapporter et d'examiner ce travail.

Je souhaite adresser de chaleureux remerciements à mon directeur de thèse en France, M. Olivier MICHEL, professeur à Grenoble INP, pour le temps conséquent qu'il m'a accordé, ses qualités pédagogiques et scientifiques, sa franchise et sa sympathie. J'ai beaucoup appris à ses côtés et je lui adresse ma gratitude pour tout cela.

Mes remerciements vont également à mon co-directeur de thèse en France, M. François FRASSATI, ingénieur chercheur au CEA-LETI, pour sa disponibilité à comprendre, à communiquer et sans oublier ses intuitions. J'ai beaucoup apprécié son enthousiasme et sa sympathie.

Je souhaite également adresser mes remerciements à ma directrice de thèse en Tunisie, Mme Monia TURKI, maître de conférence à l'ENIT, pour m'avoir proposé ce sujet et pour la confiance qu'elle m'a témoignée du début à la fin du travail.

Je remercie également ma co-directrice de thèse en Tunisie, Mme Rim AMARA, chercheur à U2S-ENIT, pour son soutien aussi bien sur le plan humain que scientifique.

REMERCIEMENT

Je suis très honoré que M. Jean-Louis LACOUME physicien dont la carrière est impressionnante, ait accordé son attention de tout instant sur mes travaux. Je le remercie beaucoup pour ses conseils avisés et son écoute qui ont été prépondérants pour la bonne réussite de cette thèse.

Merci aussi à Mickel CARMONA avec qui j'ai pu échanger et apprendre dès mon arrivée au CEA. Merci pour son énergie et ses encouragements continus.

Durant ces trois années de thèse, j'ai eu la chance de côtoyer au CEA et à l'U2S-ENIT de nombreuses personnes attachantes : que toutes soient remerciées pour les bons moments partagés. Je pense notamment (pardon à ceux que j'oublie) à Selma, Fadoua, Nawres, Saïf, Regis, Rabeb, Sarra, Mathieu, Bertrand, Svene, Anne-Cécile, Anne, Emmanuelle, Elisabeth, Feten, Olfa. Merci à l'ensemble des agents CEA et U2S avec qui j'ai pu échanger et apprendre pendant ces trois années. Merci à tous mes amis.

Pour le meilleur, c'est surtout une profonde pensée pour mon papa décédé, et qui aurait été fier de moi. Merci également à ma maman, mes beaux parents, mes sœurs et mes frères pour leur amour, leur soutien sans faille et à tout ce qu'ils ont pu m'apporter pour franchir les obstacles les plus difficiles.

Je souhaite remercier spécialement mon mari Sofiane pour son soutien et sa patience tout au long de la thèse.

Merci enfin au lecteur qui par essence justifie la rédaction de ce document.

Merci à tous.

Rim BAHROUN

Table des matières

Introduction	8
1 Ondes sismiques	12
1.1 Ondes de volume	13
1.2 Onde de surface : onde de Rayleigh	14
1.3 Ondes de plaque : onde de Lamb	15
1.4 Onde transversale SH et onde de Love	18
1.5 Conclusion	19
2 État de l'art de la localisation d'une source sismique.	20
2.1 Localisation par structure d'onde sismique	21
2.2 Localisation par apprentissage	22
2.3 Localisation à vitesse constante	23
2.4 Conclusion	25
3 Caractérisation de la signature sismique d'un pas à l'intérieur d'un bâtiment	26
3.1 Instrumentations	27
3.2 Peut-on faire de l'apprentissage pour la localisation ?	30
3.3 Peut-on utiliser la structure de l'onde sismique pour la localisation ?	36
3.4 Quelle vitesse de propagation ?	38
3.5 Conclusion	50
4 Vitesse de propagation perçue dans une dalle en béton	51
4.1 Équation de propagation dans une plaque mince	52
4.2 Étude de la vitesse perçue : approximation d'intégrale	55
4.3 Étude de la vitesse perçue : approximation de la phase stationnaire	57
4.4 Étude de la vitesse perçue : résultats expérimentaux	62
4.5 Conclusion	64

TABLE DES MATIÈRES

5	Nouvelle approche de localisation par sismique	65
5.1	Algorithme de localisation : SO-TDOA	66
5.2	Algorithme SO-TDOA VS algorithme hyperbolique	71
5.3	Étude caractéristique de l'algorithme SO-TDOA	77
5.4	Validation de l'algorithme SO-TDOA sur des données expérimentales	89
5.5	Conclusion	93
6	Localisation dynamique	94
6.1	Filtre de Kalman adapté à la localisation dynamique d'une personne	95
6.2	Résultats de simulation	97
6.3	Résultats expérimentaux	102
6.4	Conclusion	106
	Conclusion et perspectives	107
	Annexe	110
A	Localisation basée sur la structure vectoriel des ondes sismiques de surface	111
A.1	Estimation de la direction d'arrivée	112
A.2	Localisation de source à partir de la direction d'arrivée	114
A.3	Étude expérimentale à l'intérieur de bâtiment	115
A.4	Conclusion	119
B	Fiche technique des capteurs Colibry SF3000L et SF1500SA	120
	Bibliographie	126

Introduction

L'estimation de la position d'une personne dans un bâtiment revêt une importance dans un grand nombre de domaines d'applications civiles ou militaires. Dans le domaine énergétique par exemple, le réglage des apports thermiques (chauds ou froids) nécessaire au confort dans un bâtiment nécessite la connaissance du nombre d'occupants d'une pièce, leur localisation et si possible leur type d'activité. Dans le domaine de la surveillance médicale, la localisation de personnes âgées permet de suivre leur activité journalière et d'apporter de l'aide en cas de chute par exemple. Dans le domaine de la sécurité, l'estimation de la position de la personne permet la localisation des intrus dans une zone donnée.

Les méthodes de localisation classiques telles que l'utilisation de vidéo, de microphones, de capteurs infrarouge ou de radars volumétriques, technologies dérivées des alarmes anti-intrusion n'offrent pas de solutions simples pour le problème de localisation de personnes dans une pièce et surtout peuvent être mal perçues au niveau du respect de la vie privée. D'autres méthodes, comme les RFID¹ ou l'utilisation des signaux GSM obligent les utilisateurs à porter sur eux un élément (étiquette électronique, téléphone mobile) entraînant une contrainte qui ne facilite pas l'acceptation. Nous ajoutons que ces techniques s'avèrent imprécises et voire inopérantes à l'intérieur des bâtiments et peuvent même présenter des dangers sur la santé humaine à long terme à cause des rayonnements et des fréquences utilisées.

Dans le cadre de cette thèse, on s'intéresse à l'exploration d'approches 'non intrusives' au sens où il n'y a pas de véritables signatures de l'identité (à l'opposé du son ou image), respectant la 'vie privée' et n'obligeant pas la personne à être instrumentée (à l'opposé de signal GSM ou RFID). L'approche étudiée ici consiste à exploiter les vibrations structurelles provoquées par les déplacements des occupants pour effectuer leurs numération, caracté-

1. (Radio Frequency IDentification) est une méthode pour mémoriser et récupérer des données à distance en utilisant des marqueurs appelés « radio-étiquettes »

térisation d'activité, détection, localisation et poursuite à l'intérieur d'un bâtiment. L'intérêt de l'utilisation des signaux vibratoires se manifeste de plus par l'exploitation de capteurs bon marché à moyen terme et facilement intégrable dans un bâtiment (plinthes, revêtement du sol...).

Dans d'autres contextes expérimentaux tels que la sismique géologique ou la prospection, la localisation à partir de l'observation d'ondes sismiques est un sujet d'étude assez ancien dans de grands espaces ($> km$) [Mil86, SK86]. A partir de l'année 2000, des travaux de localisation sur quelques centaines de mètres ont été établis [ZLS07] pour la localisation d'un véhicule en déplacement [SPGP00, SHTY07], des coups de marteau [SAHY07] ou même les impacts des pas d'une personne [SPGP00, RDNW01, PSSG03a] à l'extérieur des bâtiments. A l'intérieur des bâtiments, le problème de la localisation statique et dynamique des habitants sur seulement quelques mètres n'a pas été souvent abordé [HLH09]. Toutefois quelques travaux de caractérisation de la signature sismique d'un pas à l'intérieur des bâtiments ont été abordés par Ekimov [ES06, ES08].

La méthodologie utilisée pour la localisation des séismes à grande échelle [IMMB11] et la localisation de source sismique à l'extérieur des bâtiments diffère de celle utilisée pour le problème de localisation de personnes dans les bâtiments. En effet, la localisation de personnes en mouvement à l'intérieur des bâtiments doit tenir compte des caractéristiques différentes entre les vibrations induites par un marcheur dans un bâtiment et les déplacements induits par un séisme à grande échelle ou une source sismique à l'extérieur des bâtiments. A titre d'exemple, les ondes sismiques propagées à l'issue d'un séisme sont des ondes de volume (onde de compression P et de cisaillement S) et des ondes de surface (chapitre 1) qui se propagent à différentes vitesses ce qui permet leurs séparation en temps à grandes distances ($> Km$), les fréquences propagées à ces distances sont de quelques hertz ($< 10Hz$, [IMMB11]) et l'amplitude des accélérations des particules du sol est de quelques centaines² de mg (à $20mg$ la personne perd l'équilibre et à $500mg$ le séisme est assez violent pour causer des endommagements dans les bâtiments [Lor12]). Les ondes sismiques générées par des sources sismiques à quelques dizaines de mètres du capteur à l'extérieur des bâtiments sont essentiellement des ondes de surface qui se propagent dans un milieu considéré comme semi infini, les fréquences propagées à ces distances sont de quelques dizaines de hertz ($< 100Hz$, [PG04]) et l'amplitude des accélérations des par-

2. Le g est une unité d'accélération correspondant approximativement à l'accélération de la pesanteur à la surface de la Terre. $g \simeq 9,8m.s^{-2}$

ticules du sol est de quelques mg . Or, à l'intérieur des bâtiments la physique des ondes est très différente de la physique qui est en jeu dans les applications précédentes. Dans notre contexte d'étude, le milieu de propagation (dalle en béton) s'apparente davantage à une plaque d'épaisseur finie (à titre indicatif, une dalle standard, ne servant pas à supporter des charges lourdes fait entre 20 et 25 cm d'épaisseur d'après [dal]) par rapport aux longueurs d'ondes propagées suite à l'impact d'un pas au sol ($> 50cm$, chapitre 3). De plus, les fréquences reçues à quelques mètres de l'impact d'un pas sur le sol peuvent atteindre quelques kilos hertz ($> 1KHz$ à $1m$, [ES06]) et avoir une amplitude maximale de quelques mg selon le type de chaussure et de revêtement du sol [ES06]. En outre, dans le présent problème considéré, il y a une spécificité qui tient à la variété des géométries (présence de poutre, de cloison porteuses,...) qui conduisent à une extrême variété des conditions aux limites, auxquelles vient s'ajouter le problème que les modules d'Young et donc les caractéristiques élastiques du béton dépendent de son âge, de sa vitesse de séchage, de la proportion ciment-sable, de la présence d'acier etc ...

Dans le présent travail, on s'intéresse particulièrement au problème de la localisation de personnes en mouvement à l'intérieur des bâtiments par ondes sismiques générées suite à l'impact d'un pas sur le sol. Ce travail repose sur une étude théorique et expérimentale des ondes sismiques se propageant dans une dalle en béton d'épaisseur finie. L'objectif de ce travail est d'aboutir à un algorithme de localisation qui puisse être étendu au cas de la poursuite d'une personne à l'intérieur des bâtiments. Le problème de numération et de caractérisation d'activité physique des personnes ne sera pas abordé dans ce travail. Le présent rapport s'articule en six chapitres.

Dans le chapitre 1, nous faisons un rappel sur les différents types d'ondes sismiques ; ondes de volume, ondes de surface et ondes de plaque. Nous étudierons les conditions d'existences de chacune ainsi que l'expression théorique de sa vitesse en fonction des caractéristiques du milieu de propagation. Nous donnerons un exemple de calcul de vitesse de propagation dans le béton et nous intéresserons plus particulièrement à une dalle en béton d'épaisseur $20cm$. Nous montrerons que dans un tel milieu des ondes qui se propagent sont essentiellement les ondes de plaque de mode zéro ; longitudinale S_0 et transversale A_0 .

Dans le chapitre 2, nous présenterons un état de l'art des techniques de localisations de source sismiques. Nous détaillerons trois familles de techniques ; localisation par structure d'onde, localisation par apprentissage et localisation à vitesse constante. Pour chacune de ces familles, nous donne-

rons le principe de localisation, les hypothèses et les domaines d'application.

Dans le chapitre 3, nous étudierons la signature sismique temporelle et fréquentielle d'un pas sur une dalle en béton d'épaisseur finie. Cette étude reposera sur l'exploitation de signaux sismiques enregistrés au cours de plusieurs expérimentations réalisées au première étage d'un bâtiment du CEA Grenoble. L'objectif de cette étude est de caractériser la signature sismique d'un pas afin de pouvoir à partir de ses caractéristiques étudier l'applicabilité des techniques de localisation de source sismique présentées dans le chapitre 2. Cette analyse montrera que les techniques de localisation basées sur l'apprentissage ou l'étude de la structure d'onde vectorielle des ondes sismiques de surface ne sont pas adaptées à la localisation à l'intérieur d'un bâtiment. Nous montrerons aussi sur des signaux expérimentaux que l'estimation d'une vitesse de propagation à partir de l'estimation de différence de temps d'arrivée n'est pas assez fiable à courte distance et nous mettrons en doute l'hypothèse de propagation à vitesse constante dans une dalle en béton. Une étude théorique de la vitesse de propagation perçue dans un tel milieu fera alors l'objet du chapitre suivant.

Dans le chapitre 4, une étude détaillée de la vitesse de propagation des ondes sismiques dans une dalle en béton sera établie. Cette étude sera basée sur l'exploitation des équations de propagation dans une plaque mince. Plusieurs approches seront développées dans l'objectif de vérifier l'hypothèse d'une vitesse constante dans tout le milieu de propagation. Ce chapitre se conclura par l'affirmation que la vitesse de propagation sismique perçue en différents points d'une salle n'est pas la même. Les techniques de localisation basées sur l'hypothèse d'une vitesse constante ne seront plus applicables à notre problème. D'où la nécessité de développer un nouvel algorithme de localisation.

Dans le chapitre 5, on développera un nouvel algorithme de localisation de personne à l'intérieur d'un bâtiment. L'algorithme qu'on proposera dans ce chapitre sera fondé sur l'étude du signe de différence de temps d'arrivée entre capteurs. Une validation numérique et expérimentale sera développée dans ce chapitre.

Dans le chapitre 6, on proposera un algorithme de localisation dynamique basé sur le filtre de Kalman et sur l'algorithme proposé dans le chapitre 5. Une validation numérique et expérimentale de l'algorithme de localisation dynamique sera également développée dans ce chapitre.

Chapitre 1

Ondes sismiques

Sommaire

1.1 Ondes de volume	13
1.2 Onde de surface : onde de Rayleigh	14
1.3 Ondes de plaque : onde de Lamb	15
1.4 Onde transversale SH et onde de Love	18
1.5 Conclusion	19

L'impact d'un pas provoque des déformations qui se transmettent à travers le sol dans toutes les directions avec une vitesse qui dépend des propriétés élastiques du milieu. Les particules du milieu qui se trouvent à une certaine distance de l'impact se mettent à osciller successivement en transmettant les oscillations d'une particule à l'autre. C'est ce qu'on appelle onde sismique. L'onde sismique est donc une onde élastique qui traverse un milieu sans le modifier durablement. Si l'on considère un milieu solide isotrope et homogène, quelles sont alors les différentes ondes sismiques qui peuvent s'y propager ? Existente-elles toutes simultanément ? Ont-elles la même vitesse de propagation ?

1.1 Ondes de volume

On suppose qu'on est en milieu élastique isotrope et homogène. On note (λ, μ) les paramètres de Lamé et ρ la densité du milieu. Soit \vec{f} une force volumique causale et \vec{u} le champ de déplacement traduisant le changement de position des points constituant le solide. Le principe fondamental de la dynamique et la loi de Hooke permettent d'établir l'équation de propagation des ondes élastiques [RD96] :

$$\rho \frac{\partial^2 \vec{u}}{\partial t^2} - (\lambda + 2\mu) \vec{\nabla} (\vec{\nabla} \cdot \vec{u}) + \mu \vec{\nabla} \times \vec{\nabla} \times \vec{u} = \vec{f}, \quad (1.1)$$

où $\vec{\nabla}$, \times et \cdot sont respectivement l'opérateur Nabla, l'opérateur produit vectoriel et l'opérateur produit scalaire. La propagation est totalement déterminée en ajoutant les conditions initiales et les conditions aux limites. On peut montrer que \vec{u} est la contribution d'une onde de compression, dite aussi onde primaire P ou onde longitudinale (fig.1.1.a), et d'une onde de cisaillement, dite aussi onde secondaire S ou onde transversale (fig.1.1.b.), fig. 1.2.

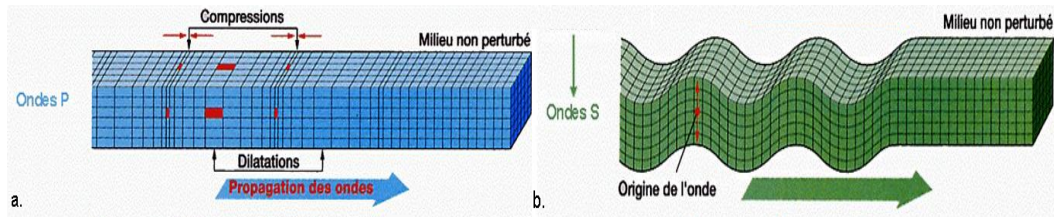


FIGURE 1.1 – a. Propagation d'une onde de compression P. b. Propagation d'une onde de cisaillement S [ond]

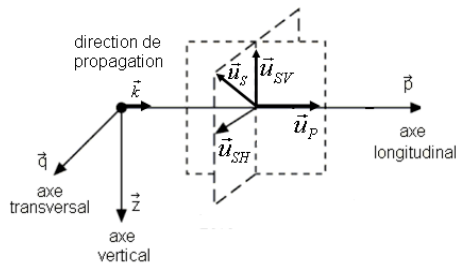


FIGURE 1.2 – Onde P longitudinale : déplacement dans la direction de propagation. Onde transversale S : déplacement perpendiculaire à la direction de propagation et décomposable en composantes SH et SV.

L'onde primaire P se propage plus rapidement que l'onde secondaire S. Les expressions des vitesses de propagation sont données par :

$$\begin{aligned} c_p &= \sqrt{(\lambda + 2\mu)/\rho} \\ c_s &= \sqrt{\mu/\rho} \end{aligned} \quad (1.2)$$

où c_p est la vitesse de propagation de l'onde P et c_s de l'onde S. A titre indicatif, dans le cas du béton par exemple, le coefficient de Lamé λ prend des valeurs entre 5555 et 13889MPa et μ des valeurs entre 8333 et 20833MPa¹. Par conséquent, pour une masse volumique égale à 2500kg/m³, les valeurs de la vitesse de cisaillement c_s peuvent être comprise entre 1825 et 2886m/s et la vitesse de compression c_p entre 2981 et 4714m/s.

Exemple : Pour $\lambda = 7000MPa$, $\mu = 10000MPa$ et $\rho = 2500kg/m^3$, on a $c_p = 4400m/s$ et $c_s = 2000m/s$.

1.2 Onde de surface : onde de Rayleigh

Les ondes P et S sont des ondes de volume et sont définies pour un milieu infini. Dans un milieu solide qui admet une surface libre, l'onde dite de Rayleigh résulte d'interférences entre les ondes de compression P et de cisaillement vertical SV. Elle est la plus énergétique en surface et sa profondeur de pénétration est de l'ordre de la demi-longueur d'onde. Elle est non dispersive² en milieu homogène et le devient si les propriétés du milieu changent avec la profondeur. La formalisation des ondes de Rayleigh est obtenue en ajoutant des conditions de contraintes nulles en surface et d'atténuation exponentielle avec la profondeur. La propagation de l'onde de Rayleigh provoque le déplacement des particules de surface dans un plan vertical et réalisant un mouvement elliptique, fig.1.3.

La vitesse de propagation des ondes de Rayleigh en milieu élastique, isotrope et homogène est très légèrement inférieure à la vitesse des ondes de cisaillement dans le matériau. Une approximation de son expression a été donnée par Viktorov [Vik70] pour un milieu réel dont le coefficient de poisson σ est entre 0 et 0.5 :

$$c_r = \frac{0.87 + 1.12\sigma}{1 + \sigma} c_s \quad \text{avec} \quad \sigma = \frac{\lambda}{2(\lambda + \mu)}. \quad (1.3)$$

1. 1MPa = 10⁶kg/(m.s²)

2. Une onde est dite dispersive si sa vitesse de propagation dépend de la fréquence.

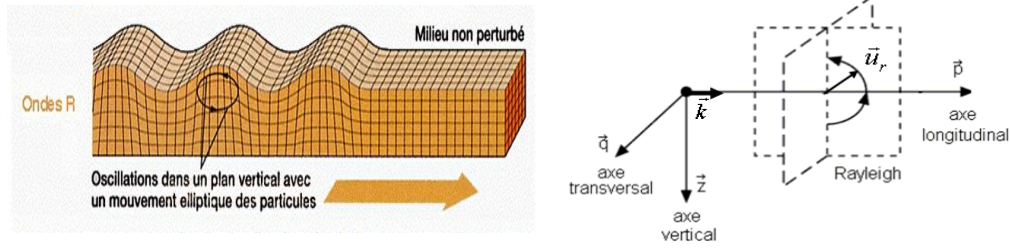


FIGURE 1.3 – Propagation d’une onde de Rayleigh : déplacement elliptique dans un plan vertical.

Dans le cas du béton où σ peut varier entre des valeurs extrême $0.15 < \sigma < 0.3$, on a alors l’approximation :

$$0.9c_s < c_r < 0.93c_s. \quad (1.4)$$

Exemple : Si on considère un béton dont les coefficients de Lamé sont $\lambda = 7000MPa$ et $\mu = 10000MPa$ et la vitesse de cisaillement $c_s = 2000m/s$, alors on peut en déduire le coefficient de poisson $\sigma = 0.2059$ ainsi que la vitesse de l’onde de Rayleigh $c_r = 0.9127c_s = 1825m/s$.

1.3 Ondes de plaque : onde de Lamb

Pour que l’onde de Rayleigh existe, il faut que l’épaisseur du milieu soit supérieure à la longueur d’onde. Lorsque l’épaisseur du milieu est de même ordre de grandeur que la longueur d’onde, les ondes de Lamb dites ondes de plaque sont excitées. Elles résultent du couplage des ondes P et SV aux interfaces solide/vide dans un milieu homogène isotrope. Ces ondes ont la particularité d’affecter toute l’épaisseur du matériau selon deux modes : symétrique S_i (fig. 1.4.a) et antisymétrique A_i (fig. 1.4.b).

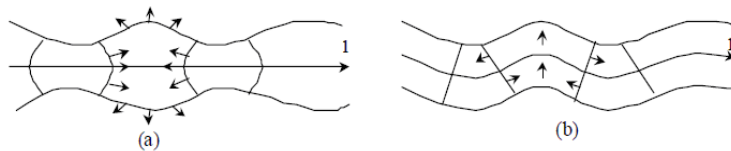


FIGURE 1.4 – a. Modes de Lamb symétrique et b. antisymétrique dans un matériau homogène isotrope [RD96]

Les ondes de Lamb sont des ondes guidées à caractère dispersif. L'étude de leur propagation requiert le calcul des courbes de dispersion qui représentent les profils de vitesse de phase ou de groupe en fonction du produit fréquence épaisseur. Les modes A_0 et S_0 existent pour les basses fréquences. Les fréquences de coupure des modes de Lamb d'ordre supérieur se produisent lorsque l'épaisseur h du milieu est un multiple de la demi-longueur d'onde des ondes de compression λ_p ou des ondes de cisaillement λ_s [RD96], autrement dit :

$$h = p\lambda/2, \quad \text{avec } p = 2n \quad \text{ou} \quad p = 2m + 1 \quad \text{et} \quad \lambda = c_s/f_c \quad \text{ou} \quad c_p/f_c. \quad (1.5)$$

Exemple : Pour une dalle en béton d'épaisseur $h = 20\text{cm}$ et $c_s = 2000\text{m/s}$ et $c_p = 4400\text{m/s}$, et pour $p = 1$, on a $\lambda = 2h = 40\text{cm}$ et par suite les fréquences de coupure sont $f_c = \frac{c_s}{\lambda} = 5\text{KHz}$ (A_1) ou $f_c = \frac{c_p}{\lambda} = 11\text{KHz}$ (S_1).

Le mode longitudinal S_0 n'est pas dispersif en basse fréquence. Sa vitesse de propagation est donnée par [RD96] :

$$c_{s0} = 2c_s \sqrt{1 - \frac{c_s^2}{c_p^2}}. \quad (1.6)$$

Exemple : Pour $c_s = 2000\text{m/s}$ et $c_p = 4400\text{m/s}$, on a $c_{s0} = 3200\text{m/s}$.

Le mode transversal A_0 est dispersif en basse fréquence. Sa vitesse de phase en fonction de la fréquence est donnée par [RD96] :³,

$$c_{a0} = \sqrt{\frac{c_{s0}}{2\sqrt{3}}} \sqrt{h2\pi f}, \quad (1.7)$$

et la courbe de dispersion du mode A_0 par la fig.1.5.

La figure 1.5 montre que la vitesse de propagation du mode A_0 dépend de la fréquence et elle peut varier entre un peu moins de 700m/s pour les fréquences inférieures à 1kHz et plus de 2000m/s pour les fréquences supérieures à 3kHz dans une dalle en béton d'épaisseur 20cm . Les longueurs d'ondes propagées sont supérieures à 50cm pour les fréquences inférieures à 5kHz dans ce même milieu.

3. Formule déduite d'après [RD96] où $c_{a0} = \frac{c_{s0}}{2\sqrt{3}}hk$ et $\omega(k) = \frac{c_{s0}}{2\sqrt{3}}hk^2$ la relation de dispersion du mode A_0 et $\omega = 2\pi f$ est la pulsation.

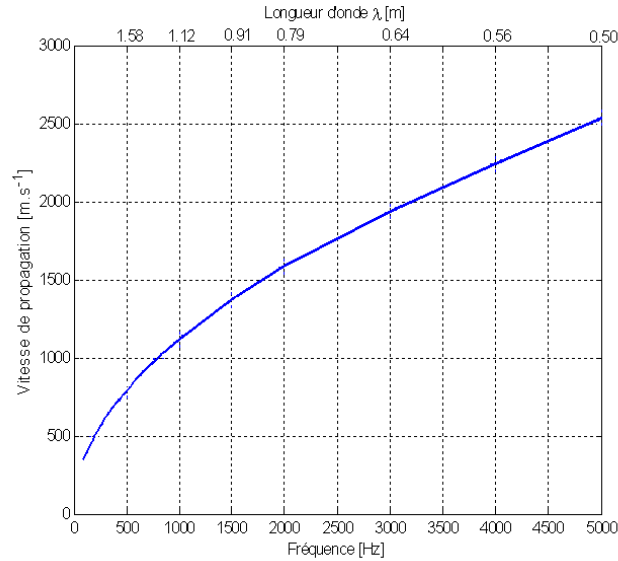


FIGURE 1.5 – Simulation : courbe de dispersion du mode transversal A_0 , vitesse de phase et longueur d’onde en fonction de la fréquence dans une plaque en béton d’épaisseur $h = 20\text{cm}$ et pour $c_{s0} = 3200\text{m/s}$.

Les modes S_0 et A_0 sont essentiellement longitudinal et transversal respectivement pour les faibles produits $h.f$, fig.1.6 et fig.1.7. La courbe bleue de la fig. 1.7 montre que pour différents produits $h.f$ le rapport des maximums d’amplitudes entre la composante verticale et longitudinale de l’onde S_0 est inférieur à 1. Donc l’onde S_0 est essentiellement longitudinale. La courbe rouge de la fig. 1.7 montre que l’inverse de ce rapport calculé pour l’onde A_0 est inférieur à 1 (pour les fréquences inférieures à 3500Hz si $h = 20\text{cm}$). Par conséquent, ce mode A_0 est essentiellement transversal (à des faibles fréquences).

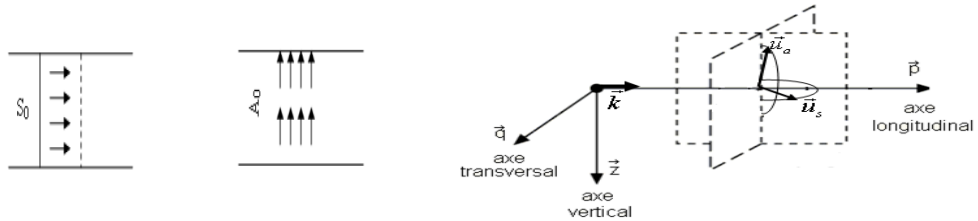


FIGURE 1.6 – Champ de déplacement des modes de Lamb symétrique S_0 et antisymétrique A_0 dans un milieu homogène isotrope.

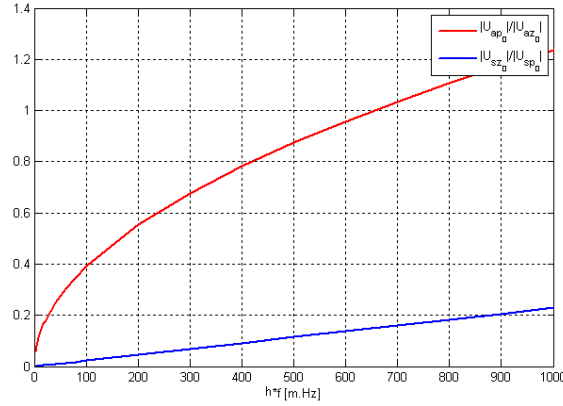


FIGURE 1.7 – Simulation : Rapport des maximums d’amplitudes des vibrations verticales $u_{.z_0}$ et longitudinales $u_{.p_0}$ pour les modes A_0 et S_0 en fonction du produit $h.f$.

1.4 Onde transversale SH et onde de Love

Dans les sections 1.2 et 1.3 de ce chapitre, on a traité le problème du couplage des ondes P et SV à l’interface d’un milieu semi-infini et un milieu d’épaisseur finie respectivement. Dans cette section, on s’intéresse au problème SH découplé de P et SV. Les ondes SH existent si la source d’excitation des ondes sismiques n’est pas orthogonale à la surface libre du milieu ($\gamma \neq 0$) [Ros99] ou bien dans le cas des réflexions sur les bords du milieu (plaque rectangulaire).

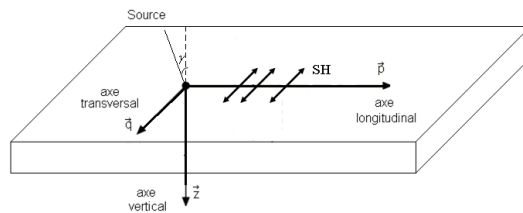


FIGURE 1.8 – Propagation d’une onde transversale à polarisation horizontale

L’onde de Love est une onde transversale à polarisation horizontale également. Elle existe quand une couche de faible vitesse de cisaillement recouvre un substrat de plus grande vitesse de cisaillement. L’onde de Love est générée à la suite de multiples réflexions entre le haut et le bas de la couche à faible vitesse. Sa vitesse de phase est entre les deux vitesses de cisaillement des deux milieux [RD96].

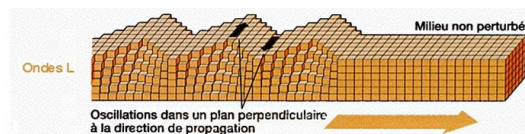


FIGURE 1.9 – Propagation d’une onde de Love [ond]

1.5 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons donné un résumé sur la propagation des ondes sismiques. Plusieurs types d’ondes progressives sont susceptibles de se propager dans les milieux solides tels que les structures en béton rencontrées dans les bâtiments. En effet, selon la valeur de l’épaisseur du milieu comparée à la longueur d’onde des ondes propagées, certaines ondes peuvent exister et d’autres non. Les ondes de volume de compression P et de cisaillement S se propagent dans un milieu de dimension infini. Si on se place dans un milieu semi-infini, on observe des ondes dites de Rayleigh non dispersives à mouvement elliptique et qui résultent du couplage des ondes P et SV à la surface. Si l’épaisseur du milieu est de même ordre de grandeur ou inférieur à la longueur d’onde des ondes propagées, on est alors dans une plaque. Dans ce cas, les ondes de Lamb symétriques et antisymétriques résultent du couplage des ondes P et SV. En basse fréquence, les modes essentiellement longitudinal S_0 et transversal A_0 sont présents. A ces fréquences, la vitesse de propagation du mode S_0 ne dépend pas de la fréquence, contrairement à celle du mode A_0 . Le problème SH est découplé du problème P et SV. Les ondes SH transversales à polarisation horizontale existent si l’excitation n’est pas verticale au milieu, ou si ce dernier est à bord limité.

Dans ce chapitre on a présenté également les ordres de grandeur des vitesses de propagation des différents types d’ondes dans le béton. Plus particulièrement, on s’est intéressé à une dalle d’épaisseur $20cm$. Les ondes propagées dans ce milieu sont essentiellement des ondes de plaque car l’épaisseur est bien inférieure aux longueurs d’ondes propagées à des fréquences inférieures à $5kHz$. En fait, une simulation a été réalisée afin de déterminer la courbe de dispersion du mode A_0 donnant la vitesse de propagation et les longueurs d’ondes en fonction de la fréquence. La vitesse de propagation de ce mode transversal se situe entre $500m/s$ et $2500m/s$ pour des fréquences entre $200Hz$ et $5kHz$, ce qui correspond alors à des longueurs d’ondes entre $50cm$ (à $5kHz$) et $1.5m$ (à $500Hz$). Le calcul de la vitesse de propagation du mode S_0 dans le même milieu a donné $3200m/s$.

Chapitre 2

État de l'art de la localisation d'une source sismique.

Sommaire

2.1 Localisation par structure d'onde sismique	21
2.1.1 Localisation par séparation des ondes de volume	21
2.1.2 Localisation par structure d'ondes de surface en milieu semi-infini	21
2.2 Localisation par apprentissage	22
2.2.1 Approche modale	22
2.2.2 Approche de 'Retournement Temporel'	22
2.3 Localisation à vitesse constante	23
2.3.1 Localisation par traitement d'antenne	23
2.3.2 Localisation par estimation des différences de trajets source-capteurs	23
2.4 Conclusion	25

Ce chapitre est un état de l'art de la localisation d'une source sismique. Il a pour objectif de présenter le principe, les hypothèses et les domaines d'applications des algorithmes de localisation de sources sismiques. Trois familles de techniques de localisation seront présentées ; la première s'intéresse à la structure des ondes sismiques propagées dans le milieu, la deuxième s'intéresse moins à la structure des ondes sismiques mais applique un apprentissage du milieu pour la formation d'une bibliothèque de référence permettant la localisation de la source, la dernière famille s'attaque plutôt à la détection du début du signal (sans tenir compte de son intégralité) en supposant une vitesse de propagation constante dans le milieu.

L'applicabilité de ces techniques à la localisation d'une personne à l'intérieur des bâtiments sera discutée dans le chapitre 3.

2.1 Localisation par structure d'onde sismique

2.1.1 Localisation par séparation des ondes de volume

Les techniques de localisation basées sur l'étude de la structure de l'onde sismique propagée dans un milieu ont d'abord été appliquées en sismique géologique pour la localisation des épicentres¹. Les distances considérées dans de telles applications sont assez importantes ($> km$) pour permettre de séparer les ondes de compression, de cisaillement et de surface en temps d'arrivée. L'estimation de l'écart de temps entre l'arrivée des ondes P et S et la connaissance de leurs vitesses de propagation permettent de déduire la distance du capteur à l'épicentre. Puisque plusieurs capteurs permettent de donner une valeur de la distance, la position de l'épicentre est localisée à l'intersection des cercles ayant pour centre les capteurs et pour rayon les distances estimées. Cette technique est appelée triangulation [Bol93].

Lee dans son article [HLH09] a proposé l'utilisation de l'orthogonalité entre les ondes P et S pour estimer la direction d'arrivée des signaux à partir d'un capteur triaxial. Cette méthode a été proposée afin de localiser un pas à l'intérieur d'un bâtiment et n'a pas été validée expérimentalement. L'hypothèse de propagation des ondes P et S n'a pas été non plus justifiée dans cet article.

2.1.2 Localisation par structure d'ondes de surface en milieu semi-infini

Dans d'autres domaines d'application, à courtes distances ($< 100m$) et dans un milieu semi infini, les ondes de surface dominent le signal sismique par rapport aux ondes de volume [SPGP00]. A ces distances, les ondes de Rayleigh et Love (SH) sont totalement mélangées. Les ondes de Rayleigh génèrent un mouvement elliptique des particules du sol dans le plan formé par la verticale et la direction de propagation. Le mouvement dans la direction perpendiculaire à ces deux directions est généré par les ondes de Love (SH). En se basant sur le mouvement spécifique de propagation de ces ondes, Kirilin [KNL95, KD98], Succi [SPGP00, SCGP01] et Stafsudd [SACH05, SACH06, SHTY07, SAHY07] ont proposé des techniques de localisation de source sismique qui consistent en premier temps à estimer la direction d'arrivée du signal et en second temps à estimer la position de la

1. épicentre : point d'origine du séisme

cible (pour avoir plus de détails, consulter [annexe A]). Ces techniques de localisation nécessitent l'utilisation des capteurs sismiques triaxiaux et supposent une propagation dans un milieu semi infini pour permettre l'existence des ondes de Rayleigh. Elles ont été appliquées pour la surveillance en champs de bataille à l'extérieur des bâtiments afin de localiser des intrus, véhicules ou soldats ennemis en mouvement.

2.2 Localisation par apprentissage

Dans la section précédente 2.1, le milieu de propagation considéré est soit un volume, soit un milieu semi-infini. Dans cette section, on s'intéresse aux techniques de localisation dans une plaque (guide d'onde). Parmi ces techniques, on cite les approches de localisation par apprentissage telles que l'approche modale ou l'approche de 'Retournement Temporel'.

2.2.1 Approche modale

Le filtrage modal consiste à utiliser les modes pour localiser la source [NeML04, Avi01, Cas10]. L'information de la position de la source est contenue dans les coefficients d'excitation des modes. Un filtre permet d'extraire ces coefficients qui seront par la suite comparés à des coefficients théoriques (obtenus à partir des équations analytiques de la propagation dans un guide parfait ou en utilisant un modèle de propagation par modes normaux²) pour différentes positions de la source. La position estimée est celle pour laquelle les coefficients d'excitation des modes théoriques sont les plus proches des coefficients réels. Parmi les applications utilisant l'approche modale, on peut citer à titre d'exemple la localisation d'une source en acoustique sous-marine [NeML04].

2.2.2 Approche de 'Retournement Temporel'

Fink [IQCF05, RIB06] a travaillé sur la localisation d'une impulsion à la surface d'une plaque, fig.2.1. Il a proposé dans ces travaux de localiser une source en milieu réverbérant par 'Retournement Temporel'. C'est une technique qui permet de focaliser spatialement et temporellement une onde à partir de la connaissance de la réponse impulsionnelle entre deux points d'un milieu complexe [IQCF05]. Cette technique consiste en deux phases : une première phase d'apprentissage, ou de mise en mémoire, de toutes les

2. mode normal est une des fréquences auxquelles un système peut osciller après avoir été perturbé, fréquences naturelles de vibration.

fonctions de Green (ou réponses impulsionnelles) entre les points localisables et les capteurs [IQCF05], et une deuxième phase lorsqu'un utilisateur tape en un point (de position inconnue), où tous les coefficients de corrélation entre cette nouvelle réponse impulsionnelle et celles enregistrées sont calculés. Ainsi, le coefficient de corrélation maximum permet de déduire la position de l'impact [IQCF05].

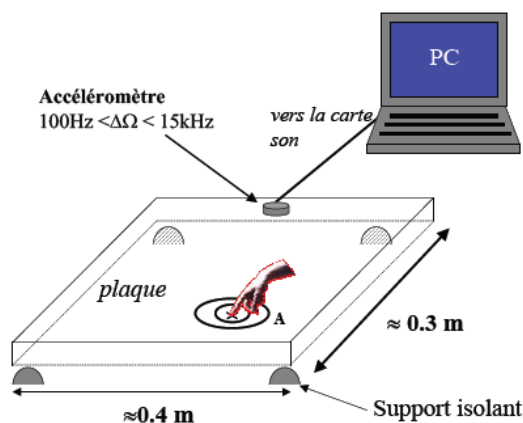


FIGURE 2.1 – Schéma du dispositif expérimental pour la localisation d'impacts sur la surface de plaques par 'Retournement Temporel' [RIB06].

2.3 Localisation à vitesse constante

2.3.1 Localisation par traitement d'antenne

Le principe de la localisation de source par traitement d'antenne [Cor02] consiste à estimer la direction d'arrivée à partir du déphasage entre les signaux des capteurs constituant l'antenne, en supposant une vitesse constante de propagation d'ondes. Le déphasage peut être calculé directement ou à partir de l'estimation des temps de retard entre les signaux. La source doit être située en champs lointain.

2.3.2 Localisation par estimation des différences de trajets source-capteurs

Le principe de la localisation de source à partir de l'estimation des différences de trajets source-capteurs est basé sur des algorithmes de localisation hyperbolique [CH94, XLS07, XLS08, MVSB06, HLK07, NEE09]. Ces algorithmes consistent à :

1. estimer les différences de temps d'arrivée (Time Difference Of Arrival TDOA) du signal entre toutes les paires de capteurs,
2. estimer les différences de trajets en multipliant les TDOA estimées par la vitesse de propagation. Si cette vitesse n'est pas préalablement connue comme dans le cas de la propagation sismique, Richman [RDNW01] a proposé d'estimer préalablement cette vitesse supposée constante à partir des signaux d'une source contrôlée (dont on connaît la position). Zheng [ZLS07] a proposé un algorithme d'estimation simultanée de la position de la source et de la vitesse de propagation. Son algorithme consiste à exploiter l'algorithme de minimisation des moindres carrés pondérés développé dans [CH94] et la relation entre la vitesse de propagation et la position de la source donnée dans [RHY99]. L'algorithme de Zheng a été validé uniquement en simulation.
3. chercher le point d'intersection de plusieurs hyperboles dans le plan. En effet, par définition, une hyperbole est le lieu géométrique des points dont la différence des trajets aux deux foyers (paire de capteurs) est constante. Soient F_1 et F_2 deux points du plan distants de $2c$. L'hyperbole de foyers F_1 et F_2 (figure 2.2) est l'ensemble de point P tel que :

$$|d(P, F_1) - d(P, F_2)| = 2a, \quad a \in \mathfrak{R}. \quad (2.1)$$

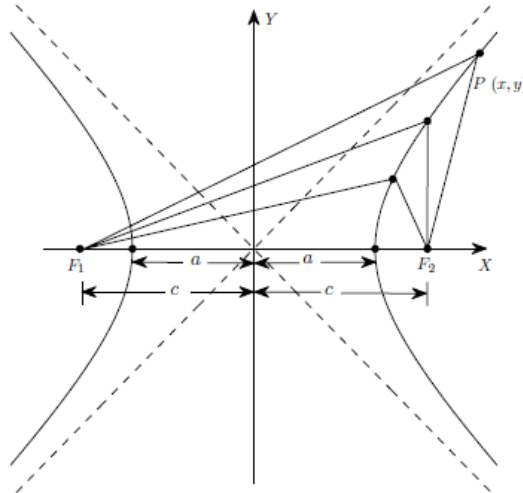


FIGURE 2.2 – Définition d'une hyperbole de foyers F_1 et F_2 . $|d(P, F_1) - d(P, F_2)| = 2a$.

2.4 Conclusion

Ce chapitre a présenté trois familles de techniques de localisation de source sismique.

La première famille est basée sur l'étude de la structure des ondes sismiques. Elle consiste, sur des grandes distances source-capteur ($> 1Km$), à séparer les ondes de volume P et S, et sur des plus courtes distances ($< 100m$), à utiliser l'orthogonalité entre les ondes de surface de Rayleigh et Love (SH).

La deuxième famille consiste à localiser une source à partir de la classification de ses signaux dans une bibliothèque préenregistrée des fonctions de Green du milieu en différents points localisables. Cette famille de techniques est appliquée pour une propagation dans un guide d'onde tel le cas d'une plaque. La bibliothèque préenregistrée peut être formée par l'intégralité de la fonction de Green ('Retournement Temporel') ou seulement par les coefficients modaux de la plaque (approche modale).

La dernière famille suppose une vitesse de propagation constante dans le milieu et consiste à localiser la source à partir de l'estimation de la différence de temps d'arrivée entre les paires de capteurs. A grandes distances, la différence de temps d'arrivée permet par un traitement d'antenne de déduire la direction d'arrivée du signal et ensuite la localisation de la source. Une autre alternative consiste à résoudre le problème de localisation hyperbolique à partir des différences de trajets calculées en multipliant les différences de temps d'arrivée par la vitesse de propagation.

Le chapitre suivant, sera une étude de l'applicabilité de ces différentes techniques au problème de localisation d'une personne en mouvement à l'intérieur des bâtiments en se basant sur une étude caractéristique des signaux expérimentaux.

Chapitre 3

Caractérisation de la signature sismique d'un pas à l'intérieur d'un bâtiment

Sommaire

3.1	Instrumentations	27
3.2	Peut-on faire de l'apprentissage pour la localisation ?	30
3.3	Peut-on utiliser la structure de l'onde sismique pour la localisation ?	36
3.4	Quelle vitesse de propagation ?	38
3.4.1	Estimation du temps d'arrivée	39
3.4.2	Estimation de la vitesse de propagation expérimentale à partir de différence du temps d'arrivée	47
3.5	Conclusion	50

Ce chapitre propose une caractérisation de la signature sismique temporelle et fréquentielle d'un pas effectué dans un bâtiment à partir des signaux expérimentaux. Il a pour objectif d'étudier l'applicabilité des techniques de localisation présentées dans le chapitre 2 au problème de localisation d'une personne en mouvement dans un bâtiment.

Quelles sont les caractéristiques de la signature sismique d'un pas à l'intérieur d'un bâtiment ? Quelles instrumentations utiliser ? Quelles techniques de localisation de l'état de l'art sont-elles plus adaptées au signal d'un pas ? Peut-on faire de l'apprentissage ? Peut-on utiliser la structure de l'onde sismique ? Quelle vitesse de propagation choisir ? Est-elle constante et indépendante de la position de la source et des capteurs ?

3.1 Instrumentations

La caractérisation de la signature sismique d'un pas à l'intérieur des bâtiments est basée sur l'exploitation des signaux expérimentaux. L'impact d'un pas sur le sol provoque le déplacement des particules du sol sous forme d'ondes sismiques [chapitre 1] qui se propagent jusqu'à atteindre un capteur sismique de vibration, figure 3.1. Le dispositif expérimental est formé par des capteurs de vibration, des câbles et une station d'acquisition. La station d'acquisition utilisée est un DL850.YOKOGAWA, 16 bits, 16 voies, 40kHz de bande passante sur chacune des voies et de bruit propre de $\pm 100\mu\text{V}$ (RMS sur 300 kHz) [yok]. Les capteurs de vibration seront détaillés au paragraphe suivant.

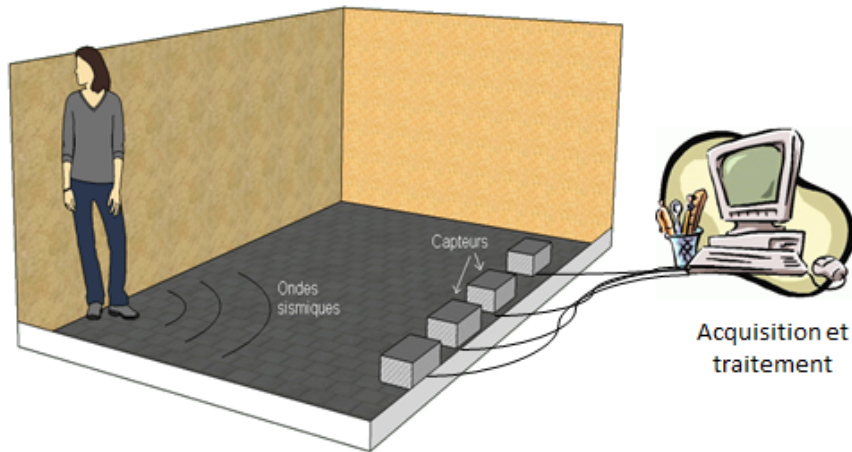


FIGURE 3.1 – Localisation d'une personne par sismique

Capteurs de vibration

La vibration peut se traduire sous forme de déplacement, vitesse ou accélération. A titre d'exemple, pour une accélération vibratoire de $1g$ ($\simeq 10\text{m/s}^2$) mesurée par un accéléromètre, on a :

- une vitesse de 160mm/s (à 10Hz) et de 1.6mm/s (à 1kHz),
- un déplacement de 2.5mm (à 10Hz) et de $25\mu\text{m}$ (à 1kHz).

Les capteurs de vibration de type accéléromètre sont les plus utilisés pour la mesure des vibrations. Leur principe de fonctionnement simplifié peut être représenté par une masse (dite 'sismique') suspendue par un ressort, figure 3.2. Si le système non-amorti masse-ressort subit une accélération verticale, on peut alors en déduire cette accélération a en mesurant la force à laquelle

est soumise cette masse m par l'application du principe fondamental de la dynamique $F = m.a$ (pour le ressort $F = -kx$ où x est la position de la masse par rapport à l'équilibre).

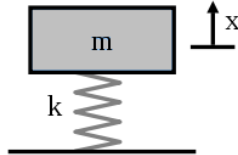


FIGURE 3.2 – Système masse ressort

Le principe de mesure de la force change d'une technologie à une autre : piézoélectriques, piézorésistifs, capacitifs et asservis [acca]. Dans nos travaux, on utilisera deux types de capteurs : les capteurs piézoélectriques et les capteurs capacitifs asservis.

Capteur capacitif asservi : Colibry SF3000L

Les accéléromètres de fabrication 'Colibrys' sont des 'MEMS'¹ qui ont été préalablement employés pour la détection de personne en mouvement pour la surveillance militaire à l'extérieur des bâtiments [col]. Plus particulièrement les accéléromètres 'Colibrys' SF3000L [annexe B] seront utilisés pour nos expérimentations, figure 3.3. Ces capteurs offrent une large sortie linéaire entre $\pm 3g$, une sensibilité de $1.2V/g$, une bande passante de $1kHz$ exploitable jusqu'à $5kHz$, en plus d'un faible bruit capteur de densité constante de $2.10^{-7}g/\sqrt{Hz}$ sur la bande de fréquence $[10 - 1000]Hz$. Ce capteur SF3000L est un capteur triaxial formé par trois accéléromètres capacitifs asservis SF1500S [annexe B] [accb]. Ils sont vendus sur le marché au prix de 1500 euros environ.



FIGURE 3.3 – Capteur Colibry SF3000L.

1. MEMS : microsystèmes électromécaniques

CHAPITRE 3. CARACTÉRISATION DE LA SIGNATURE SISMIQUE D'UN PAS À L'INTÉRIEUR D'UN BÂTIMENT

Le principe d'un capteur capacitif est de mesurer le déplacement de la masse sismique entre deux électrodes sous l'effet de l'accélération. La variation de la tension aux bornes de ces deux électrodes traduit alors l'accélération. Dans le cas d'accéléromètre capacitif asservi, la mesure du déplacement de la masse ne se fait pas directement. Dans ce cas une force égale et opposée à celle induite par l'accélération est créée (souvent par un électro-aimant) pour maintenir la masse dans sa position initiale. La force appliquée est alors proportionnelle à l'accélération à mesurer.

Le capteur SF3000L est fait pour être fixé par des vis au sol afin de garantir une bonne adhésion entre le support du capteur et le sol. Dans nos expérimentations, on le fixera par l'intermédiaire d'un scotch double face pour éviter des trous au sol. On supposera que cette fixation n'influe pas beaucoup les vibrations enregistrées (hypothèse vérifiée expérimentalement).

Capteur piézoélectrique

Afin de pouvoir utiliser plusieurs capteurs, on a réalisé un capteur à bas coût formé par une céramique piézoélectrique qu'on maintient en contact avec le sol par une masse sismique. La céramique piézoélectrique coûte environ 25 euros et est vendue à l'état brut sans électronique embarquée, figure 3.4. Ces capteurs sont donc non asservis. Ils ont une réponse qui dépend en amplitude et en fréquence de la masse sismique et de l'adhésion au sol. Le bruit est essentiellement électrique dû au câblage entre la céramique et la station d'acquisition. Ces capteurs ne seront pas utilisés dans ce chapitre mais plus loin pour la localisation.

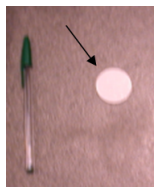


FIGURE 3.4 – Céramique piézoélectrique.

Le principe de fonctionnement des capteurs piézoélectriques est simple. Une masse sismique exerce des efforts de compression sur un matériau piézoélectrique qui génère alors une charge électrique proportionnelle à la force qui lui est appliquée (donc à l'accélération à mesurer).

Après avoir défini l'instrumentation utilisée, on s'intéresse dans les paragraphes suivants à discuter de l'applicabilité des techniques de localisation présentées dans le chapitre 2 à notre problématique. Cette discussion sera basée sur l'étude expérimentale des caractéristiques de la signature sismique d'un pas à l'intérieur d'un bâtiment. On répondra alors dans ce qui suit aux questions suivantes : Peut-on appliquer ou non les approches de localisation basées sur un apprentissage ? Peut-on utiliser la structure de l'onde de Rayleigh pour la localisation à l'intérieur des bâtiments ? Et finalement, de quelle valeur de vitesse de propagation s'agit-il ?

3.2 Peut-on faire de l'apprentissage pour la localisation ?

Les approches de localisation de source sismique par apprentissage [section 2.2] supposent que le signal reçu est invariant pour des positions fixes de la source et du capteur. Les approches de type modale supposent, en plus, une faible atténuation pour permettre l'établissement des modes par la superposition des ondes réfléchies aux bords du milieu. Dans la suite, on vérifiera les hypothèses d'applicabilité de ces approches de localisation.

Un exemple de signaux sismiques reçus sur les trois axes de l'accéléromètre *SF3000L* est donné par la figure 3.6. Le pas a été réalisé à $5m$ du capteur sur une dalle en béton recouverte de carrelage et d'épaisseur $20cm$, figure 3.5. Le pas a été effectué près d'un mur non porteur et le capteur a été placé à $1m$ d'une poutre traversante. Les signaux sont échantillonnés à $20kHz$. Le capteur triaxial est fixé tel que son axe z est perpendiculaire au sol.

La figure 3.6, montre que le signal vibratoire d'un pas est un signal transitoire d'une durée de quelques dizaines de ms ($< 200ms$) et d'une amplitude de quelques mg . Le signal sismique d'un pas est reçu sur les trois axes du capteur avec une amplitude plus importante sur l'axe vertical au sol S_z . La figure 3.7 confirme cette observation sur d'autres réalisations dans des conditions expérimentales similaires (position identique de la source et du capteur). Le mouvement des particules du sol est donc effectué dans les trois directions avec une dominance dans la direction verticale au sol. En fait, le mouvement des particules du sol est induit par la force de réaction du sol ('Ground reaction force' [Log07, RMJG10]). Cette force [Log07] et ainsi le signal vibratoire induit [ES06] dépendent de plusieurs paramètres. Ces paramètres sont essentiellement le poids de la personne [JE07, GB70, EHSP96],

CHAPITRE 3. CARACTÉRISATION DE LA SIGNATURE SISMIQUE D'UN PAS À L'INTÉRIEUR D'UN BÂTIMENT

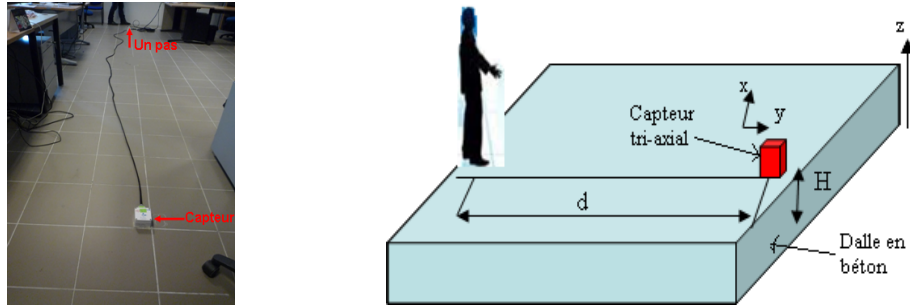


FIGURE 3.5 – Configuration expérimentale : (gauche) expérimentation sur une dalle en béton recouverte de carrelage. (droite) configuration : un pas à 5m du capteur SF3000L sur une dalle d'épaisseur $h = 20\text{cm}$. L'axe 'z' du capteur est perpendiculaire au sol, l'axe 'y' est dans la direction du pas et l'axe 'x' est dans le plan du sol et perpendiculaire à l'axe 'y'.

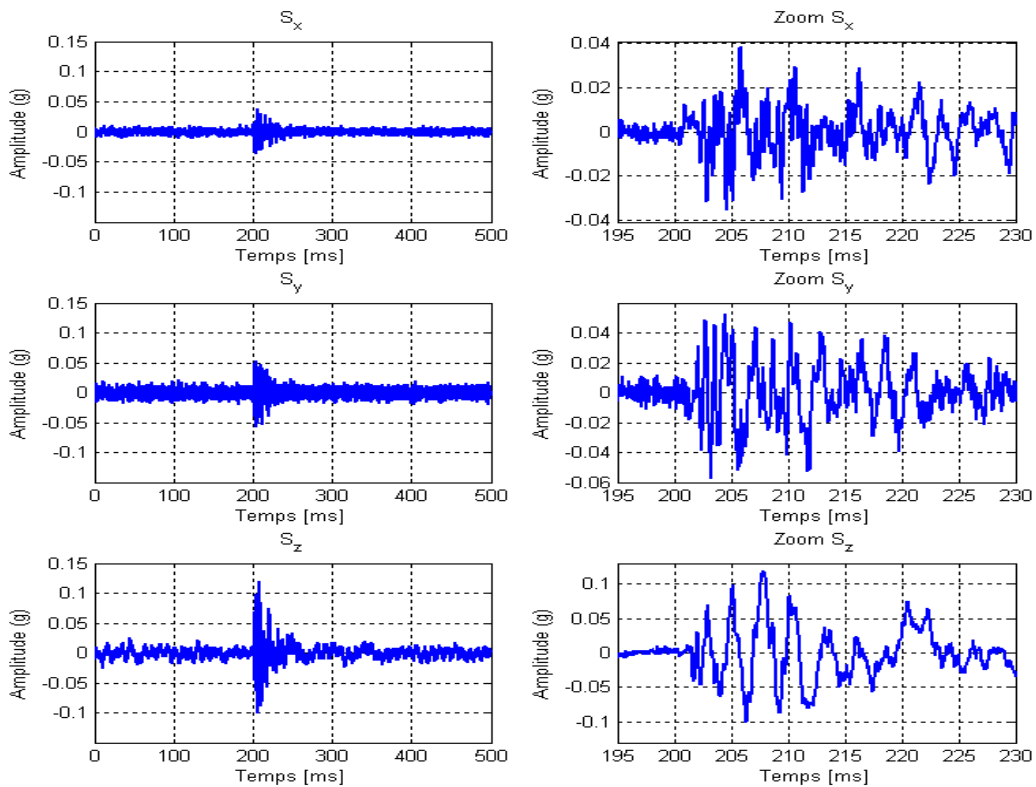


FIGURE 3.6 – (droite) signature temporelle d'un pas reçu sur l'axe 'x' (en haut), axe 'y' (au milieu) et axe 'z' (en bas) selon la configuration de la figure 3.5. (gauche) un zoom sur les signaux

CHAPITRE 3. CARACTÉRISATION DE LA SIGNATURE SISMIQUE D'UN PAS À L'INTÉRIEUR D'UN BÂTIMENT

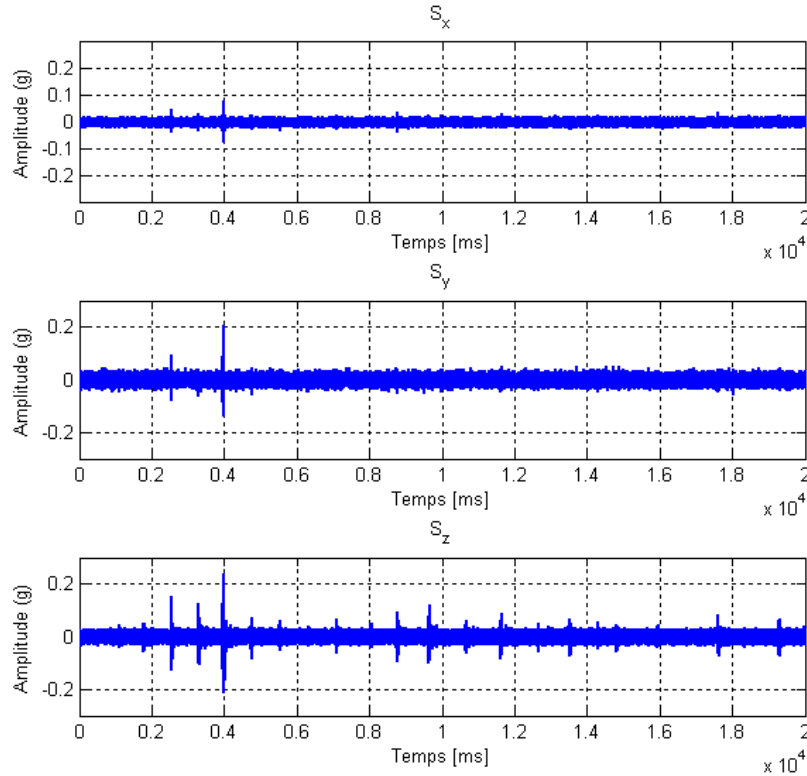


FIGURE 3.7 – Signature temporelle de plusieurs pas réalisés à la même position selon la configuration de la figure 3.5. Signaux ' S_x ', ' S_y ' et ' S_z ' reçus sur les axes 'x', 'y' et 'z' du capteur respectivement.

le style de marche (marche lente, rapide, course, etc...) [HM03], la surface de contact entre les chaussures et le sol, la nature du sol et de son recouvrement (linoléum, carrelage, bois, etc...) [Cre78], la nature des semelles des chaussures (caoutchouc, bois, talon, etc...) [Wat65]. Ekimov a étudié la signature vibratoire d'un pas à l'intérieur d'un bâtiment et a résumé ces facteurs de dépendance dans son article [ES06]. Il a constaté l'existence de deux phases dans le signal expérimental d'un pas à l'intérieur d'un bâtiment [ES06]. Il les a interprétées comme suit : la première phase est un signal basse fréquence ($< 500\text{Hz}$) qui correspond au signal de la force normale à la surface du sol, la deuxième phase est un signal à plus haute fréquence ($> 1\text{kHz}$) qui correspond au signal de la force tangentielle (appelée aussi force de friction). La première phase est toujours observée à l'extérieur des bâtiments, alors que la deuxième phase n'est observée qu'à l'intérieur. Sur nos signaux expérimentaux à l'intérieur, on observe également ces composantes à hautes

CHAPITRE 3. CARACTÉRISATION DE LA SIGNATURE SISMIQUE D'UN PAS À L'INTÉRIEUR D'UN BÂTIMENT

fréquences ($> 1\text{kHz}$), figure 3.8. Cependant, on ne distingue pas souvent les deux phases. En fait, la séparation des deux phases sur les signaux est interprétée par Ekimov comme étant le temps ($\simeq 100\text{ms}$) séparant le touché des talons et le touché des pointes des pieds. Ainsi, la séparation et l'existence des deux phases dépendent du style de marche effectué.

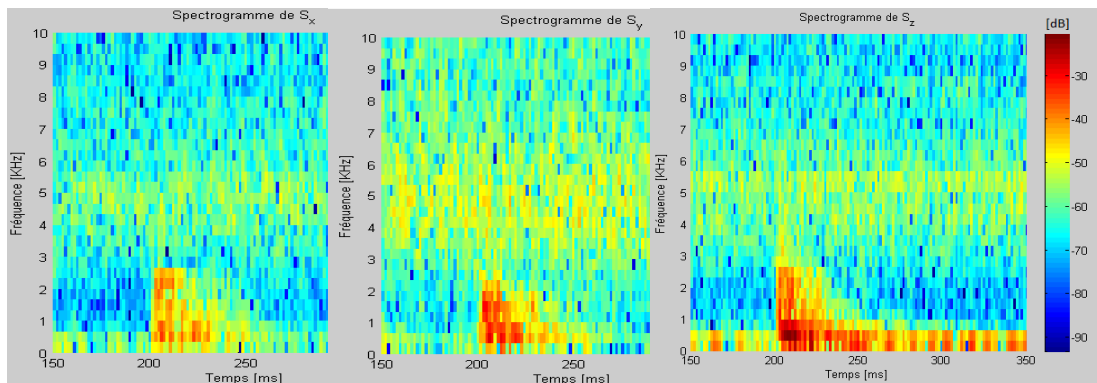


FIGURE 3.8 – Spectrogrammes des signaux ' S_x ', ' S_y ' et ' S_z ' d'un pas réalisé selon la figure 3.5 et reçus sur les axes 'x', 'y' et 'z' du capteur respectivement. Paramètres des spectrogrammes : fenêtre temporelle de *Hamming* de durée 3ms (soit 2 à 3 oscillations sur le signal temporel) soit 60 échantillons avec 50% de recouvrement. 60 échantillons ont été utilisés pour le calcul de la transformé de Fourier rapide, soit une résolution fréquentielle de 333Hz .

Dans la suite, on étudie l'atténuation du signal en fonction de la distance source-capteur. Si l'atténuation est importante, l'exploitation des approches de type modale ne sera pas possible. On ajoute alors un deuxième accéléromètre triaxial *SF3000L* à une distance de 8m du premier comme le montre la figure 3.9. On effectue une marche à partir du capteur 1 vers le capteur 2 et on s'intéresse à la comparaison des amplitudes des signaux en fonction de la distance source-capteur. Les signaux captés sur l'axe z des deux capteurs sont donnés par la figure 3.10. Cette figure montre que le signal sismique d'un pas sur le sol s'atténue en s'éloignant du capteur. Les signaux d'une marche ne permettent pas de déduire une loi d'atténuation puisque l'énergie transmise n'est pas nécessairement constante (variation non monotone du maximum d'amplitude en fonction de la distance sur quelques pas, figure 3.10). Afin de caractériser l'atténuation, on utilisera alors une source reproductible : une balle en caoutchouc de diamètre 35mm et de masse 30.5g lâchée sans vitesse initiale d'une hauteur fixe de 25cm à différentes distances entre deux capteurs, figure 3.11. L'expérimentation s'est déroulée sur la même dalle en béton recouverte de carrelage et les deux capteurs étaient fixés au sol par un scotch

CHAPITRE 3. CARACTÉRISATION DE LA SIGNATURE SISMIQUE D'UN PAS À L'INTÉRIEUR D'UN BÂTIMENT

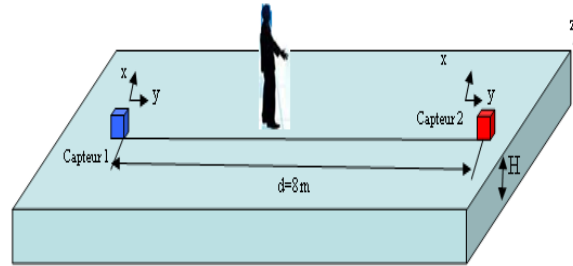


FIGURE 3.9 – Configuration expérimentale

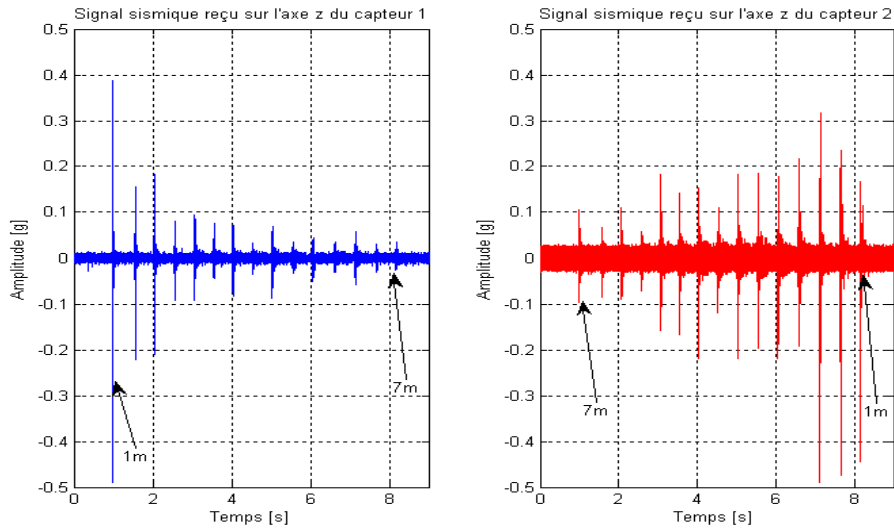


FIGURE 3.10 – Signal sismique d'une marche effectuée à partir du capteur 1 vers le capteur 2

double face. On note que la balle n'a pas la même signature vibratoire qu'un pas puisqu'elle n'a pas la même surface de contact et énergie transmise. Sa signature est plus courte en temps et plus large en bande fréquentielle qu'un pas. Toutefois, l'exploitation des signaux de la balle permettent au moins de donner une idée globale sur l'atténuation en fonction de la distance des vibrations dans le sol. On trace sur la figure 3.12, la moyenne (10 réalisations) du maximum d'amplitude du signal exprimé en g en fonction de la distance source capteur en mètre. On constate que le maximum d'amplitude des signaux décroît rapidement sur les quatre premiers mètres de la source, il passe de $0.8g$ à $0.2g$ sur l'axe vertical. Cette atténuation correspond à l'atténuation géométrique (en $1/\sqrt{d}$) et à l'atténuation par effet de dissipation de milieu. L'établissement des modes propre de la dalle en béton nécessite la

CHAPITRE 3. CARACTÉRISATION DE LA SIGNATURE SISMIQUE D'UN PAS À L'INTÉRIEUR D'UN BÂTIMENT

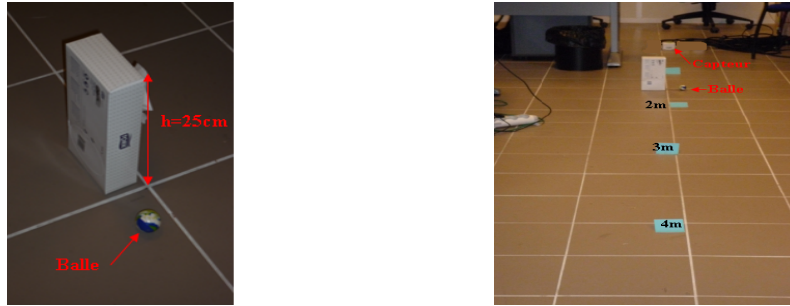


FIGURE 3.11 – Balle en caoutchouc de diamètre 3.5cm et de masse 30.5g (gauche), configuration expérimentale (droite)

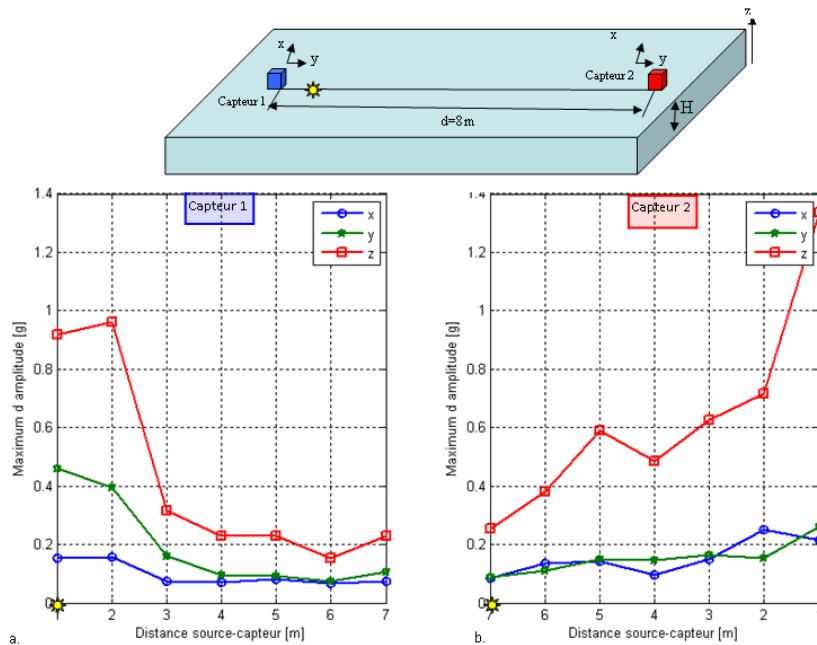


FIGURE 3.12 – Évolution du maximum d’amplitude du signal sismique d’une balle en fonction de la distance source-capteur. a. par rapport au capteur 1. b. par rapport au capteur 2.

superposition de plusieurs échos sur ses bords. Or la dalle est généralement assez grande ($> 10\text{m}$ par 10m) de sorte que l’atténuation importante ne permet pas la propagation des ondes jusqu’aux bords et leurs réflexions.

Pour conclure, les approches basées sur l’apprentissage ne sont pas bien adaptées au problème de localisation d’un pas à l’intérieur d’un bâtiment. D’une part, ces approches nécessitent le reproductibilité de la source or la

signature sismique d'un pas dépend de plusieurs paramètres extérieurs (style de marche, poids de la personne, ...). D'autre part, les approches de type modale nécessitent une faible atténuation, or l'atténuation dans le milieu de propagation étudié est assez importante et ne permet pas l'établissement des modes propres de la dalle. Dans la section suivante, on s'intéresse à l'étude de l'applicabilité des approches utilisant la structure vectorielle de l'onde de Rayleigh.

3.3 Peut-on utiliser la structure de l'onde sismique pour la localisation ?

Les approches de localisation de source sismique par l'étude de la structure vectorielle de l'onde sismique [section 2.1] supposent soit que le milieu est infini (volume) impliquant par la suite la propagation des ondes de volume P et S, soit que le milieu est semi-infini par rapport aux longueurs d'ondes propagées impliquant par la suite la propagation des ondes de surface (onde de Rayleigh) [section 1.2]. En appliquant ces techniques sur des signaux expérimentaux de pas effectués à l'intérieur du bâtiment sur une dalle en béton d'épaisseur 20cm , les résultats d'estimation de la direction d'arrivée n'étaient pas satisfaisants voire inexploitable [annexe A]. On s'est interrogé alors, dans ce paragraphe, sur la validité des hypothèses d'application de ces techniques pour une propagation à l'intérieur d'un bâtiment.

À l'intérieur des bâtiments le milieu considéré est généralement une dalle en béton d'épaisseur finie h (20 à 25 cm) et les longueurs d'ondes propagées λ suite à un pas sont généralement supérieures à 50cm (pour les fréquences $< 5\text{kHz}$, figure 3.8). Dans de telles conditions, le milieu de propagation peut être assimilé à une plaque ($h \ll \lambda$) et les ondes propagées à ces fréquences sont des ondes de plaque d'ordre zéro [section 1.3].

Expérimentalement, on peut vérifier que l'onde qui se propage à l'intérieur des bâtiments n'est pas une onde de Rayleigh en étudiant le mouvement des particules du sol. Dans cet objectif, on trace sur la figure 3.14 les hodogrammes des signaux sismiques d'un pas effectué à 5m d'un capteur triaxial selon la configuration donnée par la figure 3.13. L'axe z désigne l'axe vertical au sol, y l'axe de direction d'arrivée et x l'axe transversal. On trace les hodogrammes sur trois intervalles du temps : sans événement (en rouge), début d'un pas (en vert) et au milieu du signal d'un pas (en noir). Si l'onde reçue par le capteur est de type onde de Rayleigh, alors les graphes donnant S_z en fonction de S_y donneront des ellipses. La figure 3.14 ne montre pas des

CHAPITRE 3. CARACTÉRISATION DE LA SIGNATURE SISMIQUE D'UN PAS À L'INTÉRIEUR D'UN BÂTIMENT

ellipses. Par conséquent, l'utilisation des techniques de localisation basées sur l'hypothèse de propagation d'onde de Rayleigh n'est pas adaptée à nos signaux.

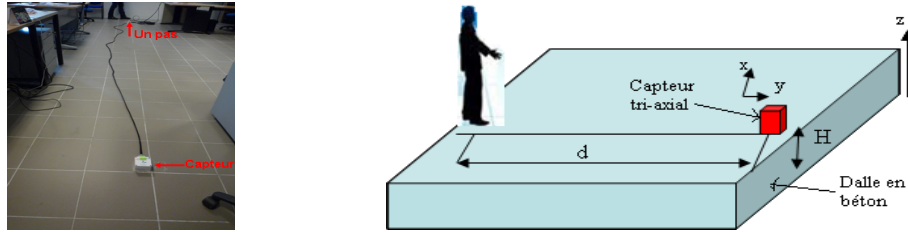


FIGURE 3.13 – Configuration expérimentale

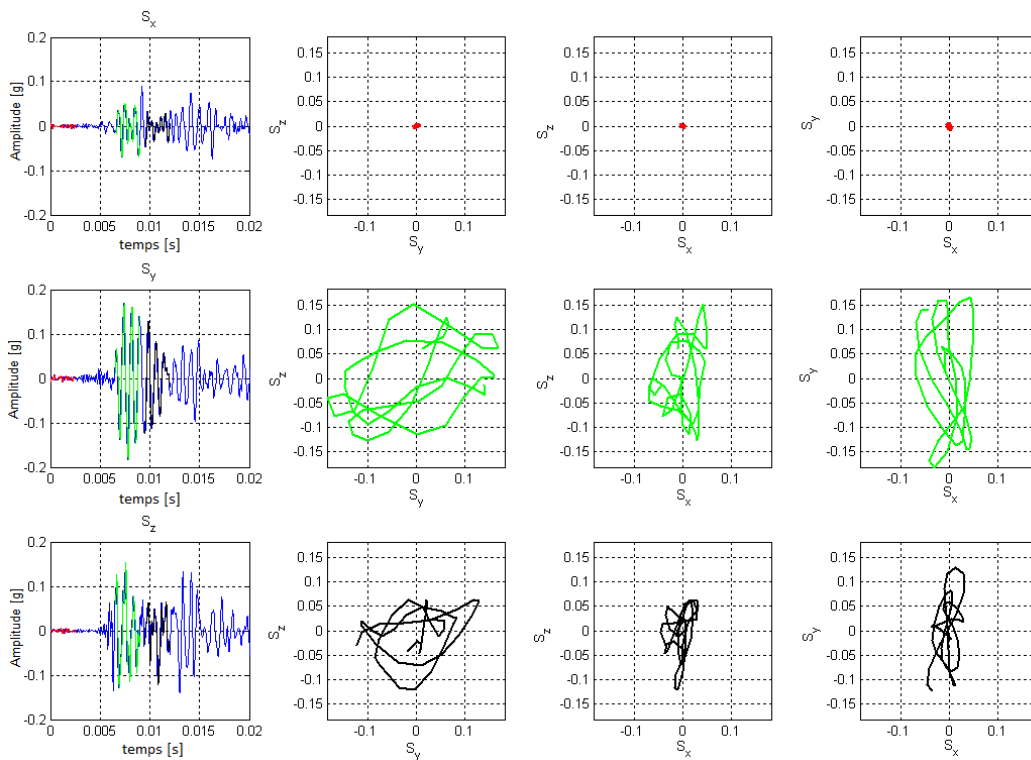


FIGURE 3.14 – Hodogramme sur trois intervalles du temps : sans événement (en rouge), début d'un pas (en vert) et au milieu du signal d'un pas (en noir). Les signaux ' S_x ', ' S_y ' et ' S_z ' d'un pas réalisé selon la figure 3.13 et reçus respectivement sur les axes ' x ', ' y ' et ' z ' du capteur.

Pour conclure, les approches basées sur la structure vectorielle des ondes

de Rayleigh ne sont pas adaptées au problème de localisation d'un pas à l'intérieur d'un bâtiment. Dans la section suivante, on s'intéressera alors à l'étude de l'applicabilité des approches basées sur une propagation à vitesse constante.

3.4 Quelle vitesse de propagation ?

Les approches de localisation à vitesse constante ont été beaucoup utilisées en télécommunication ou en acoustique dans l'air. Leur applicabilité au problème de la localisation d'un pas à partir des vibrations du sol repose essentiellement sur l'hypothèse d'une vitesse de propagation indépendante des positions de la source et des capteurs. Dans cette section, on discutera de cette hypothèse dans le cas de la propagation vibratoire d'un pas à l'intérieur d'un bâtiment.

Dans le cas de la propagation des ondes sismiques dans le sol, la vitesse dépend fortement du milieu de propagation notamment de ses caractéristiques géométriques (milieu infini, semi infini ou plaque), mécaniques (Coefficients de Lamé λ et μ) et physiques (densité ρ) [Chapitre 1]. En supposant une vitesse de propagation constante, une estimation de cette vitesse [RDNW01] peut être effectuée préalablement à partir de l'estimation de différence du temps d'arrivée du signal vibratoire d'une source contrôlée (dont on connaît la position) aux différents capteurs distribués. En effet, notons t_i le temps d'arrivée au capteur i , alors on peut écrire à vitesse constante c que :

$$t_i = \|\mathbf{p}_i - \mathbf{p}_s\|_2/c, \quad (3.1)$$

où $\mathbf{p}_s = [x \ y]^T$ et $\mathbf{p}_i = [x_i \ y_i]^T$ sont la position de la source et du capteur i respectivement. On note la distance entre le capteur i et la source par :

$$D_i = \|\mathbf{p}_s - \mathbf{p}_i\|_2. \quad (3.2)$$

La différence de trajet source-capteur i et source-capteur j est :

$$d_{ij} = D_i - D_j. \quad (3.3)$$

Le temps de retard entre deux capteurs i et j est égal à :

$$\begin{aligned} \tau_{ij} &= t_i - t_j, \\ &= \frac{1}{c} (D_i - D_j), \\ &= d_{ij}/c. \end{aligned} \quad (3.4)$$

La vitesse de propagation peut alors se calculer par :

$$c = \frac{d_{ij}}{\tau_{ij}} \quad (3.5)$$

L'estimation de la vitesse de propagation repose essentiellement sur l'estimation du temps d'arrivée ('Time Of Arrival TOA'). En fait, la variation relative sur l'estimation de la vitesse de propagation en fonction de la variation relative sur l'estimation du temps d'arrivée est donnée par :

$$\frac{\Delta c}{c} = \frac{\Delta \tau_{ij}}{\tau_{ij}}. \quad (3.6)$$

A titre d'exemple, si la vitesse de propagation est $c = 2000m/s$, une erreur sur l'estimation du temps d'arrivée de $\Delta \tau_{ij} = 1ms$ (soit 20 échantillons à $20kHz$) implique :

- pour une différence de trajets de $d_{ij} = 1m$, une erreur d'estimation de vitesse de propagation de $\Delta c = 4000m/s$.
- pour une différence de trajets de $d_{ij} = 10m$, une erreur d'estimation de vitesse de propagation de $\Delta c = 400m/s$.

3.4.1 Estimation du temps d'arrivée

Le temps d'arrivée (TOA) peut être défini comme étant le temps où quelques caractéristiques visibles du signal telles que l'amplitude et le contenu fréquentiel changent au cours de l'enregistrement. La figure 3.15 donne un exemple d'un signal sismique expérimental d'un pas et un zoom sur l'instant d'arrivée. On constate le changement de la structure du signal et de son amplitude à l'instant d'arrivée. Le problème est de détecter avec assez de précision cet instant d'arrivée du signal. La figure droite 3.15 permet d'affirmer que l'instant d'arrivée est entre les instants $45ms$ et $50ms$ et plus probablement à $48ms$ dans cet exemple. La précision sur l'estimation du temps d'arrivée dépend de plusieurs paramètres. D'après [ZZ69] la précision sur l'estimation du temps d'arrivée dépend essentiellement du rapport signal à bruit et de la bande de fréquence du signal enregistrée. Plus le rapport signal à bruit est important, plus la précision est bonne. Le niveau du bruit enregistré dépend du bruit sismique ambiant des systèmes vibratoires environnants, du bruit de la station d'acquisition et du bruit capteurs et fils. Par ailleurs, plus la largeur de la bande de fréquence du signal enregistré est importante, plus la précision est bonne. La bande de fréquence dépend des fréquences excitées par un pas, de l'atténuation du sol et de la bande passante du capteur. Plusieurs travaux de détection du signal sismique et d'estimation de TOA

CHAPITRE 3. CARACTÉRISATION DE LA SIGNATURE SISMIQUE D'UN PAS À L'INTÉRIEUR D'UN BÂTIMENT

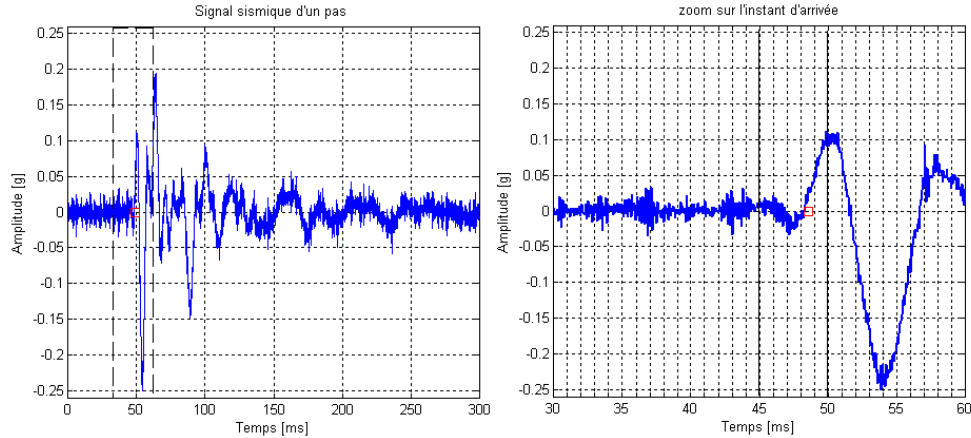


FIGURE 3.15 – Signal sismique d'un pas reçu sur un Colibry (gauche). zoom sur l'instant d'arrivée (droite)

ont été développés dans l'état de l'art pour la détection et la localisation des séismes [TK91, TPYM11, DS99, NT86]. Un résumé de ces méthodes fait le sujet de l'article [Cue]. Citons à titre d'exemple les méthodes d'analyse de l'énergie [BK87, All82, ES94], les méthodes auto régressives [KLPF90, SE99, LK99] et les méthodes utilisant les réseaux de neurones [DM95, DM97]. Notons que ces méthodes données dans l'état de l'art ont été développées pour la détection et l'estimation du temps d'arrivée des séismes à grande distance ($> Km$) et par suite l'erreur d'estimation du temps d'arrivée acceptable peut même être de l'ordre de quelques dizaines de millisecondes (erreur en distance de quelques dizaines de mètres à $1000m/s$).

Bien que le problème de la détection du signal sismique d'un pas ait été traité par plusieurs chercheurs dans le but de détecter la présence d'un intrus dans une zone à surveiller à l'extérieur des bâtiments [SCGP01, PSSG03b, PG04, Bla06, PL07, IVD07, SIMM09], le problème d'estimation du temps d'arrivée à partir du signal sismique d'un pas n'a pas été souvent abordé. Dans la suite, on propose de détailler deux méthodes d'estimation du temps d'arrivée proposées dans l'état de l'art (pour la propagation à grande distance) et de les tester par la suite sur des signaux expérimentaux de pas réalisés à l'intérieur de bâtiment afin de pouvoir, si possible, estimer une vitesse de propagation.

a. Estimation par détection de changement de la variance dans le signal [BN93] (TOA-CV)

L'algorithme consiste à détecter le changement de la variance du signal sur une fenêtre glissante avec un facteur d'oubli ('Geometric moving average

CHAPITRE 3. CARACTÉRISATION DE LA SIGNATURE SISMIQUE
D'UN PAS À L'INTÉRIEUR D'UN BÂTIMENT

GMA') [BN93], nommé dans la suite par TOA-CV algorithm. Considérant une suite de variables aléatoires indépendantes $(z_k)_k$ avec une densité de probabilité Gaussienne de moyenne nulle $p_\sigma(z)$ qui ne dépend que de σ (avant le temps de changement inconnu t_a , σ est égal à σ_0 et après le changement est égal à σ_1 tel que $\sigma_0 \neq \sigma_1$). Le problème consiste alors à détecter et estimer ce changement. On introduit la fonction de décision q_k qui prend en considération un facteur d'oubli [Rob59, HIN76]. En effet, dans le cas d'un signal non stationnaire et parce qu'on ne connaît pas l'instant de changement, il est intéressant de donner un poids élevé aux nouvelles observations et un poids plus faible aux plus anciennes.

$$q_k = \sum_{i=0}^{\infty} \gamma_i s_{k-i}, \quad (3.7)$$

où s est la log-vraisemblance donnée par :

$$s_k = \ln \frac{p_{\sigma_1}(z_k)}{p_{\sigma_0}(z_k)}, \quad (3.8)$$

et γ_i sont des poids exponentiels donnés par :

$$\gamma_i = \alpha(1 - \alpha)^i, \quad 0 < \alpha \leq 1. \quad (3.9)$$

Le coefficient α agit comme un facteur d'oubli. La fonction de décision q_k peut être réécrite avec une formule récursive comme suit :

$$q_k = (1 - \alpha)q_{k-1} + \alpha s_k, \quad q_0 = 0. \quad (3.10)$$

L'estimation du temps de changement (TOA) est obtenue par :

$$t_a = \min\{k : q_k \geq l\}, \quad (3.11)$$

où l est un seuil convenablement choisi.

Dans le cas Gaussien centré p_σ est donné par :

$$p_\sigma = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{y^2}{2\sigma^2}}. \quad (3.12)$$

La log-vraisemblance s_k est donnée par :

$$s_k = \ln \frac{\sigma_0}{\sigma_1} + \left(\frac{1}{\sigma_0^2} - \frac{1}{\sigma_1^2} \right) \frac{y_k^2}{2}. \quad (3.13)$$

On définit \tilde{q}_k par :

$$\tilde{q}_k = \frac{2\sigma_0^2\sigma_1^2}{\sigma_1^2 - \sigma_0^2} q_k - \frac{2\sigma_0^2\sigma_1^2}{\sigma_1^2 - \sigma_0^2} \ln \frac{\sigma_0}{\sigma_1}, \quad (3.14)$$

CHAPITRE 3. CARACTÉRISATION DE LA SIGNATURE SISMIQUE D'UN PAS À L'INTÉRIEUR D'UN BÂTIMENT

où q_k est donné par l'équation 3.10. Finalement, la forme récursive de la fonction de décision devient :

$$\tilde{q}_k = (1 - \alpha)\tilde{q}_{k-1} + \alpha y_k^2, \quad \tilde{q}_0 = 0. \quad (3.15)$$

L'algorithme TOA-CV nécessite le choix d'un seuil l sur la fonction de décision \tilde{q}_k et le choix d'un facteur d'oubli α .

Choix des paramètres : L'étude des poids exponentiels γ permet de fixer un choix sur α . Dans la figure 3.16, on trace $\gamma(t) = \alpha e^{t \ln(1-\alpha)} = \alpha e^{-t/\tau}$ en fonction du temps t ($t = nT_s$) pour $\alpha = 0.2$, où $\tau = \frac{-1}{\ln(1-\alpha)}$ est la durée caractéristique de la décroissance exponentielle. On définit un temps de la "déci-vie" $t_{1/10}$ correspondant à la durée pour laquelle l'amplitude des coefficients est divisée par 10. $t_{1/10} = \tau \ln 10 = \frac{-\ln 10}{\ln(1-\alpha)}$ est un indicateur sur la période sur laquelle est calculée la variance du signal dans la fonction de décision. Une grande période implique une fonction de décision q_k plus lisse au niveau du bruit mais aussi au niveau du début du signal, figure 3.17. Une petite période implique plus de fluctuation de la fonction de décision au niveau du début du signal mais aussi au niveau du bruit, figure 3.17. Le choix d'un seuil doit alors être adapté à la période fixée afin de permettre la bonne détection du TOA. On fixera dans la suite α à 0.5 soit alors $T_{1/10} = 0.16ms$ (10 échantillons pour $T_s = 0.05ms$). La période est alors courte et les fluctuations sont importantes et surtout rapides au niveau du début du signal. Par conséquent, on choisira un seuil élevé et égal à 5 fois le maximum de la fonction de décision calculée sur une séquence de bruit de 10ms.

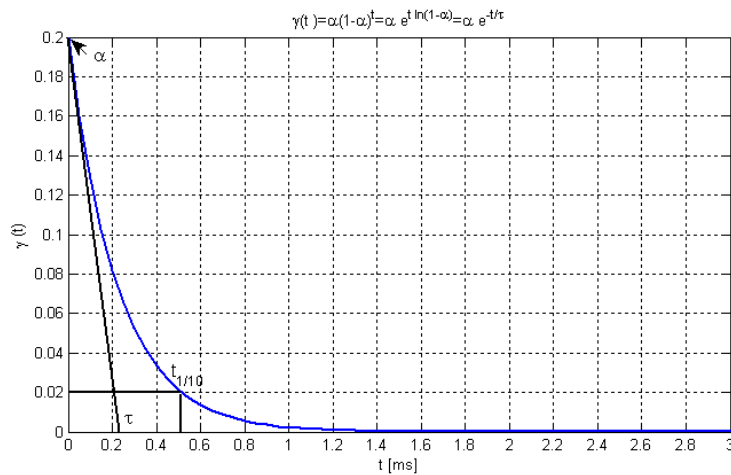


FIGURE 3.16 – Poids exponentiels $\gamma(t) = \gamma(nT_s)$ pour $\alpha = 0.2$.

CHAPITRE 3. CARACTÉRISATION DE LA SIGNATURE SISMIQUE
D'UN PAS À L'INTÉRIEUR D'UN BÂTIMENT

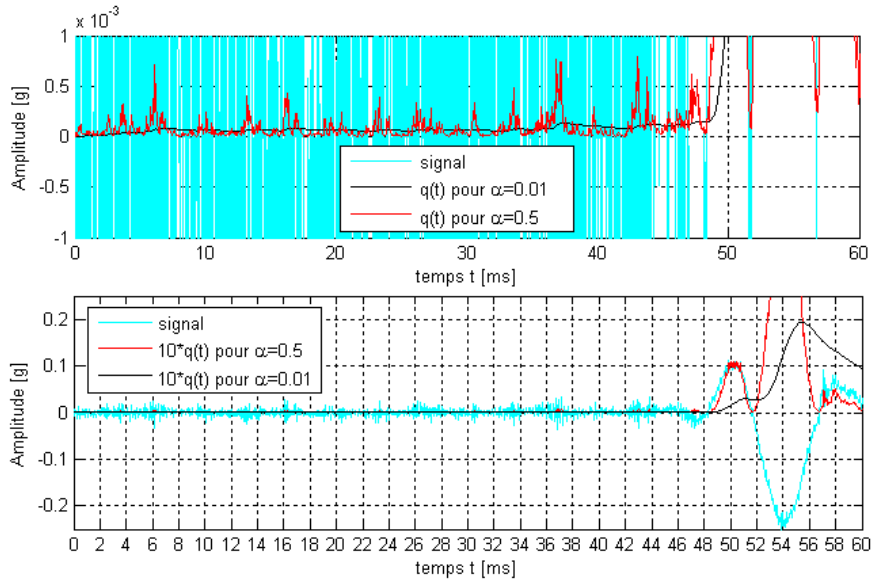


FIGURE 3.17 – En bleu : Zoom sur le signal de la figure 3.15 . En noir : fonction de décision \tilde{q} à $\alpha = 0.01$ ($t_{1/10} = 10ms$). En rouge : à $\alpha = 0.5$ ($t_{1/10} = 0.2ms$).

Résultats expérimentaux : Le résultat d'estimation du TOA du signal de la figure 3.15 est donné par la figure 3.18. Le TOA estimé est de $49.2ms$. A l'œil le TOA est $48.2ms$, soit une erreur de $1ms$ entre les deux méthodes. On ne dispose pas d'autre moyen de vérification de la valeur estimée. La vérification manuelle (à l'œil) a été souvent utilisée dans les travaux sismiques [Kup10] pour l'estimation de TOA du séisme.

CHAPITRE 3. CARACTÉRISATION DE LA SIGNATURE SISMIQUE
D'UN PAS À L'INTÉRIEUR D'UN BÂTIMENT

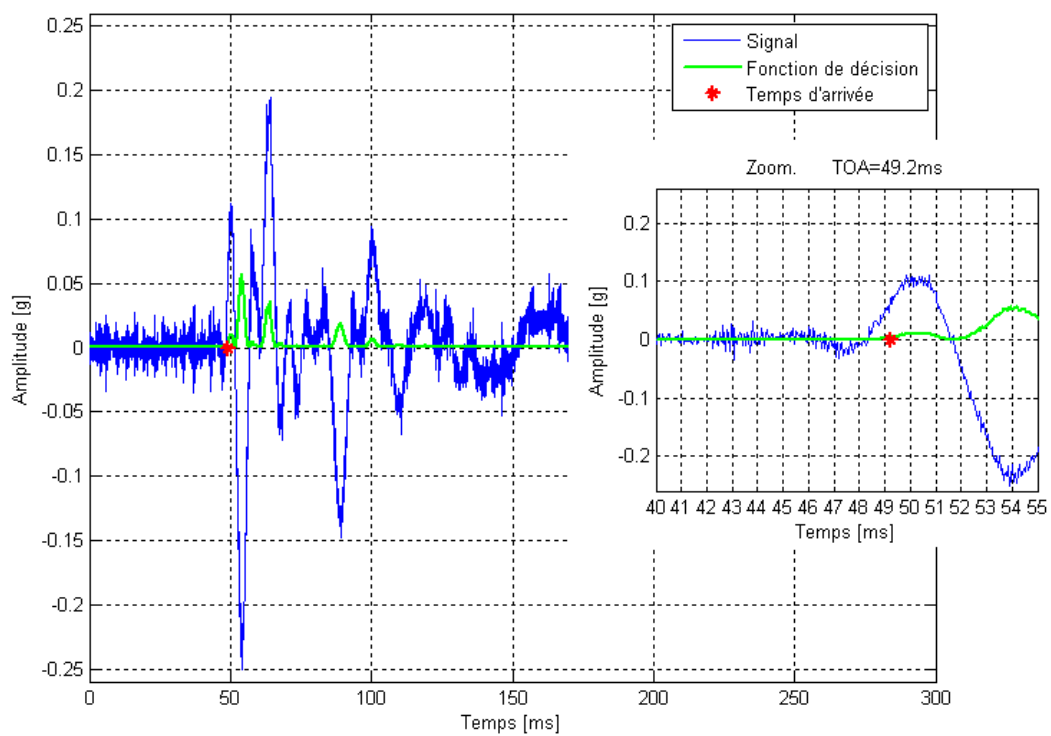


FIGURE 3.18 – Estimation de TOA par détection de changement de variance. $\alpha = 0.5$ et $l = 5 \max \tilde{q}(\text{bruit})$. Signal de la figure 3.15. $TOA_{cv} = 49.2\text{ms}$

b. Estimation par des statistiques sur le bruit [MS87] (TOA-SB)

L'algorithme d'estimation de TOA présenté dans [MS87] consiste tout d'abord à déterminer la variance σ_b du bruit sur une séquence de 200 points, soit une durée de $10ms$. Ensuite, le bruit étant supposé Gaussien, figure 3.19, un seuil à $\pm 3\sigma_b$ est fixé. Donc, si un point est au-dessus du seuil, il a une probabilité de 0.3% d'être un bruit. Le TOA estimé est le temps du premier point du signal qui dépasse le seuil et qui vérifie les conditions suivantes dans l'ordre :

- la séquence de $10ms$ de points consécutifs qui le suivent contient au moins 50% de points au-dessus du seuil.
- la séquence de $1ms$ de points consécutives qui le suivent contient au moins 75% de points au-dessus du seuil.
- la séquence de $0.5ms$ de points consécutives qui le suivent contient au moins 50% de points au-dessus du seuil.

Le choix de ces conditions était adapté aux signaux sismiques expérimentaux que nous avons enregistrés.

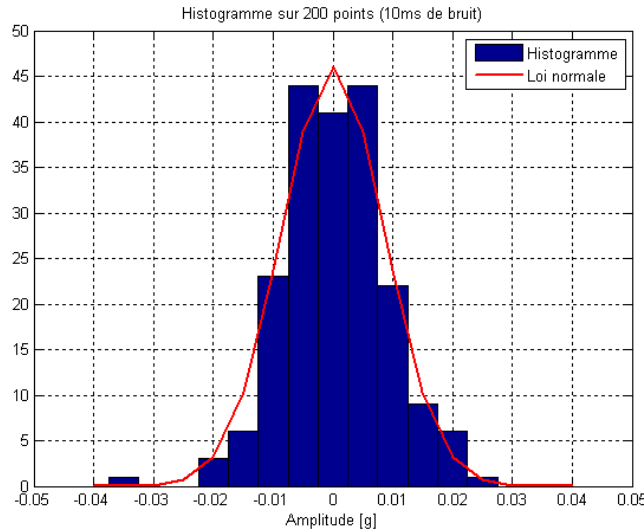


FIGURE 3.19 – Histogramme du bruit sur $10ms$ de la figure 3.15, et la loi Gaussienne de moyenne nulle et de variance $\sigma_b^2 = 7.5 \cdot 10^{-5}$

Résultats expérimentaux : Le résultat d'estimation de TOA du signal de la figure 3.15 est donné par la figure 3.20. Le TOA estimé est de $48.6ms$. À l'œil le temps d'arrivée est $48.2ms$, soit une erreur de $0.4ms$ entre les deux méthodes d'estimation de TOA.

CHAPITRE 3. CARACTÉRISATION DE LA SIGNATURE SISMIQUE
D'UN PAS À L'INTÉRIEUR D'UN BÂTIMENT

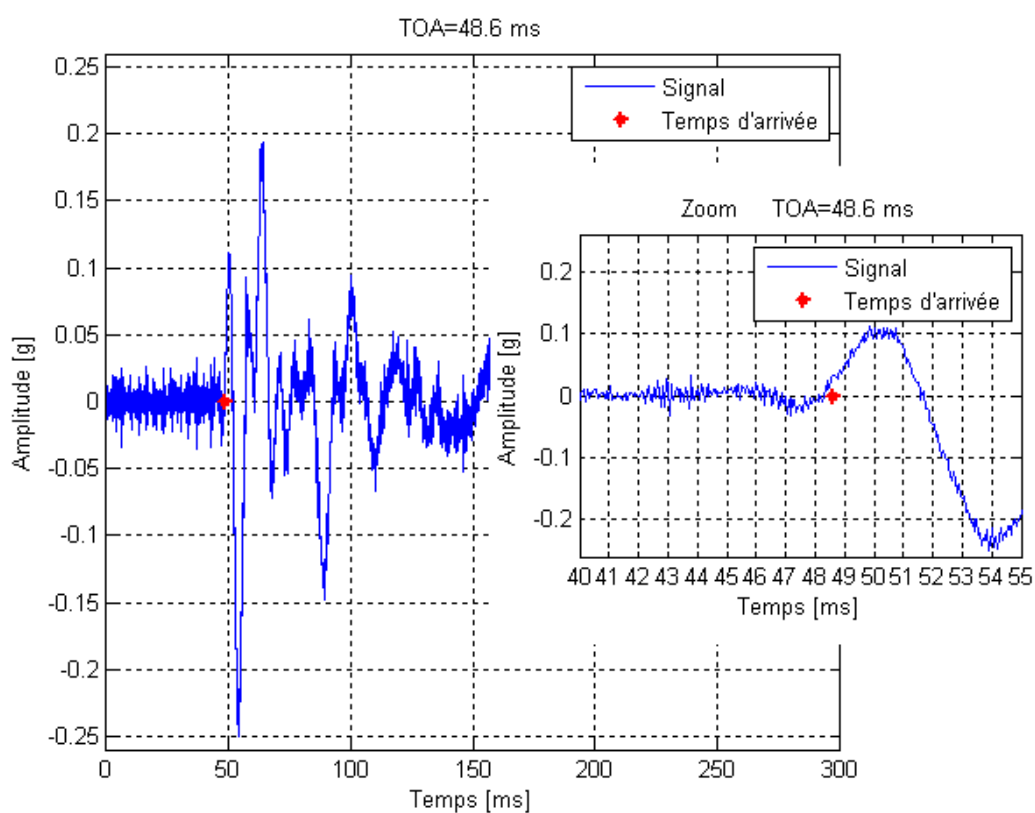


FIGURE 3.20 – Estimation du temps d'arrivée par des statistiques sur le bruit du pas de la figure 3.15. $TOA_{stat} = 48.6ms$

3.4.2 Estimation de la vitesse de propagation expérimentale à partir de différence du temps d'arrivée

On considère une dalle en béton d'épaisseur 20cm recouverte de carrelage, figure 3.21.

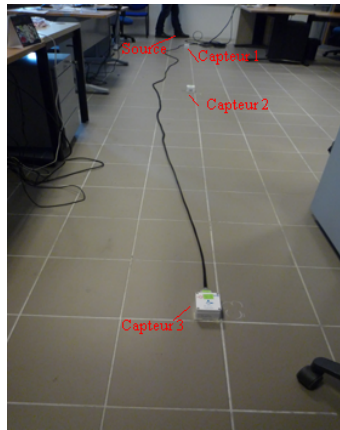


FIGURE 3.21 – Expérimentation au 1er étage d'un bâtiment.

La dalle est munie d'un repère orthonormé $(O, \mathbf{x}, \mathbf{y}, \mathbf{z})$. Trois accéléromètres de type SF3000L sont disposés sur la surface de la dalle tels que le capteur 1 soit placé à l'origine du repère, le capteur 2 et le capteur 3 sont placés à 3m et 6m respectivement du capteur 1 dans la direction de \mathbf{y} , figure 3.22. Tous les capteurs ont la même orientation : "z dirigé vers le haut". Les signaux sont enregistrés par la station d'acquisition DL850.YOKOGAWA.

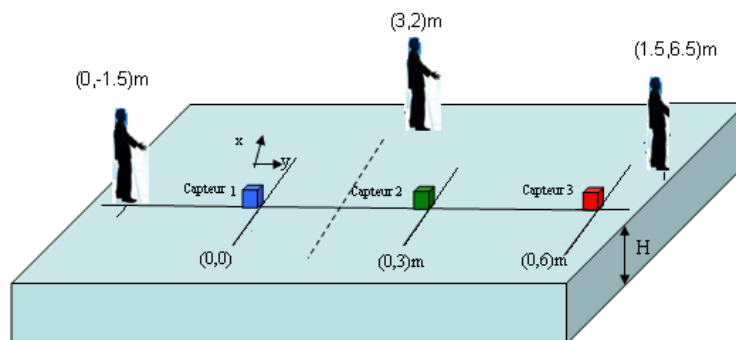


FIGURE 3.22 – Configuration expérimentale pour l'estimation de la vitesse de propagation.

CHAPITRE 3. CARACTÉRISATION DE LA SIGNATURE SISMIQUE D'UN PAS À L'INTÉRIEUR D'UN BÂTIMENT

On réalise plusieurs pas localisés dans une position donnée. On choisit trois positions ; la première est alignée avec le réseau de capteurs en la position $\mathbf{p}_s = (0, -1.5)m$, la deuxième est $\mathbf{p}_s = (3, 2)m$ et la troisième est $\mathbf{p}_s = (1.5, 6.5)m$. Dans ce qui suit, on cherche à estimer les différences du temps d'arrivée entre les capteurs et la vitesse de propagation de l'onde sismique. On utilisera les signaux collectés sur l'axe vertical des capteurs.

A titre d'exemple, pour une vitesse de $2000m/s$, une différence de trajet de $1m$ correspond à $1ms$ de différence du temps d'arrivée aux deux capteurs. Les signaux qu'on a utilisés sont échantillonnés à $20kHz$, ce qui signifie que les $1ms$ sont représentés par 20 échantillons.

Les résultats d'estimation de la vitesse de propagation $c = d_{ij}/\tau_{ij}$ à partir de l'estimation de la différence du temps d'arrivée par la méthode de détection par statistique sur le bruit (c^{SB}) et par la méthode de détection par changement de variance (c^{CV}) sont donnés dans les figures 3.23, 3.24 et 3.25.

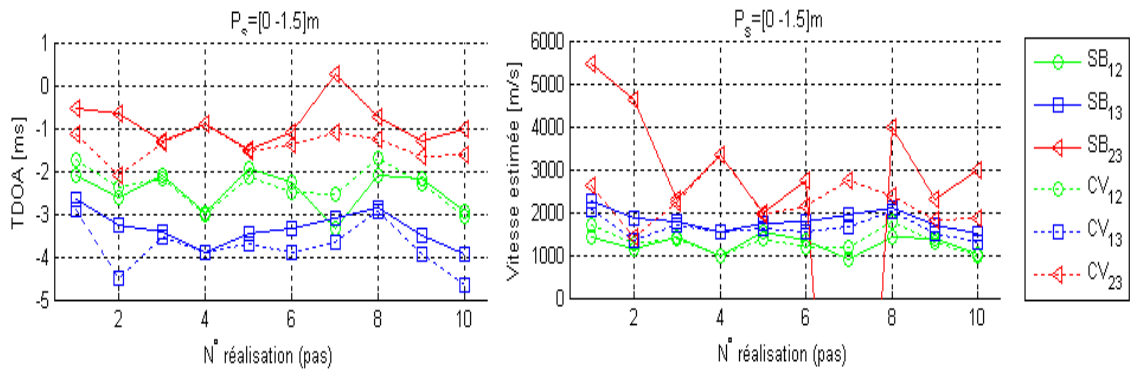


FIGURE 3.23 – Estimation de la vitesse de propagation et de la différence du temps d'arrivée (TDOA) à partir d'un couple de capteur $c = d_{ij}/\tau_{ij}$, pour 10 pas réalisés à la position $(0, -1.5)m$, configuration (figure 3.22), avec $d_{12} = -3m, d_{23} = -3m$ et $d_{13} = -6m$. SB_{ij} : estimation de TOA par la méthode de statistique sur le bruit pour le couple de capteurs (i, j) . CV_{ij} : estimation de TOA par la méthode de détection de changement de variance.

On constate d'après ces figures que la vitesse de propagation estimée est entre $500m/s$ et plus de $4500m/s$. Les valeurs estimées sont dispersées et ne permettent pas d'aboutir à une vitesse de propagation utilisable. Cette dispersion est due d'une part à l'erreur d'estimation du temps d'arrivée sur des faibles différences de distance à l'intérieur d'un bâtiment, et d'autre part à l'hypothèse de propagation à une vitesse constante qui n'était pas justifiée pour notre milieu de propagation. Le chapitre suivant aura pour objectif de vérifier la validité de cette hypothèse dans un milieu assimilé à une plaque

CHAPITRE 3. CARACTÉRISATION DE LA SIGNATURE SISMIQUE D'UN PAS À L'INTÉRIEUR D'UN BÂTIMENT

mince en béton.

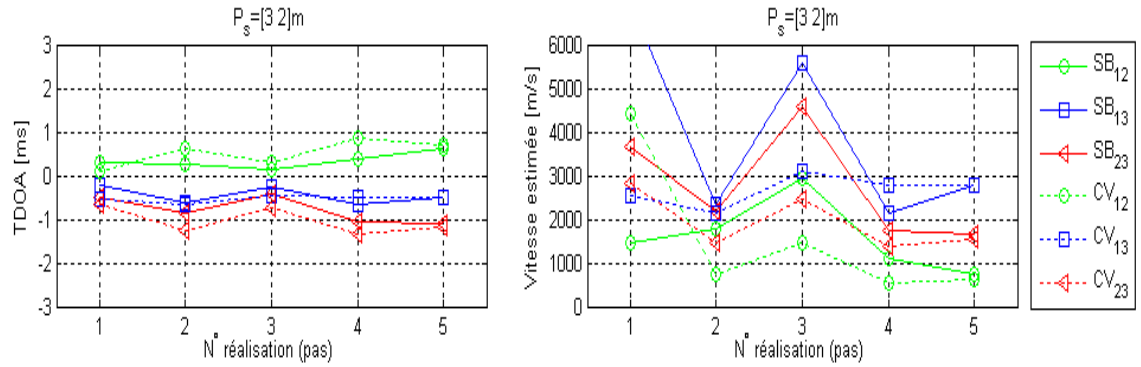


FIGURE 3.24 – Estimation de la vitesse de propagation et de la différence du temps d'arrivée (TDOA) à partir d'un couple de capteur $c = d_{ij}/\tau_{ij}$, pour 5 pas réalisés à la position $(3, 2)m$, configuration (figure 3.22), avec $d_{12} = 0.44m, d_{23} = -1.4m$ et $d_{13} = -1.83m$. SB_{ij} : estimation de TOA par la méthode de statistique sur le bruit pour le couple de capteurs (i, j) . CV_{ij} : estimation de TOA par la méthode de détection de changement de variance.

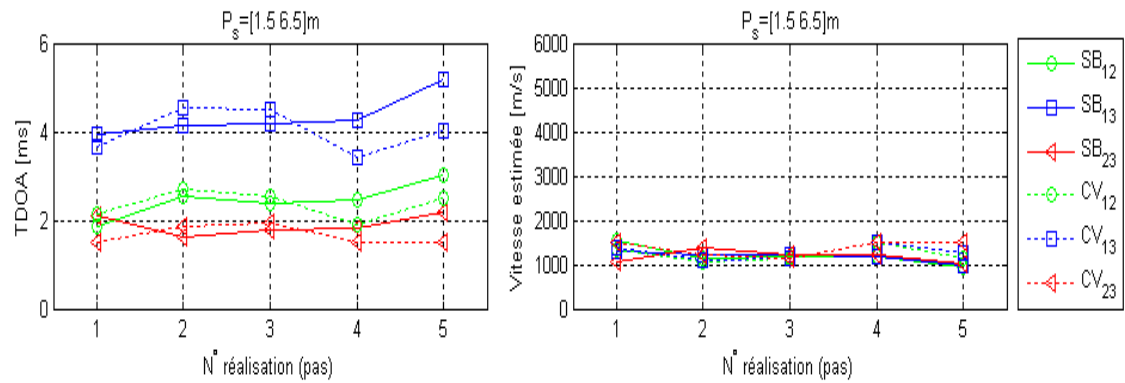


FIGURE 3.25 – Estimation de la vitesse de propagation perçue et de la différence du temps d'arrivée (TDOA) à partir d'un couple de capteur $c = d_{ij}/\tau_{ij}$, pour 5 pas réalisés à la position $(1.5, 6.5)m$, configuration (figure 3.22), avec $d_{12} = 2.86m, d_{23} = 5m$ et $d_{13} = 2.22m$. SB_{ij} : estimation de TOA par la méthode de statistique sur le bruit pour le couple de capteurs (i, j) . CV_{ij} : estimation de TOA par la méthode de détection de changement de variance.

Pour conclure, les techniques de localisation à vitesse constantes ne sont pas adaptées pour une localisation à faibles différences de trajets et à des vitesses de propagation élevées. Les résultats expérimentaux d'estimation de

vitesse de propagation ne sont pas exploitables et mettent en doute l'hypothèse de propagation à vitesse constante des ondes sismiques à l'intérieur des bâtiments. Le chapitre suivant aura pour objectif de vérifier théoriquement la validité de cette hypothèse dans nos conditions d'étude (à l'intérieur du bâtiment).

3.5 Conclusion

L'impact d'un pas sur le sol génère des ondes sismiques vectorielles qui se propagent dans le sol. La durée temporelle pendant laquelle le signal sismique est au-dessus du bruit ambiant est généralement de quelques dizaines de millisecondes ($< 200ms$) et elle peut varier en fonction des réflexions et des trajets multiples suivis par l'onde pour atteindre le capteur. L'amplitude du signal sismique d'un pas est plus importante sur l'axe vertical au sol. Elle dépend fortement de la puissance transmise par le choc d'un pas sur le sol, des chaussures portées et du type de recouvrement de sol. L'étude de l'atténuation a montré que le signal d'un pas s'atténue rapidement sur les quatre premiers mètres. Ces différentes constatations font que les approches de localisation par apprentissage ne sont pas bien adaptées pour la localisation d'un pas à l'intérieur d'un bâtiment.

L'étude fréquentielle et temporelle des signaux expérimentaux des pas a permis de conclure que les ondes propagées dans le sol ne sont pas des ondes de Rayleigh dans la gamme de fréquences inférieures à $5kHz$. L'exploitation de la structure vectorielle elliptique de ces ondes n'est alors pas possible à l'intérieur d'un bâtiment où le milieu de propagation peut être assimilé à une plaque.

L'exploitation des signaux expérimentaux pour l'estimation d'une vitesse à partir de l'estimation de différence du temps d'arrivée a montré des valeurs dispersées entre $500m/s$ et $4500m/s$. Ces résultats d'estimation d'une vitesse de propagation ne sont donc pas exploitables et mettent en doute l'hypothèse de propagation à vitesse constante des ondes sismiques à l'intérieur des bâtiments. Le chapitre suivant aura pour objectif de vérifier la validité de cette hypothèse dans nos conditions d'étude (à l'intérieur du bâtiment) et répondra aux questions suivantes : a-t-on la même vitesse de propagation perçue pour toutes les positions dans une salle ? Si non, comment dépend-t-elle des positions de la source et des capteurs ? Dépend-t-elle des fréquences générées et propagées ?

Chapitre 4

Vitesse de propagation perçue dans une dalle en béton

Sommaire

4.1	Équation de propagation dans une plaque mince .	52
4.2	Étude de la vitesse perçue : approximation d'intégrale	55
4.3	Étude de la vitesse perçue : approximation de la phase stationnaire	57
4.4	Étude de la vitesse perçue : résultats expérimentaux	62
4.5	Conclusion	64

Une dalle en béton à l'intérieur d'un bâtiment peut être assimilée à une plaque mince homogène et amortie. Les ondes élastiques se propageant dans un tel milieu sont essentiellement des ondes de Lamb transversales d'ordre zero A_0 . Les diverses composantes de l'onde A_0 se propagent à différentes vitesses à cause de la dispersion [chapitre 1]. L'objectif de ce chapitre est d'étudier l'influence de la dispersion et de l'atténuation sur la vitesse de propagation perçue à différentes distances source-capteur.

A partir de l'étude de l'équation de propagation des ondes élastiques transversales dans une plaque mince, on établira dans le paragraphe 4.1 l'expression du champ de déplacement à une distance et à un temps donné. Dans le paragraphe 4.2, on estimera par résolution numérique la variation de la vitesse de propagation perçue en fonction de la distance source-capteur. Ensuite dans les paragraphes 4.3 et 4.4 on proposera d'établir l'expression approchée de la vitesse de propagation perçue en fonction de la distance source-capteur moyennant la technique de la phase stationnaire. Finalement, on conclura sur

la dépendance de la vitesse de propagation perçue par rapport à la distance source-capteur.

4.1 Équation de propagation dans une plaque mince

On considère une plaque mince d'épaisseur h et infiniment étendue dans le plan (x, y) . L'équation d'onde de flexion A_0 dans un milieu non amortie est donnée par [LL67, RD96]

$$\rho h \frac{\partial^2}{\partial t^2} u(x, y, t) + D \Delta^2 u(x, y, t) = f \quad (4.1)$$

où u est le déplacement transversal, $D = E \frac{h^3}{12(1-\sigma^2)}$ est le module de rigidité de la plaque, E est le module Young, σ est le coefficient de Poisson, ρ est la masse volumique, $\Delta = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2}$ est l'opérateur de Laplace et f est une force source. L'équation 4.1 correspond à l'équation ordinaire de flexion d'une plaque. Elle est satisfaite pour une plaque mince dont l'épaisseur h est inférieure au moins à un sixième des longueurs d'ondes propagées ($h < \lambda/6$). Un terme de correction peut être ajouté à l'équation dans le cas d'une plaque épaisse pour présenter l'effet de cisaillement (ce cas ne sera pas traité dans la présente étude).

L'amortissement mécanique interne du milieu peut être pris en compte en introduisant une force visqueuse. Dans le cas de modèle de Kelvin-voigt [RD96, CHP10], cette force est proportionnelle à la dérivée de la contrainte. L'équation (4.1) s'écrit alors

$$\rho h \frac{\partial^2}{\partial t^2} u(x, y, t) + D \left(1 + \vartheta \frac{\partial}{\partial t} \right) \Delta^2 u(x, y, t) = f \quad (4.2)$$

On en déduit la relation de dispersion ¹

$$-\omega^2 + a^2 (1 - j\vartheta\omega) k^4 = 0 \quad (4.3)$$

où $\eta = \vartheta\omega$ est le facteur de perte (sans unité) qui caractérise l'effet d'amortissement et a est une constante ² qui caractérise la dalle en béton exprimée par $\sqrt{\frac{D}{\rho h}}$ [$m^2 \cdot s^{-1}$]. L'équation (4.3) implique

$$k(\omega) = \sqrt{\frac{\omega}{a}} (1 - j\vartheta\omega)^{-\frac{1}{4}}, \quad (4.4)$$

1. Onde plane : $u(x, y, t) = u(d, t) = u_m e^{j(kd - \omega t)}$ où d est la distance à la source.

2. Remarque : $a = \frac{c_{s0}}{2\sqrt{3}} h = \sqrt{\frac{D}{\rho h}}$, dans l'équation (1.7).

et pour des faibles valeurs du facteur de perte ($\vartheta\omega \ll 1$) on a

$$k(\omega) \simeq \sqrt{\frac{\omega}{a}} \left(1 + \frac{1}{4}j\vartheta\omega \right) = k_R(\omega) + jk_I(\omega). \quad (4.5)$$

où k_R et k_I sont respectivement la partie réelle et imaginaire du nombre d'onde k . k_I est appelé coefficient d'atténuation de l'onde dans la direction de propagation. L'effet de l'amortissement induit une atténuation qui dépend de la fréquence propagée ($k_I(\omega)$). L'effet de la dispersion ($k_R(\omega)$) induit quant à lui une dépendance fréquentielle de la vitesse de groupe c_g donnée par

$$c_g = \frac{\partial\omega}{\partial k_R} \simeq 2\sqrt{a}\sqrt{\omega}. \quad (4.6)$$

Dans un milieu isotrope le déplacement transversal $u(x, y, t)$ ne dépend que de la distance source-capteur d . Afin d'interpréter les observations expérimentales, nous proposons de développer l'expression du champ de déplacement dans l'espace (ω, k) . On se place dans l'hypothèse d'un milieu invariant suivant une direction. Le modèle peut ainsi être développé analytiquement sans grandes difficultés, bien que les ondes de plaques soit associé à un champ de déplacement à deux dimensions nous supposons que l'interprétation physique des phénomènes obtenus à une dimension reste valable. Cette hypothèse forte mériterait d'être approfondie. Néanmoins, nous nous limiterons à ces développements à une dimension pour lesquels nous avons observé une bonne adéquation entre les mesures et le modèle comme cela est illustré dans les sections qui suivent. Une hypothèse supplémentaire importante est l'hypothèse de faible dissipation ($\vartheta\omega \ll 1$) qui conduit à proposer l'intégrale (4.8) traduisant la décomposition du champ de déplacement en un ensemble d'ondes progressives.

$$u(d, t) \simeq \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int U(0, \omega) e^{j[k(\omega)d - \omega t]} d\omega \quad (4.7)$$

$$\simeq \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int U(0, \omega) e^{-k_I(\omega)d} e^{j[k_R(\omega)d - \omega t]} d\omega \quad (4.8)$$

où $U(0, \omega)$ est le spectre initial de l'onde $u(0, t)$. Pour la suite du développement, on supposera qu'il est blanc. Cette hypothèse simplifiée permettra de valider les résultats expérimentaux par des modèles analytiques simples.

Dans ce qui suit, on étudiera la variation de la vitesse de propagation perçue en fonction de la distance source-capteur par deux méthodes. La première méthode consiste à approcher l'intégrale dans l'équation (4.8) par une somme

discrète pour calculer le déplacement transversal en fonction du temps pour une distance source-capteur donnée. En appliquant ensuite un seuil sur le déplacement calculé, on détectera alors l'instant d'arrivée et ainsi la vitesse de propagation perçue à cette distance. La seconde méthode utilise la technique de la phase stationnaire pour évaluer l'enveloppe du signal dans l'équation (4.8), déterminer le temps d'arrivée et par suite la relation entre la vitesse de propagation perçue et la distance source-capteur.

On considère une dalle en béton d'épaisseur $h = 20\text{cm}$, de module de Young $E = 24.10^9\text{N/m}^2$, de masse volumique $\rho = 2500\text{Kg/m}^3$ et de coefficient de Poisson $\sigma = 0.2$, [CHP10] dans ces conditions a est de l'ordre de $183\text{m}^2/\text{s}$. Ces valeurs indiquées sont utiles à titre d'exemple, parce que les propriétés mécaniques d'un matériau comme le béton sont connues pour dépendre fortement de leur composition et la façon dont ils sont fabriqués. Il est également important de noter que l'expression dans l'équation (4.8) n'est pas valide à courtes distances source-capteur ($\sim 1\text{m}$) pour une plaque d'épaisseur $h \sim 20\text{cm}$. En effet, l'approximation d'une plaque mince ($h < \lambda/6$) n'est pas valable à ces distances parce que le signal est dominé par des composantes hautes fréquences, ce qui équivaut à des courtes longueurs d'ondes ($\lambda < 1\text{m}$). A titre d'exemple, pour $h = 20\text{cm}$ et pour une vitesse de propagation de 2400m/s , $\lambda > 6h$ est équivalent à $f < c/6h$ et donc $f < 2000\text{Hz}$.

Dans l'état de l'art, le facteur de perte du béton ($\eta = \vartheta\omega$) peut prendre des valeurs allant de 10^{-3} à 10^{-2} dans la gamme de fréquences audio [CHP10]. Sans perdre de généralité, on choisira $\vartheta = 10^{-5}\text{s}$ pour $\omega < 10^4\text{Hz}$. Le rapprochement ($\vartheta\omega \ll 1$) est alors satisfait pour un milieu en béton. Pour étudier l'effet d'amortissement et de dispersion du milieu, on considère que le champ de déplacement émis par la source est une fonction Dirac, $U(0, \omega_0) = 1$ quelque soit ω_0 .

4.2 Étude de la vitesse perçue : approximation d'intégrale

Pour simuler le signal reçu $u(d, t)$ à une distance d de la source, l'intégrale dans l'équation (4.8) peut être approchée par une somme discrète comme :

$$u(d, t) \simeq \frac{\omega_m}{n\sqrt{2\pi}} \sum_{i=0}^{n-1} e^{-k_I \left(\frac{i\omega_m}{n}\right) d} \cos \left(k_R \left(\frac{i\omega_m}{n}\right) d - \frac{i\omega_m t}{n} \right), \quad (4.9)$$

CHAPITRE 4. VITESSE DE PROPAGATION PERÇUE DANS UNE DALLE EN BÉTON

où $\omega_m = 2\pi f_{max}$. f_{max} est égale à $10kHz$ et $n = 2048$ pour cette simulation³. Il est à noter que l'approximation de l'équation (4.9) n'est pas valable pour les courtes distances source-détecteur ($d < 3m$), car à ces distances, le signal est dominé par les composantes de haute fréquence qui ne sont pas pris en compte par la somme finie dans l'équation (4.9).

La figure 4.1 montre le signal simulé pour $d = 5, 10, 15, 20m$. L'axe de l'amplitude est en unité arbitraire. Le temps d'arrivée peut être détecté par

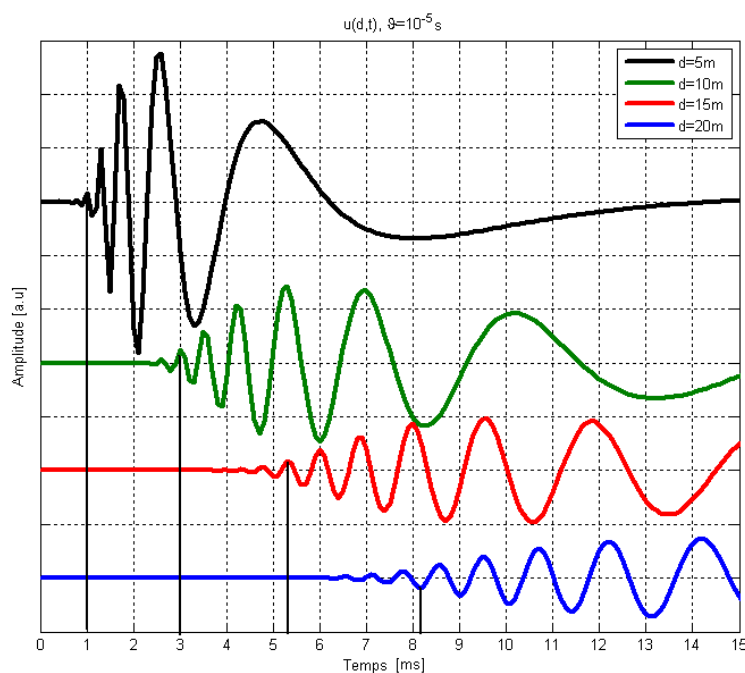


FIGURE 4.1 – Signal simulé reçu à une distance $d = 5, 10, 15, 20m$ de la source (Dirac).

un seuil Δ sur l'amplitude du signal. Le choix du seuil est arbitraire dans la figure 4.2.

La figure 4.2.a représente la variation du temps d'arrivée (t_a) en fonction de la distance source-capteur (d). La figure 4.2.a montre aussi que cette variation de TOA en fonction de la distance n'est pas linéaire et par suite la vitesse de propagation perçue n'est pas constante. En fait, si la vitesse de propagation perçue était constante, la variation de TOA en fonction de la distance source-capteur sera linéaire (la figure 4.2.a montre aussi un exemple

³. Les résultats de simulation ne varient pas significativement pour des valeurs de n plus grandes que 2048.

CHAPITRE 4. VITESSE DE PROPAGATION PERÇUE DANS UNE DALLE EN BÉTON

pour $c = 1000\text{m/s}$ et $c = 5000\text{m/s}$).

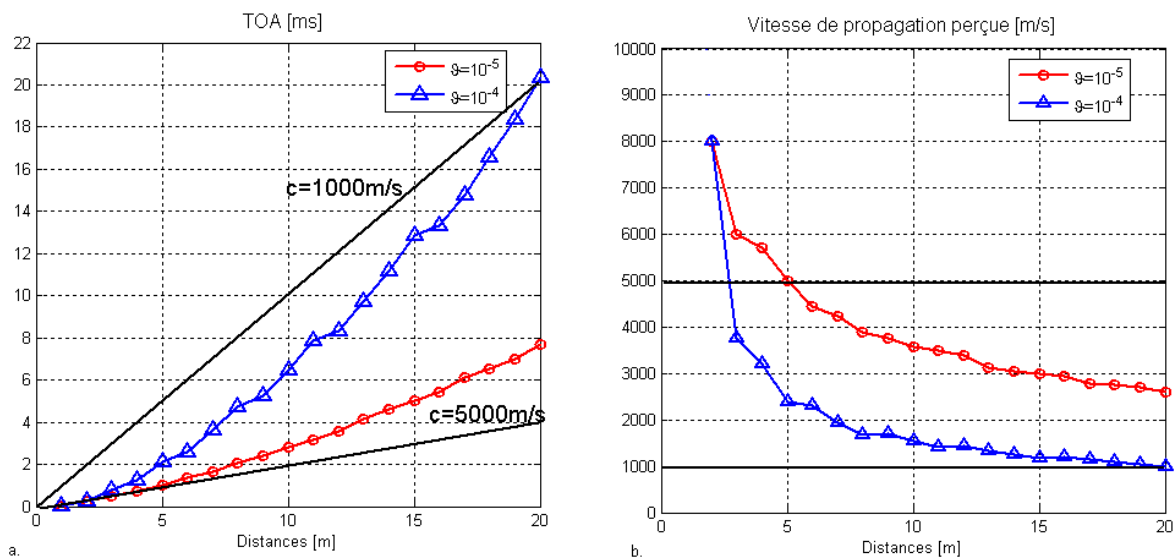


FIGURE 4.2 – Effet de l'atténuation et de la dispersion sur la détection de temps d'arrivée (TOA) (figure de gauche) et la vitesse de propagation perçue en fonction de la distance source capteur (figure de droite).

La vitesse de propagation perçue c_p définie par :

$$c_p(d) = \frac{d}{t_a(d)}, \quad (4.10)$$

dépend de la distance source-capteur (ce qui n'est pas le cas dans l'air par exemple). Toutefois l'ordre d'arrivée du signal aux capteurs est respecté. En effet, la vitesse de propagation perçue décroît en s'éloignant de la source, figure 4.2.b. Par suite, pour deux capteurs placés tels que le premier est plus proche de la source k par rapport au deuxième, on peut écrire :

$$d_{k1} < d_{k2} \quad \Rightarrow \quad c(d_{k1}) > c(d_{k2}), \quad (4.11)$$

où d_{ki} est la distance entre la source et le capteur i , $c(d_{ki})$ est la vitesse de propagation perçue par le capteur i . On obtient alors :

$$t_{k1}(d_{k1}) = \frac{d_{k1}}{c(d_{k1})} < t_{k2}(d_{k2}) = \frac{d_{k2}}{c(d_{k2})}, \quad (4.12)$$

où t_{ki} est le temps d'arrivée du signal au capteur i . Le temps d'arrivée détecté au capteur le plus proche de la source est alors le plus faible.

$$d_{k_1} < d_{k_2} \Rightarrow t_{k_1} < t_{k_2}. \quad (4.13)$$

Bien que l'approximation par l'équation (4.9) permet la démonstration du comportement de la vitesse de propagation perçue des ondes dans une plaque mince en fonction de la distance source-capteur, le niveau d'approximation et sa nature ne permettent pas d'extraire une relation analytique entre cette vitesse perçue et la distance de propagation. Pour approcher l'expression de la vitesse comme une fonction de la distance source-capteur, on exploitera la méthode d'approximation de la phase stationnaire [RD96] dans le paragraphe suivant.

4.3 Étude de la vitesse perçue : approximation de la phase stationnaire

La méthode de la phase stationnaire permet d'approcher l'intégrale de l'équation (4.8) pour la propagation d'un paquet d'ondes dans le milieu. Cela conduit à l'identification de la fréquence centrale du paquet d'onde en fonction de la distance d et du temps t [RD96]. Cette approximation est plus précise au voisinage du maximum du signal. Le champs de déplacement $u(d, t)$ peut s'écrire comme suit :

$$u(d, t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int U(0, \omega) e^{-k_I(\omega)d} e^{j[k_R(\omega)d - \omega t]} d\omega = \int F(\omega) e^{-j\Phi(\omega)} d\omega, \quad (4.14)$$

où

$$F(\omega) = \frac{U(0, \omega)}{\sqrt{2\pi}} e^{-k_I(\omega)d}, \quad (4.15)$$

$$\Phi(\omega) = -[k_R(\omega)d - \omega t]. \quad (4.16)$$

La méthode de la phase stationnaire consiste à développer $\Phi(\omega)$ en série de Taylor de second ordre au voisinage de ω_0 où la phase est stationnaire (c.-à-d. $\Phi'(\omega_0) = 0$) :

$$\Phi(\omega) \simeq \Phi(\omega_0) + \frac{1}{2} \Phi''(\omega_0) (\omega - \omega_0)^2, \quad (4.17)$$

et approximant $F(\omega)$ par $F(\omega_0)$, l'intégrale de l'équation (4.14) est approchée alors par :

$$u(d, t) \simeq F(\omega_0) e^{-j\Phi(\omega_0)} \sqrt{\frac{2\pi}{j|\Phi''(\omega_0)|}}, \quad (4.18)$$

$$\simeq \frac{U(0, \omega_0)}{\sqrt{d|k_R''(\omega_0)|}} e^{-k_I(\omega_0)d} e^{j(k_R(\omega_0)d - \omega_0 t + \frac{\pi}{4})}. \quad (4.19)$$

CHAPITRE 4. VITESSE DE PROPAGATION PERÇUE DANS UNE DALLE EN BÉTON

Dans notre cas d'étude, le point ω_0 de phase stationnaire $\Phi'(\omega_0) = 0$ est donné par :

$$\omega_0 = \left(\frac{d}{2\sqrt{at}} \right)^2. \quad (4.20)$$

L'enveloppe du signal est calculée comme suit :

$$\begin{aligned} A(d, t) &= \frac{U(0, \omega_0)}{\sqrt{d|k_R''(\omega_0)|}} e^{-k_I(\omega_0)d} = 2U(0, \omega_0) a^{\frac{1}{4}} d^{-\frac{1}{2}} \omega_0^{\frac{3}{4}} e^{-\frac{\vartheta \omega_0^{\frac{3}{2}} d}{4\sqrt{a}}}, \\ &= \frac{U(0, \omega_0)}{\sqrt{2a}} \frac{d}{t^{3/2}} e^{-\frac{\vartheta}{32a^2} \frac{d^4}{t^3}}. \end{aligned} \quad (4.21)$$

On souhaite établir la relation entre la vitesse de propagation perçue et la distance source-capteur. L'approche proposée consiste à étudier l'évolution du maximum de l'enveloppe dans le temps et dans l'espace (en fonction de la distance source-capteur d). Le maximum de l'enveloppe du signal satisfait $\frac{\partial A}{\partial d} = 0$, alors :

$$1 - 4 \frac{\vartheta}{32a^2 t^3} d^4 = 0. \quad (4.22)$$

Le maximum de l'enveloppe du signal est localisé à chaque instant t à la distance d de la source tel que

$$d = \left[\frac{8a^2}{\vartheta} t^3 \right]^{\frac{1}{4}} \quad (4.23)$$

On déduit alors que le temps d'arrivée du maximum à chaque distance d est

$$t = \left[\frac{\vartheta}{8a^2} d^4 \right]^{\frac{1}{3}}. \quad (4.24)$$

La vitesse de propagation perçue est alors calculée par

$$c_p = \frac{d}{t} = \frac{d}{\left[\frac{\vartheta}{8a^2} d^4 \right]^{\frac{1}{3}}} = \left[\frac{8a^2}{\vartheta d} \right]^{\frac{1}{3}}. \quad (4.25)$$

L'équation (4.25) montre que la vitesse de propagation perçue dépend de la distance source-capteur et qu'elle varie en $(1/d)^{1/3}$. En outre, elle permet

CHAPITRE 4. VITESSE DE PROPAGATION PERÇUE DANS UNE DALLE EN BÉTON

d'affirmer que la vitesse de propagation perçue diminue lorsque la distance source-capteur augmente. Ces résultats renforcent ceux du paragraphe 4.2, qui ont été obtenus par une approximation numérique de l'intégrale (4.8).

L'amplitude de l'enveloppe $A(d, t)$ donnée par l'équation (4.21) est représentée dans la figure 4.3 dans les conditions où $a = 183$ et $\vartheta = 10^{-5}$ s. La figure 4.3 montre aussi la trajectoire en temps et en espace effectuée par le maximum de l'enveloppe du signal (ligne épaisse) ainsi que par un point défini par un seuil $l = 200$ sur l'enveloppe (ligne fine).

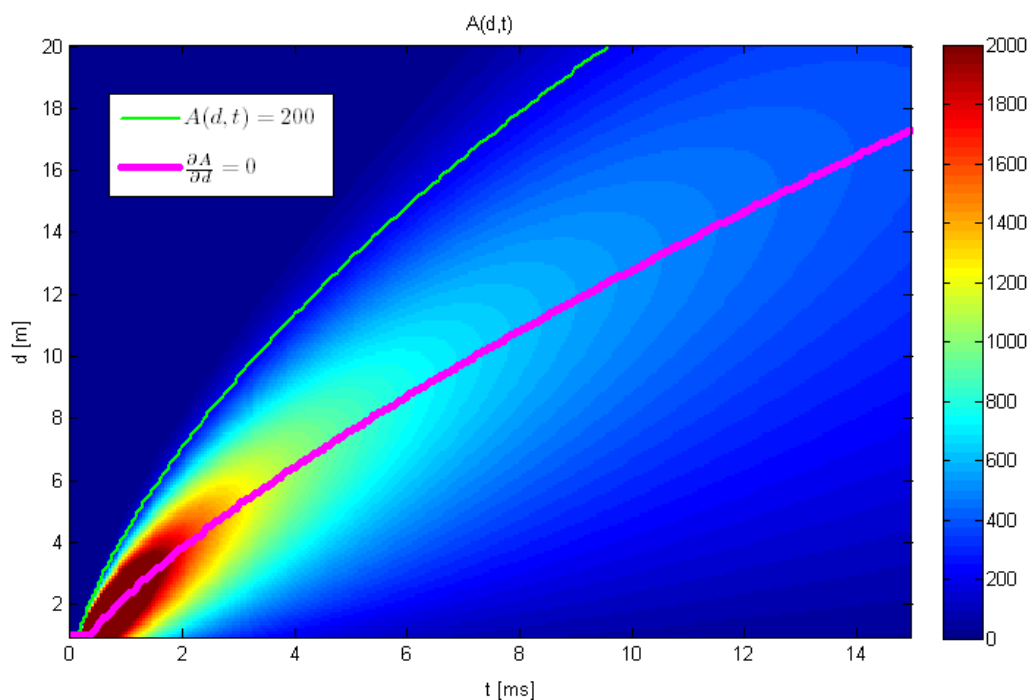


FIGURE 4.3 – Amplitude de l'enveloppe du signal en fonction de temps et de la distance. Mouvement du maximum de l'enveloppe (ligne épaisse). Mouvement d'un point défini par un seuil ($l = 200$) sur l'enveloppe (ligne fine).

Expérimentalement, pour de grandes distances source-détecteur, les hautes fréquences sont fortement amorties et le signal est dominé par les composantes de basse fréquence. La détection du maximum souffre donc d'une forte variance. Une approche à seuil peut être réglée numériquement pour donner la forme de la variation de la vitesse de propagation perçue comme une fonction de la distance source-capteur, en utilisant l'enveloppe du signal.

CHAPITRE 4. VITESSE DE PROPAGATION PERÇUE DANS UNE DALLE EN BÉTON

La solution analytique de l'approche basée sur un seuil ne peut pas être facilement identifiée.

Les vitesses de propagation déterminées par la résolution numérique et analytique sont représentées dans la figure 4.4. Cette dernière montre que la vitesse perçue est inversement proportionnelle à la distance source-capteur quelque que soit la méthode utilisée pour son identification.

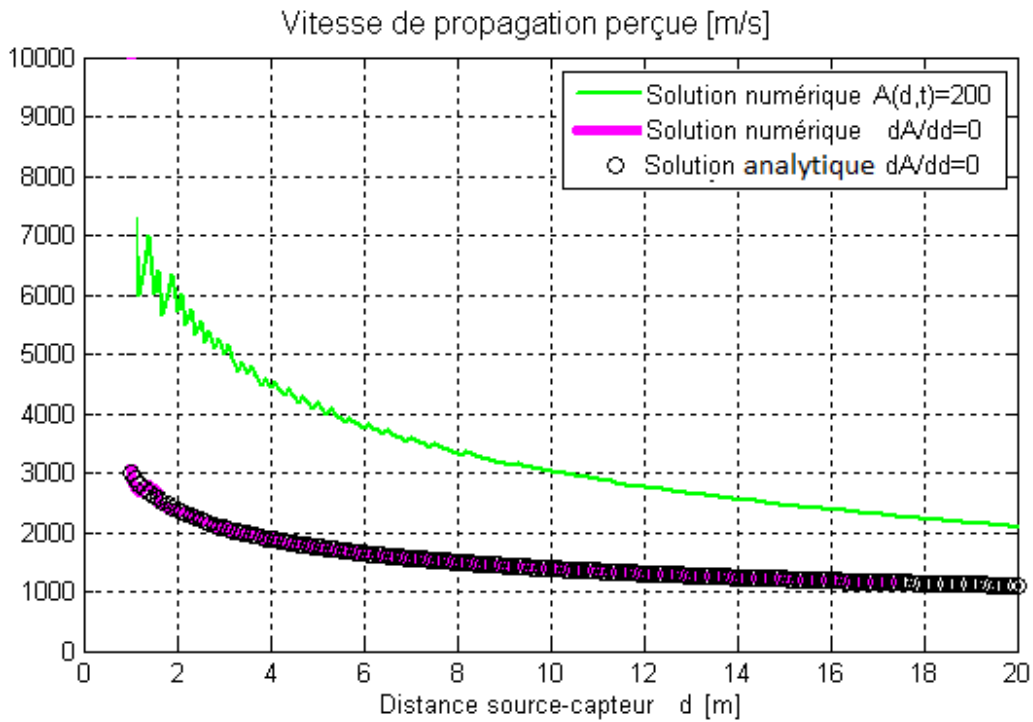


FIGURE 4.4 – Vitesse de propagation perçue. Solution numérique de $A(d, t) = 200$, (ligne fine). Solution numérique de $\frac{\partial A}{\partial d} = 0$, (ligne épaisse). Solution analytique de $\frac{\partial A}{\partial d} = 0$ donnée par l'équation (4.25), (o).

4.4 Étude de la vitesse perçue : résultats expérimentaux

Dans ce paragraphe on se propose de confirmer les résultats numériques et analytiques établis dans les paragraphes précédents par des résultats expérimentaux. L'objectif est de tracer la courbe de vitesse perçue en fonction de la distance à partir de signaux expérimentaux enregistrés à l'intérieur du bâtiment.

On considère une dalle en béton recouverte de lino. Des accéléromètres distants sont fixés au sol en ligne droite, figure 4.5. L'expérimentation consiste à lâcher une balle (Source reproductible) d'une hauteur fixe 1.5m à plusieurs reprises à côté d'un capteur de référence g_0 .

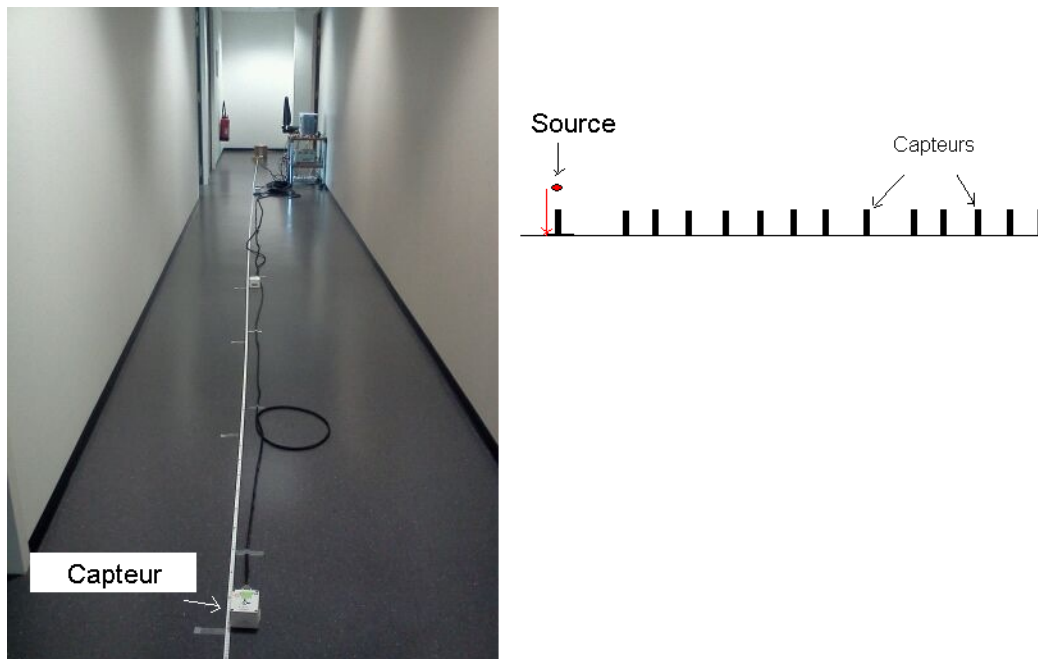


FIGURE 4.5 – *Effet de l'atténuation et de dispersion sur la vitesse de propagation perçue : configuration expérimentale.*

La figure 4.6 présente une courbe théorique de la vitesse perçue en fonction de la distance établie dans l'équation (4.25) pour $\vartheta = 1.5 \cdot 10^{-5} s$ et les résultats expérimentaux de l'estimation de la vitesse de propagation perçue par

$$c_p(d_i) = \frac{d_i}{t_a(d_i) - t_a(d_0)} \quad (4.26)$$

CHAPITRE 4. VITESSE DE PROPAGATION PERÇUE DANS UNE DALLE EN BÉTON

Où d_i est la distance entre le capteur i et le capteur de référence 0 et $t_a(d_i)$ est le temps d'arrivée estimé au capteur i par la méthode présentée dans le paragraphe 3.4.1.b.

Le facteur d'atténuation ϑ qui optimise l'erreur entre les résultats expérimentaux et analytiques est de même ordre de grandeur que dans la littérature.

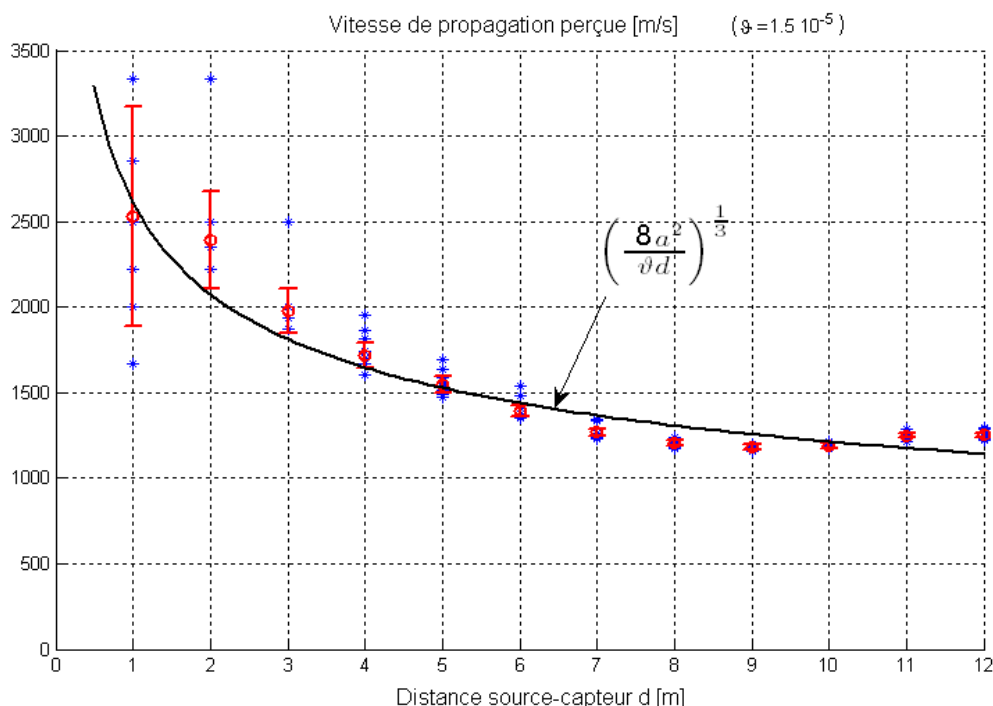


FIGURE 4.6 – Effet de l'atténuation et de dispersion sur la vitesse de propagation perçue : résultats de simulation et expérimentaux. (*) vitesse estimée par le signal d'une balle lâchée, (o) la moyenne de plusieurs essais, (|) barre d'erreur sur l'estimation de vitesse relative à 0.1 ms (2 échantillons) d'erreur sur l'estimation de temps d'arrivée.

D'après la figure 4.6, on constate une similitude entre les résultats analytiques et expérimentaux. Il est à noter que le résultat théorique est obtenu par l'étude de déplacement du maximum de l'amplitude, alors que le résultat expérimental est obtenu à partir de l'étude de déplacement du début du signal (qui dépasse le bruit).

Ces résultats expérimentaux confirment à nouveau que la vitesse de propagation perçue diminue lorsque la distance source-capteur augmente dans une plaque mince et en présence d'atténuation.

4.5 Conclusion

On a pu à travers ce chapitre, conclure sur la dépendance de la vitesse de propagation perçue de la distance source-capteur dans un milieu dissipatif et dispersif. En s'appuyant sur un modèle de propagation dans une plaque mince, on a simulé le signal reçu en fonction de la distance. Un seuil sur le signal simulé a permis de tracer la courbe de dépendance de la vitesse et de la distance source-capteur. Ce résultat obtenu étant numérique, on a développé ensuite une expression analytique de la vitesse perçue en fonction de la distance. Pour ce faire on a eu recours à la méthode de la phase stationnaire pour simplifier les calculs. L'étude analytique a prouvé que la vitesse perçue dépend de la distance source-capteur et elle décroît en $1/d^3$.

Les résultats analytiques et numériques ont été confirmés par une étude expérimentale montrant la variation de la vitesse perçue en fonction de la distance. Les algorithmes de localisation basés sur l'hypothèse de propagation à vitesse constante ne sont pas donc adaptés à notre problème de localisation de personnes par ondes élastiques à l'intérieur des bâtiments.

La décroissance de la vitesse de propagation perçue en fonction de la distance qu'on vient de prouver est la seule caractéristique robuste. On choisira alors dans la suite de construire un nouvel algorithme de localisation basé sur cette caractéristique. Le chapitre suivant présentera ce nouvel algorithme qui consiste en d'autre terme à exploiter la propriété de conservation de la relation d'ordre d'arrivée des signaux aux capteurs.

Chapitre 5

Nouvelle approche de localisation par sismique

Sommaire

5.1	Algorithme de localisation : SO-TDOA	66
5.1.1	Vecteur caractéristique d'une région	68
5.1.2	Calcul des coordonnées du centre d'une région	69
5.1.3	Algorithme SO-TDOA	70
5.2	Algorithme SO-TDOA VS algorithme hyperbolique	71
5.2.1	Étapes de simulation	72
5.2.2	Résultats de simulation	74
5.3	Étude caractéristique de l'algorithme SO-TDOA	77
5.3.1	Choix de la distance de Hamming	77
5.3.2	Effet de l'erreur d'estimation des temps d'arrivée sur le vecteur caractéristique d'un point dans la salle.	79
5.3.3	Erreur d'entrée $d_H(Z, \tilde{Z})$ Vs erreur de sortie $d_H(Z, \hat{Z})$ d'algorithme SO-TDOA	84
5.3.4	Erreur d'estimation de la position $d_2(S, \hat{S})$ en fonction de la position de la source dans la salle pour une erreur d'estimation du temps d'arrivée σ_t	87
5.4	Validation de l'algorithme SO-TDOA sur des données expérimentales	89
5.4.1	Présentation de l'expérimentation	89
5.4.2	Exploitation des données expérimentales	90
5.5	Conclusion	93

Une dalle en béton est généralement considérée comme un milieu dispersif et dissipatif. Dans le chapitre précédent, on a montré que la vitesse de propagation perçue dans un tel milieu décroît en fonction de la distance source capteur. Dans le paragraphe 5.1 de ce chapitre, on se propose de développer un nouvel algorithme de localisation de personnes en marche sur une dalle en béton. Ce nouvel algorithme se base sur la préservation de l'ordre d'arrivée des signaux aux capteurs, une conséquence directe de la décroissance de la vitesse en fonction de la distance. Dans le paragraphe 5.2, on comparera par simulation les performances du nouvel algorithme (appelé dans la suite l'algorithme SO-TDOA) et de l'algorithme hyperbolique basé sur une estimation moyenne de la vitesse de propagation, déjà présenté dans le paragraphe 2.3.2. Dans le paragraphe 5.3, on donnera quelques caractéristiques de l'algorithme SO-TDOA. Finalement, on présentera dans le paragraphe 5.4 les résultats expérimentaux de localisation déterminés en adoptant le nouvel algorithme.

5.1 Algorithme de localisation : SO-TDOA

Le principe de préservation de l'ordre d'arrivée des signaux aux capteurs peut être écrit comme suit. Pour toute source positionnée à la position \mathbf{p}_k et pour une paire de capteurs (i, j) , on a

$$\text{sign}(t_{ki} - t_{kj}) = \text{sign}\left(\frac{d_{ki}}{c_{ki}} - \frac{d_{kj}}{c_{kj}}\right) = \text{sign}(d_{ki} - d_{kj}), \quad (5.1)$$

où sign est l'opérateur signe et d_{ki} est la distance entre le point \mathbf{p}_k et le capteur i , t_{ki} est le temps d'arrivée détecté au capteur i et c_{ki} est la vitesse de propagation perçue au capteur i . L'équation (5.1) utilise le fait que le signe de la différence du temps de vol est indépendant de la valeur de la vitesse perçue.

En considérant une paire de capteurs (i, j) et une source localisée à \mathbf{p}_k , l'ensemble S_k^{ij} de points qui vérifie : pour tout $\mathbf{p}'_k \in S_k^{ij}$ on a

$$\text{sign}(d_{ki} - d_{kj}) = \text{sign}(d'_{ki} - d'_{kj}), \quad (5.2)$$

où d_{ki} (res. d'_{ki}) est la distance entre le capteur i et \mathbf{p}_k (res. \mathbf{p}'_k), est le demi plan contenant \mathbf{p}_k et délimité par la médiatrice de la droite joignant les capteurs i et j , figure 5.1. Considérons maintenant N capteurs répartis dans un espace délimité $E \subset \mathfrak{R}^2$. La position de chaque capteur i est donnée par \mathbf{g}_i . En tenant compte de toutes les médiatrices des segments reliant les différents couples de capteurs, l'espace E est partitionné en Q régions disjointes R_k . Figure 5.2 illustre un exemple de configuration où 5 capteurs sont répartis

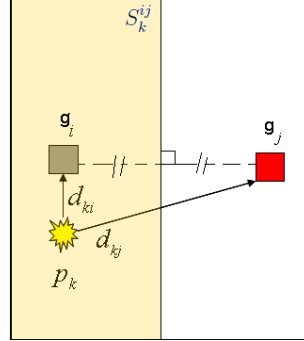


FIGURE 5.1 – Séparation en région par la médiatrice d'une paire de capteurs.

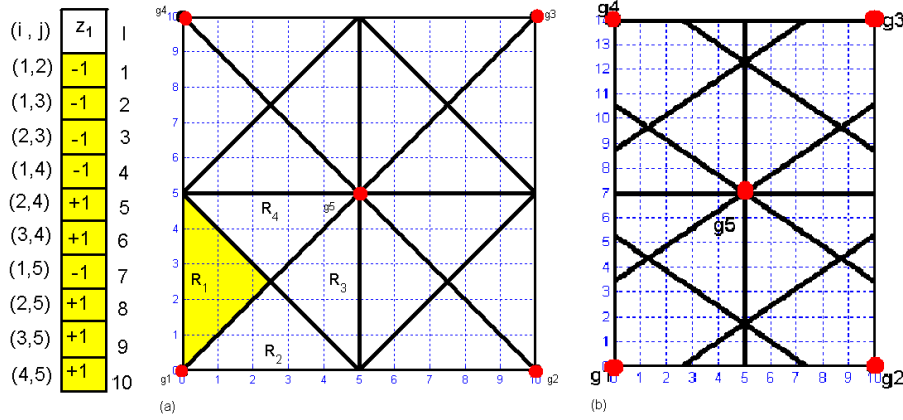


FIGURE 5.2 – Exemple de séparation en régions : 5 capteurs dans une salle carrée (a) et rectangulaire (b). La région R_1 est délimitée par les médiatrices des couples de capteurs (1, 5) et (2, 4) et le bord de la salle. z_1 est le vecteur caractéristique de la région R_1 (colorée en jaune).

dans une salle carrée et dans une salle rectangulaire.

Les équations (5.1) et (5.2) permettent de déduire la propriété suivante. Pour tout point \mathbf{p}_k et \mathbf{p}'_k dans une région donnée R_k et pour toute paire de capteurs (i, j) , on peut écrire

$$\forall \mathbf{p}_k, \mathbf{p}'_k \in R_k, \quad \text{sign}(t_{ki} - t_{kj}) = \text{sign}(t'_{ki} - t'_{kj}) \quad (5.3)$$

Le nouvel algorithme de localisation SO-TDOA (sign of time differences of arrival) proposé consiste à une localisation par région. Dans ce qui suit, on caractérisera chaque région formée et on déterminera leur nombre Q et les coordonnées du centre \mathbf{p}_k^c de chaque région R_k et son vecteur caractéristique qu'on notera par \mathbf{z}_k .

5.1.1 Vecteur caractéristique d'une région

En considérant toutes les paires de capteurs (i, j) , on définit le vecteur \mathbf{z}_k qui caractérise la région R_k comme suit

$$\mathbf{z}_k(l) = \text{sign}(d_{ki} - d_{kj}), \quad l = \frac{(j-2)(j-1)}{2} + i \quad (5.4)$$

$\forall (i, j) \in \{(1, 2), (1, 3), (2, 3), (1, 4), (2, 4), \dots, (N-1, N)\}$.

où N est le nombre de capteurs. Le vecteur \mathbf{z}_k est formé par $N(N-1)/2$ composantes dans l'ensemble $\{+1, 1\}$. A titre d'exemple, dans le cas précédent de configuration à 5 capteurs, la région R_1 peut être caractérisée par le vecteur \mathbf{z}_1 de 10 éléments comme le montre la figure 5.2.

A ce stade il faut noter que :

1. Le nombre des médiatrices formées à partir de N paires de capteurs est égal au nombre de paires possibles, c-à-d à $N(N-1)/2$ dans un milieu non délimité.
2. Le nombre de régions formées dans un milieu non délimité à partir de o droites est égal à $o(o+1)/2 + 1$ régions au plus.
3. Il résulte de 1. et 2. que : Le nombre de régions formées à partir de N capteurs répartis est au plus égal à $M_R = (N^4 - 2N^3 + 3N^2 - 2N)/8 + 1$ (en considérant $o = N(N-1)/2$ dans la remarque 2).

M_R est le nombre maximum de régions qui peuvent être formées dans un milieu non délimité. Cependant, dans un milieu limité le nombre de régions formées dépend de la configuration des capteurs et de la géométrie du milieu. Il n'existe pas de formule simple donnant le nombre des régions formées dans une configuration donnée. Par exemple, le nombre maximal des régions formées avec 5 capteurs est $M_R = 56$. Toutefois, le nombre de régions formées dans une salle carrée est $Q = 16$ et dans une salle rectangulaire est $Q = 20$ selon l'exemple de la figure 5.2.

4. Le vecteur mesuré $\hat{\mathbf{z}}_k$ peut prendre une valeur dans l'ensemble $\{+1, -1\}^{N(N-1)/2}$. A cause du bruit de mesure et de l'erreur d'estimation de la différence du temps d'arrivée, ce vecteur peut ne pas correspondre à un des vecteurs caractéristiques des régions formées. En effet, le cardinal de cet ensemble $2^{N(N-1)/2}$ est supérieur au nombre des régions formées Q . Par exemple dans la figure 5.2, on constate que les paires de capteurs (3, 4) et (1, 2) partagent la même médiatrice. Les composantes du vecteur mesuré $\hat{\mathbf{z}}_k$ qui correspondent à ces couples doivent alors avoir la même valeur. Ceci n'est pas nécessairement toujours vrai à cause du bruit et des erreurs d'estimation. L'utilisation de la redondance dans le vecteur mesuré permet d'améliorer les performances de l'algorithme de localisation.

5. Pour estimer l'ensemble des régions M_r qui correspondent le plus au vecteur mesuré $\hat{\mathbf{z}}_s$, on minimise la distance de Hamming entre le vecteur mesuré et les vecteurs caractéristiques de tous les régions \mathbf{z}_k .

$$M_r = \arg \min_{k \in [1..Q]} d_H(\mathbf{z}_s, \mathbf{z}_k), \quad M_r \subset [1..Q] \quad (5.5)$$

où d_H est la distance de Hamming mesurant le nombre d'éléments différents entre deux vecteurs de même taille.

$$d_H(\mathbf{z}_s, \mathbf{z}_k) = \sum_{i=1}^{N(N-1)/2} (\mathbf{z}_s(i) \oplus \mathbf{z}_k(i)), \quad (5.6)$$

où \oplus est l'opérateur "ou exclusif" ($a \oplus b = 1$ si $a \neq b$ si non 0, $\forall a, b \in \{+1, -1\}$). Le nombre des régions qui minimisent la distance de Hamming peut être supérieur à 1 si $\hat{\mathbf{z}}_s$ ne correspond à aucun vecteur caractéristique. Cela peut fréquemment être le cas en présence d'erreur d'estimation du temps d'arrivée. On note $|M_r|$ le cardinal de l'ensemble M_r des régions qui minimisent (5.6). On donne un exemple de calcul de la distance de Hamming entre deux vecteurs dans le cas de la configuration donnée par la figure 5.2 :

$$\begin{aligned} \mathbf{z}_2 &= [-1, -1, -1, -1, -1, +1, -1, +1, +1, +1], \\ \mathbf{z}_1 &= [-1, -1, -1, -1, +1, +1, -1, +1, +1, +1], \\ d_H(\mathbf{z}_2, \mathbf{z}_1) &= 0 + 0 + 0 + 0 + 1 + 0 + 0 + 0 + 0 + 0 = 1. \end{aligned} \quad (5.7)$$

On remarque que deux régions voisines sont distantes de 1 par la distance de Hamming.

5.1.2 Calcul des coordonnées du centre d'une région

Tous les points qui appartiennent à la même région ont le même vecteur caractéristique \mathbf{z}_k défini par l'équation (5.4). Tous ces points seront associés à leur centre \mathbf{p}_k^c . La géométrie d'une région peut être quelconque. Il n'existe pas une méthode simple de calcul qui permet de déterminer les coordonnées des centres de toutes les régions à partir des positions des capteurs. On propose alors une approche qui consiste tout d'abord à échantillonner la salle avec des points régulièrement espacés \mathbf{p}_e , figure 5.3 Ensuite, le vecteur caractéristique \mathbf{z}_e de chaque point \mathbf{p}_e est calculé. Tous les points sont par la suite classifiés en groupes selon leurs vecteurs caractéristiques. Le nombre Q de régions formées est alors égal au nombre des groupes différents. Les coordonnées du centre d'une région sont calculés en moyennant les coordonnées de tous les points appartenant au même groupe.

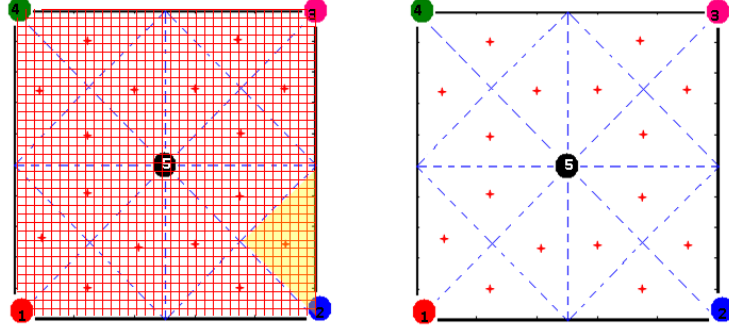


FIGURE 5.3 – Exemple : Détermination des coordonnées des centres des régions.

Cette étape de calcul est effectuée une seule fois quand la configuration des capteurs est fixée. Ces informations sont enregistrées et utilisées plus tard pour l'estimation de la position de la source par l'algorithme SO-TDOA.

5.1.3 Algorithme SO-TDOA

Une personne qui marche génère des ondes élastiques qui se propagent dans la dalle en béton. Ces ondes sont ensuite collectées par des accéléromètres, converties en signaux électriques et échantillonnées par une station d'acquisition. Pour localiser un pas à partir de ces signaux, on applique la démarche suivante, reconnue dans la suite par celle de l'algorithme SO-TDOA :

1. Estimer le temps d'arrivée \hat{t}_{si} de chaque signal reçu en capteur i par une des méthodes de détection du temps d'arrivée présentées dans le paragraphe 3.4.1.
2. Calculer le vecteur caractéristique de la source, à partir des temps d'arrivée estimés, par

$$\mathbf{z}_s(l) = \text{sign}(\hat{t}_{si} - \hat{t}_{sj}), \quad (5.8)$$

arrangée comme dans l'équation (5.4).

3. Déterminer l'ensemble $M_r \subset [1..Q]$ des régions qui minimisent la distance de Hamming

$$M_r = \arg \min_{k \in [1..M]} \sum_{i=1}^{N(N-1)/2} (\mathbf{z}_s(i) \oplus \mathbf{z}_k(i)). \quad (5.9)$$

où le cardinal de M_r peut être supérieur à 1, ($|M_r| \geq 1$).

4. Estimer la position de la source $\hat{\mathbf{p}}_s$ par

$$\hat{\mathbf{p}}_s = \frac{1}{|M_r|} \sum_{r \in M_r} \mathbf{p}_r^c \quad (5.10)$$

où \mathbf{p}_r^c est le barycentre de la région r . La position estimée de la source correspond à la moyenne de tous les centres des régions appartenant à M_r . Cet estimateur est un estimateur heuristique qui sera validé par des résultats de simulation et des résultats expérimentaux.

5.2 Algorithme SO-TDOA VS algorithme hyperbolique

On se propose de comparer par simulation les performances de localisation du nouvel algorithme SO-TDOA et l'algorithme hyperbolique [paragraphe 2.3.2]. En effet, dans le cas où la vitesse de propagation perçue est constante et indépendante de la distance source-capteur, l'algorithme de localisation hyperbolique inverse exactement le problème. Pour les simulations de cette section, on se positionnera dans le cas où la vitesse de propagation perçue dépend de la distance source-capteur, voir figure 5.4. Cette condition est plus réaliste dans notre problème considéré [chapitre 4].

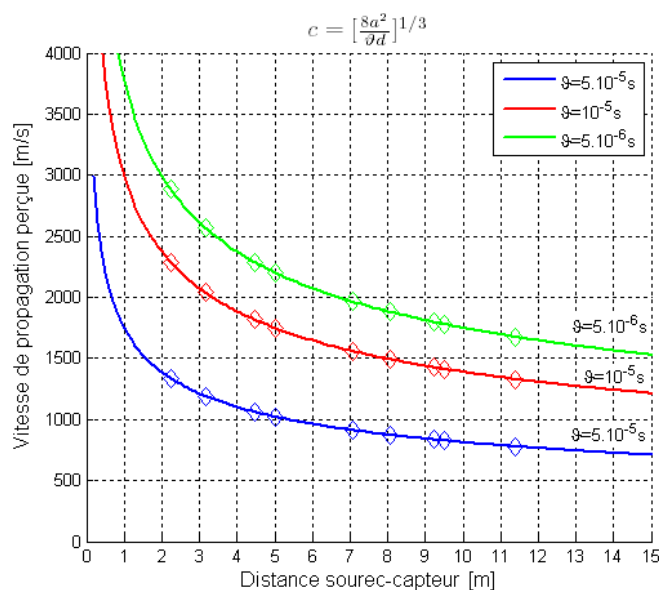


FIGURE 5.4 – Variation de la vitesse de propagation perçue en fonction de la distance source-capteur pour différents valeurs de l'atténuation.

5.2.1 Étapes de simulation

L'algorithme de localisation hyperbolique n'a pas une solution analytique simple pour inverser le problème. On propose dans ce paragraphe une implémentation simple sans passer par les calculs analytiques. Elle consiste à faire une identification à partir d'un échantillonnage de l'espace de localisation considéré. Les étapes de simulation des deux algorithmes sont illustrées dans la figure 5.5.

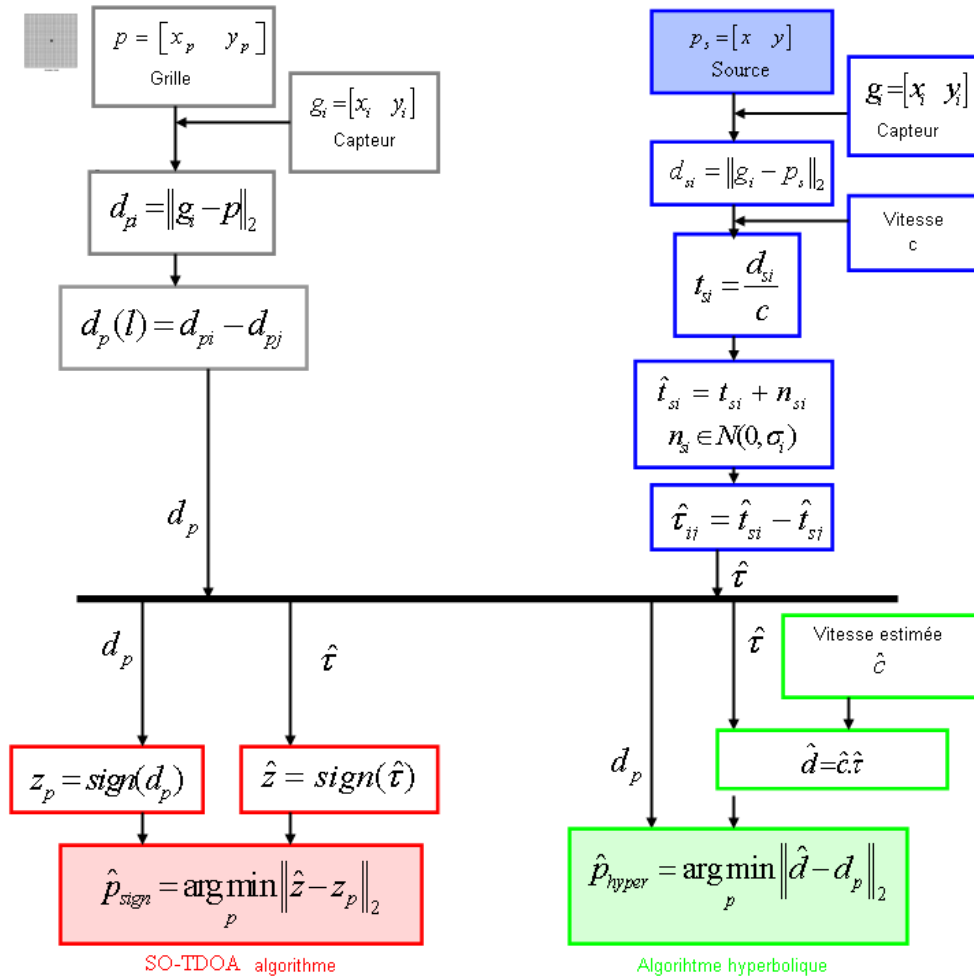


FIGURE 5.5 – Étapes de simulation. En bleu : génération des temps d'arrivée bruitées pour une source donnée à partir d'un profil de vitesse. En gris : générations des points selon une grille fine. En vert : algorithme hyperbolique. En rouge : l'algorithme SO-TDOA.

N capteurs sont placés dans une salle de dimension $L_x \times L_y$, tels que les coordonnées du capteur i sont données par $\mathbf{g}_i = [x_i \ y_i]$, $\forall 1 \leq i \leq N$.

Entrées

1. La position de la source est fixée en $\mathbf{p}_s = [x \ y]$, tel que $0 \leq x \leq L_x$ et $0 \leq y \leq L_y$.
2. Les distances qui séparent la source de tous les capteurs $d_{si} = \|\mathbf{p}_s - \mathbf{g}_i\|_2$, $\forall 1 \leq i \leq N$ sont ensuite calculées. On note \mathbf{d}_s le vecteur des différences de distance, tel que $\mathbf{d}_s(l) = (d_{si} - d_{sj})$ est arrangé comme dans l'équation (5.8).
3. Supposant que la vitesse de propagation perçue est donnée par la figure 5.4, les temps d'arrivée aux capteurs sont calculés tel que $t_{si} = \frac{d_{si}}{c(d_{si})}$, $\forall 1 \leq i \leq N$.
4. Un bruit Gaussien de moyenne nulle et de variance σ_i est ajouté au temps d'arrivée t_{si} déterminé précédemment. On suppose que le bruit est blanc et indépendant de la valeur de t_{si} . Dans les conditions expérimentales, l'erreur d'estimation du temps d'arrivée est généralement située dans l'intervalle $[0 - 1]ms$ (68% d'erreur dans $[0 - 1]ms$) et implique que $\sigma_t \simeq 0.5ms$. Une erreur de $1ms$ dans l'estimation du temps d'arrivée implique une erreur de $1m$ à $3.5m$ en erreur d'estimation de distance source-capteur (si la vitesse de propagation perçue est incluse dans $[1000 - 3500]m/s$).
5. Le vecteur des différences d'arrivée $\hat{\boldsymbol{\tau}}$ de dimension $N(N - 1)/2$ est calculé tel que

$$\hat{\boldsymbol{\tau}}(l) = \hat{t}_{si} - \hat{t}_{sj} \quad (5.11)$$

et rangé comme dans l'équation (5.8). Ce vecteur $\hat{\boldsymbol{\tau}}$ constitue l'entrée des algorithmes de localisation.

Algorithmes

6. Une grille de NP points $\mathbf{p} = [x_p \ y_p]$ uniformément répartis dans la salle est générée.
7. Pour chaque point de la grille, on calcule le vecteur de différence de distances source-capteurs \mathbf{d}_p tel que $\mathbf{d}_p(l) = (d_{pi} - d_{pj})$ rangés comme dans l'équation (5.8), où $d_{pi} = \|\mathbf{p} - \mathbf{g}_i\|_2$, $\forall 1 \leq i \leq N$.
8. On estime alors la position de la source par l'algorithme SO-TDOA ($\hat{\mathbf{p}}_{s_{sign}}$) et par l'algorithme hyperbolique ($\hat{\mathbf{p}}_{s_{hyper}}$) comme suit :

Algorithme SO-TDOA

8.1. Pour tout point \mathbf{p} de la grille, on calcule le vecteur \mathbf{z}_p tel que

$$\mathbf{z}_p(l) = \text{sign}(\mathbf{d}_p(l)), \quad \forall l \in [1 \cdots N(N-1)/2]. \quad (5.12)$$

8.2. La position de la source est estimée par

$$\hat{\mathbf{p}}_{s|_{\text{sign}}} = \arg \min_{\mathbf{p}} \sum_{i=1}^{N(N-1)/2} (\hat{\mathbf{z}}(i) \oplus \mathbf{z}_p(i)), \quad (5.13)$$

où $\hat{\mathbf{z}} = \text{sign}(\hat{\boldsymbol{\tau}})$.

Algorithme hyperbolique

8.1. On calcule $\hat{\mathbf{d}} = \hat{c}\hat{\boldsymbol{\tau}}$ où \hat{c} est une vitesse de propagation moyenne estimée préalablement par une source contrôlée dont on connaît la position [RDNW01].

8.2. La position de la source est estimée par

$$\hat{\mathbf{p}}_{s|_{\text{hyper}}} = \arg \min_{\mathbf{p}} \|\hat{\mathbf{d}} - \mathbf{d}_p\|_2. \quad (5.14)$$

5.2.2 Résultats de simulation

On considère 9 capteurs placés dans une salle $10m \times 10m$. Une source est choisie arbitrairement pour cette étude $\mathbf{p}_s = [1 \ 3]m$, figure 5.6. La grille de points utilisée pour la localisation est 25×25 points régulièrement répartis. Pour comparer les performances des deux algorithmes de localisation, on utilisera le critère de la racine de l'erreur quadratique moyenne (RMSE) entre la position estimée $\hat{\mathbf{p}}$ et la position réelle connue \mathbf{p}_s . La figure 5.7 montre les résultats obtenus en fonction de l'écart type de l'erreur d'estimation du temps d'arrivée σ_t pour trois formes de variation de la vitesse perçue (figure 5.4) à la même position de la source. Les résultats sont moyennés sur $M_c = 500$ réalisations Monte-Carlo pour tous les scénarios,

$$\text{RMSE}(\sigma_t) = \sqrt{\frac{1}{M_c} \sum_{i=1}^{M_c} \|\mathbf{p}_s - \hat{\mathbf{p}}_i(\sigma_t)\|^2} \quad (5.15)$$

La figure 5.7 montre que l'algorithme de localisation SO-TDOA proposé permet d'obtenir de bons résultats de localisation (RMSE < 1,5m) pour des erreurs d'estimation de TOA de l'ordre de ($\sigma_t = 1\text{ms}$), dans une pièce de $10m \times 10m$ (sans avoir recours à l'estimation d'une vitesse de propagation).

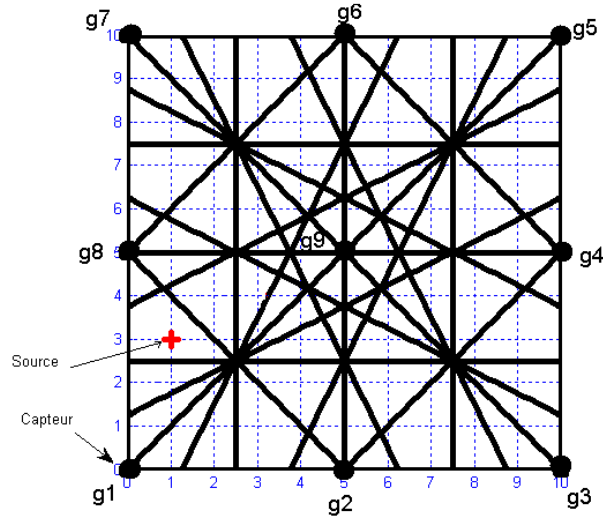


FIGURE 5.6 – Configuration d'étude : 9 capteurs placés dans une salle $10m \times 10m$. Source (+).

Les performances de l'algorithme hyperbolique dépendent de la valeur estimée de la vitesse de propagation \hat{c} . De plus, ses performances changent en fonction de la forme de variation de la vitesse de propagation perçue. Alors que, l'algorithme SO-TDOA proposé est plus robuste par rapport à un tel changement de vitesse.

Pour finir, il est important de mentionner que l'algorithme de localisation proposé SO-TDOA est plus rapide et moins calculatoire que l'algorithme de localisation hyperbolique.

CHAPITRE 5. NOUVELLE APPROCHE DE LOCALISATION PAR SISMIQUE

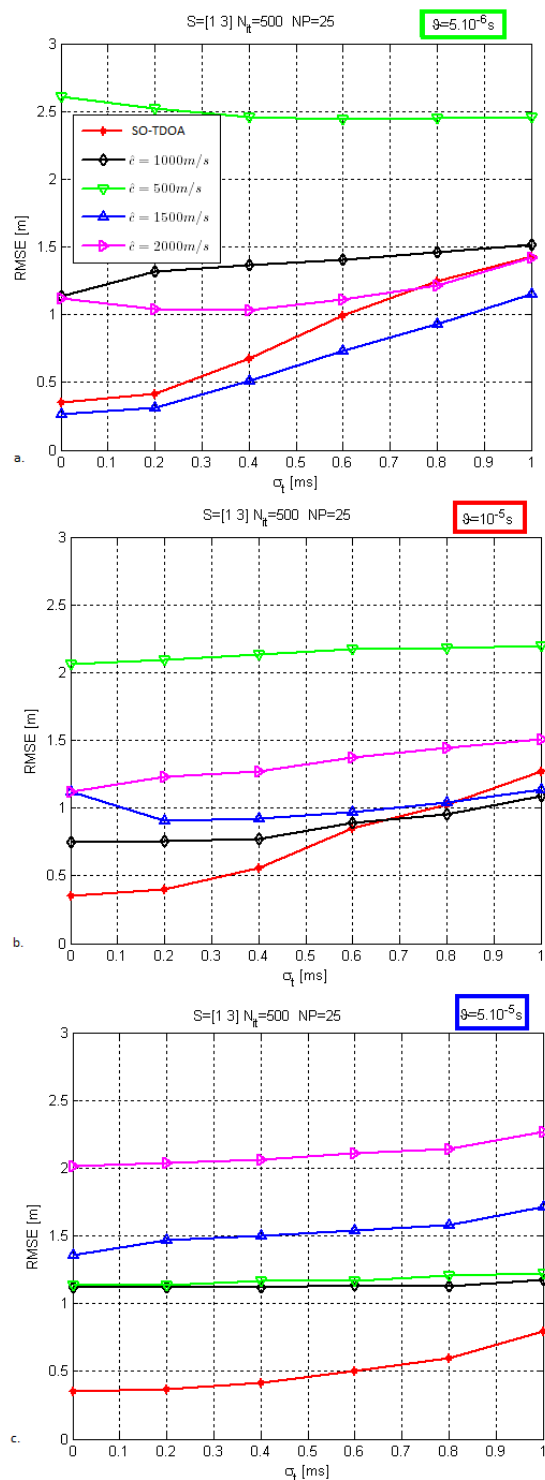


FIGURE 5.7 – Étude de performance en position $\mathbf{p}_s = [1 \ 3] \text{ m}$. La vitesse de propagation perçue varie comme dans la figure 5.7. a. pour $\vartheta = 5 \cdot 10^{-6} \text{ s}$, b. pour $\vartheta = 10^{-5} \text{ s}$, c. pour $\vartheta = 5 \cdot 10^{-5} \text{ s}$

5.3 Étude caractéristique de l'algorithme SO-TDOA

La figure 5.8 présente les différentes notations utilisées dans cette section.

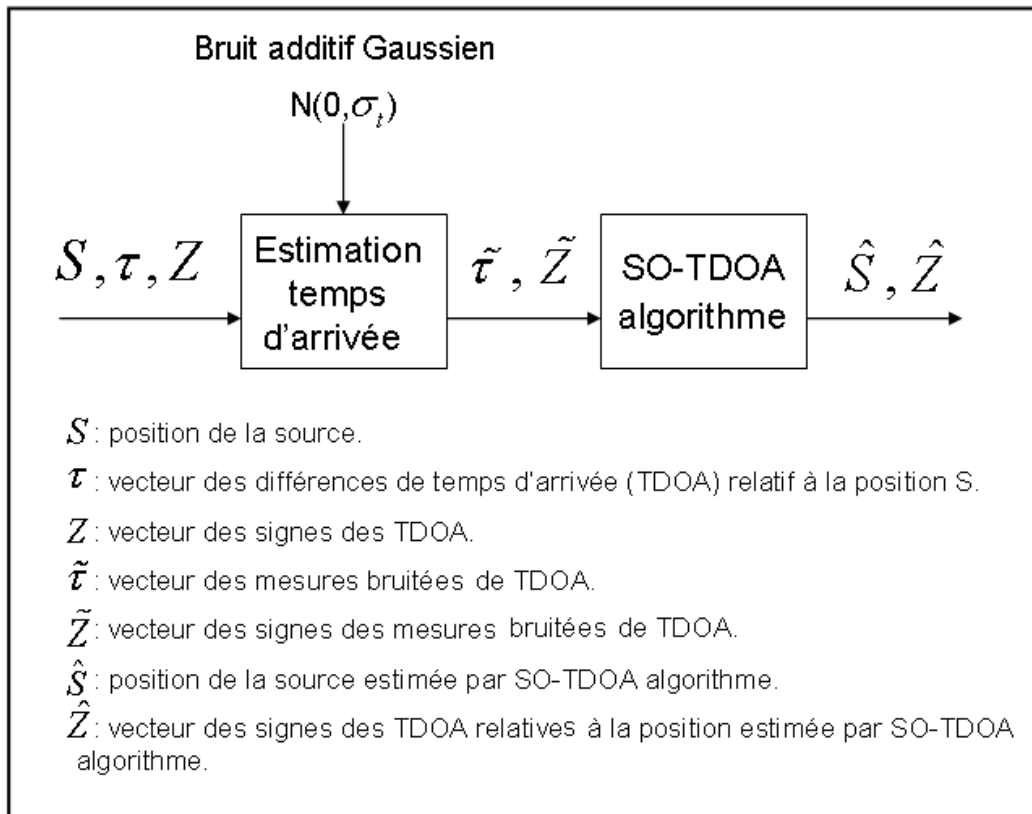


FIGURE 5.8 – Schémas d'étude.

5.3.1 Choix de la distance de Hamming

On s'intéresse à étudier le choix de la distance de Hamming dans l'algorithme proposé SO-TDOA. Ce choix se valide si la variation de la distance de Hamming entre deux points dans la salle à une configuration donnée est globalement proportionnelle à la variation de la distance géométrique entre ces deux points.

CHAPITRE 5. NOUVELLE APPROCHE DE LOCALISATION PAR SISMIQUE

On considère une salle de $10m$ par $10m$ et 9 capteurs dont la configuration est donnée par la figure 5.9 .

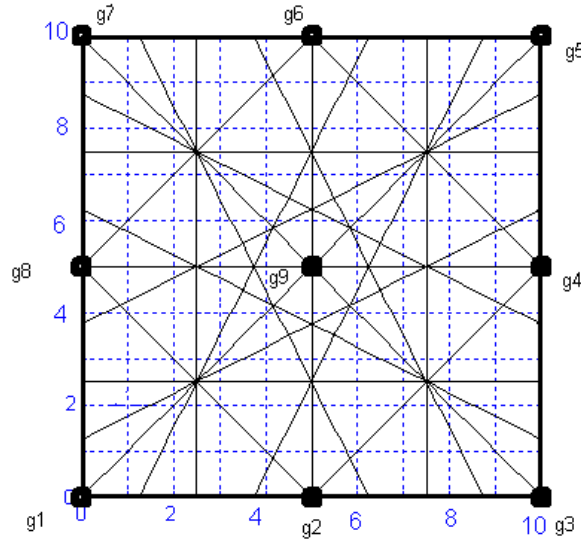


FIGURE 5.9 – Configuration d'étude : $N = 9$ capteurs placés dans une salle $10m \times 10m$.

On décrit les étapes de simulation comme suit :

1. On génère aléatoirement deux positions $S1$ et $S2$ dans la salle.
2. Pour chaque point S , on calcule le vecteur des différences de distances source-capteurs \mathbf{d}_s , tel que $\mathbf{d}_s(l) = (d_{s_i} - d_{s_j})$ est rangé comme dans l'équation (5.8) et $d_{s_i} = \|S - \mathbf{g}_i\|_2, \forall 1 \leq i \leq N$.
3. On calcule pour chaque point le vecteur Z , du signe des différences de distances source-capteurs tel que $Z_i = \text{sign}(D_i)$.
4. On détermine la distance de Hamming $d_H(Z1, Z2)$ et la distance géométrique $d_2(S1, S2)$.

L'idée consiste à refaire les étapes précédentes pour plusieurs (10000) tirages aléatoires de paires de points dans la salle (Monté-Carlo). On trace ensuite la distance de Hamming $d_H(Z1, Z2)$ en fonction de la distance géométrique $d_2(S1, S2)$ pour tous les paires de points dans la figure 5.10. Il faut noter que dans cet exemple la distance de Hamming est entre 0 et $N(N - 1)/2 = 36$ (longueur du vecteur Z) et la distance géométrique est entre 0 et 14.14 (longueur de la diagonale). On constate d'après la figure 5.10 que la distance de Hamming augmente globalement en augmentant la

distance géométrique entre deux points. Autrement dit, les points les plus loins dans une salle ont les plus différents vecteurs caractéristiques Z . Le choix de la distance de Hamming est alors validé.

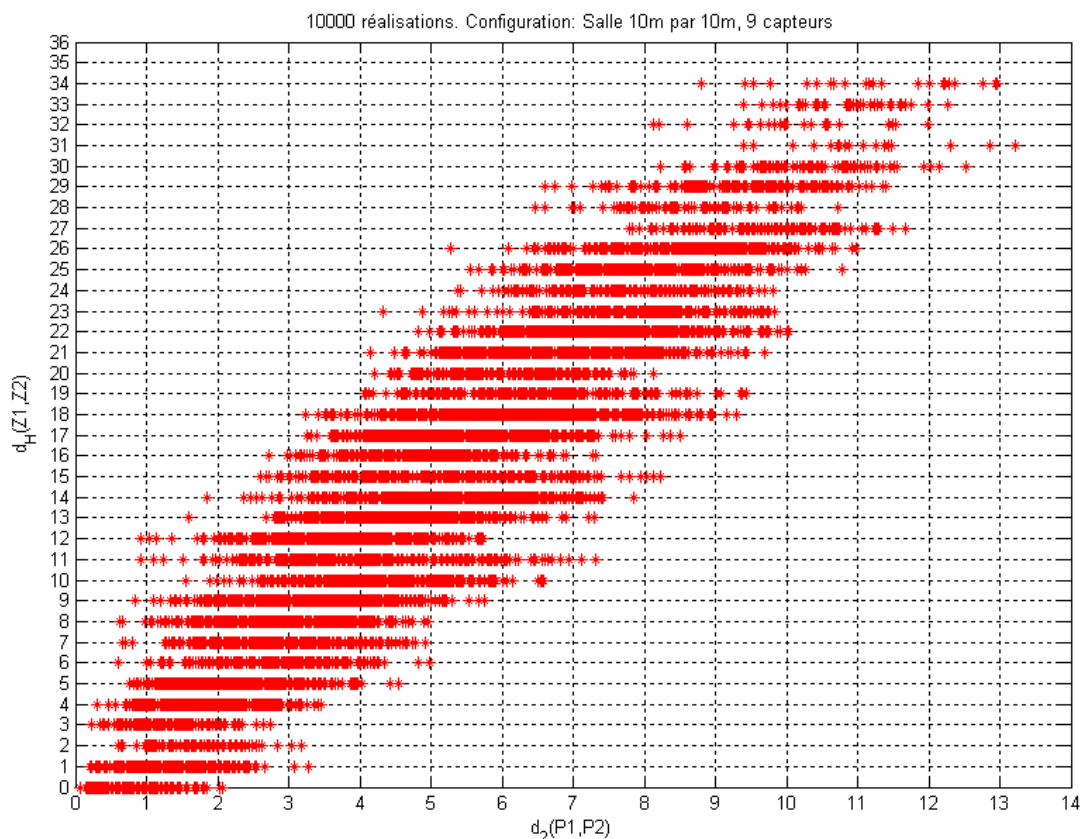


FIGURE 5.10 – DHD2. Configuration d'étude : $N = 9$ capteurs placés dans une salle $10m \times 10m$.

5.3.2 Effet de l'erreur d'estimation des temps d'arrivée sur le vecteur caractéristique d'un point dans la salle.

Dans cette section, on s'intéresse à l'étude du nombre de bits d'erreur dans le vecteur des signes des différences du temps d'arrivée (TDOA) mesuré \tilde{Z} à une position donnée et considéré donc comme une variable aléatoire. Le nombre de bits d'erreur peut se calculer par la distance de Hamming ($d_H(\tilde{Z}, Z)$) et il dépend de l'erreur d'estimation des temps d'arrivée.

Probabilité d'erreur sur le signe d'une différence du temps d'arrivée

On suppose que l'erreur d'estimation de différence du temps d'arrivée pour une paire de capteurs est une erreur additive Gaussienne $N(0, \sigma_{ij}^2)$,

$$\tilde{\tau}_{ij} = \tau_{ij} + n_{ij} \quad (5.16)$$

On cherche à caractériser la probabilité d'erreur sur le signe de $\tilde{\tau}_{ij}$ en fonction de σ_{ij}^2 . On considère le modèle suivant

$$\text{sign}(\tilde{\tau}_{ij}) = b_{ij} \cdot \text{sign}(\tau_{ij}) \quad (5.17)$$

La variable b_{ij} est une variable discrète binaire qui prend des valeurs dans l'ensemble $\{+1, -1\}$. Elle suit une loi de probabilité de type **Bernoulli** de paramètre $p(\tau_{ij}, \sigma_{ij})$ égal à la probabilité d'erreur sur l'estimation du signe de τ_{ij} .

$$\begin{aligned} p(\tau_{ij}, \sigma_{ij}) &= P[b_{ij} = -1] \\ &= P[\text{sign}(\tilde{\tau}_{ij}) = -1 | \tau_{ij} > 0] P[\tau_{ij} > 0] + P[\text{sign}(\tilde{\tau}_{ij}) = +1 | \tau_{ij} < 0] P[\tau_{ij} < 0] \end{aligned} \quad (5.18)$$

avec

$$\begin{aligned} P[\text{sign}(\hat{\tau}_{ij}) = -1 | \tau_{ij} > 0] &= P[\hat{\tau}_{ij} < 0 | \tau_{ij} > 0] \\ &= \frac{1}{\sigma_{ij}\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^0 e^{-\frac{(\tau - \tau_{ij})^2}{2\sigma_{ij}^2}} d\tau \\ &= \frac{1}{2} \left(1 + \text{erf} \left(\frac{-\tau_{ij}}{\sqrt{2}\sigma_{ij}} \right) \right), \end{aligned} \quad (5.19)$$

où erf est appelée "fonction d'erreur" telle que $\text{erf}(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^x e^{-t^2} dt$, et

$$P[\text{sign}(\hat{\tau}_{ij}) = +1 | \tau_{ij} < 0] = 1 - P[\text{sign}(\hat{\tau}_{ij}) = -1 | \tau_{ij} > 0]. \quad (5.20)$$

Après avoir caractérisé l'erreur sur une seule composante du vecteur \tilde{Z} , le nombre d'erreur dans ce vecteur en fonction du bruit d'estimation des différences du temps d'arrivée est ci après quantifié.

Nombre de bits d'erreur dans \tilde{Z} en fonction du bruit d'estimation des TDOA

\tilde{Z} est formé de $N(N-1)/2$ composantes, tel que

$$\tilde{Z}(l) = \text{sign}(\tilde{\tau}_{ij}), \quad l = \frac{(j-2)(j-1)}{2} + i \quad (5.21)$$

$\forall (i, j) \in \{(1, 2), (1, 3), (2, 3), (1, 4), (2, 4), \dots, (N-1, N)\}$.

On peut écrire

$$\tilde{Z} = B \cdot Z \quad (5.22)$$

avec $Z(l) = \text{sign}(\tau_{ij})$ et B est une variable aléatoire formée par $n = N(N - 1)/2$ termes tels que

$$\begin{aligned} B(l) &= 1 & \text{si } \text{sign}(\tilde{\tau}_{ij}) &= \text{sign}(\tau_{ij}) \\ B(l) &= -1 & \text{sinon.} \end{aligned} \quad (5.23)$$

Les n variables de B sont des variables de Bernoulli indépendantes, avec paramètres respectifs $P[B(l) = -1] = p(\tau_{ij}, \sigma_{ij})$. On définit une nouvelle variable intermédiaire X tel que $\forall l \in [1 \dots n]$ on a

$$\begin{aligned} X_l &= 1 & \text{si } B(l) &= -1 \\ X_l &= 0 & \text{sinon.} \end{aligned} \quad (5.24)$$

Le calcul du nombre d'erreur dans le vecteur des signes peut être considéré comme un problème de décompte d'événements rares. Le décompte se fait souvent à travers une somme de variables de Bernoulli X_l , la rareté des événements se traduisant par le fait que les paramètres de ces variables de Bernoulli sont petits. D'après le Paradigme de Poisson, la somme d'un grand nombre de variables de Bernoulli indépendantes de petit paramètre p_l suit approximativement la loi de Poisson. Le nombre d'erreur N_{err} dans le vecteur \tilde{Z} suit donc approximativement la loi de **Poisson** de paramètre λ et on peut alors écrire :

$$N_{err} = \sum_{l=1}^n X_l, \quad \lambda = E[N_{err}] = \sum_{l=1}^n p_l \quad (5.25)$$

avec

$$p_l = P[X_l = 1] = P[b(l) = -1] = p(\tau_{ij}, \sigma_{ij}) = \frac{1}{2} \left(1 + \text{erf} \left(\frac{-\tau_{ij}}{\sqrt{2}\sigma_{ij}} \right) \right). \quad (5.26)$$

Validation par simulation Dans ce paragraphe on veut valider par simulation le calcul du nombre d'erreurs dans le vecteur des signes des différences du temps d'arrivée bruitées \tilde{Z} . On considère la configuration de la figure 5.9. A une position donnée de la source on calcule les différences du temps d'arrivée à une vitesse constante ($c = 1000m/s$). Les différences des temps d'arrivée sont ensuite bruitées par un bruit additif Gaussien de moyenne nulle et de variance σ_t^2 pour toutes les paires de capteurs. On calcule pour 10000 réalisations aléatoires de Monté-Carlo le nombre d'erreurs dans le vecteur \tilde{Z} . On comparera l'histogramme normalisé du nombre d'erreurs à la distribution de Poisson théorique $\frac{e^{-\lambda}\lambda^k}{k!}$ de paramètre λ donné par l'équation (5.25). Les résultats sont donnés par les figures 5.11 et 5.12.

CHAPITRE 5. NOUVELLE APPROCHE DE LOCALISATION PAR SISMIQUE

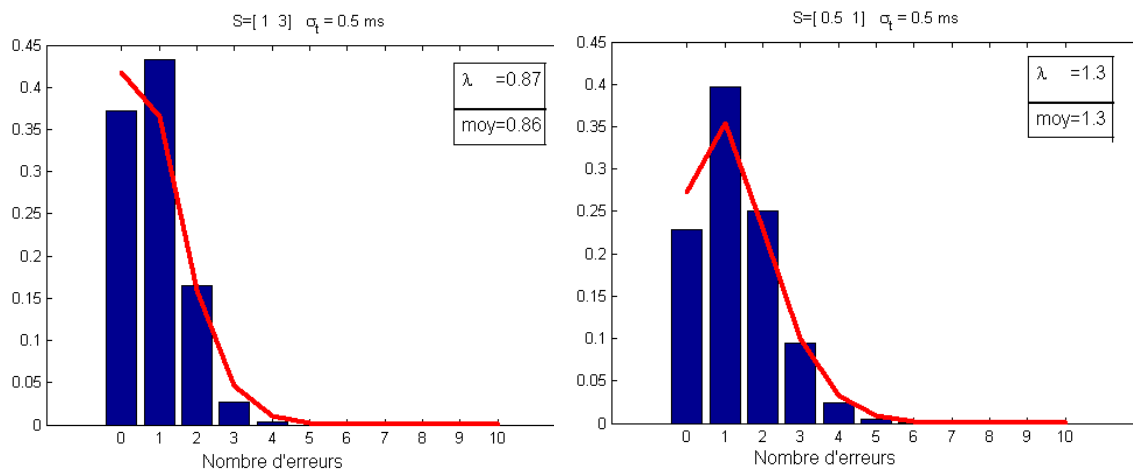


FIGURE 5.11 – Histogramme de la distribution du nombre d'erreurs dans le vecteur caractéristique pour deux positions différentes $S1 = [1 \ 3]$ $S2 = [0.5 \ 1]$. λ paramètre de la loi de Poisson. moy la moyenne du nombre d'erreurs sur 10000 réalisations

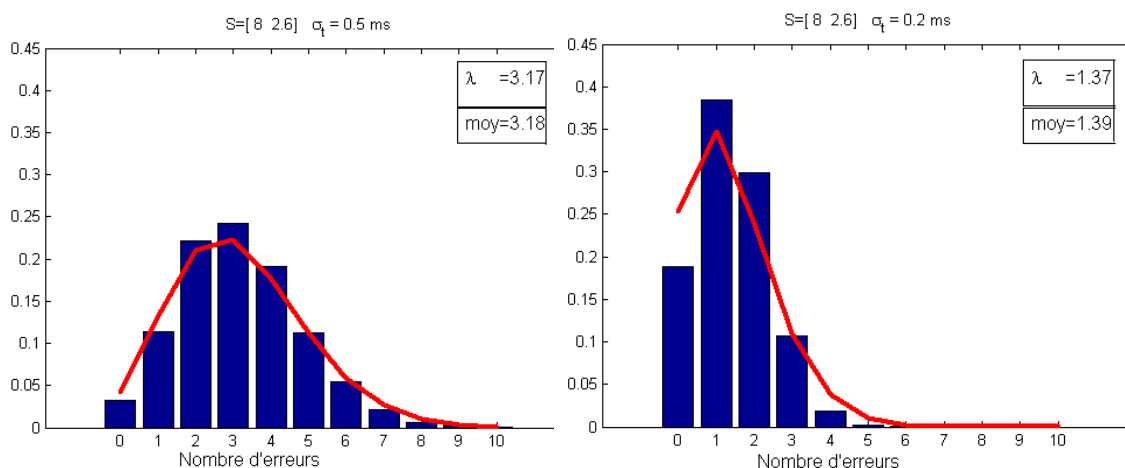


FIGURE 5.12 – Histogramme de la distribution du nombre d'erreurs dans le vecteur caractéristique pour deux σ_t différents à la même position source. λ paramètre de la loi de Poisson. moy la moyenne du nombre d'erreurs sur 10000 réalisations

Les figures 5.11 et 5.12 montrent que le calcul de nombre d'erreurs dans \tilde{Z} peut bien être approché par la loi du Poisson de paramètre λ . De plus, on constate que λ est presque égal à la moyenne du nombre d'erreurs calculée numériquement. La figure 5.11 présente le cas de deux positions dans la salle pour la même variance d'erreur σ_t . On remarque que la moyenne du nombre d'erreurs dépend de la position de la source pour une même variance d'erreur sur les différences du temps d'arrivée. Dans la figure 5.13, on donne la

moyenne du nombre d'erreur dans \tilde{Z} en fonction de la position de la source pour une erreur d'écart type $\sigma_t = 1ms$ sur la détection des temps d'arrivée à tous les capteurs.

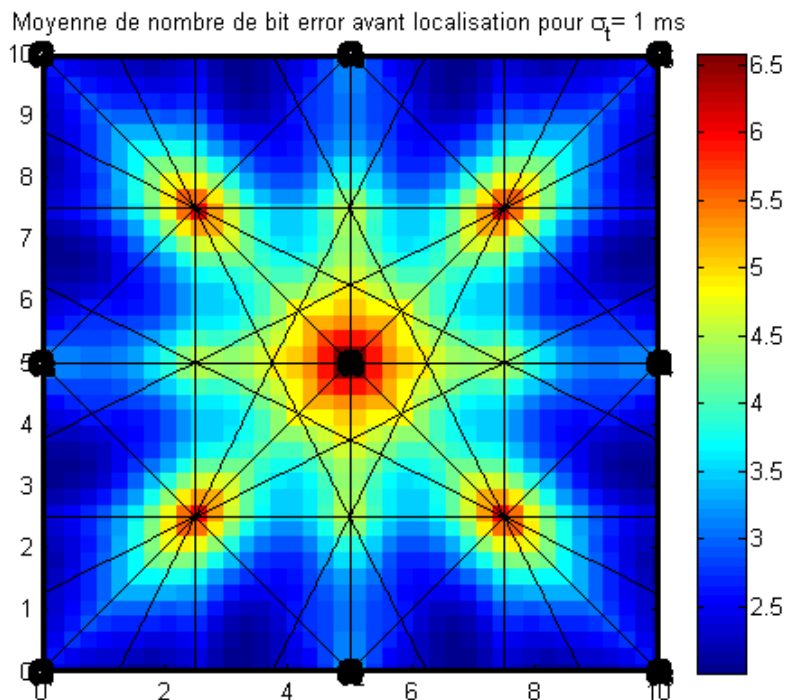


FIGURE 5.13 – Nombre d'erreurs dans \tilde{Z} en fonction de la position pour $\sigma_t = 1ms$: approximation par la moyenne de la loi de Poisson.

Pour finir, on remarque que le nombre d'erreurs dans \tilde{Z} est inférieur à 7 dans le vecteur caractéristique formé de 36 bits (soit 20% d'erreurs) pour un écart type de $1ms$ sur la détection du temps d'arrivée. On observe de plus que le nombre d'erreurs est plus grand au niveau des intersections des médiatrices. En effet, au voisinage de l'intersection des médiatrices les différences du temps d'arrivée correspondantes sont très faibles par rapport au bruit et par suite la probabilité d'erreur sur le signe de ces composantes est plus importante.

Dans la suite, on étudiera le nombre d'erreurs dans le vecteur \hat{Z} à la sortie de l'algorithme SO-TDOA. On comparera ce nombre d'erreur à celui à l'entrée de l'algorithme \tilde{Z} . A-t-on $d_H(Z, \tilde{Z}) < d_H(Z, \hat{Z})$?

5.3.3 Erreur d'entrée $d_H(Z, \tilde{Z})$ Vs erreur de sortie $d_H(Z, \hat{Z})$ d'algorithme SO-TDOA

Le but de ce paragraphe est d'étudier le nombre d'erreurs dans le vecteur caractéristique en sortie de l'algorithme SO-TDOA (donné par $d_H(Z, \hat{Z})$) en fonction du nombre d'erreurs dans le vecteur caractéristique en entrée de l'algorithme SO-TDOA (donné par $d_H(Z, \tilde{Z})$). On considère la configuration donnée par la figure 5.14. On choisit deux positions pour la source $S = [1 \ 2]$ et $S = [4.5 \ 4.8]$.

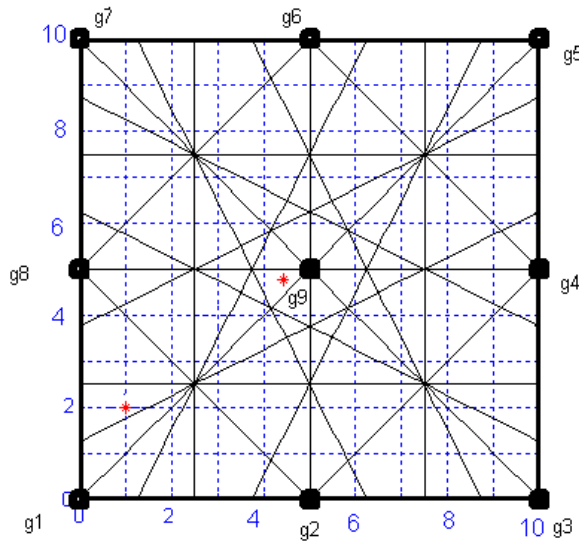


FIGURE 5.14 – Configuration d'étude : $N = 9$ capteurs placés dans une salle $10m \times 10m$. Deux positions pour la source $S = [1 \ 2]$ et $S = [4.5 \ 4.8]$

A une position donnée S , on détermine tout d'abord son vecteur caractéristique Z associé. Ensuite, on introduit aléatoirement un nombre d'erreurs sur ce vecteur pour obtenir \tilde{Z} . On applique alors l'algorithme SO-TDOA sur \tilde{Z} pour obtenir une position estimée \hat{S} et son vecteur caractéristique \hat{Z} . Dans les figures 5.15 et 5.16, on donne à une position donnée les histogrammes du nombre d'erreurs en sortie $d_H(Z, \hat{Z})$ en fonction des nombres d'erreurs en entrée $d_H(Z, \tilde{Z})$ pour 1000 réalisations aléatoires de répartition d'erreurs. D'après les figures 5.15 et 5.16 et pour un nombre d'erreurs en entrée inférieur à 7, on retrouve la bonne zone à la quelle appartient la source dans plus que 50% des cas.

CHAPITRE 5. NOUVELLE APPROCHE DE LOCALISATION PAR SISMIQUE

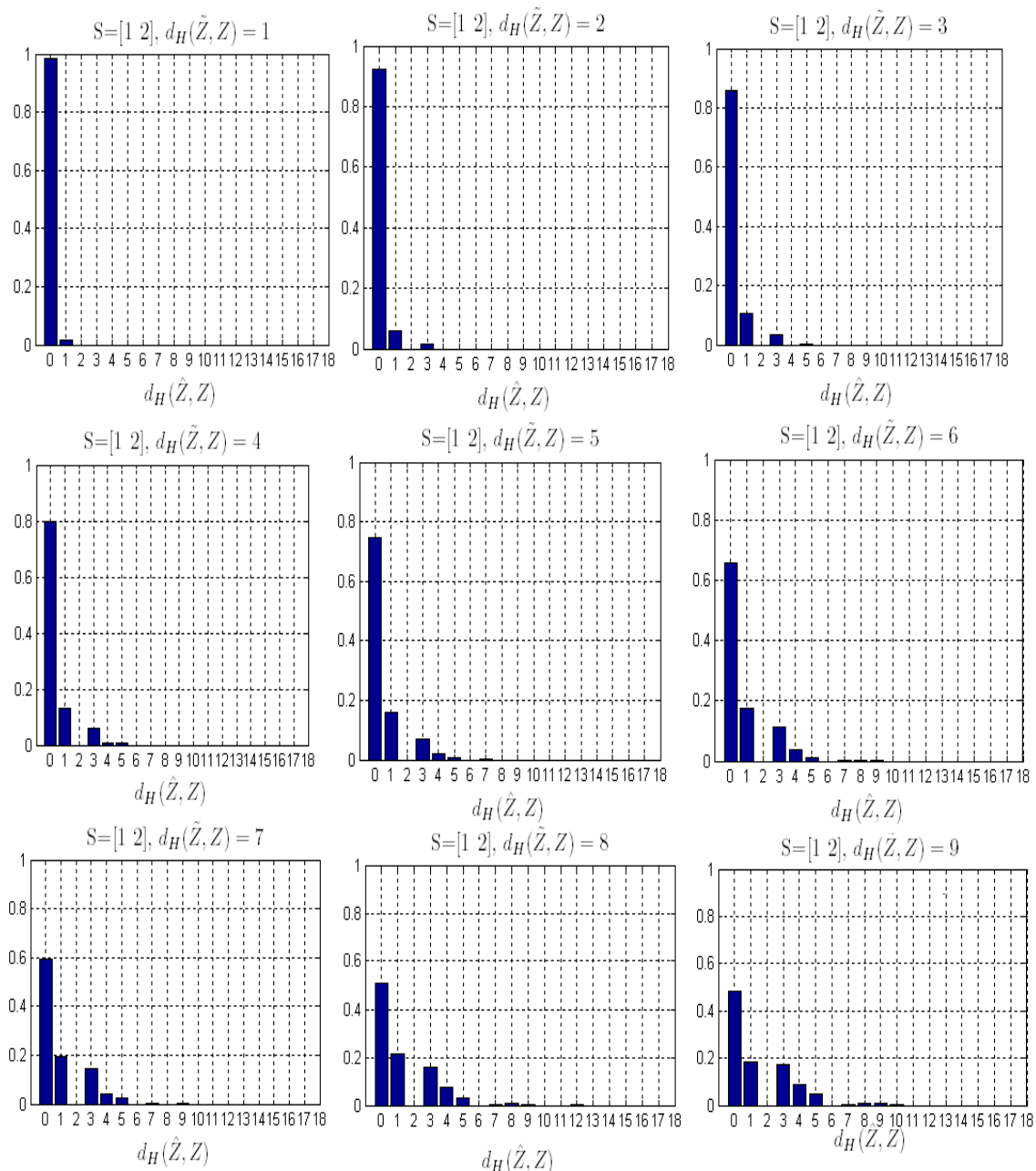


FIGURE 5.15 – Les histogrammes du nombre d’erreurs en sortie $d_H(Z, \hat{Z})$ en fonction des nombres d’erreurs en entrée $d_H(Z, \tilde{Z})$ pour 1000 réalisations aléatoires. $S = [1 \ 2]$

CHAPITRE 5. NOUVELLE APPROCHE DE LOCALISATION PAR SISMIQUE

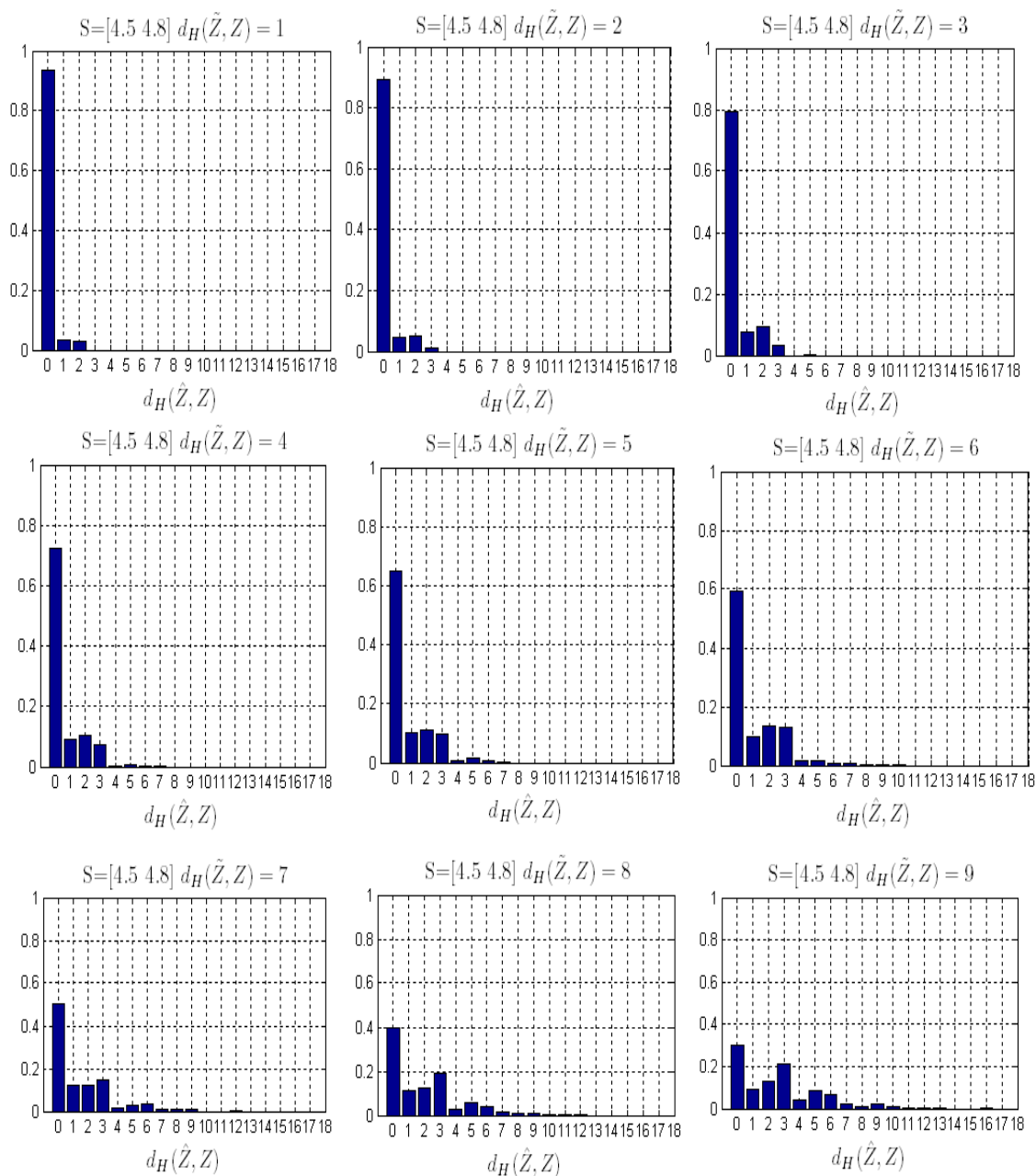


FIGURE 5.16 – Les histogrammes du nombre d’erreurs en sortie $d_H(Z, \hat{Z})$ en fonction des nombres d’erreurs en entrée $d_H(Z, \tilde{Z})$ pour 1000 réalisations aléatoires. $S = [4.5 \ 4.8]$

5.3.4 Erreur d'estimation de la position $d_2(S, \hat{S})$ en fonction de la position de la source dans la salle pour une erreur d'estimation du temps d'arrivée σ_t

Dans ce paragraphe, on s'intéresse à l'étude de l'erreur d'estimation de la position $d_2(S, \hat{S})$ pour chaque position de la source dans la salle à une erreur d'estimation du temps d'arrivée fixe (σ_t). On considère une salle de $10m$ par $10m$ et 9 capteurs dont la configuration est donnée par la figure 5.17. On considère aussi le profil de variation de la vitesse de propagation donné par la figure 5.4 pour $\vartheta = 5.10^{-5}s$.

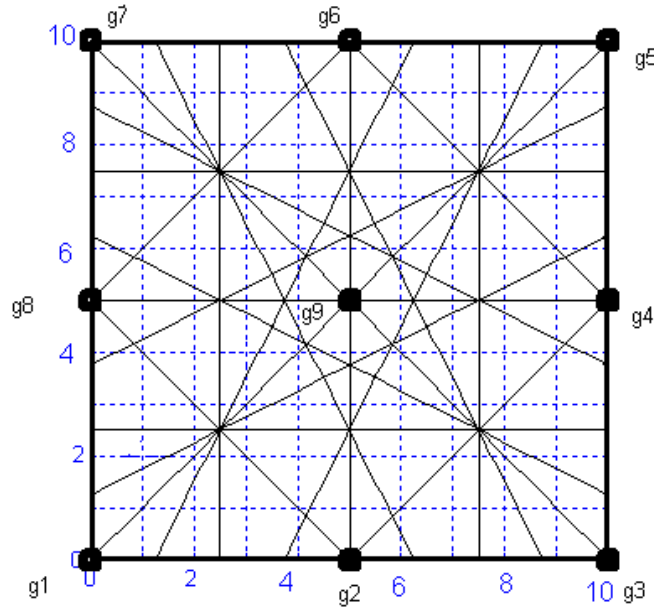


FIGURE 5.17 – Configuration d'étude : $N = 9$ capteurs placés dans une salle $10m \times 10m$.

Pour chaque position de la source dans la salle (point d'une grille de 40×40 régulièrement espacées dans la salle), on calcule les temps d'arrivée aux différents capteurs à partir du modèle de variation de la vitesse. Ces temps d'arrivée sont ensuite bruités par une erreur Gaussien de moyenne nulle et de variance σ_t^2 . On procède ensuite à l'estimation de la position de la source à partir des temps d'arrivée bruités par le nouvel algorithme SOTDOA. En utilisant $M_c = 500$ réalisations Monte-Carlo, on calcule la racine de l'erreur quadratique moyenne entre la position réelle et la position estimée à chaque réalisation. Les résultats sont données par la figure 5.18.

CHAPITRE 5. NOUVELLE APPROCHE DE LOCALISATION PAR SISMIQUE

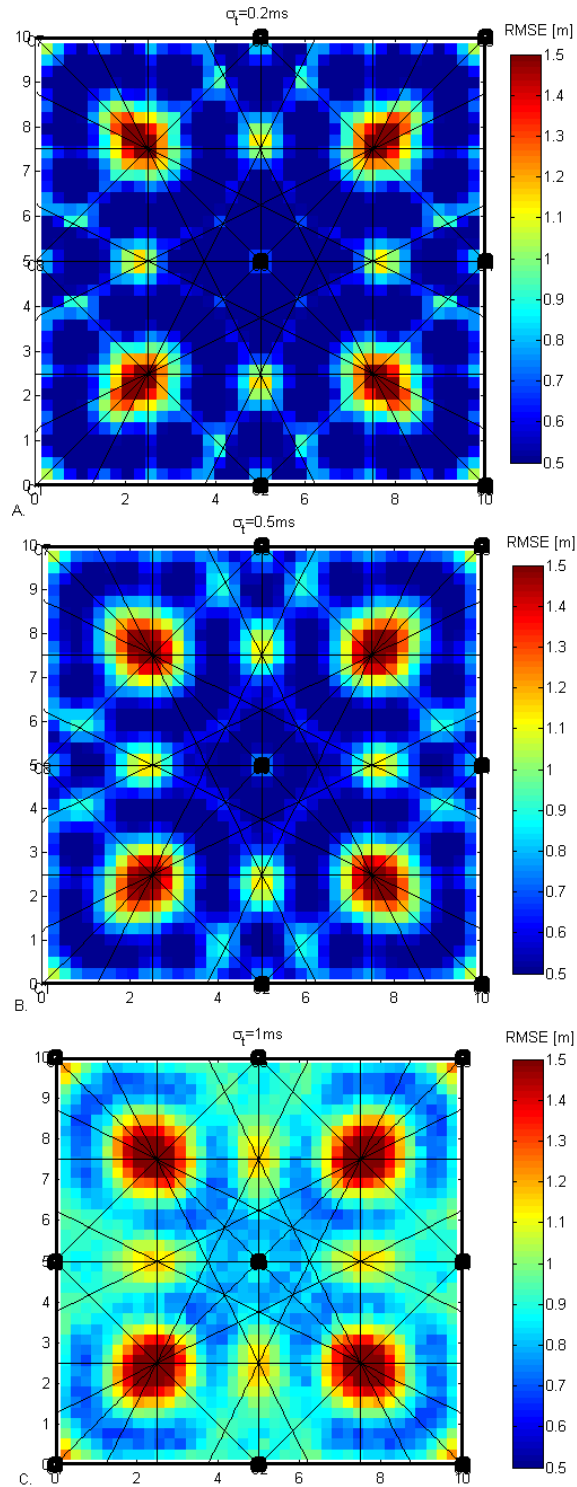


FIGURE 5.18 – Racine de l'erreur quadratique moyenne entre la position réelle et la position estimée RMSE en mètre. Pour une erreur d'estimation des temps d'arrivée de A. $\sigma_t = 0.2\text{ms}$. B. $\sigma_t = 0.5\text{ms}$ et C. $\sigma_t = 1\text{ms}$.

La figure 5.18 montre que l'erreur d'estimation de la position peut varier selon la position à estimer pour la même variance d'erreur sur les temps d'arrivée. Elle est inférieure à $1m$ à $\sigma_t = 0.2ms$ (soit une erreur à $\pm 3\sigma_t$ de $\pm 0.6ms$ même ordre de grandeur que les erreurs expérimentaux présentées dans le paragraphe 3.4.2) et $\sigma_t = 0.5ms$ (soit une erreur à $\pm 3\sigma_t = \pm 1.5ms$) pour la plupart des points dans la salle sauf en quelques régions. En effet, on constate que ces quelques régions (4 régions) sont localisées à l'intersection de plusieurs médiatrices où les différences du temps d'arrivée (TDOA) sont très faibles pour plusieurs paires de capteurs causant une ambiguïté sur le signe de TDOA.

5.4 Validation de l'algorithme SO-TDOA sur des données expérimentales

5.4.1 Présentation de l'expérimentation

L'expérimentation s'est déroulée sur une dalle d'épaisseur $20cm$ recouverte de carrelage, figure 5.19. L'espace considéré dans cette étude est de largeur $lx = 3.6m$ et de longueur $ly = 5.4m$. La répartition des 9 capteurs (c1, c2, c3, c4, c5, c6, c7, c8, c9) est donnée par la figure 5.20. Les signaux sont captés par deux types de capteurs ; 6 céramiques piézo-électriques mono-axiales fixées au sol par des poids de $5Kg$ et 3 Colibrys SF3000L tri-axiaux (c5, c6, c7) fixés au sol par un scotch double face. Le dispositif d'acquisition est la station DL850. YOKOGAWA et la fréquence d'échantillonnage est $20KS/s$.

Les neuf capteurs disposés dans la salle permettent de diviser la salle en plusieurs zones (Figure 5.20).

La première étape de l'algorithme consiste à déterminer les coordonnées P_{s_k} du centre s_k de chaque zone k et son vecteur caractéristique Z_k . Le calcul de ces coordonnées n'est pas trivial géométriquement (Figure 5.20), étant donnée la variabilité des géométries des zones et leurs répartitions. Cette étape de l'algorithme se fait une seule fois, après l'installation des capteurs dans la salle car elle ne dépend que de leurs nombres et leurs dispositions dans la salle. Pour trouver les coordonnées des centres des zones, on partitionne la salle avec un maillage de points de pas très petit, dans le présent cas d'étude, le pas de maillage est choisi sur la largeur égale à $lx/201 = 18cm$ et sur la longueur égale à $ly/201 = 27cm$. L'ensemble de ces points formant le maillage sont classifiés selon leur vecteur caractéristique Z_k en sous-ensembles de même classe, chaque classe représente une zone. Le barycentre

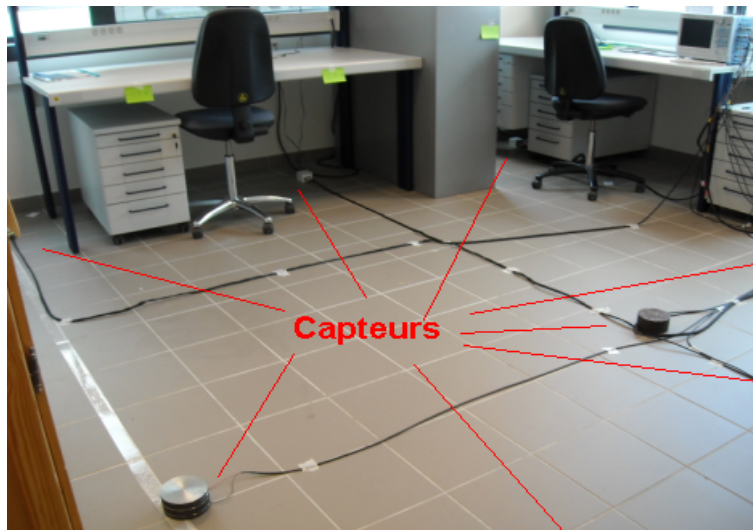


FIGURE 5.19 – Expérimentation du premier étage d’un bâtiment au CEA Grenoble pour la validation de l’algorithme de localisation par zone

des points d’une même classe est le centre s_k de la zone k .

A l’issue de cette étape, on dispose d’une bibliothèque qui contient le nombre de zones, les coordonnées du centre de chaque zone et le vecteur caractéristique d’une zone donnée.

5.4.2 Exploitation des données expérimentales

Le but de ce paragraphe est de valider l’algorithme SO-TDOA décrit dans le paragraphe 5.1 sur des pas réels dans la salle. Pour cela, on a réalisé 7 pas localisés comme suit (figure 5.21).

Footstep	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7
Position	3.3	1.8	2.25	1.35	3	1.35	0.9
[m]	4.2	4.05	3.3	4.8	2.4	2.25	1.35

TABLE 5.1 – Positions des pas réels réalisés

L’erreur d’estimation de la position d’un pas sur les signaux expérimentaux est donnée par le tableau suivant 5.2. D’après le tableau 5.2, on constate que l’erreur d’estimation de la position d’un pas sur le sol par l’algorithme SO-TDOA de localisation est de quelques dizaines de centimètres. Cette erreur est petite par rapport aux dimensions de l’espace considéré par notre

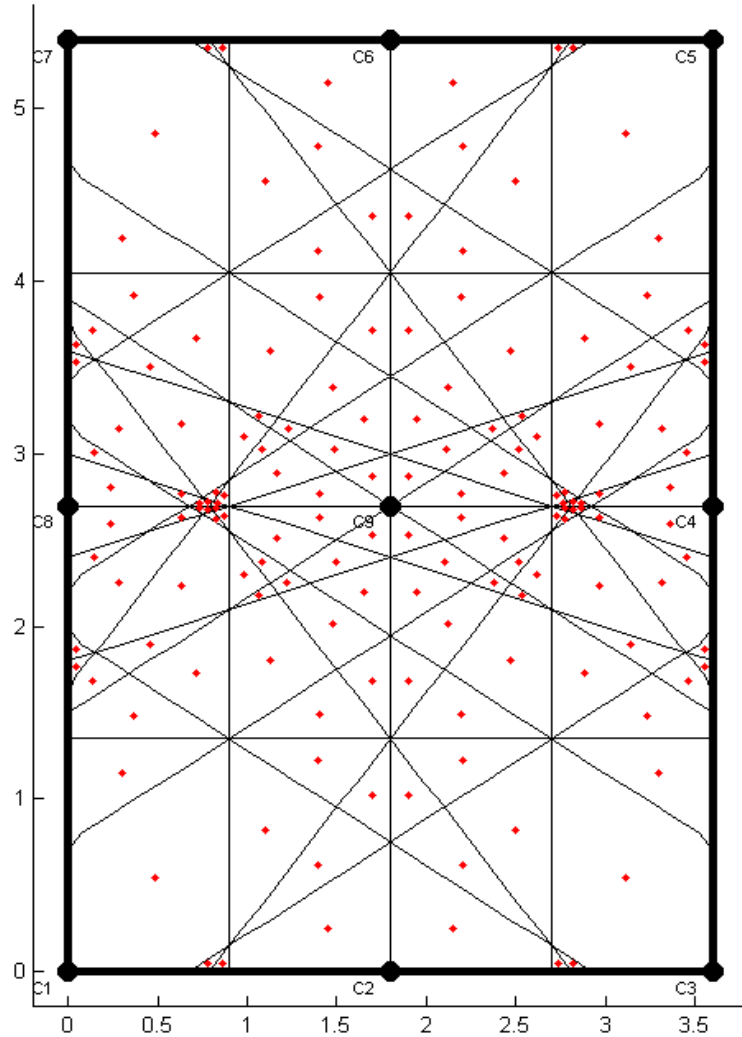


FIGURE 5.20 – Configuration expérimentale : centre des zones

étude. Le nouvel algorithme donne de bons résultats de localisation de personnes à l'intérieur des bâtiments.

Footstep	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7
Estimation error [m]	0.68	0.42	0.54	0.33	0.36	0.29	0.57

TABLE 5.2 – Erreur d'estimation de la position d'un pas sur le sol par l'algorithme SO-TDOA : résultats expérimentaux

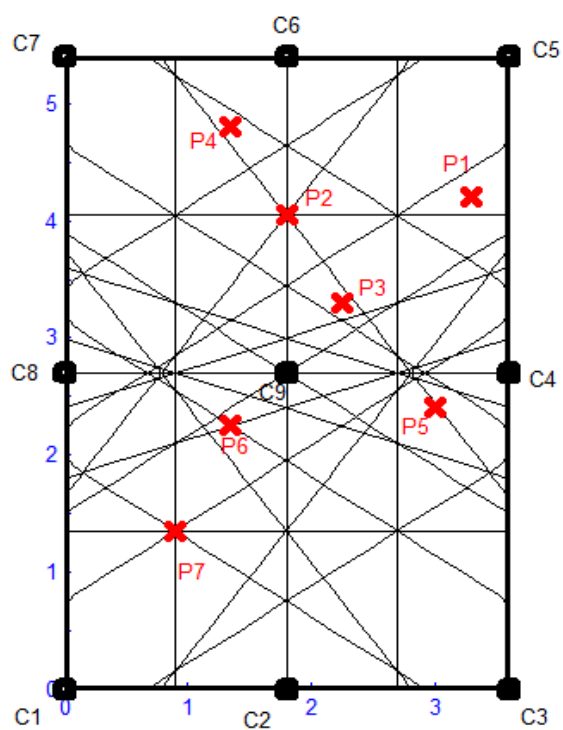


FIGURE 5.21 – Positions des pas réalisés

5.5 Conclusion

Dans ce chapitre on a proposé une nouvelle approche de localisation de personnes à l'intérieur des bâtiments par ondes sismiques. La nouvelle approche est basée sur une estimation des signes des différences du temps de vol entre capteurs. Elle consiste à diviser l'espace considéré en petites régions selon un critère basé sur l'ordonnement des temps d'arrivée aux capteurs. Chaque région est ensuite caractérisée par un vecteur et un centre. La minimisation de la distance de Hamming entre le vecteur caractéristique de la source et les vecteurs caractéristiques des régions permet d'estimer les régions envisagées. La position de la source est calculée à partir du barycentre des centres des régions minimisant la distance de Hamming. L'algorithme SO-TDOA a été détaillé dans ce chapitre donnant les différentes étapes d'estimation.

Une comparaison entre le nouvel algorithme proposé SO-TDOA et l'algorithme hyperbolique basé sur l'estimation d'une vitesse moyenne a permis de conclure quant à l'efficacité de l'algorithme SO-TDOA dans un environnement dispersif et dissipatif où la vitesse décroît en fonction de la distance source-capteur.

Une validation expérimentale de l'algorithme SO-TDOA a été effectuée sur des signaux de pas réels. Les résultats trouvés sont intéressants. En effet, dans une salle de dimensions de $3.6m$ par $5.4m$, l'erreur d'estimation de la positions des pas effectués est de l'ordre de quelques dizaines de centimètres.

Chapitre 6

Localisation dynamique

Sommaire

6.1	Filtre de Kalman adapté à la localisation dynamique d'une personne	95
6.1.1	Modèle dynamique	95
6.1.2	Modèle d'observation	95
6.1.3	Algorithme de poursuite	96
6.2	Résultats de simulation	97
6.2.1	Trajectoire linéaire par morceaux	97
6.2.2	Trajectoire circulaire	100
6.3	Résultats expérimentaux	102
6.4	Conclusion	106

Ce chapitre a pour objectif de proposer un algorithme basé sur le filtre de Kalman pour la localisation dynamique de personne par ondes sismiques dans le bâtiment. Une validation numérique et expérimentale de l'algorithme sont également développées dans ce chapitre.

6.1 Filtre de Kalman adapté à la localisation dynamique d'une personne

Le problème consiste à poursuivre une personne qui se déplace dans une salle. La source est donc à chaque fois localisée à l'endroit de l'impact du pas lors de la marche. On définit l'état de la source (la personne effectuant un pas) à l'instant k comme $s^k = [x^{k-1} \ y^{k-1} \ x^k \ y^k]^t$, où $p^k = [x^k, y^k]^t$ est la position de la source. Il est important de noter que les instants considérés dans le présent algorithme ne correspondent pas au temps d'échantillonnage du système d'acquisition. En fait, on propose dans cet algorithme d'utiliser les instants de détection des pas pour échantillonner la trajectoire. Les instants sont donc cadencés par la marche de la personne. Par conséquent, si cette dernière s'arrête, l'instant k ne sera pas incrémenté jusqu'à ce qu'elle se déplace à nouveau.

6.1.1 Modèle dynamique

On modélise le mouvement de la personne à chaque instant par :

$$p^k = p^{k-1} + (p^{k-1} - p^{k-2}). \quad (6.1)$$

Le modèle dynamique défini par l'équation (6.1) traduit la marche d'une personne dans une direction constante, avec des pas de longueur constante. On choisit de considérer ce modèle dynamique pour sa simplicité. Un tel modèle simplifié conduit à proposer le modèle dynamique linéaire pour s^k sous forme matricielle suivante :

$$s^k = F s^{k-1} + w^k, \quad \text{avec } F = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ -1 & 0 & 2 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 2 \end{bmatrix}, \quad (6.2)$$

où w^k est un bruit qu'on suppose Gaussien de moyenne nulle et de matrice de covariance Q^k . Ce bruit d'état introduit dans l'équation (6.2) permet de prendre en compte l'écart entre le modèle et la réalité (le choix de la covariance de bruit sera discuté plus tard).

6.1.2 Modèle d'observation

On note $z^k = [z_x^k \ z_y^k]^t$ la position de la source estimée par l'algorithme de localisation statique SO-TDOA à partir de la mesure des signes des différences du temps d'arrivée. La mesure z^k constitue l'observation dans notre

système et elle s'exprime en une fonction linéaire de s^k et du bruit v^k sous la forme matricielle suivante :

$$z^k = Hs^k + v^k, \text{ avec } H = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (6.3)$$

où v^k est un bruit blanc qu'on suppose Gaussien de moyenne nulle et de matrice de covariance R^k . Ce bruit modélise l'erreur d'estimation sur la position déterminée par l'algorithme SO-TDOA (le choix de la covariance du bruit sera discuté plus tard).

6.1.3 Algorithme de poursuite

On propose dans ce paragraphe de développer un filtre optimal pour les modèles d'état et d'observation proposés. Les équations étant linéaires et les perturbations Gaussiennes, le filtre optimal au sens de l'erreur quadratique moyenne est le filtre de Kalman discret [RAG04]. On note s^{k-} et P^{k-} la moyenne et la matrice de covariance de la distribution *a priori*. s^{k-} est l'estimateur optimal de l'état intégrant l'ensemble des observations jusqu'à $k-1$. On note aussi \hat{s}^k et P^k la moyenne et la matrice de covariance de la distribution *a posteriori*, c'est à dire prenant en compte l'observation k . A chaque instant k , l'algorithme de poursuite se résume ainsi :

1. Estimer z^k , la position de la source par l'algorithme de localisation statique SO-TDOA à partir de la mesure des différences du temps d'arrivée.
2. Mettre à jour le vecteur d'état $s^{k-} = [\hat{p}^{k-1} \hat{p}^{k-}]^t$ et la matrice de covariance de la distribution *a priori* :

$$\begin{aligned} s^{k-} &= F\hat{s}^{k-1}, \\ P^{k-} &= FP^{k-1}F^t + Q^{k-1}. \end{aligned} \quad (6.4)$$

3. Mettre à jour l'état $\hat{s}^k = [\hat{p}^{k-1} \hat{p}^k]^t$ en intégrant la dernière observation (k) à l'estimateur et la matrice de covariance P^k de la distribution *a posteriori* (équations de Kalman) :

$$\begin{aligned} K^k &= P^{k-t}H(H P^{k-t}H + R^k)^{-1} \\ \hat{s}^k &= s^{k-} + K^k(z^k - Hs^{k-}) \\ P^k &= (I - K^kH)P^{k-}. \end{aligned} \quad (6.5)$$

La position de la source estimée à l'instant k par l'algorithme de poursuite proposé est alors donnée par

$$\hat{p}^k = H\hat{s}^k. \quad (6.6)$$

6.2 Résultats de simulation

Pour valider l'algorithme de poursuite proposé dans la section 6.1.3, on considère une salle de $5.4m$ par $5.4m$ et 9 capteurs distribués selon la configuration de la figure 6.1. On donnera dans les paragraphes suivants les résultats de simulation pour deux trajectoires : une trajectoire linéaire par morceaux et une trajectoire circulaire.

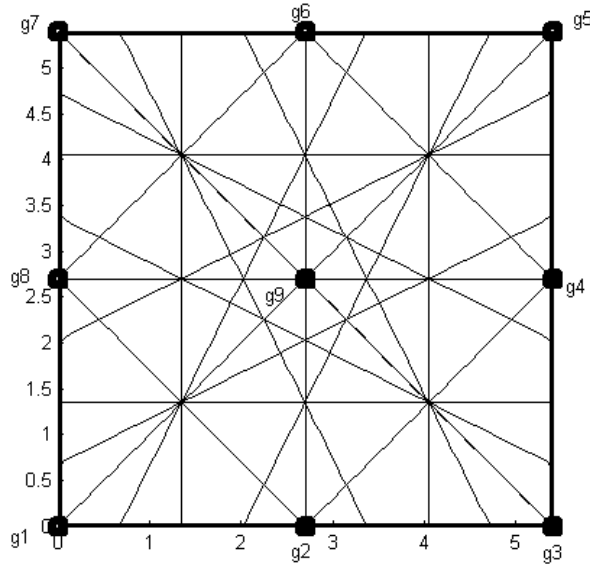


FIGURE 6.1 – Configuration de simulation : 9 capteurs dans une salle de $5.4m$ par $5.4m$.

6.2.1 Trajectoire linéaire par morceaux

On définit une trajectoire formée par 25 pas tels que deux pas successifs sont séparés de $35cm$ (distance moyenne entre deux pas selon [dis]). La trajectoire est constituée par deux morceaux linéaires, figure 6.2. Pour chaque pas de la trajectoire, on simule le vecteur du temps d'arrivée aux 9 capteurs selon :

$$t_i = d_i/c(d_i) + n_i, \quad (6.7)$$

où c est la vitesse de propagation donnée par la figure 5.4 pour $\vartheta = 10^{-5}s$ et n_i est un bruit Gaussien de moyenne nulle et d'écart type σ_t . On choisit σ_t égale à $0.5ms$ soit 68% d'erreur d'estimation du temps d'arrivée dans $[0 - 1]ms$ (erreur perçue sur des signaux expérimentaux 3.4.2).

A chaque instant k de détection, on estime la position de la source par deux algorithmes :

1. l'algorithme statique SO-TDOA (sans prendre en compte le modèle dynamique) ;
2. l'algorithme dynamique du poursuite (en prenant en compte le modèle dynamique).

La matrice de covariance du bruit sur le modèle d'observation est choisie de la forme $R^k = \sigma_{R^k}^2 I_{(2,2)}$, où I est la matrice identité et $\sigma_{R^k}^2$ est la variance du bruit sur l'estimation de la position par l'algorithme SO-TDOA. On fixe cette erreur à une constante en temps égale $\sigma_{R^k} = 0.5m$ [chapitre 5].

La matrice de covariance du bruit sur le modèle dynamique est choisie de la forme $Q^k = \sigma_{Q^k}^2 [0 \ 0 \ 0 \ 0, 0 \ 0 \ 0 \ 0, 0 \ 0 \ 1 \ 0, 0 \ 0 \ 0 \ 1]$, où σ_{Q^k} est l'erreur sur la prédiction en mètre.

Pour comparer les performances des deux algorithmes (statique et dynamique), on calcule la racine de l'erreur quadratique moyenne (REQM) sur la trajectoire moyennée sur 5000 réalisations indépendantes. Les résultats de simulation sont donnés par la figure 6.3.

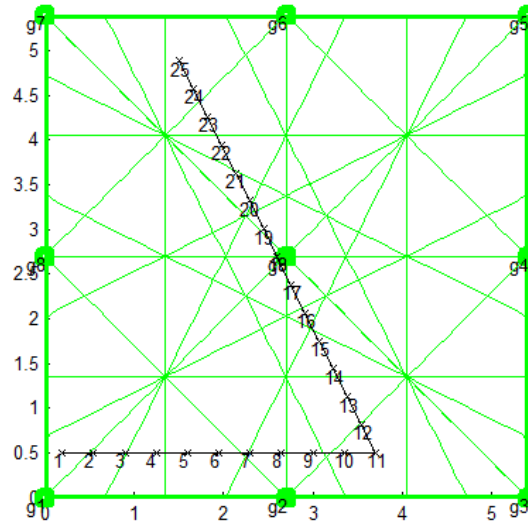


FIGURE 6.2 – Trajectoire linéaire par morceaux formée par 25 pas.

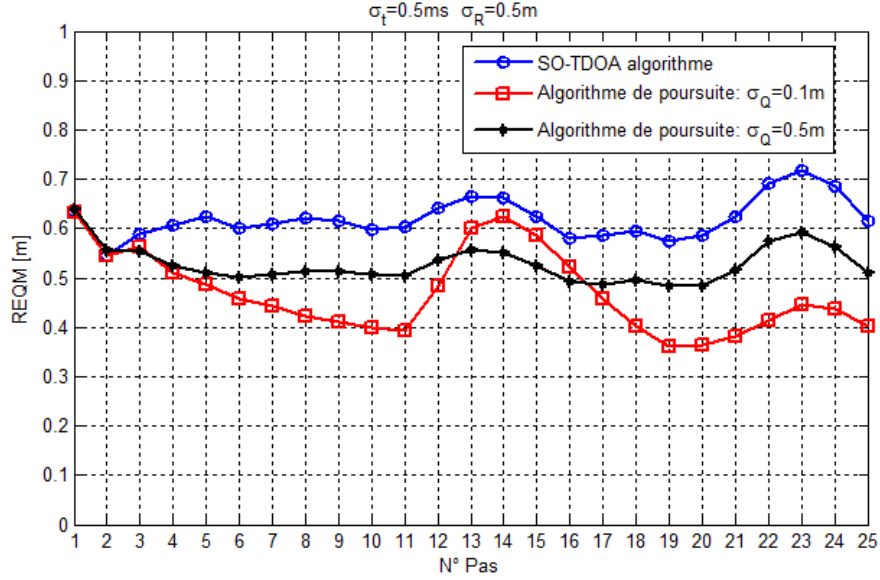


FIGURE 6.3 – Racine de l’erreur quadratique moyenne (REQM) sur la position estimée par SO-TDOA algorithme (o) et par l’algorithme de poursuite (* et \square) pour un bruit gaussien d’écart type $\sigma_t = 0.5ms$ sur les temps d’arrivée. Paramètres : $\sigma_{R^k} = 0.5m$, $\sigma_{Q^k} = 0.1m$ (\square) et $\sigma_{Q^k} = 0.5m$ (*). Trajectoire de la figure 6.2. 5000 réalisations Monte-Carlo.

L’erreur d’estimation de la position par l’algorithme statique SO-TDOA en chaque point de la trajectoire est de l’ordre de $0.6m$ comme le visualise la figure 6.3. L’application de l’algorithme de poursuite qui s’interprète ici comme une simple procédure de dé-bruitage de l’estimée fournie par l’algorithme SO-TDOA a amélioré la localisation. La courbe en (\square) de la figure 6.3 est obtenue en prenant une erreur sur le modèle dynamique de $\sigma_{Q^k} = 0.1m$. En donnant plus de confiance au modèle dynamique ($\sigma_{Q^k} = 0.1m$) qu’au modèle d’observation ($\sigma_{R^k} = 0.5m$), l’erreur de localisation devient plus faible (de $0.6m$ à $0.4m$) en avançant sur la trajectoire linéaire (du ‘pas 1’ au ‘pas 11’) ensuite au niveau du ‘pas 12’ la trajectoire change et par suite l’erreur de localisation a augmenté (jusqu’à $0.6m$, tout en étant inférieure à l’erreur donnée par l’algorithme statique) pour diminuer de nouveau (à $0.4m$) après quelques pas effectués.

La courbe en (*) de la figure 6.3 est obtenue en prenant une erreur sur le modèle dynamique de $\sigma_{Q^k} = 0.5m$. En donnant la même confiance au modèle dynamique ($\sigma_{Q^k} = 0.5m$) qu’au modèle d’observation ($\sigma_{R^k} = 0.5m$), on a une meilleure capacité d’adaptation au changement de la trajectoire (REQM reste ‘faible’ à $t = 11, 12, 13$).

Pour conclure, si le modèle dynamique n’est pas très éloigné de la trajectoire

réelle réalisée, les performances de l'algorithme dynamique sont meilleures que celles de l'algorithme statique.

6.2.2 Trajectoire circulaire

On définit une deuxième trajectoire formée par 25 pas et tel que deux pas successifs sont séparés de $36cm$. La nouvelle trajectoire est un cercle, voir figure 6.4. On rappelle que le modèle dynamique considéré par l'algorithme proposé est un modèle linéaire entre deux pas successifs. On calcule la REQM sur la trajectoire moyennée sur 5000 réalisations indépendantes. L'écart type du bruit sur les temps est $\sigma_t = 0.5ms$. Les résultats de simulation sont donnés par la figure 6.5.

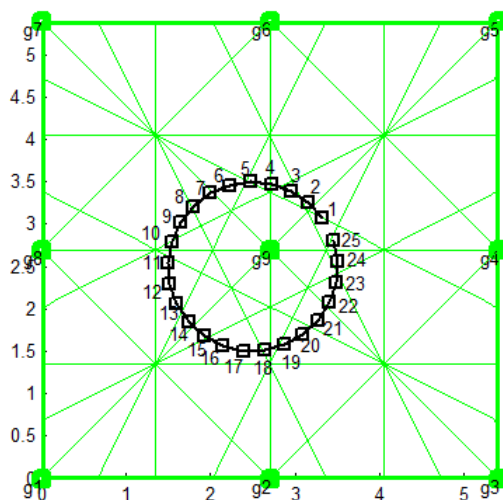


FIGURE 6.4 – Trajectoire circulaire formée par 25 pas.

Bien que la trajectoire ne soit pas linéaire, l'erreur d'estimation de la position par l'algorithme de poursuite est inférieure à celle de l'algorithme statique. La trajectoire circulaire peut être assimilée à une trajectoire linéaire par morceaux à l'échelle d'un pas. En prenant un bruit d'état élevé ($\sigma_{Q^k} = 0.5m$), on se met à suivre le bruit d'observation puisque la 'confiance' faite au modèle est moindre. Ce qui explique que la REQM pour $\sigma_{Q^k} = 0.5m$ est supérieure à la REQM pour $\sigma_{Q^k} = 0.1m$. Le filtre de Kalman est alors plutôt utilisé pour le dé-bruitage de l'estimée fournie par l'algorithme SO-TDOA.

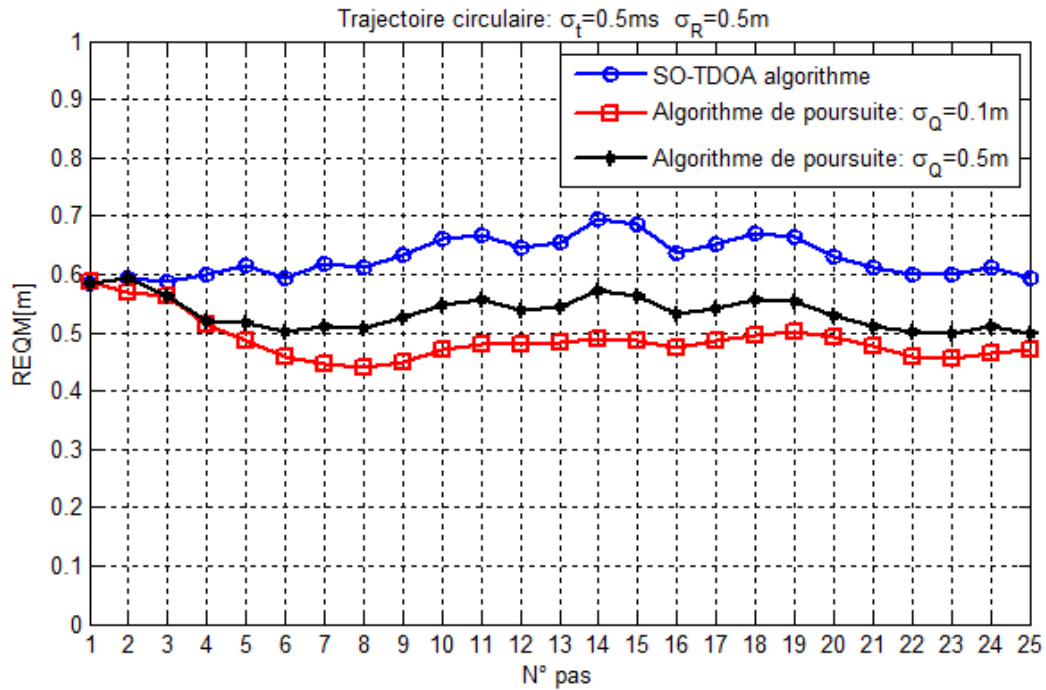


FIGURE 6.5 – Racine de l’erreur quadratique moyenne (REQM) sur la position estimée par SO-TDOA algorithme (\circ) et par l’algorithme de poursuite ($*$ et \square) pour un bruit gaussien d’écart type $\sigma_t = 0.5ms$ sur les temps d’arrivée. Paramètres : $\sigma_{R^k} = 0.5m$, $\sigma_{Q^k} = 0.1m$ (\square) et $\sigma_{Q^k} = 0.5m$ ($*$). Trajectoire de la figure 6.4. 5000 réalisations Monte-Carlo.

Dans le paragraphe suivant, on donnera les résultats expérimentaux de localisation.

6.3 Résultats expérimentaux

L'expérimentation s'est déroulée sur une dalle d'épaisseur $h = 20cm$ recouverte de carrelage (figure 6.6). L'espace considéré dans cette étude est le même que dans la section précédente, figure 6.1. Les signaux sont mesurés par deux types de capteurs ; 5 céramiques piézo-électriques mono-axiales et 4 Colibrys SF3000L tri-axiaux (g1, g3, g5, g7). Le dispositif d'acquisition est la station DL850. YOKOGAWA et la fréquence d'échantillonnage est $20KHz$. On définit trois trajectoires représentant des caractéristiques similaires à celles étudiées en simulation. Les trajectoires sont données par la figure 6.6 : une trajectoire linéaire, une trajectoire linéaire par morceaux et une trajectoire elliptique. Deux types de marche ont été utilisés : une marche pieds nus et une marche avec des chaussures en talon. A titre de remarque : la détection des temps d'arrivée est plus facile sur les signaux relatifs à la marche avec des chaussures en talon car cette dernière génère des composantes fréquentielles plus hautes.

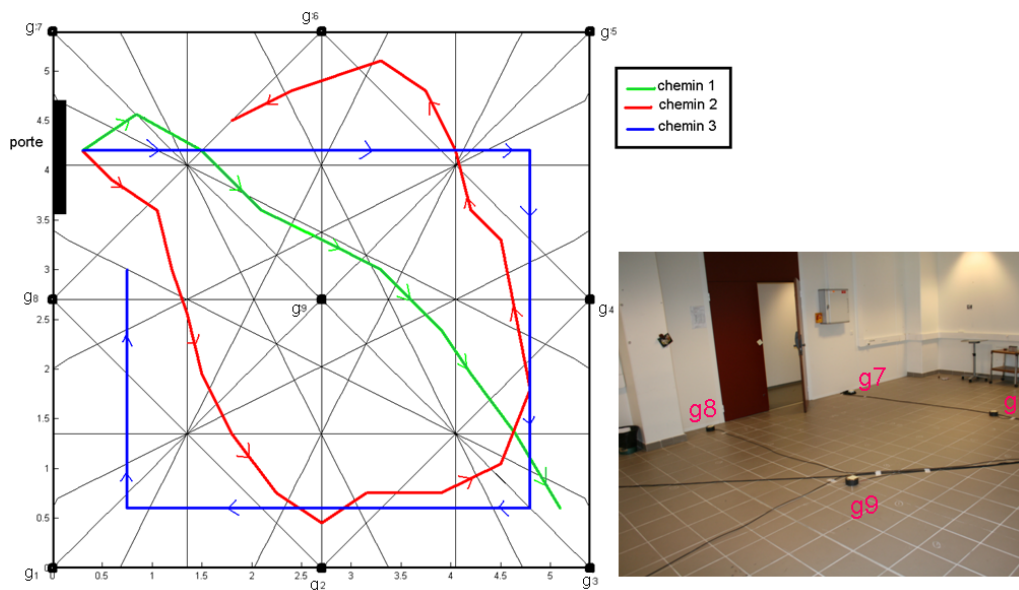


FIGURE 6.6 – Expérimentation du 1er étage du bâtiment 51C du CEA Grenoble pour la validation de l'algorithme de poursuite. Trois trajectoires.

Les résultats de la localisation dynamique sont donnés par les figures 6.7 (pieds nus), 6.8 (pieds nus) et 6.9 (chaussures en talon) pour les paramètres : $\sigma_Q = 0.1m$ et $\sigma_R = 1m$. L'estimation des temps d'arrivée est effectuée par l'algorithme de détection de changement de variance dans le signal détaillé

dans le chapitre 2.

D'après les figures 6.7, 6.8 et 6.9, l'algorithme de localisation dynamique permet de suivre approximativement un trajet expérimental quelconque dans la salle.

Si deux pas sont réalisés dans la même zone ou dans deux zones voisines, les positions estimées par l'algorithme statique SO-TDOA peuvent coïncider à la même position (centre de la zone) (exemple : pas 9 et 10 ou 7 et 8 dans la figure 6.7). Dans un tel cas, l'algorithme de poursuite permet de mieux suivre la personne en mouvement puisqu'il intègre le modèle dynamique linéaire.

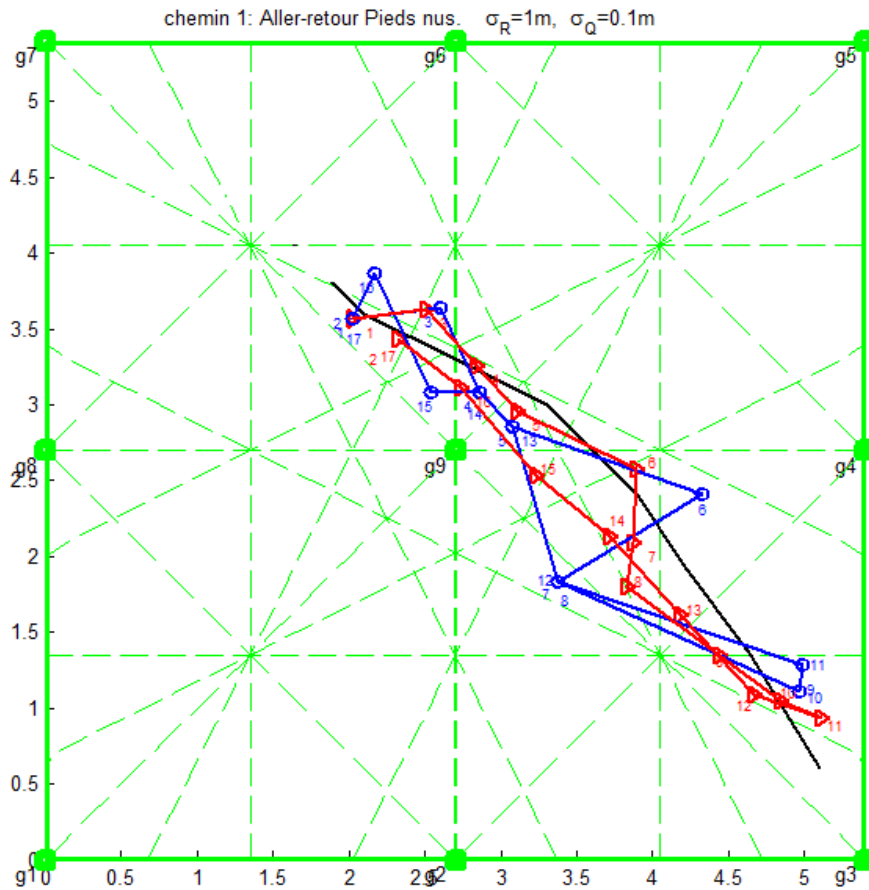


FIGURE 6.7 – Résultats expérimentaux de la localisation dynamiques : Trajectoire 1. "Marche pieds nus aller et retour". Légende : "noir" trajet réel (-), "bleu" trajet estimé par SO-TDOA algorithme (o), et "rouge" trajet estimé par l'algorithme de poursuite (\triangleright).

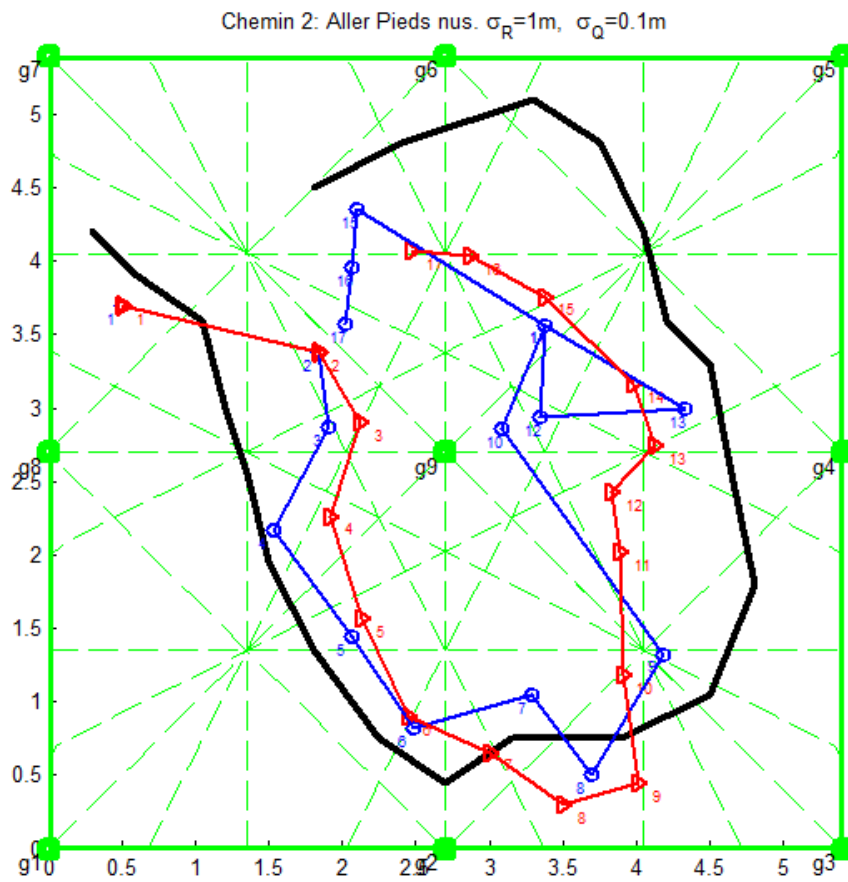


FIGURE 6.8 – Résultats expérimentaux de la localisation dynamiques : Trajectoire 2."Marche pieds nus aller simple". Légende : "noir" trajet réel (-), "bleu" trajet estimé par SO-TDOA algorithme (o), et "rouge" trajet estimé par l'algorithme de poursuite (\triangleright).

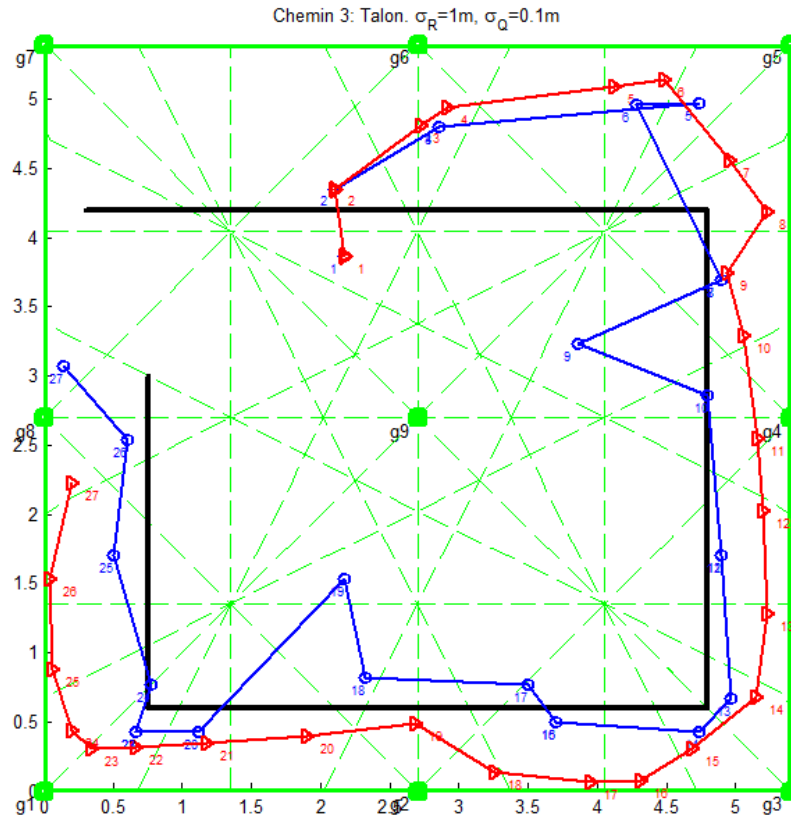


FIGURE 6.9 – Résultats expérimentaux de la localisation dynamiques : Trajectoire 3. "Marche avec des chaussures en talon". Légende : "noir" trajet réel (-), "bleu" trajet estimé par SO-TDOA algorithme (o), et "rouge" trajet estimé par l'algorithme de poursuite (\triangleright).

6.4 Conclusion

Dans ce chapitre on a proposé un algorithme de localisation dynamique basé sur l'algorithme SO-TDOA et le filtre de Kalman. Ce dernier a été adapté à la marche d'une personne, en utilisant un système d'échantillonnage basé sur les instants de détection des pas. L'algorithme de localisation dynamique a été validé par simulation et sur des signaux expérimentaux. Deux types de marche ont été testés : marche pieds nus et marche avec des talons, pour être plus critique sur les problèmes de détection qui seront alors difficiles si les impacts sont peu lisibles sur les signaux expérimentaux. Les résultats de simulation et expérimentaux ont montré que l'application du filtre de Kalman sur la sortie de l'algorithme SO-TDOA a permis d'améliorer les résultats de localisation. Une perspective envisageable est d'appliquer cet algorithme pour la classification selon des chemins prédéfinis. En effet, on a remarqué que les mêmes chemins sont souvent suivis par les personnes dans leurs déplacements quotidiens à l'étage d'un bâtiment.

Conclusion et perspectives

Durant ce travail, nous nous sommes intéressés au problème de la localisation d'une personne en mouvement à l'intérieur des bâtiments par ondes sismiques. Ce problème est un sujet très prospectif dans la mesure où très peu de données expérimentales et d'études théoriques ont été faites dans la l'état de l'art. Les quelques références s'appliquent essentiellement en milieu semi-infini, pour des propagations beaucoup plus simples.

Nous avons introduit au chapitre 1 les différents types d'ondes sismiques susceptibles de se propager dans les milieux solides. Nous avons alors conclu, pour une dalle en béton d'épaisseur 20 à 25cm, que les ondes s'y propageant à des fréquences $< 5\text{KHz}$ sont essentiellement des ondes de plaque (onde de Lamb) d'ordre zéro. Puisqu'un pas excite essentiellement la composante verticale au sol, on s'est intéressé alors aux ondes de Lamb transversales (A_0). Ces dernières sont dispersives : leur vitesse de propagation peut varier entre 500m/s et 2500m/s pour les fréquences entre 200Hz et 5KHz .

En se basant sur l'étude des ondes sismiques développée dans le chapitre 1 et l'exploitation des signaux expérimentaux à l'intérieur d'un bâtiment, nous avons pu discuter, dans les chapitres 2 et 3, de l'applicabilité des techniques de localisation de source sismique proposées dans l'état de l'art. Trois familles d'approches de localisation sismique ont été étudiées :

- La première est basée sur l'étude de la structure des ondes sismiques dans un volume ou dans un milieu semi-infini. Cette famille a été exclue puisque le milieu de propagation considéré dans notre application est plutôt assimilé à une plaque par rapport aux longueurs d'onde propagées suite à l'impact d'un pas sur le sol. Les ondes propagées (onde de plaque ou de Lamb) dans une plaque n'ont pas la même structure que les ondes propagées dans un volume (ondes de volume) ou dans un milieu semi-infini (ondes de surface).
- La deuxième famille de méthodes est basée sur l'apprentissage. Cette famille de techniques est mieux adaptée à un milieu assimilé à une

plaque. Toutefois, elle exige une faible atténuation et une signature assez similaire d'une réalisation à une autre pour les mêmes positions source-capteur. Ces propriétés ne sont pas vérifiées à l'intérieur d'un bâtiment pour la signature sismique d'un pas. Le problème vient du fait que de faibles variations sur l'excitation conduisent à des signaux très différents. De plus que ces signaux varient en fonction de différents paramètres non contrôlés comme le poids de la personne, le style de la marche ou type de chaussures portées. Cette deuxième famille est alors également exclue.

- La troisième famille est basée sur une hypothèse de propagation à vitesse perçue constante. La vitesse perçue correspond au rapport de la distance parcourue par le temps de première arrivée. A partir de la connaissance des positions de la source et du capteur et en estimant les temps du première arrivée sur des signaux expérimentaux ont a pu montré que cette vitesse perçue prend des valeurs très dispersées entre $500m/s$ et $4500m/s$. Une telle dispersion à courtes distances rend ces techniques inexploitable pour la suite. Une étude théorique de la vitesse de propagation perçue est alors proposée.

Le chapitre 4 a présenté une étude théorique, numérique et expérimentale de la vitesse de propagation perçue dans une dalle en béton en fonction de la distance source-capteur. Cette étude a confirmé que la vitesse perçue dépend de la position source-capteur. Elle a montré qu'elle n'est pas constante et qu'elle diminue en augmentant la distance source-capteur. Cette décroissance démontrée théoriquement à partir des équations de propagation et observée sur des signaux expérimentaux est la seule et unique caractéristique robuste des signaux vibratoires à l'intérieur d'un bâtiment. En se basant sur cette caractéristique, on a alors développé un nouvel algorithme de localisation qui a fait l'objet du chapitre 5.

Le nouvel algorithme (algorithme SO-TDOA) développé est validé en simulation et en expérimentation. L'erreur d'estimation de la position est de l'ordre de quelques dizaines de centimètres. L'algorithme SO-TDOA ne dépend pas du bâtiment puisqu'il ne nécessite pas une étude (ou un apprentissage) préalable des milieux. De plus, l'algorithme proposée n'utilise pas la vitesse de propagation, paramètre difficile à estimer dans les cas réels. L'algorithme SO-TDOA ne dépend, en fait, que la configuration des capteurs.

Une extension du l'algorithme SO-TDOA a été proposée dans le dernier chapitre de ce rapport et qui a donné lieu à un nouvel algorithme de poursuite. Ce dernier a été fondé sur l'exploitation des résultats de localisa-

tion statique du l'algorithme SO-TDOA et l'application du filtre de Kalman. Une validation numérique et expérimentale ont été également établies. Elles ont montré une amélioration des résultats de localisation d'une personne en marche.

Perspectives.

Nous pouvons dégager de ces travaux de thèse un ensemble de perspectives qu'il serait intéressant d'investiguer.

Dans nos travaux, on s'est limité expérimentalement à une dalle en béton d'épaisseur $20cm$, il serait intéressant de tester le nouvel algorithme de localisation sur d'autres types de sols.

Dans nos travaux, on s'est limité aussi à la détection et localisation d'une personne en mouvement à l'intérieur d'un bâtiment. Il serait également intéressant d'étudier la possibilité d'énumérer, séparer et localiser plusieurs personnes en mouvement par l'intégration d'informations *a priori* sur les chemins possibles de déplacement ou en combinant d'autres modes de capteurs non intrusifs.

Pour la partie localisation dynamique, on propose de tester nos algorithmes sur des chemins de mouvement prédéfinis dans un étage par exemple. On suggère également d'étudier la possibilité de localisation à partir d'un sous-groupe de capteurs en fonction des positions antérieures occupées par la personne en mouvement. Une étude du nombre de capteurs et leur disposition optimale pour le nouvel algorithme proposé est à développer. Cette étude pourra s'inspirer des travaux effectuées dans le même objectif pour les algorithmes de localisation par différences de trajet [Yan07].

Le problème d'intégration des capteurs est également laissée en guise de perspective. Plusieurs suggestions sont à tester et valider telles que l'intégration des capteurs de vibration dans la dalle en béton lors de sa construction ou bien sous le revêtement du sol. Les problèmes technologiques liés à l'intégration sont également à résoudre.

Annexe

Annexe A

Localisation basée sur la structure vectoriel des ondes sismiques de surface

Sommaire

A.1 Estimation de la direction d'arrivée	112
A.1.1 Méthode d'analyse des ondes de surface (AOS) . . .	112
A.1.2 Méthode d'analyse de la matrice de covariance (AMC)	113
A.2 Localisation de source à partir de la direction d'arrivée	114
A.3 Étude expérimentale à l'intérieur de bâtiment . . .	115
A.4 Conclusion	119

Les premiers travaux de localisation de personnes par ondes sismiques [SPGP00, SCGP01, SHTY07] ont considéré l'hypothèse de propagation dans un milieu semi infini. Cette hypothèse était choisie sans avoir recours à une justification tenant compte des longueurs d'ondes propagées et de l'épaisseur réel du milieu. Dans cette hypothèse, les ondes qui se propagent à la surface du sol sont les ondes de Rayleigh et de Love (SH). En se basant sur le déplacement vectoriel des particules du sol traversées par ces ondes et en utilisant des capteurs tri-axiaux, plusieurs méthodes ont été développées pour estimer la direction d'arrivée et en déduire la position de la source. Dans ce chapitre, on développera à partir de la littérature deux algorithmes d'estimation de la direction d'arrivée et on donnera quelques résultats expérimentaux sur des signaux de pas enregistrés à l'intérieur des bâtiments.

A.1 Estimation de la direction d'arrivée

A.1.1 Méthode d'analyse des ondes de surface (AOS)

L'onde de Rayleigh génère un mouvement elliptique des particules du sol dans le plan formé par la verticale \vec{z} et la direction d'arrivée \vec{p} . Le mouvement dans la direction \vec{q} orthogonale à ces deux directions est généré par l'onde de Love (SH), figure A.1.

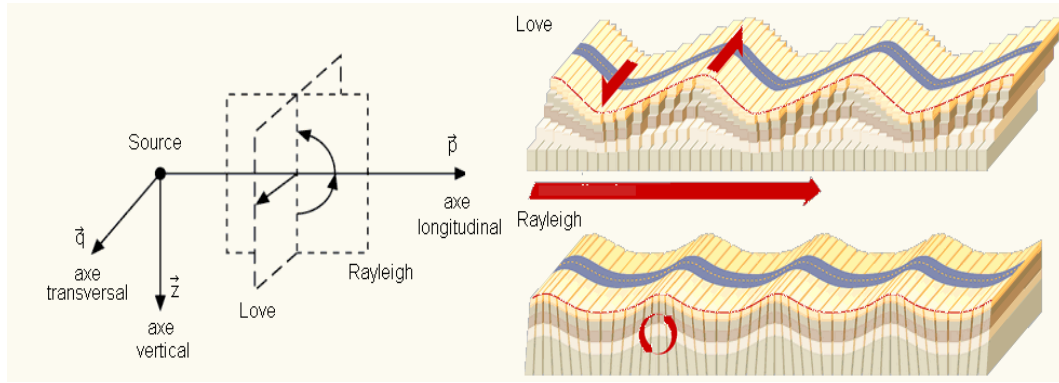


FIGURE A.1 – Mouvement des particules du sol : onde Rayleigh et Love.

L'équation d'une ellipse dans le plan (\vec{z}, \vec{p}) est donnée par $z^2/A_r^2 + p^2/B_r^2 = 1$. Si on suppose que l'onde dans la direction \vec{p} est de la forme $S_p(t) = B_r \sin(t)$, alors elle sera de la forme $S_z(t) = A_r \cos(t)$ selon \vec{z} . En introduisant un déphasage de $\pi/2$ sur le signal S_z , ce dernier qu'on note $S_z^{(\pi/2)}$ est alors en phase avec le signal S_p . La projection du signal $S_z^{(\pi/2)}$ sur le plan du sol donne la composante de l'onde de Rayleigh dans ce plan.

Mathématiquement, on note S_x , S_y et S_z les signaux reçus respectivement sur les axes x , y et z d'un capteur tri-axial, ψ un paramètre du mouvement elliptique dans le plan (\vec{p}, \vec{z}) et θ la direction d'arrivée. Sous l'hypothèse de propagation de l'onde de Rayleigh et Love (SH), on peut écrire pour une onde plane monochromatique [SPGP00, SACH06, SAHY07]

$$\begin{aligned} S_z &= A_r \cos(\psi) e^{ik_x x + ik_y y - i\omega_r t + i\pi/2} \\ S_x &= A_r \sin(\psi) \sin(\theta) e^{ik_x x + ik_y y - i\omega_r t} - E_l \cos(\theta) e^{ik_x x + ik_y y - i\omega_l t} \\ S_y &= A_r \sin(\psi) \cos(\theta) e^{ik_x x + ik_y y - i\omega_r t} + E_l \sin(\theta) e^{ik_x x + ik_y y - i\omega_l t}. \end{aligned} \quad (\text{A.1})$$

A une distance d donnée de la source et à une fréquence donnée ($\omega_r = \omega_l = \omega$), on peut écrire $\omega_r t = \omega d/c_r$ et $\omega_l t = \omega d/c_l$. Avec c_r et c_l sont les

ANNEXE A. LOCALISATION BASÉE SUR LA STRUCTURE
VECTORIEL DES ONDES SISMIQUES DE SURFACE

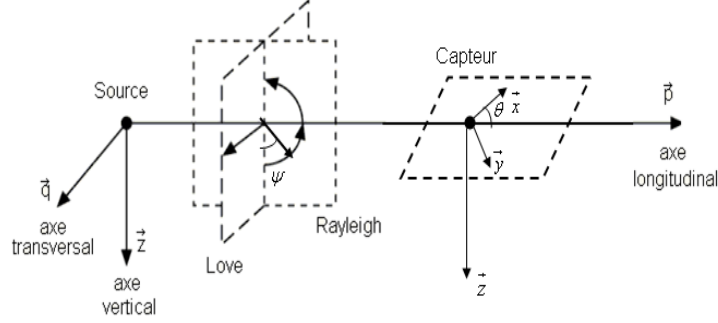


FIGURE A.2 – Mouvement des particules du sol : onde Rayleigh et Love. Réception du signal par le capteur sur les axes \vec{x} et \vec{y} du plan (\vec{p}, \vec{q})

vitesses de propagation des ondes de Rayleigh et Love (SH) respectivement. La projection de $S_z^{(\frac{\pi}{2})} = A_r \cos(\psi) e^{ik_x x + ik_y y - i\omega_r t}$ sur les axes x et y du plan du sol est alors donnée par le produit scalaire $corrX = \langle S_z^{(\frac{\pi}{2})}, S_x \rangle$ et $corrY = \langle S_z^{(\frac{\pi}{2})}, S_y \rangle$ respectivement. La direction d'arrivée de l'onde est donnée par $dirRay$. La direction de polarisation de l'onde de Love (SH) est perpendiculaire à la direction d'arrivée et donnée par $dirLov$.

$$dirRay = [corrX \quad corrY]^T, \quad dirLov = [-corrY \quad corrX]^T. \quad (A.2)$$

La direction d'arrivée θ est alors égale

$$\theta = \tan^{-1}(corrY/corrX). \quad (A.3)$$

Pour obtenir $S_z^{(\frac{\pi}{2})}$ le signal en quadrature de phase avec S_z , on peut soit utilisé l'intégrale de la composante verticale $S_z^{(\frac{\pi}{2})} = \int S_z dt$ [SACH06, SAHY07], ou bien la transformée de Hilbert du signal S_z , $S_z^{(\frac{\pi}{2})} = \text{hilbert}(S_z(t))$ [SPGP00].

A.1.2 Méthode d'analyse de la matrice de covariance (AMC)

Soit S_x , S_y et S_z les signaux reçus respectivement sur les axes x , y et z d'un capteur tri-axial. La matrice de covariance de ces signaux est donnée par

$$\mathbf{\Gamma} = \sum_{n=k}^{k+N} \begin{bmatrix} S_x^2(n) & S_x(n)S_y(n) & S_x(n)S_z(n) \\ S_y(n)S_x(n) & S_y^2(n) & S_y(n)S_z(n) \\ S_z(n)S_x(n) & S_z(n)S_y(n) & S_z^2(n) \end{bmatrix} \quad (A.4)$$

En utilisant le modèle des signaux donné par l'équation A.1, la matrice de covariance peut se décomposer en valeur et vecteur propre tel que [SAHY07]

$$\mathbf{\Gamma} = \mathbf{V}\mathbf{W}^2\mathbf{V}^T, \quad (\text{A.5})$$

avec

$$\mathbf{V} = \begin{bmatrix} \text{icos}(\theta) & -\text{icos}(\theta) & -\text{tan}(\theta) \\ \text{isin}(\theta) & -\text{isin}(\theta) & 1 \\ 1 & 1 & 0 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{W}^2 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_r^2 & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_l^2 \end{bmatrix} \quad (\text{A.6})$$

Chaque valeur propre (λ_i^2) correspond à l'énergie moyenne du mode sismique polarisé dans la direction du vecteur propre $v^{(i)}$ correspondant [JM99, GZR08]. Pour chaque vecteur propre, on peut définir l'angle d'azimut α_i (angle entre la direction d'arrivée du signal et l'axe x du plan $z = 0$) et l'angle d'élévation γ_i (angle entre la direction d'arrivée du signal et le plan $z = 0$) comme suit [GMZ05, SAHY07]

$$\alpha_i = \tan^{-1}(v_y^{(i)}/v_x^{(i)}), \quad \gamma_i = \tan^{-1}(v_z^{(i)}/\sqrt{v_x^{(i)}v_x^{(i)} + v_y^{(i)}v_y^{(i)}}) \quad (\text{A.7})$$

Dans le cas où l'onde de Rayleigh domine le signal sismique reçu par rapport à l'onde de Love (SH), la direction d'arrivée θ du signal est alors l'angle d'azimut déterminé à partir du vecteur propre $v^{(2)}$ dont la valeur propre λ_2 est la plus grande.

$$\theta = \tan^{-1}(v_y^{(2)}/v_x^{(2)}). \quad (\text{A.8})$$

Dans le cas contraire, la direction d'arrivée sera l'angle perpendiculaire.

$$\theta = \tan^{-1}(v_y^{(2)}/v_x^{(2)}) - \pi/2. \quad (\text{A.9})$$

La direction d'arrivée est déterminée avec une ambiguïté de π qui pourra être corrigée en utilisant plusieurs capteurs Stafsudd [SACH06, SAHY07].

A.2 Localisation de source à partir de la direction d'arrivée

L'estimation de la position de la source $[x \ y]$ à partir de la direction d'arrivée θ_m déterminée en chaque capteur m est obtenue par la minimisation de la somme des distances entre un point du plan et toutes les droites définies par la position $[x_m \ y_m]$ du capteur m et la direction d'arrivée estimée θ_m , figure A.3 [SACH06, SAHY07].

$$\min_{(x,y)} |l_m|_{L_\alpha} \quad (\text{A.10})$$

avec

$$l_m = \left| \begin{bmatrix} -\sin(\theta_m) \\ \cos(\theta_m) \end{bmatrix}^T \left(\begin{bmatrix} x_m \\ y_m \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} \right) \right|. \quad (\text{A.11})$$

La norme L_α peut être choisie L_1 ou L_2 selon le problème. En fait, la norme L_2 est robuste à la présence de bruit, alors que la norme L_1 est robuste à la présence de mesure aberrante [SACH06, SAHY07].

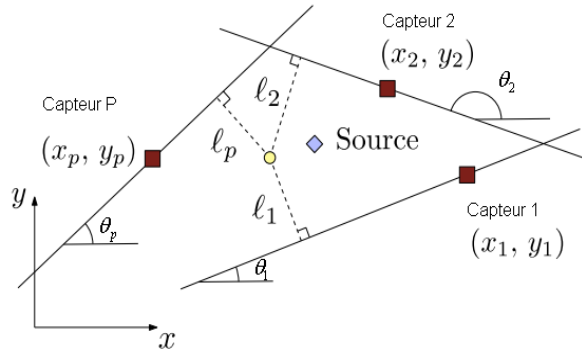


FIGURE A.3 – Localisation de source à partir de l'estimation de direction d'arrivée [SAHY07]

A.3 Étude expérimentale à l'intérieur de bâtiment

Dans cette section, on applique les méthodes d'estimation de la direction d'arrivée à l'extérieur des bâtiments (section A.1.1) par analyse des ondes de surface et par analyse de la matrice de covariance sur des signaux expérimentaux enregistrés à l'intérieur des bâtiments selon la configuration de la figure A.4. On rappelle que ces méthodes nécessitent l'utilisation d'un seul capteur tri-axial pour l'estimation de la direction d'arrivée en se basant sur l'ellipticité du mouvement des particules du sol traversées par une onde de Rayleigh.

L'expérimentation s'est déroulée sur une dalle en béton recouverte de carrelage et d'épaisseur 20cm . On dispose d'un capteur tri-axial et on réalise des pas localisés à $d = 3\text{m}$ de ce capteur dans la direction donnée par l'angle θ , angle entre l'axe x du capteur et un pas. Les pas ont été réalisés par série, chaque série de pas est localisée à 3m du capteur et à un angle θ

ANNEXE A. LOCALISATION BASÉE SUR LA STRUCTURE
VECTORIEL DES ONDES SISMIQUES DE SURFACE

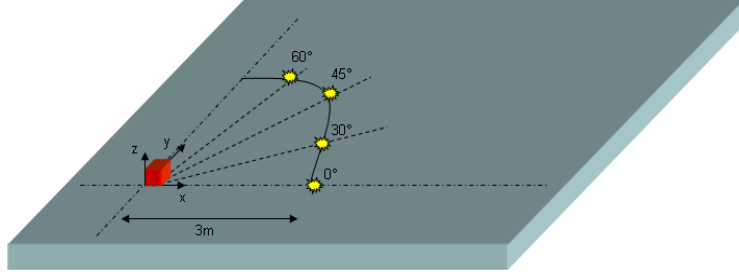


FIGURE A.4 – Configuration expérimentale pour l'estimation de la direction d'arrivée à partir d'un seul capteur tri-axial (en rouge).

fixé ; $\theta = 0^\circ, \theta = 30^\circ, \theta = 45^\circ$ et $\theta = 60^\circ$. On rappelle que les expressions des estimateurs de la direction d'arrivée θ par les deux méthodes AMC et AOS sont

$$\theta_{AMC} = \tan^{-1} \left(\frac{v_y^{(i)}}{v_x^{(i)}} \right) \quad (\text{A.12})$$

Avec $\mathbf{v}^{(i)} = [v_x^{(i)} v_y^{(i)} v_z^{(i)}]$ est le vecteur propre correspondant à la plus grande valeur propre de la matrice de covariance du signal d'un pas.

$$\theta_{AOS} = \tan^{-1} \left(\frac{\langle S_{zh} S_y^T \rangle}{\langle S_{zh} S_x^T \rangle} \right) \quad (\text{A.13})$$

où $S_{zh}(t)$ est le signal en quadrature de phase, obtenu par la transformée de Hilbert de $S_z(t)$. La direction d'arrivée est donnée par les expressions précédentes sous l'hypothèse de domination de l'onde de Rayleigh. Dans le cas où l'onde de Love domine le signal, la direction d'arrivée sera donnée par la perpendiculaire à ces expressions [SAHY07]. On note aussi, qu'à partir des expressions précédentes, la direction d'arrivée est déterminée avec une ambiguïté de π [SAHY07].

Les résultats d'estimation de la direction d'arrivée selon les deux méthodes sont représentés par les figures A.5, A.6, A.7, A.8.

ANNEXE A. LOCALISATION BASÉE SUR LA STRUCTURE VECTORIEL DES ONDES SISMIQUES DE SURFACE

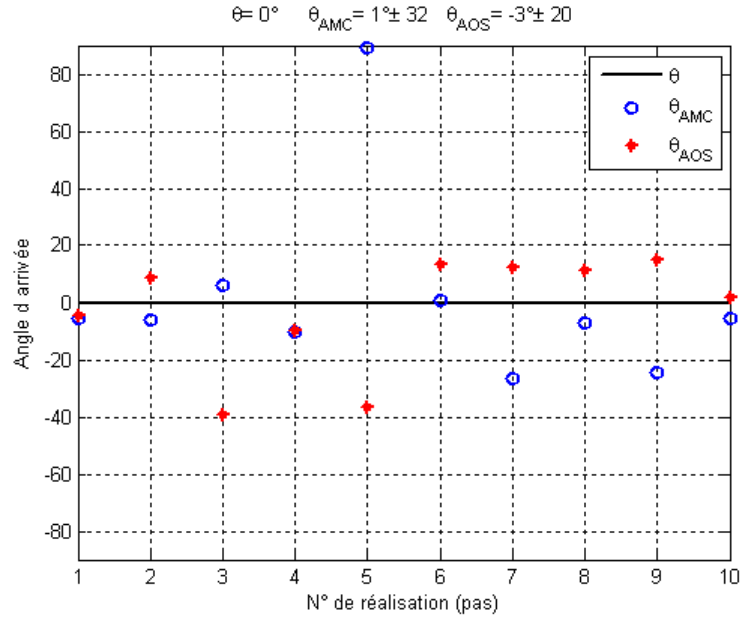


FIGURE A.5 – Résultats expérimentaux de l'estimation de la direction d'arrivée $\theta = 0^\circ$

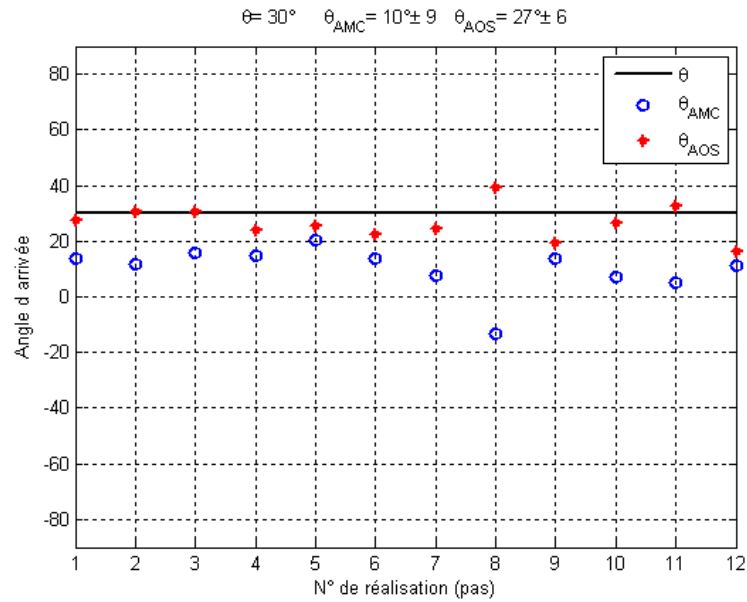


FIGURE A.6 – Résultats expérimentaux de l'estimation de la direction d'arrivée $\theta = 30^\circ$

ANNEXE A. LOCALISATION BASÉE SUR LA STRUCTURE VECTORIEL DES ONDES SISMIQUES DE SURFACE

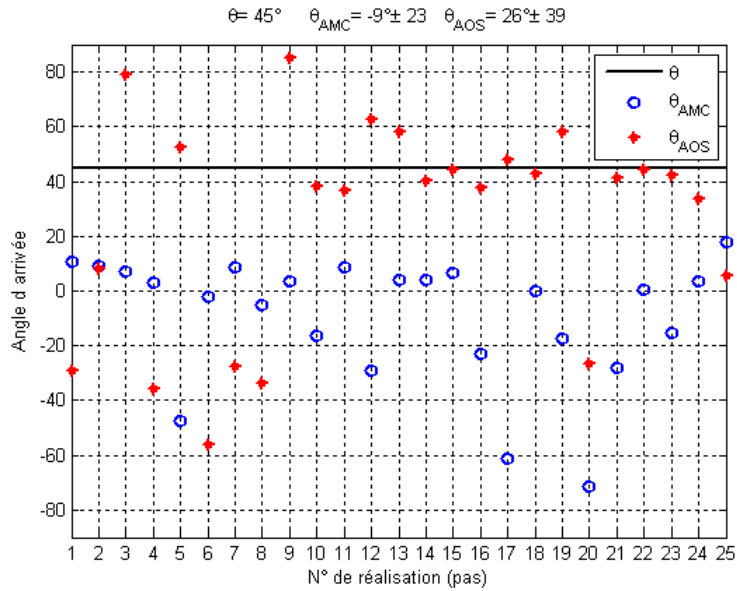


FIGURE A.7 – Résultats expérimentaux de l'estimation de la direction d'arrivée $\theta = 45^\circ$

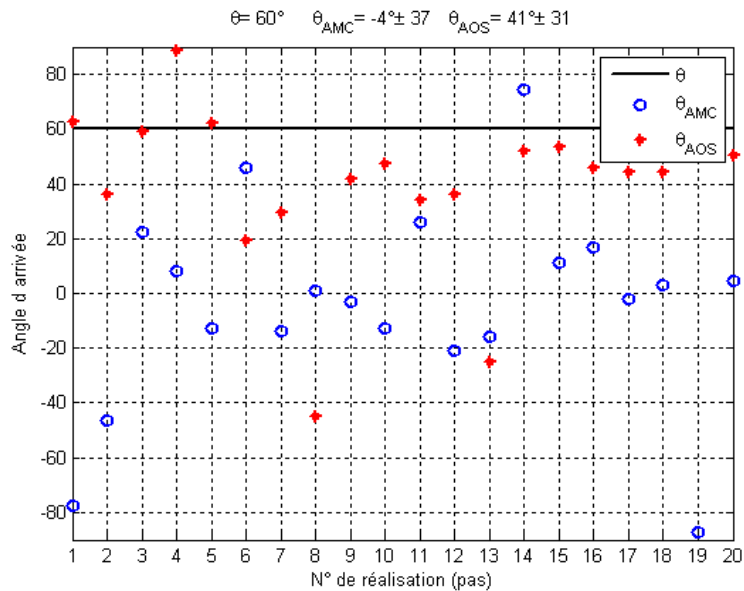


FIGURE A.8 – Résultats expérimentaux de l'estimation de la direction d'arrivée $\theta = 60^\circ$

ANNEXE A. LOCALISATION BASÉE SUR LA STRUCTURE VECTORIEL DES ONDES SISMIQUES DE SURFACE

Dans quelques cas de réalisation de pas ($\theta = 45^\circ$, pas $n^\circ 1-4-6-7-8-20$ et $\theta = 60^\circ$, pas $n^\circ 8-13$), l'angle estimée θ_{AOS} est perpendiculaire à la vraie valeur de la direction d'arrivée. Ce résultat peut être expliqué par la domination de l'énergie de l'onde de Love sur l'énergie de l'onde de Rayleigh dans ces cas.

On résume les résultats expérimentaux dans le tableau suivant :

θ°	$\hat{\theta}_{AMC}^\circ$	$\hat{\theta}_{AOS}^\circ$
0	1 ± 32	-3 ± 20
30	10 ± 9	27 ± 6
45	-9 ± 23	26 ± 39
60	-4 ± 37	41 ± 31

TABLE A.1 – Résultats expérimentaux d'estimation des la direction d'arrivée

En terme de moyenne la méthode d'analyse des ondes de surfaces (AOS) est meilleure que la méthode d'analyse de la matrice de covariance (AMC), tableau A.1 [SAHY07]. Néanmoins, les variances d'estimations de la direction d'arrivée par la méthode (AOS) sont de même ordre que les directions d'arrivée estimées voir supérieure. Globalement, ces résultats sont inexploitable pour la localisation. A titre d'exemple, une variation 10° sur l'estimation de la direction d'arrivée correspond à une erreur de $d * \sin(10)$ sur la position soit $3 * \sin(10) = 0.52m$.

A.4 Conclusion

Les résultats d'estimation d'angle d'arrivée qu'on a trouvés sur les signaux expérimentaux remettent en question la nature des ondes mises en jeux. En effet, les méthodes testées reposent essentiellement sur l'hypothèse de propagation des ondes de surface; ondes de Rayleigh et Love. Ce qui ne correspond peut être pas à la réalité.

Annexe B

Fiche technique des capteurs Colibry SF3000L et SF1500SA

ANNEXE B. FICHE TECHNIQUE DES CAPTEURS COLIBRY
SF3000L ET SF1500SA



MEMS Capacitive Accelerometers

Data sheet

SF3000L

30S SF3000L.D.03.09

Features

- Three axis output
- Best in class noise level of 300ng_{rms}/√Hz
- Wide dynamic range of 120dB (100Hz BW)
- ± 3g full scale
- DC to 1000Hz frequency response
- Analog servo accelerometer

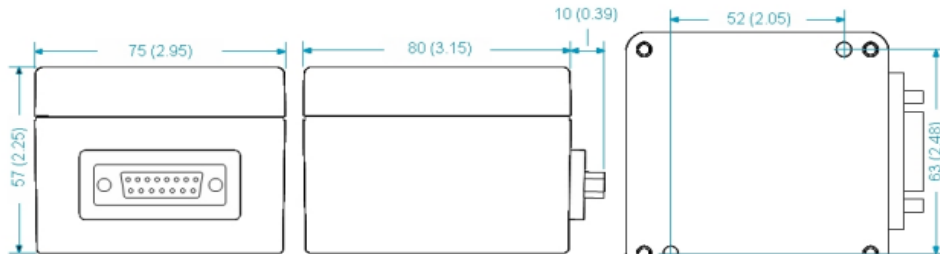
Applications

- Seismic sensing**
- Earthquake detection
- Geophysics
- Homeland and border security
- Structural monitoring
- Strong motion
- Railway technology

Description

The SiFlex™ accelerometer has been designed and developed by Colibrys Inc. for "strong motion" seismic sensing applications. This MEMS capacitive product is the best in class "digital geophone", largely used for seismic and vibration sensing when extreme low noise measurement is required. Features such as wide dynamic range, excellent bandwidth, low distortion, high shock tolerance, and thermal stability make it ideal for applications such as earthquake and seismology measurements, homeland and border security or structure

monitoring. Used as a tilt sensor, it also provides a very high resolution of measurement. The SF3000L is a three axis combination of SF1500S accelerometer that operates from a bipolar power supply voltage that can range from ± 6V to ± 15V with a typical current consumption of 36mA at ± 6V. The linear full acceleration range is ± 3g with a corresponding sensitivity of 1.2V/g. The frequency response over the full scale range is DC to >1000Hz .



Specifications

	Units	SF3000L
Linear output range	g peak	± 3
Sensitivity	V/g	1.2
Frequency response (full signal)	Hz	DC to 1000
Dynamic range (100 Hz BW)	dB	120
Noise (10 to 1000 Hz)	ng _{rms} /√Hz	300 to 500
Cross-axis rejection	dB	> 46
Shock limit (0.5 ms ½ sine)	g peak	1000
Operating temperature range	°C	-40 to +85
Sensitivity temperature coefficient	ppm/°C (re: ±1g)	75
Offset thermal coefficient	µg/°C (re: ±1g)	± 100
DC offset (max)	mg	±200
Linearity error	% Full scale (re: ±1g)	± 0.1
Input voltage	Volts DC	± 6 to ± 15
Quiescent current	mA	< 30
Weight	Lb	1
Enclosure moisture rating	IP rating	67
Self Test	V	TTL level

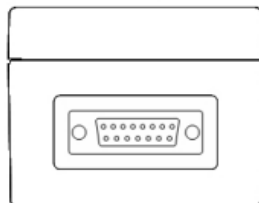
ANNEXE B. FICHE TECHNIQUE DES CAPTEURS COLIBRY SF3000L ET SF1500SA



Electrical connections

Both the (+) and (-) power supplies must be applied simultaneously to the input pins (within 50 ms). The power supply should have less than 100 $\mu\text{V}/\sqrt{\text{Hz}}$ noise in order to avoid the possibility of adding noise to the output of the sensor. The ASIC and on-board electronics operate on $\pm 5\text{V DC}$ provided by internal power conditioning circuitry, reducing the effects of power supply variations on sensor operation. The input power supply connections are reverse polarity protected by a diode bridge.

Should reverse polarity power be applied, the unit will self-correct and start normally. The output of the Si-Flex accelerometer is fully buffered and ready to connect to common inputs found on many analog to digital converters, oscilloscopes and digital multi-meters. The nominal output impedance for the Si-Flex accelerometers is typically 10 Ohms.



Electrical connections

P1	+Vin	Positive Power Input
P2	-Vin	Negative Power Input
P3	SNDATA* ¹	Signals for the on board EEPROM
P4	SNCLK * ¹	Signals for the on board EEPROM
P5	ATEST*	Sensor Self Test Input
P6	X-OUT	X Output
P7	Y-OUT	Y Output
P8	Z-OUT	Z Output
P9	COM Power	The common connection for the bipolar power supply
P10	COM-SNDATA	Common for SNDATA
P11	COM-SNCLK	Common for SNCLK
P12	COM-ATST	Ground Return for ATEST
P13	COM-X	AGND for X-OUT
P14	COM-Y	AGND for Y-OUT
P15	COM-Z	AGND for Z-OUT

¹Note: The datasheet for the EEPROM is available on request. A detailed SiFlex™ Product Description (30D.SFX.x.xx.xx) and further Application Notes are available on demand or on our web site. In order to provide an ideal support to our customers, our standard SF3000L products is available worldwide through

a wide network of distributors and agents or directly at Colibrys. Do not hesitate to access our web site for precise contacts or directly Colibrys in Europe or in US for more details.

*See SiFlex™ product description for more details.



Colibrys (Switzerland) Ltd
accelero.europe@colibrys.com

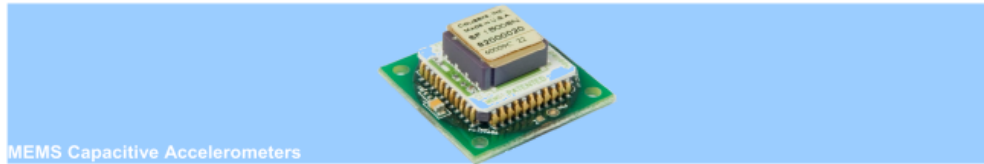


Colibrys, Inc.
accelero.us@colibrys.com

www.colibrys.com

Colibrys reserves the right to change these data without notice.

ANNEXE B. FICHE TECHNIQUE DES CAPTEURS COLIBRYS
SF3000L ET SF1500SA



MEMS Capacitive Accelerometers

Data sheet
SF1500S.A / SF1500SN.A

30S.SF1500A.D.03.09

Features

- Best in class noise level of 300 ng_{rms}/√Hz**
- Wide dynamic range of 120 dB (100Hz BW)**
- DC to 1500 Hz frequency response**
- ± 3g full scale**
- Analog servo accelerometer**
- Self test input**

Applications

- Seismic sensing** Earthquake detection
- Geophysics
- Homeland and border security
- Strong motion
- Railway technology
- Structural monitoring

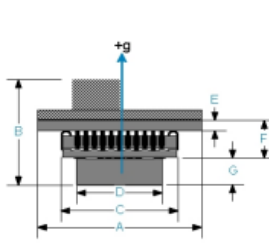
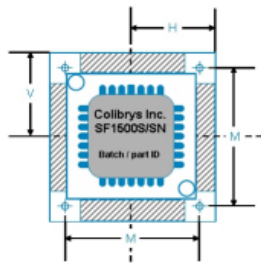
Description

The SiFlex™ accelerometer has been designed and developed by Colibrys Inc. for "strong motion" seismic sensing applications. This MEMS capacitive product is the best in class "digital geophone", largely used for seismic and vibration sensing when extremely low noise measurement is required. Features such as wide dynamic range, excellent bandwidth, low distortion, high shock tolerance, and thermal stability make it ideal for strong motion applications such as earthquake and seismology measurements, homeland and border security or structure monitoring. Used as a tilt sensor, it also provides a very

high resolution for precise measurements.

The SF1500 operates from a bipolar power supply voltage that can range from ± 6V to ± 15V with a typical current consumption of 12mA at ± 6V. The linear full acceleration range is ± 3g with a corresponding sensitivity of 1.2V/g. The SF1500S.A and SF1500SN.A can operate over a wide temperature range from -40°C to +85°C and can withstand a shock of up to 1500g without performance degradation. The frequency response over the full scale range is DC to > 2000Hz .

Full scale range	± 3g (with oscillator)	± 3g (without oscillator)
Products	SF1500S.A	SF1500SN.A



	Inch	mm
A	0.96	24.4
B	0.65	16.6
C	0.70	17.8
D	0.50	12.7
E	0.07	3.5
F	0.22	7.9
G	0.19	4.8
H	0.48	12.2
M	0.78	19.8
V	0.48	12.2

Specifications

	Units	SF1500S.A / SF1500SN.A
Linear output range	g peak	± 3
Sensitivity (differential)	V/g	1.2 (2.4)
Frequency response (full signal)	Hz	DC to 2000
Dynamic range (100 Hz BW)	dB	120
Noise (10 to 1000 Hz)	ng _{rms} /√Hz	300 to 500
Cross-axis rejection	dB	> 46
Shock limit (0.5 ms ½ sine)	g peak	1500
Operating temperature range	°C	-40 to +85
Sensitivity temperature coefficient	ppm/°C (re: ±1g)	250
DC offset (max)	mg	±200
Input Resistance of Offset adjustment pin	KΩ	10
Offset thermal coefficient	µg/°C (re: ±1g)	± 100
Linearity error	% Full scale (re: ±1g)	± 0.1
Input voltage	Volts DC	± 6 to ± 15
Quiescent current	mA	11.7

ANNEXE B. FICHE TECHNIQUE DES CAPTEURS COLIBRY SF3000L ET SF1500SA

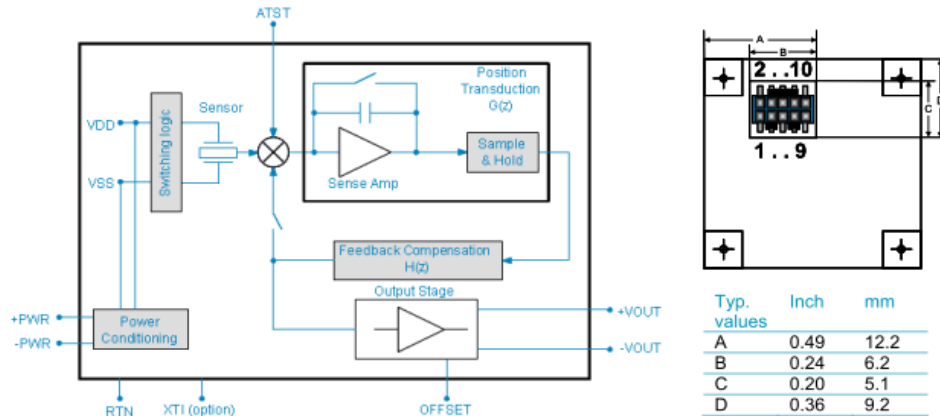


Block diagram and electrical connections

Both the (+) and (-) power supplies must be applied simultaneously to the input pins (within 50 ms). The power supply should have less than 100 $\mu\text{V}/\sqrt{\text{Hz}}$ noise in order to avoid the possibility of adding noise to the output of the sensor. The ASIC and on-board electronics operate on $\pm 5\text{V}$ DC provided by internal power conditioning circuitry, reducing the effects of power supply variations on sensor operation. The input power supply connections are reverse polarity protected by a diode bridge. Should reverse polarity power be applied, the unit will self-correct and start normally.

The output of the Si-Flex accelerometer is fully buffered and ready to connect to common inputs found on many analog to digital converters, oscilloscopes and digital multi-meters. The nominal output impedance for the Si-Flex accelerometers is typically 10 Ohms. The connector reference for the SF1500 is a Samtec part no. FTSH-105-01-L-DV-K-P-TR (Header, 2X5, 1.27mm (0.05 in), SMD).

Electrostatic discharge (ESD) damage can occur when Si-Flex accelerometers are improperly handled,



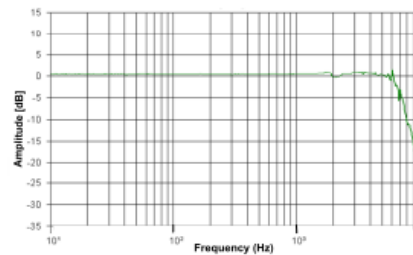
Electrical connections

PJ1-1	-Vout	Inverted output signal
PJ1-2	+Vout	Output signal
PJ1-3	ATST *	Sensor self test input
PJ1-4, PJ1-8	RTN *	Signal return (common)
PJ1-5	OFFSET *	Used to remove DC offset
PJ1-6	XTI *	Oscillator input, N/C for SF1500S
PJ1-7	RTN	Return
PJ1-9	-PWR	Negative power supply
PJ1-10	+PWR	Positive power supply

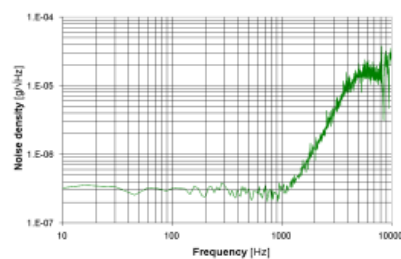
* : see SiFlex™ product description for more details

Frequency response and noise

SF1500S/SN Frequency Response



SF1500S/SN Typical Wideband Noise



A detailed SiFlex™ Product Description (30D.SFX.x.xx.xx) and further Application Notes are available on demand or on our web site. In order to provide an ideal support to our customers, our standard SF1500S.A and SF1500SN.A products are available

worldwide through a wide network of distributors and agents or directly at Colibrys. Do not hesitate to access our web site for precise contacts or directly Colibrys in Europe or in US for more details.



Colibrys (Switzerland) Ltd
accelero.europe@colibrys.com



Colibrys, Inc.
accelero.us@colibrys.com

www.colibrys.com

Colibrys reserves the right to change these data without notice.

Bibliographie

Bibliographie

- [acca] http://www.mesures.com/archives/090_098_gda.pdf.
- [accb] http://specialty.bfiophtilas.fr/objects/101_25_1251309101/Colibrys_Acceleration.pdf.
- [All82] R. Allen. Automatic phase pickers : their present use and future prospects. *Bulletin of the seismological society of america*, 72 :225 – 242, 1982.
- [Avi01] P. Avitabile. Experimental modal analysis : a simple non-mathematical presentation. *Sound and vibration*, 35 :20–31, 2001.
- [BK87] M. Baer and U. Kradolfer. An automatic phase picker for local and teleseismic events. *Bulletin of the seismological society of america*, 77 :1437–1445, 1987.
- [Bla06] R.E. Bland. Acoustic and seismic signal processing for footstep detection. Master’s thesis, Massachusetts institute of technology, 2006.
- [BN93] M. Basseville and V. Nikiforov. *Detection of Abrupt Changes : Theory and Application*. Prentice Hall Information and System Science Series, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, NJ, 1993.
- [Bol93] B.A. Bolt. *Earthquakes and Geological Discovery*. Scientific American Library, W.H. Freeman, New York, 1993.
- [Cas10] K.A. Castillo. *Simulation numérique d’un réverbérateur à plaque*. PhD thesis, Ecole Polytechnique, 2010.
- [CH94] Y.T. Chan and K.C. Ho. A simple and efficient estimator for hyperbolic location. *IEEE Transactions on signal processing*, 42 :1905–1915, 1994.
- [CHP10] L. Cremer, M. Heckel, and B.A.T Petersson. *Structure borne sound*. Springer verlag Berlin Heidelberg, 2010.
- [col] <http://www.colibrys.com/files/pdf/products/30N.UGS.B.05.11.pdf>.

BIBLIOGRAPHIE

- [Cor02] C. Cornou. *Traitement d'antenne et imagerie sismique dans l'agglomération grenobloise : implication pour les effets de site*. PhD thesis, Université de Joseph Fourier Grenoble, 2002.
- [Cre78] D.H. Cress. *Terrain considerations and data base development for the design and testing of devices to detect intruder-induced ground motion*. Waterways Experiment Station (U.S.), 1978.
- [Cue] O. Cuenot. Les algorithmes de détection automatique d'ondes sismiques.
- [dal] <http://dalle-beton.ideesmaison.com/>.
- [dis] <http://www.indiana.edu/~ensiweb/lessons/footsteps.data.pdf>.
- [DM95] H. Dai and C. Macbeth. Automatic picking of seismic arrivals in local earthquake data using an arterial neural network. *Geophysical Journal International*, 102 :758–774, 1995.
- [DM97] H. Dai and C. Macbeth. The application of back propagation neural network to automatic picking seismic arrivals from single component recordings. *Journal of Geophysical research*, 102 :15105–15113, 1997.
- [DS99] Z.A. Der and R.H. Shumway. Phase onset time estimation at regional distances using the cusum algorithm. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 113 :227 – 246, 1999.
- [EHSP96] A. Ebrahimpour, A. Hamam, R.L. Stack, and W.N. Patten. Measuring and modeling dynamic loads imposed by moving crowds. *Journal of Structural Engineering*, 122 :1468–1474, 1996.
- [ES94] P.S. Earle and P.M. Shearer. Characterization of global seismograms using an automatic picking algorithm. *Bulletin of the seismological society of america*, 84 :366–376, 1994.
- [ES06] A. Ekimov and J. M. Sabatier. Vibration and sound signatures of human footsteps in buildings. *Journal of the Acoustical Society of America*, 120 :762–768, 2006.
- [ES08] A. Ekimov and J.M. Sabatier. Human motion analyses using footstep ultrasound and doppler ultrasound. *Journal of the Acoustical Society of America*, 123 :149–154, 2008.
- [GB70] F.W. Galbraith and M.V. Barton. Ground loading from footsteps. *Journal of the Acoustical Society of America*, 48 :1288–1292, 1970.
- [GMZ05] S. Greenhalgh, I.M. Mason, and B. Zhou. An analytical treatment of single station triaxial seismic direction finding. *Journal of Geophysics and Engineering*, 2 :8–15, 2005.

BIBLIOGRAPHIE

- [GZR08] S.A. Greenhalgh, B. Zhou, and M. Ruttly. Effect of coherent noise on single station direction of arrival estimation. *Journal of Seismology*, 12 :377–385, 2008.
- [HIN76] W.GS. HINES. Improving a simple monitor of a system with sudden parameter changes. *IEEE Transaction on information theory*, 22 :496–499., 1976.
- [HLH09] J.W. Park H. Lee and A. Helal. Estimation of indoor physical activity level based on footstep vibration signal measured by mems accelerometer in smart home environments. *Proceedings of the 2nd international conference on Mobile entity localization and tracking in GPS-less environments*, pages 148–162, 2009.
- [HLK07] K.M. Ho, X. Lu, and L. Kovavisaruch. Source localization using tdoa and fdoa measurements in the presence of receiver location errors : analysis and solution. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 55 :684–696, 2007.
- [HM03] K.M. Houston and D.P. McGaffigan. Spectrum analysis techniques for personnel detection using seismic sensors. *Proceedings of SPIE*, 5090 :162–173, 2003.
- [IMMB11] L.A. Inza, J.I. Mars, J.P. Meaxian, and G.S.O. Brien. Seismo-volcano source localization with triaxial-broadband seismic array. *Geophysical Journal International*, 187 :371–384, 2011.
- [IQCF05] R.K. Ing, N. Quieffin, S. Catheline, and M. Fink. In solid localization of finger impacts using acoustic time-reversal process. *Applied physics letters*, 84 :204104, 2005.
- [IVD07] S.G. Iyengar, P.K. Varshney, and T. Damarlab. On the detection of footsteps based on acoustic and seismic sensing. *Conference Record of the Forty-First Asilomar Conference on Signals, Systems and Computers*, pages 2248–2252, 2007.
- [JE07] J. Jenkins and C. Ellis. Using ground reaction forces from gait analysis : body mass as a weak biometric. *Proceedings of the 5th international conference on Pervasive computing*, pages 251–267, 2007.
- [JM99] G. Jackson and M. Mason. Signal station triaxial seismic direction finding. *Covariance analysis in seismic signal processing ed L Kirilin and W Done*, pages 275–290, 1999.
- [KD98] R.L. Kirilin and W.J. Done. *Covariance analysis for seismic signal processing*. Society of Exploration Geophysicists, 1998.

BIBLIOGRAPHIE

- [KLPF90] A.F. Kushnir, V.M. Lapshin, V.I. Pinsky, and J. Fyen. Statistically optimal event detection using small array data. *Bulletin of the seismological society of america*, 80 :1934–1950, 1990.
- [KNL95] L. Kirlin, J. Nabelek, and G. Lin. Triaxial array separation of rayleigh and love waves. *In the Twenty-Ninth Asilomar conference on signal, systems and computers*, 1 :722–725, 1995.
- [Kup10] L. Kuperkoch. *Automated recognition, phase arrival time estimation and location local and regional earthquakes*. PhD thesis, Bochum, 2010.
- [LK99] M. Leonard and B.L.N. Kennett. Multi-component autoregressive techniques for the analysis of seismograms. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 113 :247 – 263, 1999.
- [LL67] L. Landau and E. Lifchitz. *Theorie de l’elasticite*. Mir, Moscou, première édition française traduit du russe par E Gloukhian, 1967.
- [Log07] S. Logan. Ground reaction force differences between running shoes, racing flats and distance spikes in runners. Master’s thesis, Brigham young university, 2007.
- [Lor12] G. Lorant. Seismic design principles. *Whole Building Design Guide. National Institute of Building Sciences.*, 2012.
- [Mil86] J. Mile. *Earthquakes and Other Earth Movements*. D. Appleton and company, 1886.
- [MS87] A. Maji and S.P. Shah. Process zone and acoustic-emission measurements in concrete. *Experimental Mechanics*, 28 :27–33, 1987.
- [MVSB06] W.K. Ma, B.N. Vo, S. Singh, and A. Baddeley. Tracking an unknown time-varying number of speakers using tdoa measurements : a random finite set approach. *IEEE Transactions on signal processing*, 54 :3291–3304, 2006.
- [NEE09] J. NEERING. Optimization and estimation techniques for passive acoustic source localization. Technical report, Ecole nationale supérieure des mines de Paris, 2009.
- [NeML04] B. Nicolas, Jérôme, I. Mars, and J.L. Lacoume. Source depth estimation using modal decomposition and frequency wavenumber transform. *EUSIPCO*, 2004.
- [NT86] L.V. Nikiforov and I.N. Tikhonov. Application of change detection theory to seismic signal processing. *Detection of Abrupt Changes in Signals and Dynamical Systems, Lecture Notes in Control and Information Sciences*, 77 :355–373, 1986.

BIBLIOGRAPHIE

- [ond] <http://s.briquet.free.fr/spip.php?article48>.
- [PG04] A. Pakhomov and T. Goldburt. Seismic signals and noise assessment for foot step detection range estimation in different environments. *Proceedings of SPIE*, 5417, 2004.
- [PL07] L. Peck and J. Lacombe. Seismic based personnel detection. *41st Annual IEEE International Carnahan Conference on Security Technology*, 2007.
- [PSSG03a] A. Packomov, A. Sicignano, M. Sandy, and T. Goldburt. Single and three axis geophone : Footstep detection with bearing estimation, localization and tracking. *Proceedings of SPIE*, 5090, 2003.
- [PSSG03b] A. Pakhomov, A. Sicignano, M. Sandy, and T. Goldburt. A novel method for footstep detection with an extremely low false alarm rate. *Proceedings of SPIE*, 5090, 2003.
- [RAG04] B. Ristic, S. Arulampalam, and N. Gordon. *Beyond the Kalman filter*. Artech house boston London, 2004.
- [RD96] D. Royer and E. Dieulesaint. *Elastic waves in Solids 1*. Springer, 1996.
- [RDNW01] S. Richman, S. Deadrick, J. Nation, and L. Whitney. Personnel tracking using seismic sensors. *Proceedings of SPIE*, 4393, 2001.
- [RHY99] C.W. Reed, R. Hudson, and K. Yao. Direct joint source localization and propagation speed estimation. *Proceedings, IEEE International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing*, 3 :1169–1172, 1999.
- [RIB06] G. RIBAY. *Localisation de source en milieu réverbérant par Retournement Temporel*. PhD thesis, Universite Paris VII Denis Diderot, 2006.
- [RMJG10] R.V. Rodriguez, J.S. Mason, J.Fierrez, and J.O. Garcia. Analysis of time domain information for footstep recognition. *Proceedings of the 6th international conference on Advances in visual computing*, 1 :489–498, 2010.
- [Rob59] S.W. Roberts. Control charts based on geometric moving averages. *Technometrics*, 1 :239–250., 1959.
- [Ros99] J.L. Rose. *Ultrasonic Waves in solid media*. Cambridge university press, 1999.
- [SACH05] J.Z. Stafsudd, S. Asgari, C. Chen, and R. Hudson. Collection and processing of acoustic and seismic array data for source localization. *In advanced signal processing algorithms, architectures, and implimentations XV, F. T. Luk*, 5910 :92–103, 2005.

BIBLIOGRAPHIE

- [SACH06] J.Z. Stafsudd, S. Asgari, C. Chen, and R. Hudson. Analysis, implimentation, and application of acoustic and seismic arrays. *Acta automatic sinica*, 32 :928–937, 2006.
- [SAHY07] J. Z. Stafsudd, S. Asgari, R. Hudson, and K. Yao. Localization of short-range acoustic and seismic wideband sources : Algorithms and experiments. *Journal of sound and vibration*, 312 :74–93, 2007.
- [SCGP01] G. Succi, D. Clapp, R. Gampert, and G. Prado. Footstep detection and tracking. *Proceedings of SPIE*, 4393, 2001.
- [SE99] R. Sleeman and T.V. Eck. Robust automatic p phase picking : an on line implementation of broadband seismogram recordings. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 113 :265–275, 1999.
- [SHTY07] J. Z. Stafsudd, R. Hudson, E. Taciroglu, and K. Yao. Seismic array signal processing for moving source localization. *Proceedings of SPIE*, 6697, 2007.
- [SIMM09] A. Subramaniana, S.G. Iyengara, K.G. Mehrotraa, and C.K. Mohana. A data-driven personnel detection scheme for indoor surveillance using seismic sensors. *Proceedings of SPIE*, 7333, 2009.
- [SK86] M.S. Sambridge and B.L.N. Kennett. A novel method for hypocentre location. *Geophysical Journal of the Royal Astronomical Society.*, 87 :679–697, 1986.
- [SPGP00] G. Succi, G. Prado, R. Gampert, and T. Pedersen. Problems in seismic detection and tracking. *Proceedings of SPIE*, 4040 :165–173, 2000.
- [TK91] T. Takanami and G. Kitagawa. Estimation of the arrival times of seismic waves by multivariate time series model. *Annals of the Institute of Statistical Mathematics*, 43 :407–433, 1991.
- [TPYM11] K.M. Taylor, M.J. Procopio, C.J. Young, and F.G. Meyer. Estimation of arrival times from seismic waves : a manifold-based approach. *Geophysical Journal International*, 2011.
- [Vik70] I.A. Viktorov. *Rayleigh and Lamb waves : physical theory and applications*. Plenum Press, 1970.
- [Wat65] B.G. Watters. Impact-noise characteristics of female hard-heeled foot traffic. *Journal of the Acoustical Society of America*, 37 :619–630, 1965.
- [XLS07] Z.D. Xu, N. Liu, and B.M. Sadler. A simple closed-form linear source localization algorithm. *IEEE Military Communications Conference*, 2007.

BIBLIOGRAPHIE

- [XLS08] Z. Xu, N. Liu, and B.M. Sadler. Low-complexity hyperbolic source localization with a linear sensor array. *IEEE Signal processing letters*, 15 :865–868, 2008.
- [Yan07] B. Yang. Different sensor placement strategies for tdoa based localization. *IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing*, 2 :1093–1096, 2007.
- [yok] http://c418683.r83.cf2.rackcdn.com/uploaded/BUDL850_00EN_050.pdf.
- [ZLS07] J. Zheng, K.W.K. Lui, and H.C. So. Accurate three-step algorithm for joint source position and propagation speed estimation. *Signal Processing*, 87 :3096–3100, 2007.
- [ZZ69] J. Ziv and M. Zakai. Some lower bounds on signal parameter estimation. *IEEE Transactions on Information Theory*, 15 :386–391, 1969.