



La cartographie des sonorités environnementales d'un territoire

Mémoire

Ameni Dhib

Maîtrise en sciences géomatiques - avec mémoire
Maître ès sciences (M. Sc.)

Québec, Canada

La cartographie des sonorités environnementales d'un territoire

Mémoire

AMENI DHIB

Sous la direction de :

Alain A. Viau, directeur de recherche

Frédéric Hubert, codirecteur de recherche

Résumé

Sur un territoire, des sources sonores émettent des sons qui peuvent être d'origines anthropophoniques (i.e. le bruit des véhicules), biophoniques (i.e. les sons émis par les oiseaux), ainsi que géophoniques (i.e. le bruit du vent). Ceci permet de décrire un paysage sonore des lieux tout en alimentant des besoins particuliers propres à la cartographie de l'environnement sonore tels que les propriétés acoustiques des territoires, nécessaires à la compréhension de l'environnement sonore. Au-delà des travaux de recherches qui étudient et analysent les propriétés acoustiques de l'environnement, l'état de l'existant se concentre sur deux types de cartes sonores : les cartes d'inventaire de sons et les cartes de bruit. Deux approches méthodologiques sont à l'origine de la production de ces cartes. La première est basée sur des enregistrements sonores mesurés et géoréférencés sur le territoire à l'aide de sonomètres, ou d'applications installées sur des tablettes/téléphones intelligents. La deuxième sert à modéliser la propagation de l'onde acoustique en lien avec les objets présents sur le territoire (i.e. bâtiments, arbres, etc.). Bien que cette deuxième approche considère les différents facteurs environnementaux qui peuvent affaiblir l'onde acoustique comme l'absorption atmosphérique (causée par le vent, la température, etc.), la divergence géométrique et la nature de la couverture des sols, on constate qu'elle est peu documentée dans la littérature scientifique, lorsqu'aucun capteur sonore n'est utilisé pour produire des cartes sonores.

L'objectif principal est de définir une méthode générique de modélisation de la propagation acoustique du son pour territoire à l'aide de données géospatiales multi-sources, dont des images à très haute résolution. Ainsi à l'aide des outils géomatiques, il est possible de représenter l'interaction qui existe entre l'onde sonore et les objets environnementaux composant ce territoire. Il est alors possible à partir d'une source sonore et des points récepteurs du son de réaliser des cartes dites spatio-phoniques.

Mots clés : environnement sonore, modélisation, géomatique, propagation, données géospatiales, cartographie

Abstract

On a territory, sound sources emit sounds that can be of anthropophonic origins (i.e. vehicle noise), biophonic origins (i.e. sounds emitted by birds), as well as geophonic origins (i.e. wind noise). This makes it possible to describe a soundscape of the places while feeding particular needs specific to the mapping of the sound environment such as the acoustic properties of the territories, necessary to the understanding of the sound environment. Beyond the research work that studies and analyzes the acoustic properties of the environment, the state of the existing focuses on two types of sound cards: sound inventory cards and noise maps. Two methodological approaches are behind the production of these cards. The first is based on sound recordings measured and georeferenced on the territory using sound level meters, or applications installed on tablets/smartphones. The second is used to model the propagation of the acoustic wave in relation to the objects present on the territory (i.e. buildings, trees, etc.). Although this second approach considers the different environmental factors that can weaken the acoustic wave like atmospheric absorption (caused by wind, temperature, etc.), the geometric divergence and the nature of the cover of soil, it is found that it is poorly documented in the scientific literature, when no sound sensor is used to produce sound cards.

The main objective is to define a generic method for modeling the acoustic propagation of a territory using multi-source geospatial data including very high resolution images. Thus, using geomatic tools, it is possible to represent the interaction that exists between the sound wave and the environmental objects that make up this territory. It is then possible from a sound source and sound receiving points to make so-called spatio-phonic cards.

Key words: sound environment, modeling, geomatic, propagation, geospatial data, mapping.

Table des matières

Résumé	ii
Abstract.....	iii
Table des matières	iv
Liste des tableaux	vii
Liste des figures.....	viii
Remerciement	ix
Introduction générale	1
1.1 Introduction.....	1
1.2 Mise en contexte	1
1.3 Problématique générale de la recherche	5
1.4 Objectifs général et spécifiques	9
1.5 Méthodologie de recherche.....	10
1.6 Structure du mémoire	13
Chapitre I : État de l'art sur l'environnement sonore	15
2.1 Introduction.....	15
2.2 L'aspect théorique de l'environnement sonore.....	15
2.2.1 L'onde acoustique	15
2.2.2 La notion de décibel.....	16
2.2.3 Caractéristiques physiques de l'onde acoustique	18
2.3 Les principaux objets et facteurs environnementaux affectant la propagation de l'onde acoustique en milieu extérieur	20
2.3.1 Affaiblissement phonique dû à la distance (divergence géométrique)	22
2.3.2 Affaiblissement phonique dû à l'absorption atmosphérique.....	23
2.3.3 Affaiblissement phonique dû aux objets environnementaux	24
2.4 Conclusion	28
Chapitre II : Méthodologie de traitement des données géospatiales	29
3.1 Introduction.....	29
3.2 Conception d'une bibliothèque de données géospatiales pour étudier un environnement acoustique d'un territoire	29
3.3 Traitement des données géospatiales	35
3.3.1 Revue de littérature sur les méthodes de classification.....	36
3.3.1.1 Approches basées sur le pixel	36
3.3.1.2 Approche basée sur l'objet (ensemble de pixels homogènes).....	37

3.3.2	Classification orientée-objet du milieu d'étude	38
3.3.2.1	Outils utilisés pour faire le traitement des données	38
3.3.2.2	Description générale du processus de classification adopté.....	40
3.4	Conclusion	42
Chapitre III : Modélisation cartographique de la propagation d'un son dans un milieu extérieur		43
4.1	Introduction.....	43
4.2	Conceptualisation du modèle général de la méthode de propagation d'un son en milieu extérieur	43
4.3	Modélisation de la source et des récepteurs sonores	47
4.4	Modélisation de la propagation	50
4.4.1	Calcul de l'effet de la distance sur la propagation de l'onde acoustique dans un milieu extérieur sans obstacles.....	51
4.4.2	Calcul de l'effet des conditions atmosphériques sur la propagation de l'onde acoustique	51
4.4.3	Calcul de l'effet des objets environnementaux sur la propagation de l'onde acoustique	53
4.4.3.1	Barrières acoustiques : bâtiments et végétation (forêts).....	54
4.4.3.2	Effets de la surface du sol	56
4.5	Modélisation 2D de la répartition spatiale des niveaux d'intensité acoustique d'un son	59
4.5.1	Définition de la modélisation spatiale	59
4.5.2	Les méthodes d'interpolation spatiale	60
4.5.3	Modélisation spatiale des données sonores par la méthode de krigeage.....	61
4.6	Conclusion	61
Chapitre VI : Expérimentation et résultats de la méthode de cartographie de propagation en fonction d'un cas d'étude : campus de l'Université Laval		62
5.1	Introduction.....	62
5.2	Simulation de la méthode de propagation	62
5.2.1	Zone d'étude.....	63
5.2.2	Extraction des objets environnementaux de la zone d'étude	64
5.2.2.1	Données utilisées	64
5.2.2.2	Approche adoptée d'extraction d'objets environnementaux de la zone d'étude	66
5.3	Simulation de la méthode	77
5.3.1	Localisation de la source sonore	77
5.3.2	Localisation des points récepteurs.....	78
5.3.3	Calcul de l'effet de la distance sur le son émis par la source sonore	80
5.3.4	Calcul de l'effet des conditions atmosphériques sur le son émis par la source sonore.....	83
5.3.5	Calcul de l'effet des objets environnementaux sur le son émis par la source sonore	84
5.3.5.1	Effet de la barrière acoustique : bâtiments	84
5.3.5.2	Effet de la barrière acoustique : végétation (forêt).....	85

5.3.5.3 Effets de la surface du sol	86
5.3.6 Résultat de la simulation	87
5.4 Validation de la méthode	90
5.4.1 Campagne de mesures acoustiques	90
5.4.2 Validation des résultats	95
5.5 Conclusion	100
Conclusion et perspectives	101
Bibliographies.....	107
Annexe (A)	112
Annexe (B)	114
Annexe (C)	118

Liste des tableaux

Tableau 3.1: Tableau récapitulatif des propriétés acoustiques des différentes composantes du territoire	32
Tableau 3.2: La liste des données vectorielles tirées de la base de données d'OSM (2017)	34
Tableau 5.1: La description des données téléchargées de la base de données d'OSM (2017).....	65
Tableau 5.2: Tableau récapitulatif des six classes d'occupation du sol du campus de l'Université Laval	73
Tableau 5.3: Matrice de confusion de la classification	76
Tableau 5.4: Calcul de l'effet de la distance sur le son émis par un bus	81
Tableau 5.5: Caractéristiques physiques du matériau "béton"	84
Tableau 5.6: Tableau récapitulatif des niveaux d'intensité acoustique des autobus captés sur la zone d'étude	93
Tableau 5.7: Comparaison des niveaux d'intensité acoustique obtenus par la simulation du modèle avec ceux mesurés sur le terrain au niveau de l'axe (1)	95
Tableau 5.8: Comparaison des niveaux d'intensité acoustique obtenus par la simulation du modèle avec ceux mesurés sur le terrain au niveau de l'axe (2)	96
Tableau 5.9: Comparaison des niveaux d'intensité acoustique obtenus par la simulation du modèle avec ceux mesurés sur le terrain au niveau de l'axe (3)	97
Tableau 5.10: Tableau comparative entre le son ambiant mesuré sur le terrain ainsi que les niveaux d'intensité acoustique du son de bus mesurés sur le terrain	99

Liste des figures

Figure 1.1 : Le cadre méthodologique retenu du projet	11
Figure 2.1: Schéma récapitulatif de propagation du son dans l'air (tiré d'Oliveira (2012))	16
Figure 2.2: Schéma récapitulatif du comportement de l'onde acoustique incidente vis-à-vis un obstacle (tiré de Raichel (2006))	25
Figure 3.1: Schéma récapitulatif du processus de classification adopté	41
Figure 4.1: Schéma récapitulatif du modèle conceptualisé pour la cartographie acoustique.....	46
Figure 4.2: Schéma du modèle conceptualisé pour la localisation des points récepteurs aux alentours de la source sonore	49
Figure 5.1: Carte de la zone d'étude: Campus de l'Université Laval.....	63
Figure 5.2: Ré-échantillonnage de l'image satellite originale du campus de l'Université Laval : a) Image originale ré-échantillonnée à 1 m. b) Image originale ré-échantillonnée à 5 m. c) Image originale ré-échantillonnée à 10 m. d) Image originale ré-échantillonnée à 20 m.	68
Figure 5.3: Segmentation de l'image satellite du campus de l'Université Laval par l'algorithme Mean shift. a) Image originale ré-échantillonnée à 1 m. b) Illustration du premier niveau de segmentation sur l'image originale. c) Deuxième niveau de segmentation après l'agrégation de certains polygone.	71
Figure 5.4: Résultat de la classification de l'image satellite du campus de l'Université Laval	74
Figure 5.5: Les 185 points de validation du résultat de classification de l'image satellite du campus de l'Université Laval.....	75
Figure 5.6: Localisation de la source sonore sur le campus de l'Université Laval.....	77
Figure 5.7: Localisation des points récepteurs du son sur le campus de l'Université Laval.....	79
Figure 5.8: Carte schématique de l'affaiblissement phonique de l'onde acoustique dû à la divergence géométrique	82
Figure 5.9: Résultat de la simulation de la méthode de modélisation en 2D de la propagation d'un son généré par un autobus	89
Figure 5.10: Schéma récapitulatif de la source sonore et les points considérés pour les levés sonores	92
Figure 5.11: Courbe illustrative des valeurs des niveaux d'intensité acoustique de l'autobus et du son ambiant sur les 3 axes	100

Remerciement

En premier lieu, j'adresse mes sincères remerciements à mon directeur de recherche **M. Alain A. Viau**, pour m'avoir proposé ce projet de recherche, pour sa disponibilité, pour sa patience, pour son aide, pour toutes les heures qu'il a consacré afin de diriger cette recherche et surtout ses judicieux conseils, qui ont contribué à réaliser ce travail.

Je désire aussi remercier mon codirecteur de recherche **M. Frédéric Hubert** pour avoir accepté de participer à m'encadrer tout le long de ce travail de recherche, pour son support ainsi que ses multiples encouragements.

Je souhaiterais exprimer mes chaleureux remerciements à la **Mission Universitaire de la Tunisie (MUT)** pour m'avoir donné l'opportunité de poursuivre mes études de deuxième cycle en sciences géomatiques à l'Université Laval. Ce travail n'aurait pu être réalisé sans leur soutien financier.

Finalement, un très grand MERCI à toute ma famille et surtout mon père **Hédi Dhib** et ma mère **Jamila Sfaxi** pour leur soutien moral pendant ces années d'études. Je leur adresse toute ma gratitude du fond du cœur.

Introduction générale

1.1 Introduction

Le présent chapitre a pour vocation d'introduire le cadre général du projet de recherche qui a été réalisé au cours de ma maîtrise en sciences géomatiques. Ce projet est destiné à étudier la dimension sonore d'un territoire à l'aide des Systèmes d'Informations Géographiques (SIG) et des images satellites, considérés comme étant deux moyens géomatiques importants ainsi que l'exploitation des données géospatiales multi-sources. Nous voulons approfondir les connaissances à propos de la cartographie sonore, la modélisation et la compréhension de la dimension spatiale de l'environnement sonore des territoires qu'ils soient urbains, semi-urbains ou forestiers, ainsi que des paysages ayant des valeurs patrimoniales importantes. En effet, un effort particulier sera dédié à la question de la modélisation de la propagation acoustique en milieu extérieur complexe via la géomatique.

1.2 Mise en contexte

La première mention du terme « paysage sonore » a été présentée en 1967 par le chercheur M. F. Southworth. Ce dernier s'intéressait aux travaux de conception des paysages sonores urbains. En particulier, son travail illustre comment le « *design sonore* » des villes permettrait d'améliorer la perception des espaces urbains par ses habitants et en particulier ceux qui ont des handicaps comme les personnes aveugles et sourdes (Southworth, 1967). De ce fait, les premières recherches sur le paysage sonore ont été faites et développées principalement pour les milieux urbains (Papadimitriou *et al.*, 2009). Après, elles sont devenues un objet de recherche pour le compositeur et musicologue canadien R. Murray Schafer. Ces premiers travaux ont été présentés dans un premier ouvrage *The Tuning of the World* (1977) qui a ensuite été traduit en français en 2010 sous le titre *Le Paysage Sonore* (2010) (Woloszyn, 2012 ; Smith, 2016). En fait, étant donné que les sons provenant d'un paysage font partie intégrante de ses propriétés écologiques, Schafer a voulu les utiliser pour réaliser des compositions musicales (Pijanowski *et al.*, 2011). Ceci a notamment conduit à identifier trois classes de sonorités environnementales dans lesquelles les sons de la nature sont distribués: sons biophoniques, géophoniques et anthropophoniques (Crocq, 2009;

Pijanowski *et al.*, 2011). Le premier terme « biophonie » décrit les sons provenant des organismes vivants, comme le chant des oiseaux ou des grenouilles. Le deuxième terme « géophonie » est pour décrire les sons ambiants non biologiques et en lien avec le Terre comme le bruit de l'eau (vague, chutes, etc.) ou les sons en lien avec les conditions météorologique (le vent, la pluie, etc.). Enfin, le troisième terme « anthropophonique » correspond aux sons issus des activités humaines, comme les transports, les travaux de construction etc. (Gage *et al.*, 2004).

Les paysages sont caractérisés non seulement par leurs aspects visuels et leurs composantes géographiques, mais aussi par leurs aspects non visuels comme par exemple leurs propres identités sonores (Papadimitrou *et al.*, 2009 ; Woloszyn, 2012) du fait que le son est considéré parmi les indices environnementaux les plus importants vu qu'il procure des informations complémentaires et pertinentes sur l'état des milieux et des territoires (Roulier, 1999). Cependant, le fait de combiner l'information à la fois visuelle et sonore pour un paysage, cela permet de percevoir, examiner, interpréter et agir sur l'environnement sonore d'un lieu afin de mieux comprendre le fonctionnement de la nature et de ces composantes environnementales (Matsinos *et al.*, 2008 ; Papadimitrou *et al.*, 2009).

Au cours des dernières décennies, l'étude du « paysage sonore » ou ce qu'on appelle aussi « environnement sonore » a fait l'objet d'une attention particulière par les autorités publiques et aussi par les chercheurs (Roulier, 1999). Cela a été une réponse à une demande sociale croissante pour améliorer la qualité de cet environnement et satisfaire aux demandes de la société (Geisler, 2011), tout en luttant contre les nuisances sonores qui se sont aggravées dans les villes au fil du temps (Guastavino, 2003). Cependant, Roulier (1999) et Reed *et al.* (2012) ont mentionné que l'accroissement de la population, le développement urbain et industriel, l'extension des réseaux de transport ainsi que l'exploitation des ressources naturelles sont parmi les premiers causes de ces nuisances sonores qui affectaient l'écosystème. De ce fait, ces bruits ont entraîné un grand bouleversement de l'environnement sonore, à la fois pour les milieux naturels et ceux habités. Ces bruits ont entraîné et ont contribué à la création de nouveaux paysages et environnements sonores (Roulier, 1999 ; Brown *et al.*, 2013).

Selon Liu *et al.*, (2013), l'exposition chronique aux bruits affecte significativement la qualité de vie humaine, la santé publique et le bien-être physique. Dans la littérature, plusieurs travaux ont démontré que le bruit a des effets néfastes sur la santé humaine (Matsinos *et al.*, 2008), à la fois au niveau physiologique, psychologique et aussi sur le plan comportemental des individus. Roulier (1999) et Bocher *et al.* (2017) ont présenté des exemples de ces méfaits du bruit comme par exemple: l'augmentation des niveaux du stress chez les individus, la difficulté à dormir et à se réveiller provoquant des effets néfastes à la qualité du sommeil et entraînent des maladies cardiovasculaires. En 2015, l'INSPQ a également publié un rapport sur la pollution sonore et ses impacts sur la santé demandant aux autorités gouvernementales et municipales d'agir pour mieux comprendre le bruit et lutter contre ce fléau du 21^{ème} siècle en milieu urbain principalement (Martin *et al.*, 2015).

À côté de ces effets néfastes sur la santé humaine, le bruit affecte aussi la faune. Il entraîne la modification de la répartition spatiale des animaux, perturbe leurs systèmes de communication et provoque la diminution de leur reproduction (Reed *et al.*, 2012; Brown *et al.*, 2013; Bocher *et al.*, 2017). C'est pour cela que de nos jours, l'environnement sonore est devenu un enjeu important et principalement utilisé dans la surveillance des changements spatio-temporels des espèces, qu'elles soient animales ou végétales, le tout à travers l'estimation des variations spatio-temporelles de la diversité sonore du milieu (Matsinos *et al.*, 2008). Aussi, il joue un rôle central dans l'évaluation des effets des bruits anthropiques sur la qualité, la répartition et le changement des habitats fauniques (Sueur et Farina, 2015).

Jour après jour, la dimension spatiale de l'environnement sonore a reçu une attention accrue de la part des chercheurs provenant de diverses disciplines (Papadimitriou *et al.*, 2009). Selon Roulier (1999), l'environnement sonore « *en tant que dimension perceptive* » est complètement différent de celui l'environnement géographique. De ce fait, selon lui, la représentation spatiale d'un phénomène non visible comme l'environnement sonore sera aussi différente de la représentation spatiale d'un environnement géographique plein de formes visuelles et composantes environnementales telles que les forêts, les bâtiments etc.

En effet, Sahlin (2014) a mentionné dans son mémoire de maîtrise que l'environnement géographique « *est souvent considéré comme un espace vide, largement 2D, rempli d'objets (maisons, arbres, etc.)* » qui sont facilement modélisables, alors que Roulier (1999) et Woloszyn (2012) ont spécifié que l'environnement sonore est un phénomène ni continu, ni homogène mais il est plutôt variable et dynamique dans l'espace et dans le temps.

Au-delà des travaux de recherches qui étudient, analysent et documentent les propriétés acoustiques de l'environnement, l'état de l'existant se concentre sur principalement deux types de cartes sonores: (1) les cartes d'inventaires de sons et (2) les cartes de bruits. Ainsi, deux différentes approches méthodologiques sont à l'origine de la production de ces cartes. La première approche est basée sur des enregistrements sonores mesurés à l'aide de microphones et/ou sonomètres et puis ces séquences sonores vont être localisées sous forme de points géoréférencés sur le territoire afin de faire un inventaire de sons de ce milieu (Hong et Jeon, 2016) ou encore de produire des applications mobiles pour tablettes numériques/téléphones intelligents (Bocher *et al.*, 2017) qui donnent l'opportunité à ses utilisateurs de faire des mesures ponctuelles de niveaux sonores dans différents lieux dans lesquels ils sont présents puis de partager les mesures obtenues en ligne avec la communauté. Cependant, ce type d'applications représente la plus récente et nouvelle approche de recherche à propos du suivi et de l'évaluation du bruit environnemental. La deuxième approche (cartes de bruit) utilisée afin de réaliser des cartes sonores consiste à aller sur le territoire d'étude afin d'installer des capteurs (Murphy et King, 2016) ou des sonomètres à différents endroits dont le but est de capter les niveaux d'intensité acoustique sous forme de décibels. Ensuite, une interpolation des décibels de ces points de mesures permet de produire des cartes sonores. Dans la littérature scientifique, à notre connaissance au moment de la réalisation de cette recherche, il existe une autre méthode qui est peu documentée afin de faire les cartes de bruits. Cette méthode est basée sur les notions de l'acoustique environnementale ainsi que la connaissance théorique du territoire comme le présente les travaux de Reed *et al.* (2012). Dans le cadre de ce projet de maîtrise, la deuxième méthode de la deuxième approche de cartographie sonore sera prise en considération.

En ce qui concerne les cartes de bruits, elles ont été réalisées afin de modéliser la répartition spatiale du bruit (Abdmouleh et Dahech, 2014) et pour identifier les zones pour lesquelles les valeurs limites du bruit tolérées ont été dépassées et ensuite de localiser les zones les plus impactées par ce bruit ainsi que les lieux sensibles à ces valeurs hors limites tels que les hôpitaux, les écoles, les habitations etc. (Klæboe *et al.*, 2006). Ces types de travaux sont des outils d'aide à la décision (Abdmouleh et Dahech, 2014) qui ont comme objectif principal de prévoir des mesures d'aménagements et/ou d'atténuations contre les nuisances provoquées par les bruits envers la population dont le but est de réduire les effets néfastes de ces nuisances sonores sur santé humaine (Matsinos *et al.*, 2008; Chételat, 2009). Cependant, cette deuxième approche sert plutôt à modéliser la propagation de l'onde acoustique, émise par une ou plusieurs sources sonores, en lien avec les différents objets présents sur le territoire (ex. bâtiments, arbres, objets divers, etc.), les différents facteurs environnementaux qui peuvent affaiblir l'onde acoustique (ISO 9613-2, 1996, Roulier, 1999, Reed *et al.*, 2012 et Baume, 2007) tels que les conditions météorologiques (le vent, la température, l'humidité relative de l'air), la divergence géométrique, l'absorption atmosphérique, la nature de la couverture des sols et la présence d'obstacles acoustiques comme les bâtiments, les infrastructures, ainsi que la végétation (ex. forêt, bosquet, etc.).

De ce fait, Roulier (1999) et Baume (2007) ont mentionné que les caractéristiques physico-chimiques du milieu de propagation (telles que l'humidité et la sécheresse de l'air, la température, etc.) influencent considérablement la continuité spatiale de l'espace sonore, ce qui induit automatiquement la perturbation de la propagation de l'onde acoustique et l'atténuation de ses niveaux d'intensité acoustique. Mais, on constate que la deuxième approche, lorsqu'aucun capteur de son n'est considéré pour produire des cartes sonores, est peu documentée dans la littérature scientifique et pour n'importe quel milieu (forestier, semi-urbain, urbain). De plus, nous considérons que les données et les outils géomatiques sont sous-exploités pour l'élaboration de telles cartes.

1.3 Problématique générale de la recherche

Dans leur article, Antoni *et al.* (2004) ont identifié la cartographie comme étant « *l'un des moyens les plus adéquats, voire le seul moyen pour représenter l'espace géographique* » sous une forme

simple, c'est-à-dire la carte. En effet, ce moyen a évolué graduellement avec l'avancement de la science et des technologies informatiques. Antoni *et al.* (2004) ont mentionné que les nouvelles technologies informatiques se basent sur les systèmes d'information géographique (SIG). Cependant, ces derniers représentent un moyen efficace de modélisation et de représentation spatiale de l'information et des composantes géographiques d'un territoire et « *des phénomènes non directement visibles ou mal perçus* » d'un environnement complexe sous forme de cartes thématiques, citant comme exemple l'environnement sonore (Antoni *et al.*, 2004).

Parallèlement aux SIG qui représentent un moyen de cartographie et de représentation thématique des données spatiales et des phénomènes sous formes de cartes contenant des objets polygonaux, linéaires ou ponctuels, il y a une autre technologie informatique pour visualiser les objets environnementaux et créer des cartes thématiques dont le but est de faciliter la représentation spatiale de l'environnement via des images satellites. On parle à ce moment-là de « la télédétection ». En effet, cette dernière est un moyen d'observation continue de la Terre vu qu'elle fournit des informations à jour sur l'utilisation des terres et les ressources naturelles (Alonso-Benito *et al.*, 2013). De nos jours, elle est utilisée comme source d'information pour étudier et cartographier la morphologie d'un lieu qu'il soit urbain, péri-urbain ou forestier tout en détectant leurs composantes ainsi que leurs limites et contours (Sheeren *et al.*, 2007).

Étant donné que les images satellites représentent un support important d'informations visuelles (Bolon *et al.*, 1995), elles permettent à ses utilisateurs d'identifier, d'étudier et d'analyser les différentes composantes naturelles et humaines des paysages à différentes échelles spatiales (Achbun *et al.*, 2011). Cependant, l'avancement des technologies et l'avènement des satellites et des images à très haute résolution spatiale (THRS) ont permis d'élargir les domaines d'applications de la télédétection (Sheeren *et al.*, 2007) et d'améliorer le processus de classification et de représentation thématique de la couverture du sol ainsi que les connaissances sur l'occupation des sols (Alonso-Benito *et al.*, 2013). De ce fait, la combinaison de ces deux technologies géomatiques : SIG et télédétection permet une meilleure compréhension de l'environnement.

Parlant au niveau de la mise en contexte sur les différentes méthodes utilisées afin de faire la cartographie de l'environnement sonore, on trouve que, dans la littérature, il y a une faiblesse quant à la variété des méthodes de la deuxième approche utilisée au niveau de la cartographie sonore. Cette approche sert à modéliser et représenter la dimension spatiale d'un environnement acoustique d'un milieu extérieur qu'il soit urbain, péri-urbain ou rural tout en se basant sur l'approche théorique de l'acoustique environnementale qui permet de faire des cartes sonores sans avoir eu recours à des relevés sur le terrain pour faire des enregistrements sonores à l'aide des sonomètres. Ainsi, selon Reed *et al.* (2012), la dimension spatiale d'un environnement acoustique se définit comme étant les schémas spatiaux de la propagation des sons environnementaux d'un milieu extérieur, tout en prenant en considération les effets des différents objets et facteurs environnementaux entourant les sources sonores. Ses facteurs sont : l'effet de la distance, de l'atmosphère, des gradients de vent et de température, de l'humidité relative de l'air, de la nature de la surface des sols, de la végétation, des barrières acoustiques telles que les bâtiments et les forêts ainsi que l'effet de la topographie du terrain. De ce fait, les facteurs cités ci-dessus absorbent l'énergie acoustique émise par une source sonore, influencent considérablement la direction de propagation de l'onde acoustique et affaiblissent ses niveaux d'intensité acoustique.

Dans leur article, Cosens et Falls (1984) ont démontré que le sol absorbe le son et qu'il a un fort effet d'atténuation pour les fréquences sonores inférieures à 2 000 Hz. En effet, Gołębiewski (2007) a précisé l'effet de sol sur la propagation des sons. Selon la nature de sa surface (poreuse, dure ou mixte), le sol peut affecter différemment les niveaux d'intensité acoustique. Barrière *et al.* (2000) ont démontré que la forêt agit sur la propagation du bruit provenant par exemple du trafic routier ou ferroviaire et qu'elle a aussi un effet d'atténuation sur les niveaux d'intensité acoustique. Dans sa thèse, Chevret (1994) a expliqué que l'absorption de l'énergie acoustique peut être aussi affecté sous l'effet du vent, de la température et de l'humidité de l'air.

Reed *et al.* (2012) ont décidé de produire un outil géomatique nommé « SPreAD-GIS » qui permet de modéliser automatiquement la dimension spatiale de l'environnement acoustique d'une zone d'intérêt à partir d'une ou de plusieurs sources sonores. En effet, pour développer cet outil, ils ont pris en compte, pour faire la modélisation, différents facteurs environnementaux tels que l'humidité relative de l'air, la température, la vitesse et la direction du vent afin de voir l'effet cumulatif de

ceux-ci sur l'atténuation de l'onde acoustique. De plus, à notre connaissance, SPreAD-GIS est la première extension gratuite d'ArcGIS de modélisation des schémas spatiaux de la propagation des sons environnementaux dans un milieu extérieur (Reed *et al.*, 2012). Elle s'intègre au SIG sous forme de boîte à outil écrite en Python et elle utilise des données géospatiales telles qu'un modèle numérique d'élévation du terrain (MNE) et une couche raster de l'occupation du sol de la zone d'étude. Reed *et al.* (2012) ont aussi eu recours à la télédétection à travers les images satellites comme moyen d'identification et d'extraction des objets environnementaux afin de réaliser la carte thématique de la zone d'étude qui va faciliter l'attribution des propriétés acoustiques de chaque objet environnemental.

Même si cet outil présente un bon potentiel de modélisation de l'environnement acoustique, il reste une boîte noire lorsqu'on souhaite l'utiliser. En effet, il demande à ses utilisateurs d'intégrer plusieurs sources de données et des paramètres qui permettront la modélisation de la propagation d'un son sans savoir à l'avance l'intérêt de leur utilisation, ainsi que leurs effets sur la propagation de l'onde. Aussi, la méthode de calcul utilisée pour pouvoir modéliser la propagation du son n'est pas expliquée ni détaillée. De plus, une limitation très importante de l'outil de Reed *et al.* (2012) est que les prévisions des niveaux d'intensité acoustique obtenues par celui-là n'ont pas été validées avec des mesures prises sur le terrain. De ce fait, il manque la partie validation de la méthode par des données empiriques ainsi que la partie comparaison des prévisions obtenues par le modèle avec des levés sonores captées sur la zone d'étude.

Ces limitations nous ont inspiré et poussé à penser à mettre en place une nouvelle méthode théorique de propagation d'un son en milieu extérieur plein d'obstacles et facteurs environnementaux affectant l'énergie acoustique, la propagation de cette dernière, ainsi que les niveaux d'intensité acoustique tout en s'éloignant de la source sonore. Le but, de cette méthode théorique est de développer ultérieurement un algorithme basé sur cette méthode afin de mettre en place un outil géomatique de production de cartes sonores. Dans ce travail de recherche, en proposant une nouvelle méthode, on a pensé à aller plus loin que la méthode de Reed *et al.* (2012). En effet, on a décidé d'intégrer des images satellites à THRS et d'autres données géospatiales multi-sources dans la méthode de propagation, comme deux sources d'extraction et étude des différentes composantes environnementales d'un territoire. Cette méthode va être développée et détaillée tout

en se basant sur un ensemble de travaux et études portant sur la modélisation de la propagation sonore en milieu extérieur.

Avec la revue bibliographique, on a constaté que la modélisation de la propagation d'un son au niveau d'un territoire en fonction de ses différents objets, de leurs propriétés acoustiques, ainsi que les facteurs environnementaux, entourant la source sonore, constituent un défi important en cartographie spatio-phonique. En effet, ce type de cartographie vise à mettre en évidence l'interaction du son avec son milieu de propagation, ainsi que les éléments et facteurs environnementaux composants ce milieu. De ce fait, pour relever ce défi, on estime que la combinaison des deux composantes de la géomatique : « la télédétection » et « les SIG » permettent, à travers des données géospatiales multi-sources, de cartographier les propriétés acoustiques des différentes composantes environnementales d'un territoire donné sans aucun contact avec le terrain d'étude.

1.4 Objectifs général et spécifiques

L'objectif principal de ce projet de recherche est de concevoir une méthode théorique de cartographie des sons, sans avoir recours à des capteurs sonores installés judicieusement sur le terrain. Dans cette méthode, on va détailler le calcul acoustique ainsi que la méthode de modélisation de l'interaction et de la propagation d'un son dans un milieu extérieur plein d'éléments environnementaux tout en se basant sur des données géospatiales multi-sources et des outils géomatiques appropriés. En premier lieu, le but de cette méthode est d'exploiter des images satellites à THRS afin d'avoir des connaissances préalables sur le milieu d'étude sans avoir eu recours à se déplacer et visiter le milieu. En deuxième lieu, elle vise à mettre en évidence l'interaction de l'onde acoustique émise par une source sonore avec les différents objets environnementaux, identifiés à travers ces images à THRS, qui existent entre la source sonore et les points récepteurs du son tout en prenant en considération les facteurs environnementaux du milieu d'étude. De ce fait, ce but sera atteint grâce aux différents objectifs spécifiques suivants :

- 1- Identifier les différents objets environnementaux présents sur un territoire et caractériser les propriétés acoustiques de chaque objet.
- 2- Concevoir une méthode théorique de cartographie de la propagation d'un son dans un milieu extérieur.
- 3- Valider cette méthode à l'aide d'un cas d'étude, soit une partie du campus de l'Université Laval.

1.5 Méthodologie de recherche

Dans cette partie, on va exposer la méthodologie adoptée afin de répondre aux objectifs spécifiques cités dans la précédente section. Ainsi, la méthodologie est composée de trois phases.

La figure -1.1- résume la démarche globale de notre méthodologie

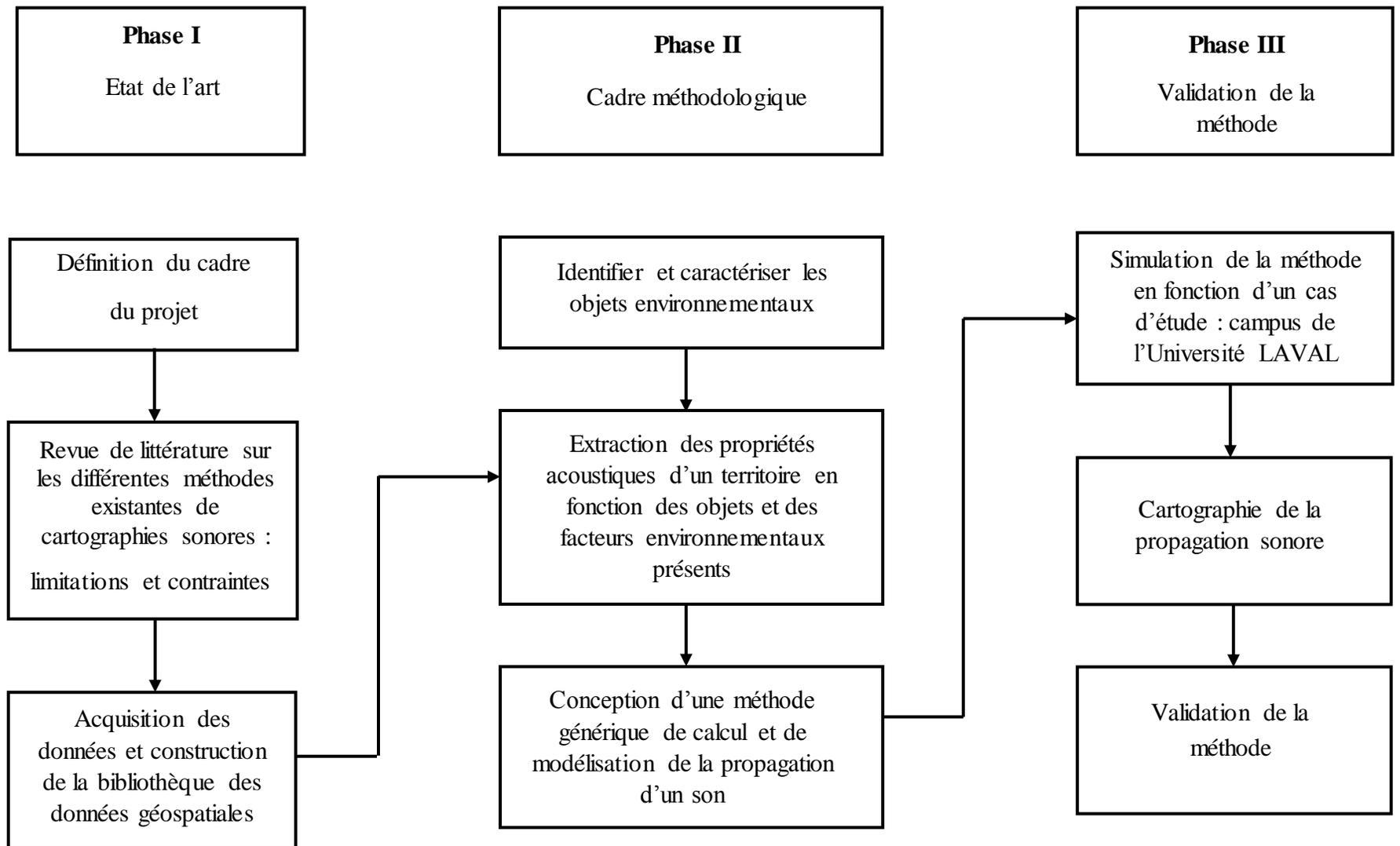


Figure 1.1 : Le cadre méthodologique retenu du projet

- **La phase -I-** : cette phase du projet consiste à définir le cadre général du projet comme première étape. Cette phase a été développée dans les trois premiers chapitres de ce mémoire. En effet, notre projet vise à étudier l'environnement sonore d'un territoire ainsi que sa dimension spatiale. Tout d'abord, une revue de littérature a été faite pour définir les concepts de l'environnement sonore, les différents types de sonorités existantes dans la nature ainsi que le phénomène de propagation des sons dans un milieu extérieur complexe pleins d'objets et de facteurs environnementaux affaiblissant l'énergie acoustique émis par une source sonore et influençant la propagation de l'onde acoustique au niveau de ce milieu complexe. Cela permet d'identifier les différentes méthodes existantes utilisées pour faire la cartographie de l'environnement sonore et de préciser leurs limitations et leurs contraintes.

Au chapitre -I-, un état de l'art sur l'environnement sonore a été fait afin de mieux identifier les propriétés acoustiques des différents objets environnementaux ainsi que les facteurs environnementaux ayant un effet sur la propagation de l'onde acoustique.

La première partie du chapitre -II-, une bibliothèque des données géospatiales a été mise en place résumant les données nécessaires à utiliser afin d'étudier l'environnement acoustique d'un territoire plein d'éléments environnementaux affectant la propagation du son

- **La phase -II-** : la deuxième phase du projet correspond au deuxième sous-objectif de ce travail de recherche, soit la conception et le développement d'une méthode de calcul et de modélisation de la propagation d'un son dans un milieu extérieur complexe. La conception de cette méthode est divisée en deux parties. La première partie est destinée à trouver la façon la plus facile pour faire l'extraction des objets environnementaux qui pourraient être présents sur un territoire pour qu'ensuite, on puisse caractériser ce territoire par des propriétés acoustiques liées à chaque objet identifié. Cependant, cette première partie de la phase -II- du projet va être abordé au niveau de la deuxième partie du chapitre -I- dans lequel on a détaillé les traitements adoptés des données géospatiales afin d'extraire les composantes environnementales d'un territoire. Ensuite, la deuxième partie de la phase -II- aborde la conception d'une méthode générale de modélisation de la propagation d'un son dans un milieu extérieur tout en prenant en compte les

propriétés acoustiques des objets déjà extraits ainsi que les effets de différents facteurs environnementaux tel que « l'absorption atmosphérique » qui vont caractériser les propriétés acoustiques du milieu de propagation vu leurs effets considérables sur le phénomène de propagation et sa modélisation dans l'espace. Cette deuxième partie de la phase -II- va être abordée dans le chapitre -III-.

- **La phase -III- :** après avoir mis en place notre méthode théorique destinée à modéliser la propagation d'un son dans un milieu extérieur, cette phase se focalise sur la simulation de la méthode conceptualisée et par la suite, sur la validation de cette même méthode en fonction d'un cas d'étude : le campus de l'Université Laval. En effet, le choix du campus de l'Université Laval, se justifie pour plusieurs raisons. En premier lieu, on a accès presque à tous les types de données géospatiales (images satellites, données vectorielles, Lidar, etc) du campus. En deuxième lieu, on trouve les différentes classes de sources sonores : biophonie (i.e. oiseaux), géophonie (i.e. vent) et anthropophonie (i.e. voitures) avec lesquelles on va réaliser notre projet. Enfin, des cartographies sonores du campus n'existent pas, d'où l'idée de mettre en place des cartes sonores représentatives résumant les phénomènes acoustiques qui pourraient survenir sur celui-ci. Cette phase va nous permettre de réaliser à la fin des cartes sonores représentant le phénomène de propagation d'un son en milieu extérieur, et ainsi d'atteindre notre troisième sous-objectif et du coup l'objectif général de ce mémoire. A la fin, la conclusion résume les parties de la phase -III-.

1.6 Structure du mémoire

Ce manuscrit est constitué de quatre chapitres organisés comme suit :

- **Introduction générale :** cette partie est dédiée à l'introduction générale de la thématique du projet et le contexte dans lequel s'effectue ce travail de recherche. La problématique, les objectifs ainsi que la méthode de recherche font partie de ce chapitre. Ce projet vise à étudier l'environnement sonore d'un lieu quelconque tout en prenant en considération les trois classes de sonorités environnementales existantes dans la nature: la biophonie, la géophonie et l'anthropophonie. Cela est dans le but de modéliser la propagation de n'importe quel type de son dans un milieu extérieur complexe.

- **Chapitre -I-** : ce chapitre est consacré à décrire l'état de l'art sur l'environnement acoustique et ses formules mathématiques. Une partie de ce chapitre porte sur la définition du phénomène de propagation de l'onde acoustique en milieu extérieur, ainsi que sur la revue bibliographique sur l'affaiblissement phonique et les effets des objets environnementaux existants dans la nature sur la propagation de l'onde acoustique et l'atténuation de ses niveaux d'intensité acoustique.
- **Chapitre -II-** : dans la première partie de ce chapitre, on a détaillé la mise en place d'une bibliothèque de données géospatiales destinée à étudier un environnement acoustique d'un territoire tout en se basant sur la revue bibliographique qui était faite au niveau du chapitre -II- sur les objets environnementaux ayant un effet sur la propagation du son. Dans la deuxième partie de ce chapitre, on a mis en place la méthode qu'on va adopter afin de faire les traitements des données géospatiales pour avoir une carte d'occupation du sol d'un territoire donné. Cette carte synthétise les différentes composantes environnementales qui affaiblissent l'énergie acoustique et la propagation du son.
- **Chapitre -III-** : ce chapitre est consacré à la conception de la méthode de modélisation de la propagation d'un son dans un milieu extérieur. En effet, cette méthode a pour but de cartographier l'environnement sonore d'un territoire donné à partir d'une approche théorique basée sur l'acoustique environnementale. Cette approche excluait le fait d'aller sur le terrain et de prendre des mesures sonores par des sonomètres à différents points pour réaliser une carte sonore.
- **Chapitre -VI-** : la première partie de ce chapitre est dédiée à la validation de la méthode en fonction d'un cas d'étude qui est le campus de l'Université Laval. Ensuite, la deuxième partie sert à la validation de cette méthode en exploitant des données réelles captées sur le même campus, qui seront comparées au résultat obtenu avec l'application de notre méthode.
- **Conclusion et perspectives** : dans cette partie, on va présenter la conclusion des travaux de ce mémoire ainsi que les différentes perspectives de recherche.

Chapitre I : État de l'art sur l'environnement sonore

2.1 Introduction

Le présent chapitre présente une revue bibliographique dans laquelle on a recensé les aspects théoriques de l'acoustique environnementale. Il est divisé en deux grandes parties. La première est dédiée à l'introduction et la présentation des principales notions de l'acoustique. Ensuite, la deuxième est consacrée pour mettre en place la relation entre l'onde acoustique et l'environnement dans lequel elle se propage ainsi que l'interaction de celle-ci avec les différents objets environnementaux qui affectent sa propagation.

2.2 L'aspect théorique de l'environnement sonore

Dans les sections qui suivent, on présente un récapitulatif sur les bases théoriques de l'environnement sonore comme étant un milieu de propagation d'une énergie acoustique émise par une source sonore et transportée par ce qu'on appelle « onde acoustique ».

2.2.1 L'onde acoustique

L'onde acoustique est définie comme étant un phénomène physique généré par une variation de pression qui se produit suite à une vibration mécanique des particules d'un milieu élastique qu'il soit solide, liquide ou gazeux (Raichel, 2003). Potel ; Bruneau (2006) ont expliqué en détail le phénomène. Ainsi, les particules du milieu de propagation vont transmettre l'énergie acoustique en s'entrechoquant les unes aux autres puis elles reviennent à leurs positions initiales. De ce fait, il n'y aura pas un déplacement des particules du milieu mais plutôt une transmission de l'énergie acoustique de proche en proche dans le milieu de propagation. À la fin, ces vibrations donnent naissance à ce qu'on appelle « ondes acoustiques » qui vont engendrer des sons. L'unité de mesure du son est le décibel (dB). La section -2.2.2- va nous aider à comprendre la notion du son et du décibel.

Le schéma de propagation du son peut être récapitulé comme étant une source sonore (S), d'une hauteur (Z_S), exprimée en mètres (m), par rapport à la surface du sol, située à une distance (r), exprimée en (m), d'un récepteur (R) qui est aussi placé à une hauteur (Z_R), exprimée en (m), au-dessus du sol (Oliveira, 2012), comme il est illustré dans la figure -2.1- ci-dessous :

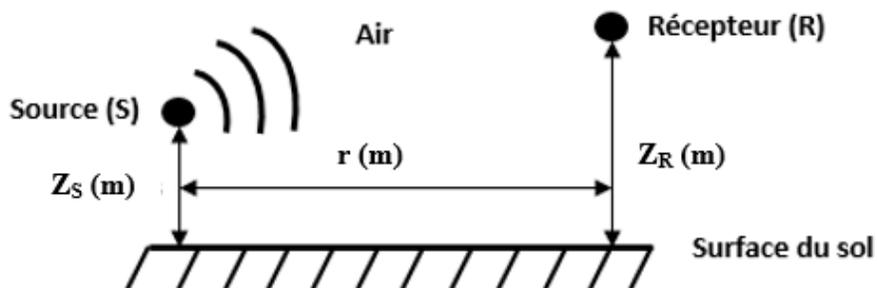


Figure 2.1: Schéma récapitulatif de propagation du son dans l'air (tiré d'Oliveira (2012))

Au cours de sa propagation, l'onde acoustique perd une partie de son énergie. On appelle ce phénomène « affaiblissement phonique ». Cette perte est principalement due à l'absorption du milieu de propagation de cette énergie et elle dépend fortement de la nature et des composantes environnementales de ce milieu. Ainsi, l'atténuation de l'énergie de l'onde sonore est fonction, à la fois, des caractéristiques physiques et mécaniques (la densité, la porosité, la célérité, etc.) des matériaux des objets constituant le milieu de propagation. Cependant, le phénomène de l'affaiblissement phonique va être plus détaillé dans la section -2.3-.

2.2.2 La notion de décibel

Eason (2013) a défini la notion de décibel (dB) comme étant un sous-multiple de bel comme il est démontré à l'équation [2]. En effet, le bel, nommé en l'honneur du physicien Alexandre Graham Bell, correspond à l'unité de mesure attribuée au son et elle est égale au logarithme décimal du rapport de deux intensités acoustiques I_1 et I_2 . Ainsi, la formule de bel est indiquée à l'aide de l'équation [1] (Potel et Bruneau, 2006 ; Eason, 2013).

En fait, l'invention de cette unité de mesure a pour but de calibrer la sensibilité de l'oreille humaine vis-à-vis les intensités acoustiques, vu que la perception du son par l'oreille humaine varie d'une façon logarithmique comme ils ont indiqué Potel et Bruneau (2006) : « *la sensation auditive évolue comme le logarithme de l'intensité acoustique de l'onde acoustique* ».

$$\mathbf{bels} = \mathbf{\log_{10} \frac{I_2}{I_1}} \quad \text{Eq [1]}$$

$$\mathbf{dB} = \mathbf{10 \log_{10} \frac{I_2}{I_1}} \quad \text{Eq [2]}$$

En mesurant l'intensité acoustique d'un son, on est capable à ce moment-là d'estimer le niveau d'intensité acoustique de ce son. Toutefois, la formule générale du niveau d'intensité acoustique noté « L_I » est exprimé en dB, et est donnée par l'équation [3] (Potel et Bruneau, 2006) :

$$\mathbf{L_I} = \mathbf{10 \times \log \left(\frac{I}{I_0} \right)} \quad \text{(en dB)} \quad \text{Eq [3]}$$

Avec :

L_I : Le niveau d'intensité acoustique en (dB).

I_0 : représente le seuil d'intensité acoustique audible par l'oreille humaine ($I_0 = 10^{-12} \text{ W/m}^2$)

I : L'intensité acoustique du son exprimée en Watts / m^2 et est donnée dans l'ouvrage de Raichel (2003) par l'équation [4] :

$$\mathbf{I} = \frac{\mathbf{W}}{\mathbf{4\pi d^2}} \quad \text{(en w/m}^2 \text{)} \quad \text{Eq [4]}$$

Avec :

W : La puissance sonore en Watts (W).

d : La distance à partir du point de la source sonore en mètres (m).

Toutefois, on sait qu'à chaque fois que la distance à la source sonore double, l'intensité acoustique émise par cette source sera divisée par quatre (Raichel, 2003). Cela va être démontré dans la partie ci-dessous :

À une distance d_1 de la source sonore, l'intensité acoustique I , donnée par l'équation [4], est exprimée par l'équation [4.1] et elle s'écrit comme suit :

$$I = \frac{W}{4\pi d_1^2} \quad (\text{en } w/m^2) \quad \text{Eq [4.1]}$$

Passant maintenant à une distance $d_2 = 2d_1$ de la source sonore, l'intensité acoustique I est donnée par l'équation [4.2] :

$$I = \frac{W}{4\pi d_2^2} = \frac{W}{4\pi (2d_1)^2} = \frac{1}{4} \times \frac{W}{4\pi d_1^2} \quad (\text{en } w/m^2) \quad \text{Eq [4.2]}$$

2.2.3 Caractéristiques physiques de l'onde acoustique

Au niveau de cette section, on va s'intéresser aux différentes grandeurs physiques de l'onde acoustique :

- Célérité (ou vitesse) de l'onde acoustique

La célérité du son est la vitesse à laquelle l'onde acoustique se propage dans un milieu. Elle est influencée par les caractéristiques physiques du milieu de propagation (Raichel, 2003). Aussi, elle est influencée par la température du milieu de propagation (Kinsler *et al.*, 1999). Ainsi, la célérité de l'onde acoustique a la propriété d'augmenter avec l'accroissement de la température du milieu de propagation traversé par cette onde comme le montre le tableau (3) de l'annexe (A) où la vitesse de propagation de l'onde acoustique, dans l'air, augmente de 331.6 m/s à $T = 0^\circ\text{C}$ à 343 m/s à $T = 20^\circ\text{C}$.

En outre, la vitesse de l'onde acoustique est fortement influencée par la nature du milieu de propagation (solide, liquide et gazeux), ainsi que la densité (masse volumique) des matériaux qui le composent (Kinsler *et al.*, 1999). Les tableaux (1), (2) et (3) de l'annexe (A) montrent le changement de la vitesse de l'onde acoustique avec le changement des caractéristiques physiques du milieu de propagation.

- L'impédance acoustique

Raichel (2003) a défini l'impédance acoustique d'un milieu pour une onde acoustique. Elle est notée « Z » et elle caractérise la résistance d'un milieu donné ou d'un matériau au passage du son. Elle est exprimée en $\text{kg/m}^2 \cdot \text{s}$ et elle est donnée par l'équation [5] (Kinsler *et al.*, 1999 et Raichel, 2003) :

$$Z = \rho \times c \quad (\text{en kg/m}^2) \quad \text{Eq [5]}$$

Avec

ρ : La masse volumique du milieu (en kg/m^3).

c : La vitesse de l'onde sonore dans le milieu (en m/s).

Les tableaux (1), (2) et (3) de l'annexe (A) montrent les valeurs d'impédances pour différents matériaux.

- Fréquence de l'onde acoustique

Vu que l'onde acoustique est un phénomène vibratoire qui provoque la déformation du milieu dans lequel elle se propage et forme des oscillations (des dépressions et des compressions) résultant d'une variation de la pression du milieu de propagation (Attenborough, 2002), elle est caractérisée par une fréquence, exprimée en Hertz (Hz) (où $1 \text{ Hz} = 1$ pulsation par seconde) qui correspond au nombre d'oscillations par seconde (Attenborough, 2002 et Raichel, 2003).

De plus, ces vibrations engendrent une onde acoustique audible par l'homme ou ce qu'on appelle *un son* (Potel et Bruneau, 2006). Ainsi, de tout le spectre de fréquences de l'onde acoustique, la gamme des fréquences auxquelles l'oreille humaine est plus ou moins sensible est de 20 à 20 000 Hz (Potel et Bruneau, 2006 ; Raichel, 2003). En effet, on trouve, dans cet intervalle, plusieurs classes de fréquences:

- Les fréquences basses s'étendent de 20 à 200 Hz.
- Les fréquences médiums sont entre 200 et 2 000 Hz.
- Les fréquences aiguës sont de 2 000 à 20 000 Hz.
- En dessous de 20 Hz, on parle d'infrasons.
- Au-dessus de 20 000 Hz, on parle d'ultrasons.

On conclut que la sensibilité auditive humaine dépend de la fréquence du son. Potel et Bruneau (2006) ont indiqué dans leur ouvrage que le seuil de l'audibilité humaine « *correspond à un niveau en décibel égal à 0 dB* ».

2.3 Les principaux objets et facteurs environnementaux affectant la propagation de l'onde acoustique en milieu extérieur

Tout au long de la section -2.2-, on s'est intéressé à mettre en place les notions théoriques de la propagation sonore et du phénomène de l'affaiblissement phonique afin de comprendre ce dernier et avoir une idée sur les différentes notions physiques liées à ce même phénomène. Ensuite, dans cette partie du mémoire, nous effectuons une revue sur les différents phénomènes physiques qui interviennent au cours de la propagation de l'onde acoustique dans son milieu.

En fait, les sources sonores se trouvent dans un milieu extérieur complexe plein d'objets et entourés par des conditions environnementales variables d'un instant à un autre. En effet, l'environnement extérieur influe considérablement la propagation acoustique ainsi que les niveaux d'intensité acoustique, vu les phénomènes physiques et les composantes environnementales complexes qui y sont présents (Attenborough, 2002 et Cotté, 2008 et Leroy, 2010). En premier lieu, si le milieu de propagation est considéré comme un milieu homogène (la densité et la pression moyenne du milieu

sont constantes), l'absorption atmosphérique et la surface du sol n'influencent pas la propagation de l'énergie acoustique. Dans le cas où le milieu de propagation est considéré comme non homogène, la propagation de l'onde acoustique dépend des propriétés et des caractéristiques physiques du milieu de propagation et notamment des caractéristiques de la couverture du sol (Oliveira, 2012).

Dans la partie qui suit, on va se concentrer principalement sur les facteurs et les mécanismes environnementaux jouant un rôle important dans la modification et l'atténuation de l'onde acoustique lors de sa propagation. Ainsi, l'atténuation est définie comme étant la somme des réductions que va subir l'onde acoustique tout le long de son chemin (Attenborough, 2002). Ces réductions (ou affaiblissements) sont conséquentes, d'un côté, à l'interaction de l'onde acoustique avec les obstacles tels que les sols, la végétation, la forêt, les bâtiments, etc., et de l'autre côté, à l'interaction de l'onde acoustique avec son milieu de propagation comme la distance entre la source sonore et le récepteur, la divergence géométrique, la nature du matériau de propagation, l'effet des conditions atmosphériques (i.e. la température du milieu de propagation, le vent, l'humidité etc.) et l'absorption atmosphérique (ISO 9613-2, 1996 ; Attenborough, 2002).

En effet, la norme ISO 9613-2 (1996) représente un document primordial destiné à mettre en place une méthode générale et théorique de calcul de l'atténuation d'un son lors de sa propagation dans l'air. En fait, cette norme prend en considération dans sa méthode de calcul les différents objets environnementaux qui pourraient affecter la propagation d'un son tels que les bâtiments, les forêts, la nature de la surface des sols (sol nu, sol gazonné ou sol recouvert par une matière synthétisée comme l'asphalte). Elle considère aussi la topographie du terrain ainsi que les facteurs environnementaux qui devraient être pris en considération lors de n'importe quel calcul acoustique en milieu extérieur citant comme exemples les conditions atmosphériques (i.e. le vent, la température, l'humidité relative de l'air) et la divergence géométrique. Dans la partie qui suit, on va s'intéresser à détailler les effets des facteurs et des objets environnementaux sur la propagation d'un son en milieu extérieur.

2.3.1 Affaiblissement phonique dû à la distance (divergence géométrique)

Dans un milieu de propagation sans obstacles, il y a deux types de sources sonores : les sources ponctuelles (une voiture sur une rue vue à partir d'une grande distance) et les sources linéaires (comme par exemple un flux continu de voitures sur une autoroute). De ce fait, la forme de la surface de l'onde sonore émise dépend du type de la source sonore. Ainsi, pour une source sonore ponctuelle, l'onde acoustique est assimilée à une onde sphérique (Attenborough, 2002). Celle-ci se propage sous forme de sphères concentriques dont le centre est la source sonore. Le rayon des sphères augmente tout en s'éloignant de la source et l'amplitude de ces dernières diminue avec l'étalement de l'onde. Cela s'explique par le fait que l'intensité acoustique décroît à mesure que l'onde s'éloigne de la source sonore. Ce phénomène est appelé « la divergence géométrique » (Leroy, 2010). Ainsi, le niveau d'intensité acoustique décroît de 6 dB, dans toutes les directions, à chaque fois que la distance par rapport à la source sonore ponctuelle est doublée, comme on va le démontrer ci-dessous. En revanche, si la source sonore est une source linéaire, alors l'énergie acoustique émise se propage sous forme de cercles et la pression acoustique décroît de 3 dB par doublement de la distance (Attenborough, 2002 ; Oliveira, 2012).

À une distance d_1 de la source sonore, l'intensité acoustique I_1 est donnée par l'équation [4.1] et le niveau d'intensité acoustique L_1 à la même distance est donné par l'équation [3.1] comme suit :

$$I_1 = \frac{w_1}{4\pi d_1^2} \quad (\text{en dB}) \quad \text{Eq [4.1]}$$

$$L_1 = 10 \times \log\left(\frac{I_1}{I_0}\right) \quad (\text{en w/m}^2) \quad \text{Eq [3.1]}$$

À une distance $d_2 = 2d_1$ de la source sonore, l'intensité acoustique I_2 et le niveau d'intensité acoustique L_2 sont données par les équations [4.2] et [3.2] :

$$I_2 = \frac{W_2}{4\pi d_2^2} \quad (\text{en dB}) \quad \text{Eq [4.2]}$$

$$L_2 = 10 \times \log\left(\frac{I_2}{I_0}\right) \quad (\text{en w/m}^2) \quad \text{Eq [3.2]}$$

De ce fait, l'affaiblissement phonique dû à la distance se calcule par la différence entre deux niveaux d'intensité acoustique L_1 et L_2 (Eason, 2013) comme il est expliqué dans l'équation [6]. Cet affaiblissement est noté « A_{div} ». Il est exprimé en décibel (dB) comme il est montré à l'équation [7]:

$$A_{\text{div}} = L_2 - L_1 = 20 \times \log\left(\frac{d_2}{d_1}\right) = 20 \times \log\frac{2 d_1}{d_1} \quad (\text{en dB}) \quad \text{Eq [6]}$$

Alors

$$A_{\text{div}} = 20 \times \log 2 = 6 \text{ dB} \quad (\text{en dB}) \quad \text{Eq [7]}$$

2.3.2 Affaiblissement phonique dû à l'absorption atmosphérique

Dans l'air, selon Dubois (1951), la propagation de l'onde sonore, à partir d'une source émettrice, est toujours amortie. Cet amortissement (ou affaiblissement) résulte du phénomène de l'absorption atmosphérique. Les conditions atmosphériques affectent la propagation de l'onde sonore. En se propageant dans l'air, l'onde acoustique est peu à peu absorbée (Attenborough, 2002). Tout d'abord, cette absorption varie en fonction de la température, de l'humidité relative de l'air et de la fréquence du son (ISO 9613-2, 1996). En effet, l'humidité relative de l'air a un effet sur les intensités acoustique pour les fréquences qui sont au-dessus de 40 000 Hz. Dans ce cas, l'atténuation du niveau d'intensité acoustique est aux alentours de 0.1 dB/m. De plus, cette atténuation n'est élevée que pour les humidités relatives dans la gamme de 10 à 30 % (Raichel, 2003). Passant maintenant au vent, il a une influence mineure sur l'intensité acoustique mesurée à des courtes distances qui ne dépassent pas 50 m. Pour des distances plus longues, les effets du vent deviennent sensiblement plus importants (Chen et Maher, 2004). De plus, la variation de la température dans l'air cause l'absorption de l'onde acoustique (Dubois, 1951).

2.3.3 Affaiblissement phonique dû aux objets environnementaux

Dans la nature, il y a plusieurs facteurs physiques tels que la température, la densité volumique du milieu de propagation, l'humidité relative de l'air etc. qui influencent la propagation du son. Dans les sections -2.3.1- et -2.3.2-, on a parlé de l'affaiblissement des niveaux d'intensité acoustique dû aux phénomènes de la divergence géométrique (distance à la source sonore) et à l'absorption atmosphérique. Maintenant, à ces deux types d'affaiblissements, s'ajoute un autre type d'affaiblissement de l'énergie acoustique qui est dû aux objets environnementaux présents dans le milieu de propagation tels que les bâtiments, la végétation, etc.

Dans la pratique, il est évident que l'onde acoustique rencontre, sur sa trajectoire, de nombreux objets environnementaux (i.e. bâtiments, forêts, murs etc.). On appelle ces derniers « des barrières ou obstacles acoustiques » (ISO 9613-2, 1996). Cependant, selon la nature des matériaux composant les parois de ces barrières acoustiques, un pourcentage de l'énergie acoustique incidente va être soit réfléchi au moment où l'onde incidente croise l'obstacle, soit absorbée puis transmise à travers la paroi de ce dernier (Raichel, 2003). De ce fait, l'absorption de l'énergie acoustique par les matériaux des objets est également un facteur important qui influence la propagation de l'onde et atténue ses niveaux d'intensité acoustique. La figure -2.2- illustre le comportement de l'onde sonore incidente vis-à-vis les surfaces des obstacles acoustiques croisées.

Dans son ouvrage, Raichel (2003) a expliqué en détails les phénomènes de réflexion, d'absorption ou de transmission. En effet, ces derniers se produisent à l'interface entre deux milieux de natures différentes, généralement entre l'air et une autre surface jouant le rôle d'une barrière empêchant ainsi la propagation de l'onde acoustique tels que la surface des sols, les bâtiments, la végétation etc. Les milieux urbains, avec ses composantes telles que les murs, les bâtiments, les routes, les stationnements ou autres structures solides, affectent significativement la propagation de l'onde acoustique. Ainsi, les bâtiments peuvent servir de barrières acoustiques. En effet, ces barrières, selon la nature des matériaux qui les composent (Kim *et al.*, 2014), une certaine quantité de l'énergie acoustique incidente sera transmise à travers la barrière, une autre quantité sera réfléchi (Picaut *et al.*, 2012).

En se propageant dans l'air, lorsque l'onde incidente ($I_{\text{Incidente}}$) rencontre des matériaux solides à porosité faible comme le béton, presque la majorité de l'onde sera réfléchi ($I_{\text{Réfléchi}}$) dans l'air, alors qu'une faible partie de l'onde incidente sera transmise ($I_{\text{Transmise}}$) et/ou absorbée par le matériau (Raichel, 2003) comme il est schématisé au niveau de la figure 2.2-. En effet, Raichel (2003) a détaillé dans son ouvrage que la partie transmise de l'onde sonore incidente peut être soit dissipée sous forme de chaleur (absorption totale de l'onde par le matériau), soit transmise à un autre milieu sous forme d'ondes acoustiques de transmission. Tandis que pour les matériaux à porosité élevée (i.e. le sol, le gravier etc.), l'onde acoustique est presque totalement absorbée et une petite partie sera réfléchi dans l'air.

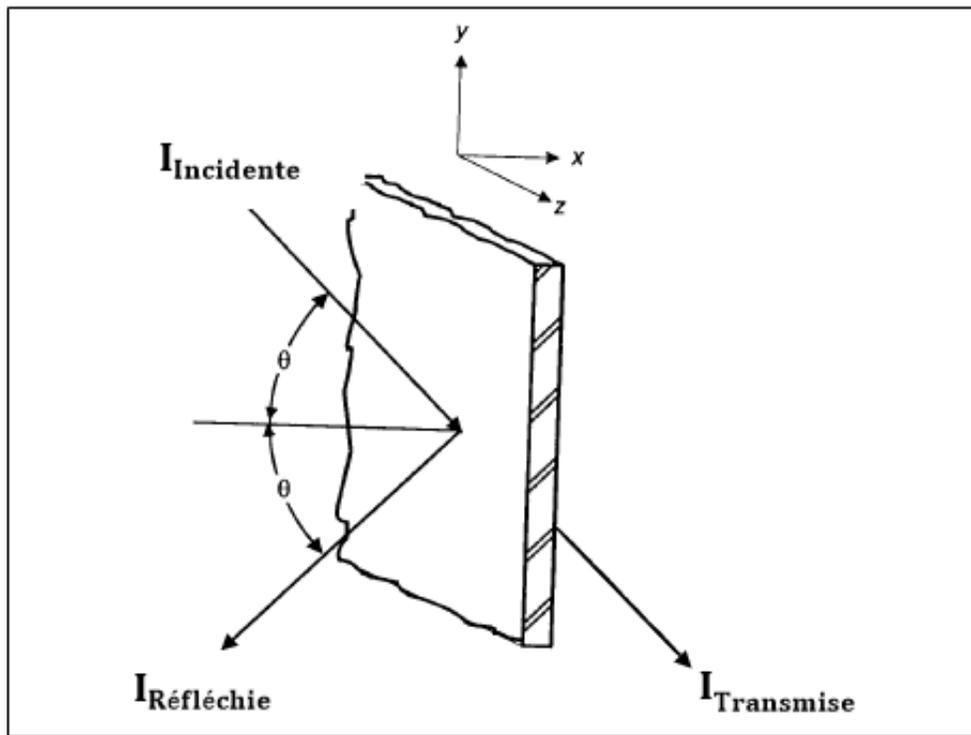


Figure 2.2: Schéma récapitulatif du comportement de l'onde acoustique incidente vis-à-vis un obstacle (tiré de Raichel (2003))

Cependant, les sons venant de l'extérieur et frappant une barrière acoustique subissent un affaiblissement ou réduction au niveau de leurs niveaux d'intensité acoustique dû à l'impédance acoustique (Z) de la paroi de l'obstacle. Alors, chaque matériau composant la barrière acoustique est caractérisé par sa propre impédance et isolation acoustique (Kinsler *et al.*, 1999). La mesure de cette dernière se fait grâce à la formule de la perte de transmission (Raichel, 2003).

De ce fait, soient $I_{\text{Incidente}}$ est l'intensité acoustique incidente et $I_{\text{Transmise}}$ est l'intensité acoustique transmise par la surface de l'obstacle (figure -2.2-). On appelle la perte de transmission (T_L) par une surface, la différence des niveaux d'intensité acoustique entre deux points : un point (1) situé avant la paroi et un point (2) situé derrière la paroi (Raichel, 2003). Elle est donnée par les deux équations [8] et [9] qui sont expliquées dans l'ouvrage de Raichel (2003):

$$T = \frac{I_{\text{Transmise}}}{I_{\text{Incidente}}} = \frac{4Z_1 Z_2}{(Z_1 + Z_2)^2} = \frac{4c_1 \rho_1 c_2 \rho_2}{(c_1 \rho_1 + c_2 \rho_2)^2} \quad \text{Eq [8]}$$

Alors

$$T_L = L_1 - L_2 = 10 \log \frac{I_{\text{Incidente}}}{I_{\text{Transmise}}} = 10 \log \frac{1}{T} \quad (\text{en dB}) \quad \text{Eq [9]}$$

Avec :

T_L : La perte de transmission par la surface d'une barrière acoustique en (dB)

T : Le facteur de transmission de l'onde acoustique

Z_1 : L'impédance de l'air en (Pa.s/m)

Z_2 : L'impédance de la surface de la barrière acoustique en (Pa.s/m)

c_1 : Célérité de l'onde acoustique dans l'air en (m/s)

c_2 : Célérité de l'onde acoustique à travers le matériau en étude en (m/s)

ρ_1 : Densité (masse volumique) de l'air en (kg/m³)

ρ_2 : Densité du matériau en étude en (kg/m³)

Dans la littérature, on a trouvé qu'à côté de l'effet des barrières acoustiques sur l'onde acoustique, le comportement de cette dernière dépend aussi fortement de la nature de la surface au-dessus de laquelle se fait la propagation (ISO 9613-2, 1996). De ce fait, en se propageant sur le sol, l'atténuation de l'onde acoustique se produira à cause des pertes de l'énergie acoustique dues à la réflexion et à l'absorption de celle-ci par le sol (Attenborough, 2002). Pour les surfaces en béton ou en eau (surfaces acoustiquement dures et ayant une faible porosité), l'onde acoustique incidente est presque totalement réfléchi. Alors qu'au niveau des surfaces poreuses (surfaces acoustiquement douces comme la pelouse), cette onde incidente est absorbée et seule une petite partie sera réfléchi (Kim *et al.*, 2014).

En général, les recherches de Yang *et al.* (2013) ont montré que le sol affecte significativement les niveaux d'intensité acoustique, vu ses propriétés similaires à celles d'un matériau poreux absorbant l'énergie sonore. De ce fait, il absorbe moins l'énergie acoustique lorsque sa teneur en humidité est élevée. Ils ont également trouvé, au cours de leur étude, qu'une zone de végétation peut contribuer à l'atténuation des niveaux d'intensité acoustique. En effet, la végétation avec ses trois structures végétales (feuille, tige et racine) a, à la fois, un pouvoir absorbant et diffusif de l'énergie acoustique, en particulier à des fréquences élevées (à environ 2 000 Hz) (Barrière *et al.*, 2000). Ainsi, l'atténuation de cette énergie dépend de la densité du couvert végétal (ISO 9613-2, 1996 et Barrière *et al.*, 2000), du diamètre des troncs d'arbres, du type des arbres, de la densité des branches ainsi que l'importance de leur feuillage (Leroy, 2010). En premier lieu, en général, la végétation fournit une atténuation faible ou même nulle de l'énergie acoustique, mais seulement si la ceinture d'arbres est suffisamment dense et large, alors il y a absorption et atténuation significative de l'onde acoustique, selon les résultats de recherche qui ont été faits sur l'effet des conifères sur la propagation de l'onde acoustique (Attenborough, 2002). En deuxième lieu, des recherches ont montré que les troncs d'arbres et leurs branches ont un effet de diffusion par rapport à l'onde acoustique (Barrière *et al.*, 2000). Enfin, la présence d'une paroi verte, comme par exemple un sol recouvert de gazon, a un effet sur l'absorption du son.

2.4 Conclusion

Ce chapitre a été consacré à la présentation de plusieurs notions théoriques relatives à l'environnement acoustique. Une description du phénomène de la propagation acoustique a été faite au début du chapitre. Ensuite, un état de l'art concernant les composantes et les facteurs environnementaux ayant des effets sur l'énergie acoustique, son affaiblissement, ainsi que la propagation de l'onde acoustique dans un milieu complexe a été également présenté dans ce chapitre. Cette revue nous a permis d'avoir une idée sur l'ensemble des éléments environnementaux que l'on va prendre en considération pour atteindre nos objectifs de ce travail de recherche. Ils feront l'objet des prochains chapitres.

Chapitre II : Méthodologie de traitement des données géospatiales

3.1 Introduction

Le présent chapitre est consacré à la conception d'une méthode permettant de détecter et d'identifier les composantes environnementales d'un territoire qui ont des influences sur la propagation de l'onde acoustique. En effet, le but de notre projet de recherche est de conceptualiser et mettre en place une méthode théorique qui permet de mettre en relation l'interaction d'un son, émis par une source sonore, avec son environnement de propagation ainsi que les éléments composant ce même environnement. Afin d'atteindre cet objectif avec les moyens et les techniques les plus simples, il faut conceptualiser et mettre en place une méthode générale qui pourrait être utilisée et appliquée par différents utilisateurs provenant de multiples domaines.

3.2 Conception d'une bibliothèque de données géospatiales pour étudier un environnement acoustique d'un territoire

Pour atteindre l'objectif de notre projet cité en introduction de ce chapitre, comme première étape, il faut faire l'acquisition des données nécessaires. Alors, l'étape de l'acquisition des données est divisée en deux grandes phases : (1) la création d'une bibliothèque de données géospatiales permettant l'étude d'un environnement acoustique d'un territoire urbain, semi-urbain ou même rural et de le cartographier et (2) le traitement de ces données géospatiales.

Étant donné que la cartographie spatiophonique met en relation le son avec son environnement, il faut donc d'une part chercher dans la littérature les différentes données utilisées afin de caractériser et de représenter le son spatialement, c'est-à-dire la manière de se propager. De ce fait, il faut identifier les différentes sources sonores, ainsi que les éléments et les facteurs environnementaux ayant un effet sur la propagation du son. En effet, la revue bibliographique, qui a été faite à la section -2.3- du chapitre -I-, nous a permis de résumer les différentes données qui pourraient être utilisées pour faire une cartographie spatiophonique.

Comme première étape, il faut identifier et représenter les sources sonores sur le territoire. En effet, comme on a dit à la section -1.2- de l'introduction générale, il y a dans l'environnement de nombreuses sources sonores, de différents types: les sons anthropophoniques (i.e. le bruit des moyens de transport, le bruit des chantiers), géophoniques (i.e. l'écoulement de l'eau, le bruissement des feuilles dû à la présence du vent) et biophoniques (i.e. les chants des oiseaux). De ce fait, il faut identifier des données géospatiales qui jouent le rôle des émetteurs ponctuelles. Dans notre projet, on s'intéresse aux sources sonores ponctuelles et non linéaires (i.e. les forêts pour les chants des oiseaux, la rivière ou la fontaine pour l'écoulement de l'eau).

Comme deuxième étape, pour représenter le son spatialement, il faut identifier aussi les données des multiples objets qui ont un effet sur la propagation du son dans l'environnement. On a déterminé à la section -2.3- du chapitre -I- les différents objets et facteurs environnementaux qui ont un effet sur le son et qui pouvaient affecter l'onde acoustique au cours de sa propagation. Tout d'abord, comme on a mentionné auparavant, les bâtiments comme obstacles verticaux présents dans les milieux urbains, bloquent le son au cours de sa propagation. De ce fait, ils représentent la première donnée géospatiale à considérer. Ensuite, la forêt comme étant un élément de territoire et un obstacle vertical, a un effet sur le son en raison de ses composantes végétales (les feuilles et les branches). Alors, la forêt constitue la deuxième donnée géospatiale à considérer. Aussi, la nature de la surface du sol (i.e. sol sableux, sol gazonné, sol asphalté comme les rues et les stationnements, sol enneigé etc.) a un effet sur la propagation du son. Finalement, les différentes catégories de la nature de la surface du sol représentent la troisième donnée géospatiale à considérer dans le projet. Sans oublier que, dépendamment des conditions atmosphériques (i.e. la température, l'humidité relative de l'air, la vitesse du vent) du milieu de propagation, ce dernier a aussi un effet sur la propagation du son.

Le paragraphe précédent nous a permis d'avoir d'une part une idée de la liste des données géospatiales représentant les différents objets environnementaux, qui est nécessaire pour toutes études d'un environnement acoustique d'un territoire et d'autre part les données non géospatiales. Ces dernières représentent les données des conditions atmosphériques du territoire à l'étude, ainsi que les données sonores (i.e. les niveaux d'intensité acoustique du son exprimés en dB qui sont émis par la source sonore).

Pour résumer, la revue de littérature qui a été faite a permis de cibler les différents objets du territoire pertinents à considérer et à extraire pour un projet qui vise l'étude de l'environnement acoustique et le cartographier. En effet, certains de ces éléments environnementaux (bâtiment, forêt, fleuve) pourraient être à la fois des sources sonores, des porteurs de sources sonores, ainsi qu'ils ont des effets sur la propagation du son comme il est indiqué au tableau -3.1-. Passant maintenant à la surface du sol, selon sa nature et selon le matériau qu'il la compose, elle peut influencer la propagation de l'onde acoustique comme elle peut porter des sources sonores pareilles au bâtiment et à la forêt. Le tableau -3.1- récapitule les propriétés acoustiques des différentes composantes environnementales qui pourraient être présentes sur un territoire.

De plus, on a mentionné à la section -2.3- du chapitre -I- que l'onde acoustique, émis par une source sonore, réagit différemment avec les éléments du territoire. Cela est dû à l'élément lui-même et à la nature du matériau composant chaque élément présent dans le milieu de propagation. Cependant, chaque matériau a ses propriétés acoustiques vis-à-vis l'onde acoustique. La revue bibliographique destinée aux propriétés acoustiques des différents éléments du territoire par rapport à l'onde acoustique et sa propagation, va être développée et détaillée à la section -4.2- du chapitre -III-.

Tableau 3.1: Tableau récapitulatif des propriétés acoustiques des différentes composantes du territoire

Composantes du territoire	Fonctions		
	Source sonore	Élément porteur de source sonore	Élément ayant des perturbations sur la propagation du son
Bâtiment	×	×	×
Forêt	×	×	×
Surface du sol	×	×	×
1- Sol nu		×	×
2- Sol gazonné		×	×
3- Sol asphalté (voies de communication et stationnements)		×	×
4- Sol enneigé		×	×
Hydrographie (rivière, fleuve, fontaine etc.)	×	×	×

Une fois que la liste des éléments environnementaux a été dressée, il faut passer à la phase de l'acquisition des données des éléments du territoire recensés au tableau -2.1-. Dans la littérature, on remarque que les chercheurs utilisent plusieurs moyens géomatiques tel que la télédétection et des données géospatiales multi-sources afin « *d'aborder des paysages complexes et de les rendre identifiables et favorise aussi la révélation de propriétés de l'écosystème non observables a priori* » (Skupinski et al., 2009). En effet, selon Skupinski et al., (2009), les données satellites présentent un des outils incontournables et les plus performants dans l'identification des formes et des composantes paysagères, ainsi que l'extraction des différentes occupations de la surface terrestre grâce à leurs multiples résolutions spatiales. De ce fait, l'utilisation des images satellites se révèle importante dans notre étude pour détecter et identifier les différentes occupations de sol de la zone d'étude.

A l'égard des paragraphes précédentes, on a identifié deux types de données: des données géospatiales et des données non géospatiales (données météorologiques et données sonores). Premièrement, pour les données géospatiales, on vise à extraire les différentes composantes du territoire en utilisant des images satellites à THRS et à partir d'autres données gratuites et libres afin de créer une bibliothèque géospatiale libre et exploitable par n'importe quel utilisateur à travers le monde souhaitant étudier et s'investir dans le domaine de l'acoustique environnementale et la cartographie sonore. De ce fait, le choix a porté sur la base de données libre appelée Open Street Map (OSM, 2017). Il s'agit d'une source de données gratuites sous format vectoriel (.shp). Cette base de données contient la majorité des données vectorielles des différents éléments environnementaux existants. Le tableau -3.2- présente un récapitulatif des données vectorielles à utiliser dans le projet afin d'identifier les éléments généraux d'un territoire qu'il soit urbain, semi-urbain ou forestier. Ces éléments du territoire à considérer sont résumés dans le tableau -3.1-. Une combinaison sera faite entre des images satellites à THRS avec des données vectorielles issues de la base de données d'OSM (2017) afin d'extraire le maximum de composantes environnementales avec une haute précision.

Tableau 3.2: La liste des données vectorielles tirées de la base de données d'OSM (2017)

Éléments du territoire	Distributeur/ producteur de la donnée	Année de production	Échelle
Bâtiments	OSM	2017	1:1 000
Forêts	OSM	2017	1:1 000
Voies de communication (routes)	OSM	2017	1:1 000
Stationnements	OSM	2017	1:1 000
Hydrographie (rivière, fleuve, fontaine etc.)	OSM	2017	1:1 000
Surface gazonnée	Non disponible		
Surface sableuses (sols nus)	Non disponible		

D'après le tableau -3.2-, on constate que les données sur les surfaces sableuses (nues) et gazonnées sont absentes sur la base de données d'OSM (2017). En effet, les images satellites comblent ce manque d'information pour quelques composantes et leur utilisation est une solution pour extraire les zones gazonnées et les zones sableuses qui pourraient exister sur un territoire. De ce fait, il fallait s'assurer que la résolution spatiale de l'image satellite du territoire soit suffisamment fine (images satellites à THRS) afin de bien représenter et modéliser la réalité du territoire.

3.3 Traitement des données géospatiales

On passe maintenant à l'étape du traitement des données géospatiales comme étant la deuxième étape de la partie « conception d'une bibliothèque de données géospatiales pour étudier un environnement acoustique d'un territoire ». En effet, cette section est consacrée au traitement adopté pour les données géospatiales afin d'identifier et extraire les différentes composantes environnementales d'un territoire.

Dans la littérature, il existe différentes méthodes qui servent à détecter et extraire les données d'occupation de sol citant, comme les indices de différence végétale, l'application des réseaux neurones, la classification spectrale/ temporelle et l'approche orientée-objet (Skupinski *et al.*, 2009). Toutefois, le choix de la méthode qui va être utilisée dans de notre travail se base d'une côté sur la source et le type des données géospatiales. De l'autre côté, le choix dépend de la disponibilité des logiciels de traitements utilisés au département des sciences géomatiques de l'Université Laval.

Les sections qui suivent vont être divisées comme suit : la première partie sera consacrée pour une petite revue de littérature sur les différentes approches de classification existantes vu que notre choix porte sur la méthode de classification pour faire l'extraction des objets environnementaux existants sur un territoire. Après, on va passer à la description générale du processus de classification adopté dans notre étude. Dans ce processus, nous montrerons les différents traitements effectués sur une image satellite à THRS afin de réaliser l'étape de classification et faire l'extraction des différentes classes d'objets présentes sur un territoire donné.

3.3.1 Revue de littérature sur les méthodes de classification

Nous allons introduire dans cette section la définition et la description du processus de classification ainsi que son principe. Tout d'abord, Caloz et Collet (2001) ont défini le principe de classification d'une image. En effet, il s'agit de rassembler et d'organiser l'ensemble des pixels d'une image en un nombre de classes finies et homogènes résumant les grands éléments structuraux de celle-ci, dont le but est d'obtenir une représentation cartographique des valeurs radiométriques des objets. De ce fait, les méthodes de classification ont pour but d'extraire de l'information sur les objets ainsi que des connaissances exploitables, tout en analysant un ensemble de données satellites brutes, afin d'identifier les classes auxquelles appartient chaque objet environnemental (Bolon *et al.*, 1995).

Dans la littérature, il existe diverses façons d'effectuer l'opération de classification des images satellites (Bolon *et al.*, 1995). En effet, on trouve les méthodes de classification conventionnelles telles que : « la classification non supervisée » et « la classification supervisée ». Aussi, on trouve la méthode de classification basée sur l'approche orientée-objet. Cette dernière est parmi les méthodes les plus récentes en traitement d'images satellites (Bolon *et al.*, 1995 et Caloz et Collet, 2001). Dans ce qui suit, nous nous intéressons à donner un petit aperçu sur ces méthodes de classification.

3.3.1.1 Approches basées sur le pixel

Il est à noter que les méthodes conventionnelles de classification basées sur l'approche du pixel sont « la classification non-supervisée » et « la classification supervisée » (Achbun *et al.*, 2011). Toutefois, Zhou et Troy (2008) ont précisé que ces deux méthodes utilisent uniquement l'information spectrale de chaque pixel de l'image, provenant de la réflectance des objets environnementaux et que les informations spatiales de ces derniers (i.e. la forme, la taille, la texture etc.), seront négligées et ne seront pas exploitées au cours du traitement de la donnée.

- **Classification non supervisée**

Elle est nommée aussi « classification non dirigée ». En effet, elle permet de déterminer d'une façon automatique, par des programmes informatiques, les différentes classes d'occupation du sol sans avoir eu recours à aucune information externe autre que l'image satellite de la zone d'intérêt (Caloz et Collet, 2001). Ainsi, cette approche permet le regroupement et le rassemblement des pixels de l'image ayant une similitude de signature spectrale, formant ainsi différentes classes de signatures spectrales qui sont transformables ultérieurement en classes d'occupation du sol ou ce qu'on appelle classes thématiques (Caloz et Collet, 2001).

- **Classification supervisée**

Elle est nommée aussi « classification dirigée ». Elle procède par une démarche totalement inverse que celle de la classification non supervisée. En effet, elle se fait lorsqu'on a des connaissances préalables concernant les objets environnementaux présents dans l'image à classifier (Caloz et Collet, 2001). C'est-à-dire que ce type de classification donne l'opportunité à son utilisateur d'exploiter ses connaissances sur le milieu d'étude au cours du processus de la classification (Shi et Xue, 2017). De ce fait, avant de commencer la classification, les différentes classes thématiques doivent être définies au préalable en identifiant des zones de validation terrain correspondant respectivement aux classes thématiques définies. Ainsi, ces zones permettent d'extraire l'intervalle de la signature spectrale de chaque classe thématique identifiée sur la zone d'étude. Puis, chaque pixel de l'image, selon ses propriétés spectrales, va être attribué à la classe thématique qui a les informations spectrales les plus proches (Caloz et Collet, 2001). Cependant, dans le cas où les zones d'entraînements ne représentent pas de manières exactes les objets identifiés, cela peut affecter la classification et le résultat de celle-ci peut être flou et un chevauchement entre les classes sera présent aussi.

3.3.1.2 Approche basée sur l'objet (ensemble de pixels homogènes)

- **Du pixel vers l'objet**

Les deux approches de classifications définies au-dessus (classification non-supervisée et classification supervisée) sont deux techniques traditionnelles de classification des données de

téledétection. Tel que mentionné auparavant, elles se basent sur l'information spectrale qui se trouve dans les pixels des images satellites. De ce fait, elles présentent plusieurs limitations et difficultés dans la classification de certaines classes telles que les rues, les stationnements et les bâtiments vu qu'elles ont des signatures spectrales semblables (Achbun *et al.*, 2011). Alors, ces catégories d'occupation du sol ont besoin des informations spatiales additionnelles autres que les informations spectrales des objets telles que la forme, la texture, la topologie etc. (Caloz et Collet, 2001 ; Achbun *et al.*, 2011).

- **Approche Orientée-Objet (AOO)**

Contrairement à l'approche de classification classique basée sur « le pixel », l'approche de classification orientée-objet ne traite pas le pixel de manière isolé. Ainsi, elle permet de regrouper et classer les pixels de l'image ayant des informations semblables en des zones ou groupes homogènes tout en se basant sur les valeurs spectrales des pixels, les formes des objets à classer, leurs textures etc.(Achbun *et al.*, 2011). Elle s'agit d'un moyen qui donne l'opportunité d'intégrer l'information spatiale à côté de celle la spectrale dont le but de bien discriminer les objets terrestres ayant des signatures spectrales très proches et de bien classer les images à haute résolution spatiale qui présentent une forte hétérogénéité dans leurs pixels (Zhou et Troy, 2008 ; Sparfel *et al.*, 2008 et Shi et Xue, 2017). Le choix de l'approche de classification adoptée va être expliqué et détaillé dans la prochaine section.

3.3.2 Classification orientée-objet du milieu d'étude

3.3.2.1 Outils utilisés pour faire le traitement des données

Sur le marché, il existe plusieurs logiciels commerciaux, comme ENVI, eCognition, Geomatica etc., qui automatisent les différentes méthodes de classification citées précédemment. Au département, le logiciel disponible est ENVI pour faire les traitements d'images satellites mais ce logiciel ne comporte pas pour le moment des fonctionnalités de classification par l'approche orientée-objet. Cela présente une limitation pour les logiciels commerciaux car ils coutent chers.

Dans un premier temps, on a testé une classification sur une image satellite à THRS d'un territoire tout en utilisant l'algorithme du maximum de vraisemblance de l'approche supervisée sous le logiciel ENVI. On a réalisé cette approche de classification sans avoir eu recours à l'utilisation de données auxiliaires telles que des couches vectorielles. Malheureusement, le résultat obtenu n'était pas satisfaisant. Il y avait une mauvaise attribution de certains pixels aux classes auxquelles ils n'appartenaient pas et une certaine confusion entre les classes. Cela est dû à la difficulté de faire la distinction entre les différentes surfaces réfléchissantes présentes sur la scène telles que les stationnements, les routes et les bâtiments. Ces derniers ont des réponses spectrales voisines, voire même semblables vu qu'ils sont construits par les mêmes matériaux. Ainsi, il était difficile de distinguer les limites des différents objets environnementaux sans avoir des données auxiliaires qui nous donnent des renseignements supplémentaires sur les classes d'objets comme les périmètres des différents éléments existants sur le territoire. La très haute résolution spatiale de l'image satellite a été aussi parmi les causes fondamentales de la mauvaise classification de celle-ci, vu le trop de détails qui existait là-dessus aboutissant à mal classer les pixels de certaines classes. De ce fait, pour classifier une image satellite à THRS, un ré-échantillonnage de celle-ci est suggéré afin d'agréger les pixels ayant la même signature spectrale

Dans ce cas, la classification par l'approche orienté-objet paraît la plus appropriée dans le cas d'une étude qui comprend des images satellites à THRS, comparée à la classification par l'approche orienté-pixel. Comme avec le logiciel ENVI on ne pourra pas faire la classification de l'image par l'approche orientée-objet, on a pensé d'aller chercher d'autres moyens procurant le même service. Ces moyens doivent permettre à la fois de faire le travail souhaité de la façon la moins coûteuse et être disponibles à tout moment pour toute personne désirant réaliser les mêmes tâches.

Cependant, afin de réaliser notre étude, les matériels et logiciels utilisés pour extraire et cartographier les objets environnementaux présents sur une image satellite sont différents. Dans la partie de traitement de l'image, présentée ci-après, nous avons utilisé :

- La bibliothèque **Orfeo Toolbox** (OTB): c'est une bibliothèque de traitement d'images satellites (Open Source). Elle fournit aux utilisateurs d'images satellites tous les outils nécessaires pour

faire les traitements d'images. Elle est facilement intégrable dans le logiciel QGIS et elle peut remplacer les logiciels de traitement d'images.

- Le logiciel **QGIS** (Open Source) : permet de gérer l'image satellite et faire la segmentation de celle-ci.

3.3.2.2 Description générale du processus de classification adopté

Dans cette section, on va présenter le traitement à faire à propos des données géospatiales du projet. La partie la plus importante des traitements des données géospatiales est la classification de l'image satellite. En effet, cette étape de traitement a pour objectif d'obtenir une couche matricielle appelée « carte d'occupation du sol » qui résume avec une haute précision, les différents éléments environnementaux qui pourraient être présents sur le territoire d'étude. Cette carte illustre tous les objets environnementaux qui ont des propriétés acoustiques et ont des effets sur la propagation du son.

Le traitement s'est fait en plusieurs étapes et le schéma de la figure -3.1- résume le processus de classification adopté. En effet, ce processus comprend plusieurs étapes de traitement de l'image originale. Ces étapes sont fortement liées entre elles et consécutives. En fait, le but de cette première partie de notre démarche méthodologique est d'extraire le maximum d'objets environnementaux à partir de notre image satellitaire à THRS. Ensuite, le reste des informations sur ces objets sera comblé par les données vectorielles extraites de la base de données d'Open Street Map (données supplémentaires). Ce processus va être expérimenté au niveau du chapitre -VI- et toutes les étapes de traitement vont y être détaillées. Selon la figure -3.1- ci-dessous:

Les entrées de ce processus sont :

- Une image satellite délimitée d'un territoire donné.
- Des couches vectorielles d'occupation de sol du territoire à l'étude extraites de la base de données d'OSM (2017).

En sortie, ce processus produit :

- Une carte d'occupation du sol du territoire en étude.

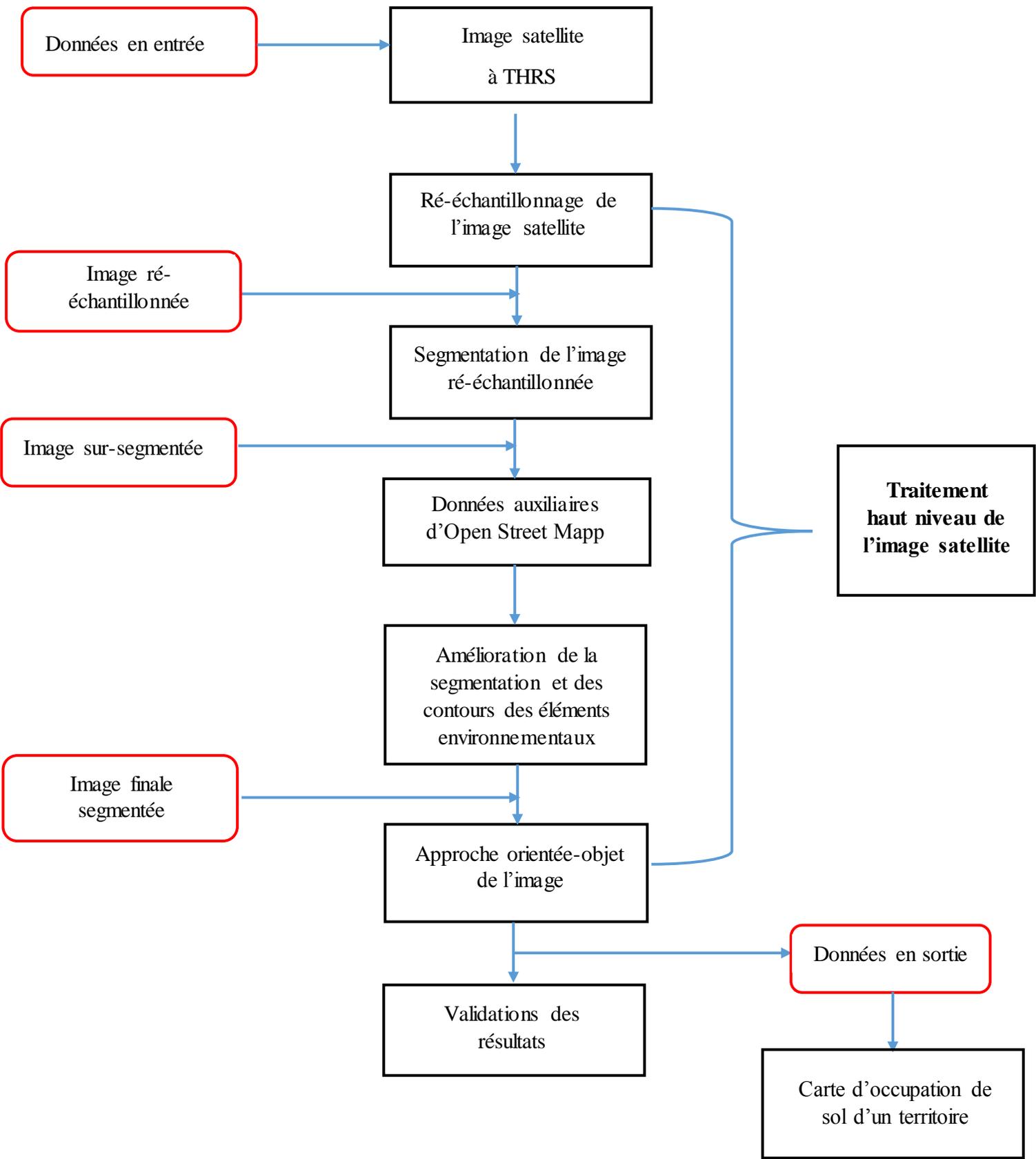


Figure 3.1: Schéma récapitulatif du processus de classification adopté

3.4 Conclusion

Dans ce chapitre, on a mis en place une bibliothèque générale de données géospatiales multi-sources qui permet d'étudier un environnement sonore d'un territoire quelconque (urbain, semi-urbain ou forestier). Cette bibliothèque englobe les données nécessaires sur les multiples éléments environnementaux affectant la propagation d'un son. Ces éléments avaient été déterminés lors de la revue bibliographique du chapitre -I-. Après, une méthode de traitements de ces données a été proposée afin d'aboutir à la détection et à l'extraction de ces éléments du territoire. En effet, l'approche proposée a été testée et elle a montré une bonne définition des contours des différentes composantes environnementales (bâtiments, stationnements, routes, forêts, rivières etc.) avec une haute précision dans le but d'avoir une carte d'occupation du sol d'un territoire.

Chapitre III : Modélisation cartographique de la propagation d'un son dans un milieu extérieur

4.1 Introduction

Le chapitre -II- visait à mettre en place la méthode d'extraction des objets environnementaux présents dans un milieu donné. Le présent chapitre est consacré à faire la documentation de la méthode conceptualisée destinée à modéliser la propagation d'un son environnemental, dans un milieu extérieur, tout en prenant en considération l'effet des objets environnementaux déjà extraits au chapitre -II- et qui ont une influence sur l'absorption de l'énergie acoustique et sur la propagation de l'onde acoustique émise par un son quelconque dans l'air.

4.2 Conceptualisation du modèle général de la méthode de propagation d'un son en milieu extérieur

En milieu ouvert, la propagation de l'onde acoustique est influencée par plusieurs objets et facteurs extérieurs. Selon Minard *et al.* (2014), les propriétés spatio-temporelles de l'onde acoustique subissent différentes et profondes transformations au cours de sa propagation dans l'espace. De ce fait, ces modifications dépendent essentiellement:

- De la trajectoire de propagation de l'onde acoustique.
- De la localisation des récepteurs sonores par rapport à la source sonore et aux barrières acoustiques d'une part, et de l'autre part de l'effet de la nature de la surface du sol sur l'onde acoustique.
- Des caractéristiques physiques propres aux différents objets environnementaux entourant la source sonore qui affectent la propagation de l'onde acoustique comme par exemples : l'impédance acoustique (Z) des matériaux composant certains objets (i.e. le bois, le béton, le verre etc.), ainsi que la célérité de l'onde acoustique à travers ces matériaux. Cependant, ces deux caractéristiques physiques citées au-dessus ont été détaillées au niveau de la section -2.2.3- du chapitre -I-.

Ainsi, le problème général est celui de la modélisation et de la représentativité de la propagation de l'onde acoustique dans l'espace, tout en tenant compte d'un certain nombre d'hypothèses qui vont être énumérés ci-dessous et qui vont expliquer l'intervention et l'effet des différents objets et facteurs environnementaux dans les calculs acoustiques à faire ultérieurement. Ces hypothèses vont permettre d'estimer l'absorption de l'énergie acoustique et l'affaiblissement phonique affectant l'onde acoustique au cours de sa propagation dans un milieu extérieur plein de facteurs et d'objets environnementaux.

La partie suivante correspond à la présentation et la description des différentes hypothèses adoptées afin de construire notre modèle de calculs acoustiques tout en tenant compte des différents facteurs environnementaux existants autour de la source sonore, ainsi que les objets qui existaient entre la source sonore et les points récepteurs de l'onde acoustique. Ainsi, les hypothèses choisies pour cette étude sont extraites de plusieurs travaux (ISO 9613-2, 1996 ; Barrière *et al.*, 2000 ; Gołębiewski, 2007 ; Reed *et al.*, 2012 et Minard *et al.*, 2014) et récapitulés ensemble ci-dessous :

- La source sonore est considérée comme une source ponctuelle omnidirectionnelle, c'est-à-dire qu'elle émet de l'énergie acoustique, d'une manière uniforme, autour d'elle et dans toutes les directions, sous forme de cercles concentriques entourant la source sonore. De ce fait, cette méthode traite les sources sonores ponctuelles et non linéaires.
- Dans un milieu extérieur sans obstacles, l'onde acoustique, émise par une source sonore, se propage sous formes de cercles concentriques dans un espace à 2 dimensions (2D) dont le centre correspond à la source sonore. Puis, le niveau d'intensité acoustique, émis par la source, diminue d'une valeur de 6 dB par doublement de la distance au point source.
- L'absorption de l'énergie acoustique et l'atténuation des niveaux d'intensité acoustique de l'onde acoustique par l'absorption atmosphérique est causée essentiellement par la température, ainsi que par l'humidité relative de l'air.

- L'onde acoustique subit aussi un affaiblissement dû à la nature et aux propriétés acoustiques de la surface du sol sur laquelle se fait la propagation de l'onde acoustique. Ce type d'affaiblissement sera modélisé à travers la norme ISO 9613-2 (1996) tout en se basant sur un facteur appelé facteur de sol et il est noté « G ».
- De plus, l'onde acoustique subit un autre type d'affaiblissement causé par des barrières acoustiques environnementales naturelles comme les forêts ou artificielles telles que les bâtiments. En effet, l'affaiblissement de l'énergie acoustique par les barrières artificielles (i.e. bâtiments) sera calculé par les équations [11] et [12] qui sont destinées à calculer la perte de l'énergie acoustique par transmission dû à la nature de la surface de la barrière. Ensuite, l'affaiblissement de l'énergie acoustique par la barrière naturelle « forêts » sera calculé par la norme ISO 9613-2 (1996).

Dans le but d'améliorer la compréhension du lien entre l'onde acoustique, son environnement de propagation et les paramètres acoustiques qui les lient au même temps, on a développé une méthode englobant plusieurs démarches méthodologiques de certains travaux de recherche cités au-dessus. En fait, cette méthode va être suivie pour atteindre notre objectif général de recherche. La figure - 4.1- explique le choix de notre méthodologie et chaque étape de cette démarche méthodologique va être détaillée à part après.

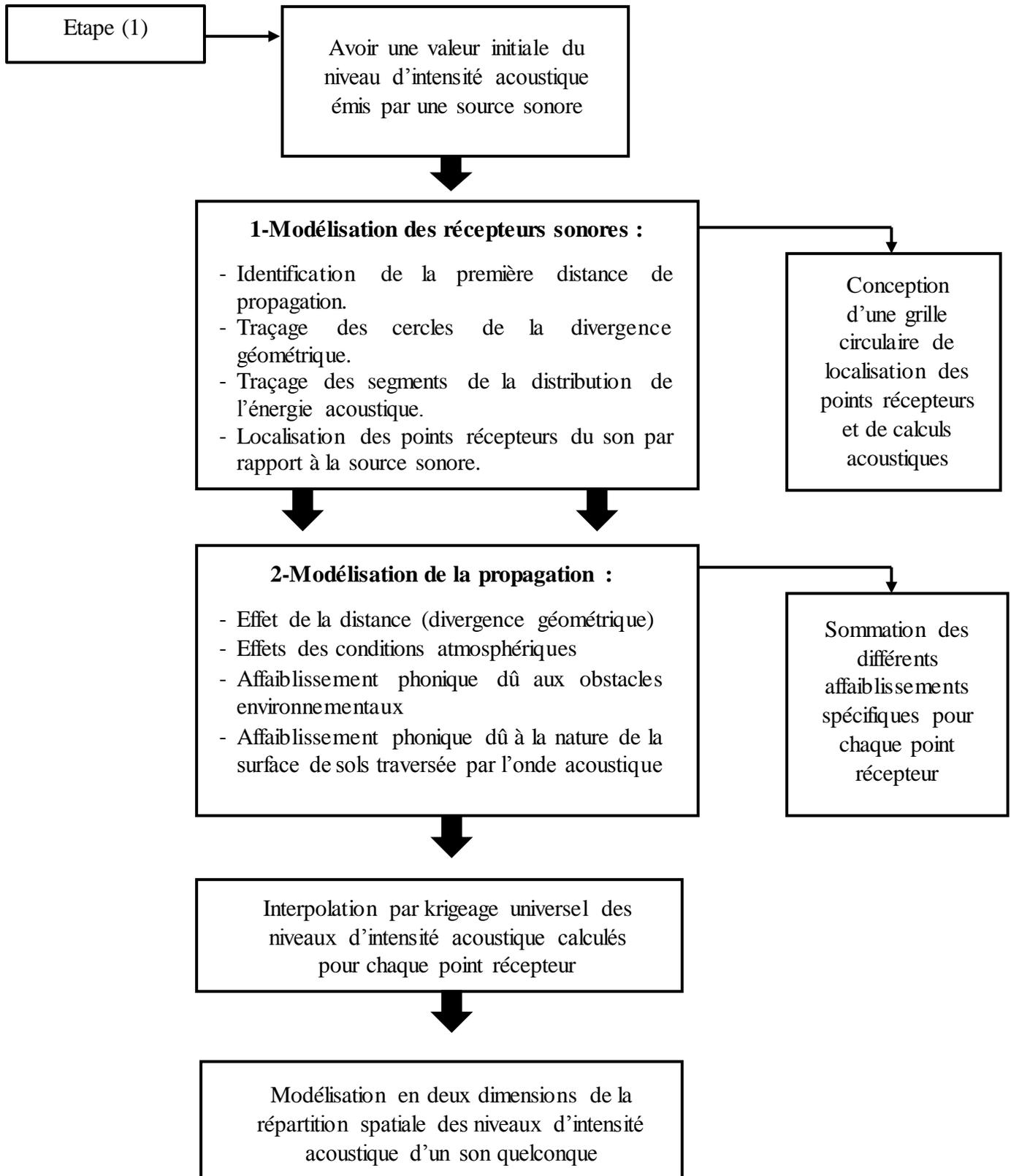


Figure 4.1: Schéma récapitulatif du modèle conceptualisé pour la cartographie sonore

4.3 Modélisation de la source et des récepteurs sonores

Dans une partie de notre étude, on est intéressé à estimer le niveau d'intensité acoustique reçu par différents récepteurs localisés à plusieurs distances à la source sonore. De ce fait, dans cette partie du mémoire, on va définir et détailler notre propre méthode destinée à (1) la localisation des récepteurs sonores aux alentours de la source ainsi que (2) le concept adopté pour réaliser les calculs acoustiques pour notre projet ainsi que la modélisation de la propagation comme il est indiqué dans la figure -4.1-. En effet, comme mentionné dans la section 2.3.1 du chapitre -II-, pour une source sonore ponctuelle omnidirectionnelle, qui est notre cas d'étude, l'énergie acoustique émise par celle-ci va se propager sous forme de cercles concentriques aux alentours de la source et que le niveau d'intensité acoustique diminue de 6 dB en passant d'un cercle à un autre de double diamètre que celui le premier. Cependant, le diamètre du n-ième cercle de la divergence géométrique est égale deux fois le diamètre du cercle (n-1) comme il est indiqué à la figure -4.2-. Afin d'estimer le niveau d'intensité acoustique de chaque cercle, on devrait avoir comme première étape une valeur du niveau d'intensité acoustique émise par la source comme on a mentionné au niveau de la figure -4.1-. Cette valeur doit être soit mesurée directement à la source ou à une certaine distance connue de celle-ci, soit avoir une valeur théorique du niveau d'intensité acoustique de la source sonore en étude.

On connaît que l'onde acoustique se propage théoriquement sous forme de cercles concentriques, dans un milieu sans obstacles comme on vient de l'expliquer juste au-dessus. À ce moment-là, on a adopté la façon théorique dont l'onde acoustique se propage comme un modèle de propagation à développer et à appliquer pour modéliser les niveaux d'intensités sonore dans un milieu plein de facteurs et objets environnementaux affectant la propagation théorique de l'onde acoustique. Cependant, ce modèle permet de voir l'effet des obstacles et des facteurs environnementaux sur la propagation circulaire de l'onde acoustique.

Dans ce qui suit, nous allons détailler notre modèle de la propagation d'un son. Pour ce modèle, on a pensé à localiser un ensemble de points qui représentent les points récepteurs des niveaux d'intensité acoustique émis par le son en étude. Ces points récepteurs représentent les points pour

lesquels le calcul acoustique de l'absorption de l'énergie acoustique, dû à plusieurs facteurs environnementaux, va être réalisé.

On passe maintenant à expliquer le modèle conceptualisé de localisation des points récepteurs aux alentours de la source sonore comme il est schématisé au niveau de la figure -4-2-. En effet, le modèle consiste à placer des cercles concentriques de différents rayons aux alentours de la source sonore. Ces cercles correspondent aux cercles du phénomène de la divergence géométrique (c'est-à-dire la propagation théorique de l'énergie acoustique). De ce fait, les rayons de ces cercles sont appelés « rayons sonores » qui dépendent principalement du rayon du premier cercle entourant la source sonore (Picaut, 2005). Alors, le rayon de ce premier cercle est égal à la distance à la source sonore à partir de laquelle la mesure du premier niveau d'intensité acoustique, émis par la source, était captée. Cependant, chaque rayon de ces cercles est porteur d'un certain niveau d'intensité acoustique dont la valeur décroît de 6 dB proportionnellement avec le carré du rayon du premier cercle entourant la source sonore comme on a expliqué au niveau de la section -2.3.1- du chapitre -I-. Ensuite, le rayon du n-ième cercle de la divergence géométrique est variable. Il dépend de l'étendue de la zone d'étude ainsi que de la distance choisi pour étudier la propagation d'un son dans l'espace.

Connaissant que pour une énergie sonore, émise à partir d'une source sonore ponctuelle omnidirectionnelle, la distribution de cette énergie dans l'espace se fait sous forme d'un nombre de segments rectilignes (Picaut, 2005). Ces derniers se répartissent d'une manière uniforme sur les différents cercles de la divergence géométrique qui circonscrivent la source sonore et la valeur de l'angle d'émission, séparant ces segments, change selon la complexité du milieu d'étude (Picaut, 2005). Alors, les points récepteurs correspondent aux points d'intersection des cercles de la divergence géométrique avec les segments rectilignes.

À titre d'exemple, la figure -4.2- illustre le modèle conceptualisé pour la localisation d'un certain nombre de points récepteurs aux alentours d'une source sonore.

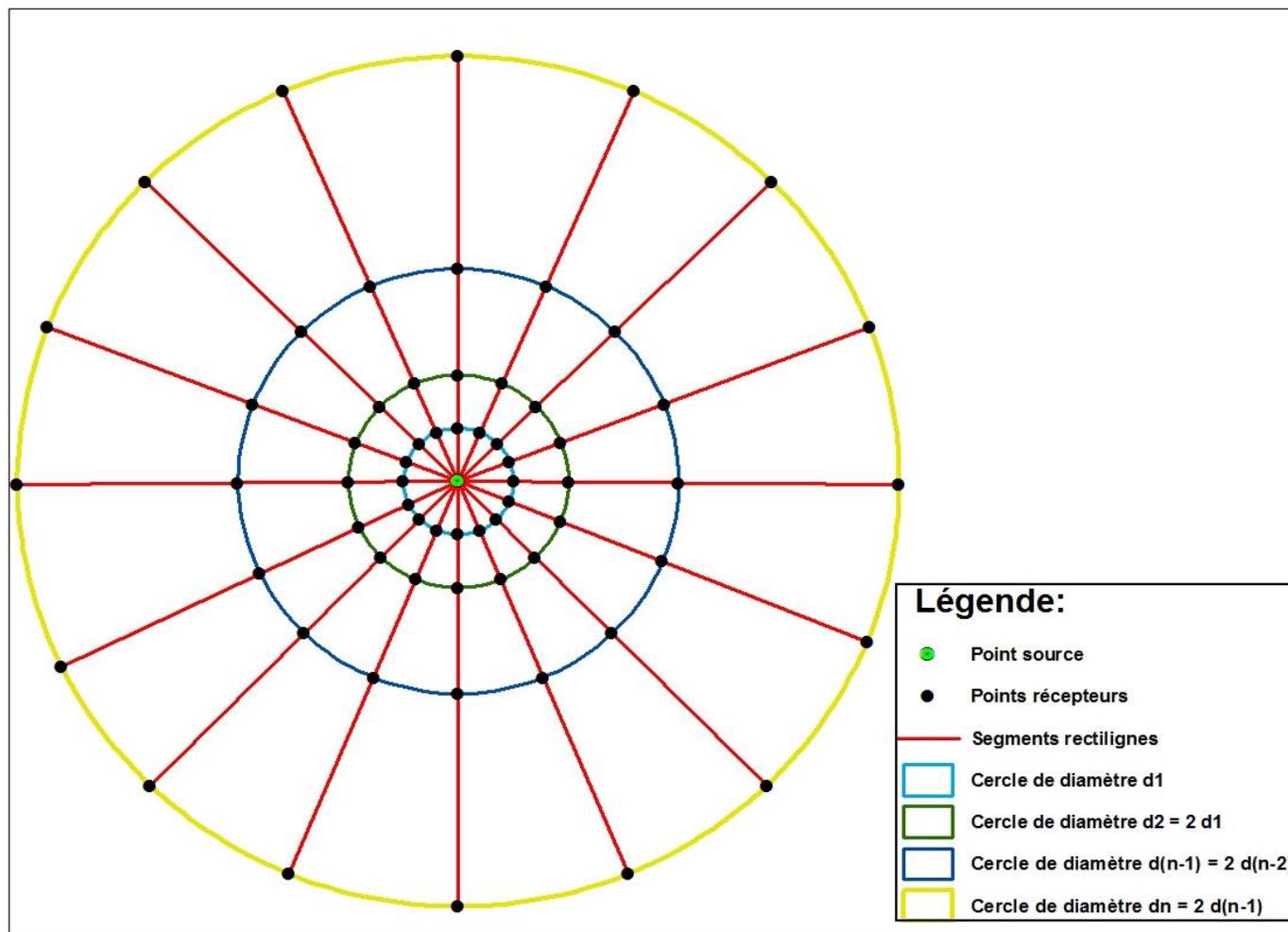


Figure 4.2: Schéma du modèle conceptualisé pour la localisation des points récepteurs aux alentours de la source sonore

Avec le concept proposé et détaillé ci-dessus, et compte tenu du grand nombre de points de calculs considérés comme étant des points récepteurs du son, l'approche proposée permet d'avoir un grand nombre de points où il y a de l'information sur les niveaux d'intensité acoustique qui pouvaient être présentes sur le terrain, sans avoir eu recours d'y aller et faire le captage du son à chaque point.

Les données qui vont être obtenues par notre concept de calcul seront utilisées afin de construire de nouvelles méthodes d'analyses spatio-temporelles de données ainsi que leur visualisation sous formes de produits cartographiques afin d'évaluer et représenter les sons environnementaux (Bocher *et al.*, 2017).

4.4 Modélisation de la propagation

On passe maintenant à détailler la partie de modélisation de la propagation qui était introduite à la figure -4.1-. En effet, les niveaux d'intensité acoustique aux points récepteurs, localisés selon notre modèle conceptuel schématisé à la figure -4.2-, seront calculés avec deux méthodes en même temps.

- La première est la méthode générale de calcul de l'atténuation d'un son, qui provient d'une source sonore ponctuelle ou d'un assemblage de sources ponctuelles, tout au long de sa propagation dans un milieu extérieur. Cette méthode est détaillée par la norme ISO 9613-2 (1996) et elle prend en considération l'atténuation de l'énergie acoustique par la divergence géométrique, l'absorption atmosphérique, l'effet de la barrière acoustique naturelle « forêts », l'effet de la nature de la surface des sols ainsi que la propagation au-dessus de plusieurs installations artificielles (i.e. bâtiments).
- La deuxième est l'utilisation, en parallèle avec la première méthode, les formules de l'acoustique générale introduites au chapitre -II- destinées à estimer l'absorption de l'énergie acoustique par l'effet de la transmission acoustique dû à la nature du matériau constituant la façade de la barrière artificielle susceptible d'entrer en contact avec l'onde acoustique émise par la source sonore.

La propagation de l'énergie acoustique entre le point source et le point récepteur de celle-ci fait intervenir plusieurs phénomènes physiques qui seront décrits et détaillés un à un dans la partie ci-dessous.

4.4.1 Calcul de l'effet de la distance sur la propagation de l'onde acoustique dans un milieu extérieur sans obstacles

A la section -2.3.1- du chapitre -I-, on a mentionné que la distance parcourue par l'onde acoustique est parmi les premiers facteurs influençant considérablement la propagation de cette onde. Cette influence se résume par l'atténuation (en dB) du niveau d'intensité acoustique émis par la source à chaque fois que la distance entre la source et le récepteur double.

Pour commencer le calcul acoustique et estimer l'atténuation des niveaux d'intensité acoustique de l'onde acoustique sous l'effet de la divergence géométrique, une valeur du premier niveau d'intensité acoustique, émis par la source, est recommandée et doit être mesurée. Ce type d'affaiblissement phonique est appelé l'atténuation dû à la divergence géométrique « A_{div} » qui est exprimé par l'équation [6]. On avait détaillé ce type d'affaiblissement phonique à la section -2.3.1- du chapitre -I-.

Cependant, grâce à l'équation [3.1], une fois qu'on a la valeur du premier niveau d'intensité acoustique émis par la source sonore, on pourrait maintenant estimer la valeur de l'intensité acoustique I_1 . Ainsi, cette intensité acoustique I_1 va nous permettre après d'estimer autres niveaux d'intensité acoustique à différentes distances à la source sonore.

4.4.2 Calcul de l'effet des conditions atmosphériques sur la propagation de l'onde acoustique

A la section -2.4.2-, on a écrit à propos de l'atténuation acoustique dû à l'effet des conditions atmosphériques. De ce fait, dans cette partie, nous allons présenter le processus du calcul

acoustique de l'absorption atmosphérique. Ce type de calcul va être réalisé à l'aide d'une équation qui va être extraite de la norme ISO 9613-2 (1996).

En effet, l'équation [10] représente l'atténuation de l'énergie acoustique due à l'absorption atmosphérique qui est notée « A_{atm} » et elle est exprimée en décibels (dB) (ISO 9613-2, 1996). Ce type d'atténuation s'écrit comme suit :

$$A_{atm} = \frac{\alpha d}{1000} \quad (\text{en dB}) \quad \text{Eq [10]}$$

Avec :

A_{atm} : l'atténuation de l'énergie acoustique par l'absorption atmosphérique en (dB).

α : Le coefficient d'atténuation atmosphérique exprimé en (dB/Km).

d : La distance de propagation en (mètres).

Ainsi, comme mentionné dans l'article de Öhlund et Larsson (2015), en plus de l'effet de la distance sur l'absorption de l'énergie acoustique, cette dernière est influencée aussi par la fréquence, la température ainsi que l'humidité relative de l'air. En effet, la norme ISO 9613-2 (1996) documente bien l'effet de ces deux paramètres météorologiques, cités ci-dessus, sur l'absorption de l'énergie acoustique. En effet, le tableau -1- de l'annexe (B), qui est extrait de cette norme, montre les différentes conditions possibles de l'absorption de l'énergie acoustique dû à l'effet de l'absorption atmosphérique sous forme de dB/km.

Pour pouvoir estimer l'absorption de l'énergie acoustique et l'atténuation du niveau d'intensité acoustique causée par l'absorption atmosphérique, il faut avoir des renseignements sur les conditions atmosphériques de la journée des mesures du niveau d'intensité acoustique émis par la source sonore. Cependant, les valeurs de la température et de l'humidité relative de l'air doivent être mesurés soit simultanément avec les mesures acoustiques (Öhlund et Larsson, 2015), soit la

valeur de chacune doit correspondre à la valeur moyenne enregistrée le jour de la captation sonore. Dans nos méthodes, c'est ce dernier point qui est considéré.

4.4.3 Calcul de l'effet des objets environnementaux sur la propagation de l'onde acoustique

Dans la nature, plusieurs objets environnementaux sont considérés comme barrières acoustiques bloquant ou interférant la propagation de l'onde sonore dans l'espace, d'autres n'ont pas un effet de blocage mais plutôt un effet d'affaiblissement des valeurs de niveaux d'intensité acoustique. La valeur de l'affaiblissement est en fonction de la longueur du trajet parcouru par l'onde acoustique et la nature de la surface des sols sur lesquels se fait la propagation de celle-ci (ISO 9613-2, 1996 ; Öhlund et Larsson, 2015).

Dans la partie qui suit, on va s'intéresser à détailler les méthodes utilisées afin d'estimer les effets des objets environnementaux sur l'absorption de l'énergie acoustique. Le calcul acoustique va être divisé sur deux parties.

- La première partie est consacrée au calcul de l'effet des barrières acoustiques : les bâtiments et les forêts sur les niveaux d'intensité acoustique et la propagation de l'onde acoustique.
- La deuxième est destinée au calcul de l'affaiblissement phonique dû à l'effet de la nature de la surface du sol sur laquelle se propage l'onde acoustique.

Dans les deux parties de calculs, la norme ISO 9613-2 (1996) joue un rôle important dans la réalisation du calcul acoustique et dans la prédiction des niveaux d'intensité acoustique dans l'espace tout en partant de la source sonore où la valeur d'émission sonore est connue. Pour appliquer les deux méthodes, plusieurs paramètres doivent être connus en ce qui concerne la nature des matériaux des objets, la localisation des points récepteurs par rapport à la source sonore et les objets qui entourent la source et les récepteurs ainsi que les caractéristiques de la surface du sol sur laquelle l'onde acoustique va se propager.

4.4.3.1 Barrières acoustiques : bâtiments et végétation (forêts)

Dans cette partie, on va s'intéresser aux deux barrières acoustiques retenues pour le modèle. En premier lieu, on va commencer le calcul acoustique de l'effet des bâtiments, en deuxième lieu, on va détailler le calcul de l'effet de la présence de la forêt sur l'absorption de l'énergie acoustique et la propagation de l'onde sonore dans l'espace. Le comportement de l'onde sonore, vis-à-vis ces deux barrières acoustiques ainsi que les matériaux qui les composent, s'avère différent. En effet, le calcul dépend énormément de la nature et de la composition de chacune de ces deux barrières. Chacune réagit différemment envers l'onde acoustique.

- Barrière (1) : bâtiments

En général, l'étude de l'effet d'une barrière acoustique sur l'atténuation de l'énergie acoustique et des niveaux d'intensité acoustique prend en considération l'effet de l'interface « air » et l'interface « matériau » de la barrière acoustique en étude, qui entre en contact avec l'onde acoustique, comme il est indiqué au niveau de l'équation [8] et [9].

Comme mentionné à la section -2.3.3- du chapitre -I-, les bâtiments sont considérés comme barrières acoustiques et ils ont un effet d'affaiblissement sur l'énergie acoustique émise par l'onde acoustique incidente. Cet effet se calcule avec l'équation [8] et [9] correspondant respectivement à la perte de l'énergie acoustique par transmission dû aux matériaux composant la façade/la paroi de ces différentes barrières et au facteur de transmission de l'onde acoustique à travers la surface de la barrière acoustique. Afin de faire les calculs, on a besoin des valeurs de la densité volumique (ρ) du matériau qui compose les bâtiments en étude, présent aux alentours de la source sonore et qui vont entrer en interaction avec l'onde acoustique. Aussi, la célérité (c) de l'onde acoustique à travers le matériau des bâtiments entre dans le calcul. En effet, les tableaux -1-, -2- et -3- de l'annexe (A) présentent les propriétés acoustiques d'un certain nombre de matériaux qui pourraient composés la façade/la paroi des bâtiments (i.e. le béton, le verre, le bois etc.).

Une fois que la perte par transmission provoquée par la surface d'un bâtiment est calculée, on peut maintenant estimer la valeur du niveau d'intensité acoustique résultante du croisement de l'onde acoustique avec la façade du bâtiment. Ainsi, la valeur résultant du niveau d'intensité acoustique affecté par la façade du bâtiment est égale à la valeur du niveau d'intensité acoustique émise par la source et arrivée jusqu'à la façade moins la valeur de la perte par transmission calculée auparavant et provoquée par le matériau composant la façade du bâtiment.

Ensuite, le reste du calcul de la propagation des niveaux d'intensité acoustique au-delà des bâtiments, c'est-à-dire la continuation de la propagation de l'onde acoustique au-dessus des bâtiments, sera exprimé au tableau -2- de l'annexe (B) qui est extrait de la norme ISO 9613-2 (1996). En effet, au niveau de cette norme, ce type d'atténuation des niveaux d'intensité acoustique est noté « A_{site} » et il est exprimé en décibels (dB).

Ainsi, comme il est montré au niveau du tableau -2- de l'annexe (B), l'estimation de ce type d'atténuation prend en considération la fréquence utilisée lors de l'enregistrement du son sur le terrain. De ce fait, on trouve dans ce tableau différentes valeurs d'atténuation en fonction de la fréquence de mesure du son. Avec cette méthode, on pourrait alors estimer les valeurs des niveaux d'intensité acoustique reçue par des récepteurs situés derrière les bâtiments à n'importe quelle distance.

- **Barrière (2) : végétation (forêts)**

Dans cette partie, on va présenter la méthode de calcul de l'effet de la barrière acoustique naturelle « la forêt » sur les niveaux d'intensité acoustique. Cependant, Barrière *et al.* (2000), dans leur article, ont présenté certaines études faites sur ce sujet qui ont démontré l'effet de la végétation sur l'atténuation de l'énergie acoustique. En récapitulation, selon ces recherches, la forêt a deux principaux effets sur le son : l'affaiblissement phonique par l'effet de sol, ainsi que l'affaiblissement par les structures végétales des arbres (les troncs, les branches et les feuilles). Cependant, selon Barrière *et al.* (2000), le sol de la forêt cause un effet d'affaiblissement des niveaux d'intensité acoustique seulement pour les fréquences ayant des valeurs inférieures à 1 000 Hz.

Dans ce cas-là, le modèle adopté pour faire le calcul de l'effet de la forêt sur l'atténuation des niveaux d'intensité acoustique sera basé sur la méthode détaillée par la norme ISO 9613-2 (1996) afin d'estimer l'atténuation de l'énergie acoustique émise par l'onde acoustique à travers le feuillage des forêts et la densité des arbres.

En effet, ce type d'atténuation des niveaux d'intensité acoustique est noté « A_{fol} » et il est exprimé en décibels (dB). En effet, ce type d'affaiblissement est extrait de la norme ISO 9613-2 (1996).

Cependant, selon cette méthode, l'atténuation dépend fortement de l'épaisseur de la bande d'arbres (ou ce qu'on appelle densité d'arbres) entre le point source et le point récepteur (ISO 9613-2, 1996 ; Barrière *et al.*, 2000) comme il est montré à la figure -4- de l'annexe (B). En effet, l'épaisseur totale des arbres sera calculée par l'équation [11] qui est détaillée par la norme ISO 9613-2 (1996). Elle est exprimée en mètres (m):

$$d_f = d_1 + d_2 \quad (\text{en m}) \quad \text{Eq [11]}$$

d_f : Epaisseur totale des arbres entre le point source et le point récepteur en (m)

d_1 : Epaisseur des arbres devant le point source en (m)

d_2 : Epaisseur des arbres devant le point récepteur en (m)

Ensuite, l'estimation des atténuations des niveaux d'intensité acoustique « A_{fol} » dû à l'épaisseur totale des arbres entre le point source et le point récepteur sera faite à travers le tableau -4- de l'annexe (B). Ce tableau est un extrait de la norme ISO 9613-2 (1996).

4.4.3.2 Effets de la surface du sol

Selon la nature de sa surface, le sol affecte différemment la propagation de l'onde sonore. De ce fait, dans son article, Golebiewski (2007) décrit que la norme ISO 9613-2 (1996) considère l'effet de sol comme l'un des premiers facteurs environnementaux influençant la propagation de l'onde acoustique et affaiblissant son énergie. De ce fait, à côté de l'effet des barrières acoustiques (i.e. bâtiments, forêts) et des conditions atmosphériques (i.e. la température, l'humidité relative de l'air),

l'ISO 9613-2 (1996) prend aussi en considération l'effet de la nature de la surface du sol dans les procédures de calcul de l'atténuation du son dans un milieu extérieur et la prédiction des niveaux d'intensité acoustique.

Ainsi, la norme ISO 9613-2 (1996) détaille l'effet de la nature de la surface du sol sur les niveaux d'intensité acoustique pendant la propagation de l'onde dans l'espace. Cette surface sera caractérisée en fonction de son pouvoir réfléchissant ou absorbant de l'énergie acoustique.

En effet, ce type d'atténuation ne dépend pas uniquement de la nature de la surface de sol sur laquelle se fait la propagation mais aussi de la fréquence de mesures du son et de la hauteur (en mètres) de captation du son auprès du point sonore et du point récepteur comme il est indiqué au niveau du tableau -3- de l'annexe (B) et la figure -3- du même annexe. Ces derniers sont extraits de la norme ISO 9613-2 (1996).

Dans la norme ISO 9613-2 (1996), la nature de la surface du sol est caractérisée par un facteur de sol nommé « G ». Ce facteur de sol est spécifique pour chaque type de surface de sol comme on va le détailler après, sur laquelle se fait la propagation et il dépend au même temps de la fréquence de mesures du son. Dans ce qui suit, on va détailler les différents types du facteur de sol « G ».

Au niveau de la norme ISO 9613-2 (1996), seulement 3 catégories de surfaces de sol sont présentes :

- Sol dur et réfléchissant: on cite par exemples les trottoirs, les stationnements, l'eau, la glace, ainsi que toutes surfaces ayant une faible porosité. Le facteur de sol $G = 0$.
- Sol poreux et absorbant : toutes surfaces recouvertes par de gazon, d'arbres ou autres végétaux, ainsi que toutes autres surfaces adaptées à la croissance de la végétation et le facteur de sol $G = 1$.
- Sol mixte : si la surface de sol est composée des deux types de sols cités juste au-dessus (sol dur et sol poreux), alors le facteur de sol G prend une valeur de 0 à 1. Ainsi, la valeur du facteur du sol G correspond à la fraction de la surface poreuse par rapport à la surface mixte.

Dans notre étude, l'affaiblissement phonique par l'effet de la surface du sol a été effectué avec le calcul du facteur de sol « G » détaillé ci-dessus. Ainsi, les atténuations de la nature de la surface du sol, à une certaine distance « d_p » entre le point source et le point récepteur, seront calculés en utilisant la figure -1-, la figure -A.1- et le tableau -A.1- extraits de la norme ISO 9613-2 (1996). Les figures et le tableau se trouvent au niveau de l'annexe (3) de ce mémoire.

L'atténuation globale des niveaux d'intensité acoustique provoquée par l'effet de la nature de la surface du sol qui est notée par « A_{gr} » et exprimée en décibels (dB), est donnée par l'équation [12]. Cette dernière est un extrait de l'ISO 9613-2 (1996) :

$$A_{gr} = A_s + A_r + A_m \quad (\text{en dB}) \quad \text{Eq [12]}$$

Cependant, cette atténuation dépend fortement de la nature de la surface de propagation entre le point source et le point récepteur. En effet, cette surface de propagation sera divisée en trois sortes de régions A_s , A_r et A_m comme expliqué dans la figure -2- de l'annexe (B) où :

- A_s : correspond aux atténuations causées par le sol de la région source. Cette dernière s'étend de la source sonore vers le récepteur à une distance égale 30 fois la hauteur (h_s) de la source sonore où (h_s) est exprimée en mètres (m). Cette région est caractérisée par le facteur de sol « G_s ».
- A_r : correspond aux atténuations causées par le sol au niveau de la région réceptrice. Cette dernière s'étend du récepteur vers la source à une distance égale 30 fois la hauteur (h_r) du récepteur où (h_r) est exprimée en mètres (m). Cette région est caractérisée par le facteur de sol « G_r ».
- A_m : correspond aux atténuations par le sol de la région moyenne. Cette dernière est la distance entre la région source et récepteur. Ainsi, la région moyenne ne sera pas présente si la distance « $d_p < (30h_s + 30h_r)$ » car à ce moment-là on aura un chevauchement des régions source et réceptrice. Cette région est caractérisée par le facteur de sol « G_r ».

4.5 Modélisation 2D de la répartition spatiale des niveaux d'intensité acoustique d'un son

4.5.1 Définition de la modélisation spatiale

Dans son mémoire, Sahlin (2014) a défini la modélisation spatiale comme étant « *la représentation (dans un environnement numérique) d'un phénomène géographique (phénomène géométrique)* » dont le but est d'en extraire les informations nécessaires sur les phénomènes géographiques existants, ainsi que l'environnement qui les entoure afin de les étudier, analyser et interpréter.

En premier lieu, la modélisation spatiale des phénomènes spatiaux nécessite la connaissance de la nature du phénomène environnemental en cours d'étude s'il s'agit bien d'un phénomène (1) objet ou (2) continu. Le premier cas correspond aux phénomènes discrets qui sont circonscrits par leurs limites géographiques et occupent une surface bien déterminée sur le territoire (i.e. caractériser une unité parcellaire par ses différents types de cultures, ses types de sols existants etc.). En revanche, le deuxième cas correspond aux phénomènes qui ne peuvent pas être des phénomènes objets (discrets) mais plutôt des phénomènes qui se représentent par des attributs mesurables en de multiples points de l'espace afin de prendre en considération les variations spatiales et temporelles de ses propriétés. Le but est de représenter ces attributs non discrets sous forme de phénomènes continus dans l'espace et dans le temps tout en partant par des données ponctuelles tels que l'altitude, la température etc. (Sahlin, 2014).

Dans notre cas d'étude, des points récepteurs localisés sur la surface d'étude (figure 4.2) sont considérés comme étant de données ponctuelles avec lesquelles on va construire le modèle spatial de notre phénomène continu. Cependant, ce dernier se résume par « la modélisation 2D de la répartition spatiale des niveaux d'intensité acoustique d'un son généré par un autobus ». Par conséquent, la transformation de nos données ponctuelles en champ continu représentant l'atténuation des niveaux d'intensités sonore du son de bus sur la zone d'étude nécessite une interpolation spatiale de ces données ponctuelles. Alors, l'interpolation spatiale représente une étape primordiale pour toute étude comprenant une modélisation spatiale. De ce fait, les méthodes existantes de l'interpolation spatiale seront décrites dans la section suivante.

4.5.2 Les méthodes d'interpolation spatiale

Dans cette partie, une attention particulière est portée aux différentes méthodes d'interpolation spatiale. En effet, dans la littérature, il existe un nombre assez grand de méthodes d'interpolation. Ses dernières sont classifiées en deux approches principales. La première approche correspond aux méthodes déterministes ou appelées non géostatistiques, alors que la deuxième est les méthodes probabilistes ou appelées géostatistiques (Drapeau, 2000).

Les méthodes déterministes reposent purement sur des fonctions mathématiques. Ainsi, les méthodes d'interpolation par le Diagramme de VORONOI (DV), le TIN (Triangular Irregular Network), l'inverse de la distance (IDW), les voisins naturels et les voisins plus proches sont parmi les méthodes déterministes les plus répandues et utilisées. Cependant, les méthodes géostatistiques utilisent à la fois des fonctions mathématiques et des analyses statistiques. (Drapeau, 2000 et Sahlin, 2014). Les méthodes d'interpolation géostatistiques sont résumées en trois types de méthodes de krigeage : on note le krigeage simple, ordinaire et universel (Gratton, 2002).

Les méthodes mentionnées ci-dessus sont un moyen indispensable d'estimation et prédiction des valeurs inconnues des points de l'espace non échantillonnés tout en partant d'un nombre limité de points visant à fournir une information continue, sur l'ensemble de l'espace du phénomène non discret en cours d'étude, de déterminer la distribution spatiale de ce dernier, ainsi que de le cartographier en 2D afin de l'étudier, l'analyser et l'interpréter (Drapeau, 2000 ; Joly *et al.*, 2008).

Les méthodes d'interpolation spatiale sont utilisées dans différentes recherches scientifiques. Parmi ces recherches, on note : (1) modélisation de la variation spatiale de la température sur un territoire donné (Joly *et al.*, 2008), (2) la répartition spatiale des concentrations chimiques d'un métal (Renaud *et al.*, 2004), (3) la surveillance de la qualité de l'air par l'étude de la répartition spatiale des polluants atmosphériques (Bobbia *et al.*, 2016), (4) l'estimation du stock des sols forestiers en carbone organique (Bernoux *et al.*, 1998) et (5) la représentation de la propagation acoustique de la nuisance sonore des infrastructures routières à partir des mesures sonores ponctuelles afin d'estimer l'impact acoustique sur les individus (Baume, 2007).

4.5.3 Modélisation spatiale des données sonores par la méthode de krigeage

Dans son article, Gratton (2002) a annoncé que la méthode de « krigeage » est la méthode optimale d'interpolation et d'estimation de la répartition spatiale d'un phénomène continu (non discret). Baume (2007) aussi a expliqué dans son article que la modélisation de l'atténuation de l'énergie acoustique, considérée comme phénomène continu, est claire, meilleure et plus réaliste avec la méthode de « krigeage universel » vu que « *le phénomène étudié présente une forte tendance non-stationnaire due principalement à la divergence géométrique* ». Cependant, dans ce mémoire, seulement « le krigeage universel » sera utilisé et testé afin de modéliser en 2D la répartition spatiale de l'atténuation des niveaux d'intensité acoustique d'un son généré par une source sonore dans un milieu extérieur complexe.

4.6 Conclusion

Le présent chapitre a été consacré à la conception d'une méthode théorique de modélisation de la propagation d'un son dans un milieu extérieur complexe. Cette méthode permet de produire des cartes sonores sans avoir recours à des capteurs sonores installés sur le territoire afin d'estimer les niveaux d'intensités acoustique d'un son à différentes distances à la source sonore. On a choisi la norme ISO 9613-2 (1996) comme la base théorique de la conception de cette méthode de cartographie théorique de la propagation d'un son vue qu'elle englobe la majorité des composantes environnementales ayant des effets sur les niveaux des intensités acoustiques émis par un son et sur la propagation acoustique.

Chapitre VI : Expérimentation et résultats de la méthode de cartographie de propagation en fonction d'un cas d'étude : campus de l'Université Laval

5.1 Introduction

Le chapitre -III- visait à définir et présenter la méthode conceptualisée afin de modéliser en 2D la propagation d'une onde acoustique, émise par un son, tout en tenant en compte les différents facteurs environnementaux présents aux alentours de la source sonore. Ainsi, le présent chapitre sert à tester la méthode, avoir les résultats préliminaires de cette simulation puis de valider cette méthode en fonction d'un cas d'étude qui est le campus de l'Université Laval.

5.2 Simulation de la méthode de propagation

Afin de pouvoir modéliser spatialement, la relation entre un son émis par une source sonore et son environnement, on doit simuler la méthode conceptualisée au chapitre -III-. De ce fait, pour réaliser la simulation de la méthode, plusieurs étapes doivent être réalisées :

- a- Identifier le milieu d'étude. Le choix est tombé sur le campus de l'Université Laval pour faire la simulation de notre méthode de propagation d'une onde sonore, émise par une source sonore, en milieu extérieur plein d'objets environnementaux affectant cette propagation. On a fait ce choix vu la présence de presque de toutes les composantes environnementales nécessaires pour étudier un environnement sonore (i.e. bâtiments, forêts, pelouse, stationnements, rues etc.), ainsi que les données géospatiales sur ces différentes composantes sont disponibles et open source.
- b- Après avoir choisi l'espace d'étude, il faut identifier la source sonore à considérer pour l'étude ainsi que les composantes environnementales présentes sur celui-là afin d'identifier les interactions possibles qui pourraient survenir entre les deux. De ce fait, l'identification et l'extraction des différentes composantes environnementales présentes sur le terrain d'étude, sera faite à travers la méthode de classification.

c- Simuler la méthode conceptualisée au chapitre -III- destinée à modéliser et à représenter la répartition spatiale de l'atténuation des niveaux d'intensité acoustique produits par un autobus d'une façon quantitative (c'est-à-dire sous forme de niveaux d'intensité acoustique exprimés en dB) tout en prenant en considération les effets des différents objets environnementaux qui entourent la source sonore.

5.2.1 Zone d'étude

Dans cette partie, on va présenter la zone d'étude sur laquelle sera simulée la méthode déjà conceptualisée permettant la modélisation de la propagation d'un son en milieu extérieur plein d'objets et de facteurs environnementaux influençant cette propagation. Le choix de la zone d'étude est le campus de l'Université Laval. En effet, la figure -5.1- illustre notre zone d'étude.

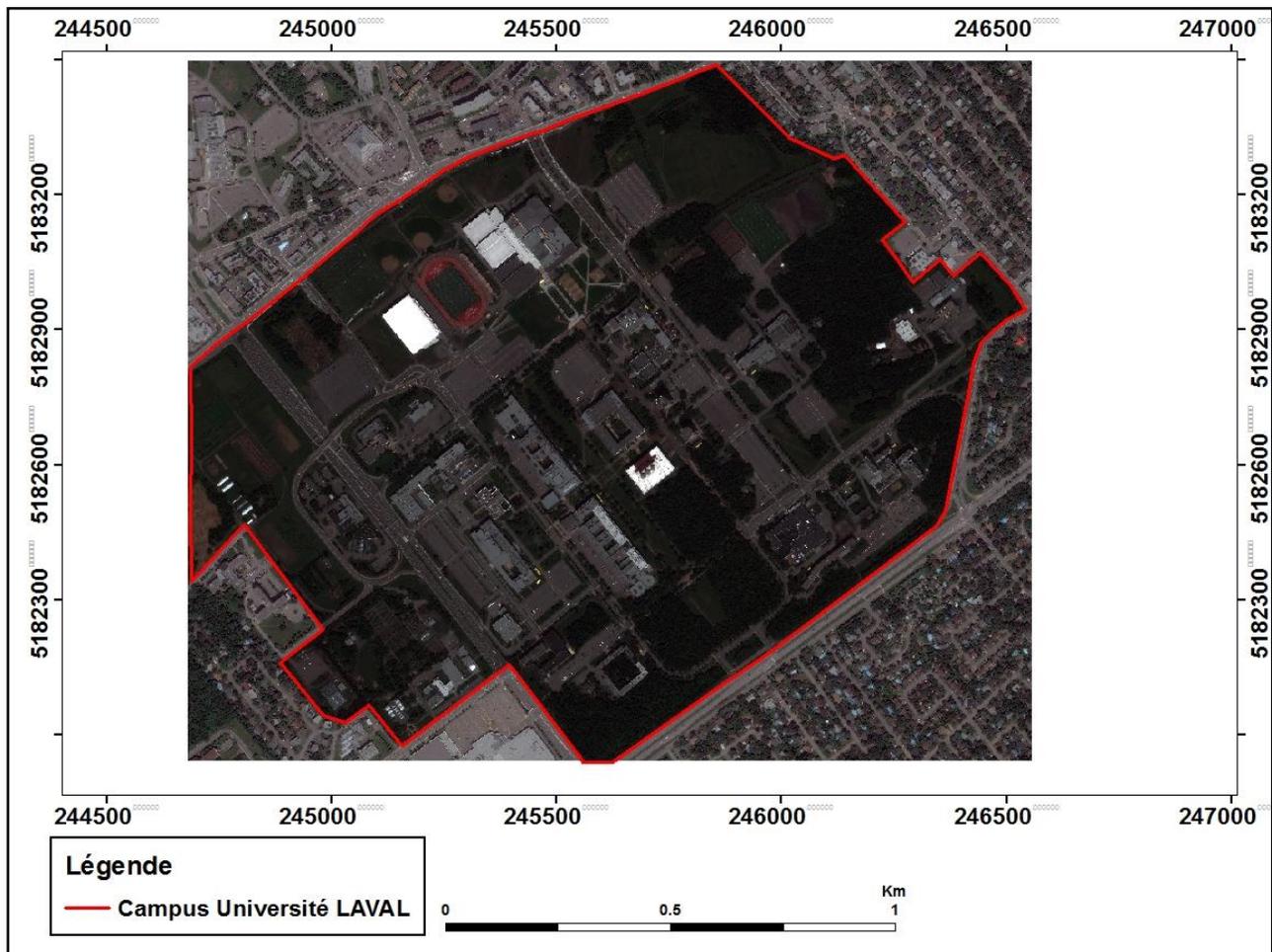


Figure 5.1 : Carte de la zone d'étude : Campus de l'Université Laval

5.2.2 Extraction des objets environnementaux de la zone d'étude

5.2.2.1 Données utilisées

- Image satellite à très haute résolution spatiale (THRS)

Pour faire l'étape de classification et d'extraction des objets environnementaux présents sur le campus de l'Université Laval, nous avons choisi d'utiliser une image satellite de la ville de Québec issue du capteur Haute Résolution (HR) du satellite Pléiades. Cette image est d'une résolution spatiale de 50 cm et elle date de 2015. Cette image couvre un vaste territoire de la ville de Québec. On a obtenu cette image satellite à partir de la base de données géospatiales de la plateforme Géoindex de l'Université Laval.

- Données cartographiques auxiliaires d'Open Street Map

La base de données d'OSM (2017) a été utilisée comme deuxième source d'information sur la zone d'étude. Elle a servi à obtenir les données les plus à jour, relatives à l'occupation de sol de la ville de Québec. Cependant, le choix des différentes couches s'est basé sur la revue de littérature faite à la section -2.3- du chapitre -I-, où on a identifié les différents objets environnementaux ayant une influence sur l'énergie acoustique au cours de sa propagation et sur les niveaux d'intensité acoustique. De ce fait, les différents objets environnementaux qu'on doit extraire, à travers la littérature vue leurs effets sur la propagation de l'onde acoustique, sont : les bâtiments, la végétation, le type de la surface du sol si c'est artificiel comme les routes et les stationnements ou si c'est naturel comme le sol nu ou gazonné etc.

On a discuté à la section -3.2- du chapitre -I- que les données vectorielles des deux éléments « les surfaces sableuses et gazonnées » ne sont pas disponibles (tableau 3.2). De ce fait, des données vectorielles extraites de la base de données d'OSM (2017) des différents éléments environnementaux, ont été préparées dans le but de les utiliser dans certaines étapes de traitement de l'image satellite afin d'ajouter plus de précision sur le territoire. Les données vectorielles retenues sont présentées au tableau -5.1-:

Tableau 5.1: La description des données téléchargées de la base de données d'OSM (2017)

Nom des couches	Type des entités	Description de chaque couche
1- Bâtiments.shp	Polygone	Cette couche contient l'ensemble des bâtiments présents sur le campus (tous les pavillons documentés avec leurs noms).
2- Occupation_de_sol.shp	Polygone	Cette couche contient les différentes occupations du sol (forêts, parcs, jardins, bâtiments résidentiels et commerciaux présents sur le campus).
3- Points_d'intérêts.shp	Polygone	Cette couche contient tous les équipements sportifs présents sur le campus (terrain de golf, terrains de tennis, terrains de basketballs, Peps, etc.).
4- Réseaux_routier.shp	Poly-lignes	Cette couche contient le réseau routier (avenues, autoroutes, rues, chemins, sentiers, stationnements etc.).

5.2.2.2 Approche adoptée d'extraction d'objets environnementaux de la zone d'étude

Dans cette section, on va détailler et appliquer l'approche adoptée afin de réaliser l'extraction des différents objets environnementaux présents sur le territoire d'étude. Cette approche a été détaillée à la figure -4.1- de la section -3.3.2- du chapitre -II-. En effet, parmi les objectifs de notre étude, on cite la classification de l'image satellite de la zone d'étude. Le but de cette classification est de tirer, détecter et extraire le maximum d'objets environnementaux qui se trouvent sur le campus de l'Université Laval. Ces objets vont servir comme étant des porteurs de sources sonores et/ou des porteurs de récepteurs de l'onde sonore. En effet, l'interprétation des objets environnementaux existant sur l'image a été élaborée sur la base de la pré-connaissance du terrain et à l'aide des données auxiliaires extraites de la base de données d'OSM (2017) qui sont détaillées dans le tableau -5.1-. Les sections ci-dessous vont présenter le travail et les opérations qui ont été faites à chaque étape de la figure -4.1-.

- Ré-échantillonnage de l'image originale

Avant de commencer n'importe quel traitement sur une image satellite, un prétraitement est requis. Vu que l'image satellite, retenue pour le projet, couvre une large partie de la ville de Québec, un découpage de cette image a été fait à l'aide du logiciel Arc GIS afin de réduire la taille de l'image et avoir les limites du campus de l'Université Laval.

On passe maintenant à l'étape de traitement de l'image satellite. La première étape de traitement est de tester la segmentation sur l'image originale du campus universitaire. L'utilisation de la très haute résolution spatiale de l'image originale (50 centimètres) pour faire la segmentation, a causé certains problèmes : l'image reste figée, le temps de calcul et de traitement est très lent (presque une journée), après l'ordinateur plante et on doit redémarrer à chaque exécution de segmentation le logiciel. Cependant, la très haute résolution spatiale d'une image satellite apporte des difficultés de performance des logiciels faisant le traitement d'images car plus la résolution spatiale de l'image est élevée, plus la taille informatique de celle-ci est importante, ce qui entraîne un ralentissement des traitements et la nécessité d'avoir un matériel assez puissants (des ordinateurs avec un processeur i7). En rencontrant un tel problème et vu que les ordinateurs disponibles pour faire le traitement ont un processeur i5, on a eu recours à la méthode de ré-échantillonnage de l'image

originale et à l'agrégation de ses pixels afin de diminuer l'espace de mémoire que le processus de traitement nécessite pour terminer la segmentation de notre image à très haute résolution spatiale (50 centimètres). Ceci va faciliter le traitement et on n'aura pas donc le problème de redémarrage de l'ordinateur et de longues durées de traitement.

On a fait quatre niveaux de ré-échantillonnages de l'image originale, à 1, 5, 10 et 20 mètres (figure 5.2). Ainsi, plus la résolution de l'image est grande, plus les nouveaux objets agrégés sont grands et le niveau du détail des objets présents sur les nouvelles images ré-échantillonnées commencent à disparaître à partir d'une certaine valeur de résolution spatiale et l'image devient floue comme le cas de la figure (5.2c) et la figure (5.2d). Seule l'image à résolution de 1 mètre qui présente assez de détails, proche de celle originale, à partir de laquelle on n'a pas rencontré de problèmes de traitement pendant la segmentation et le temps d'exécution de la segmentation était acceptable (quelques minutes). De ce fait, le choix a été tombé sur la résolution de 1 mètre (figure 5.2a).

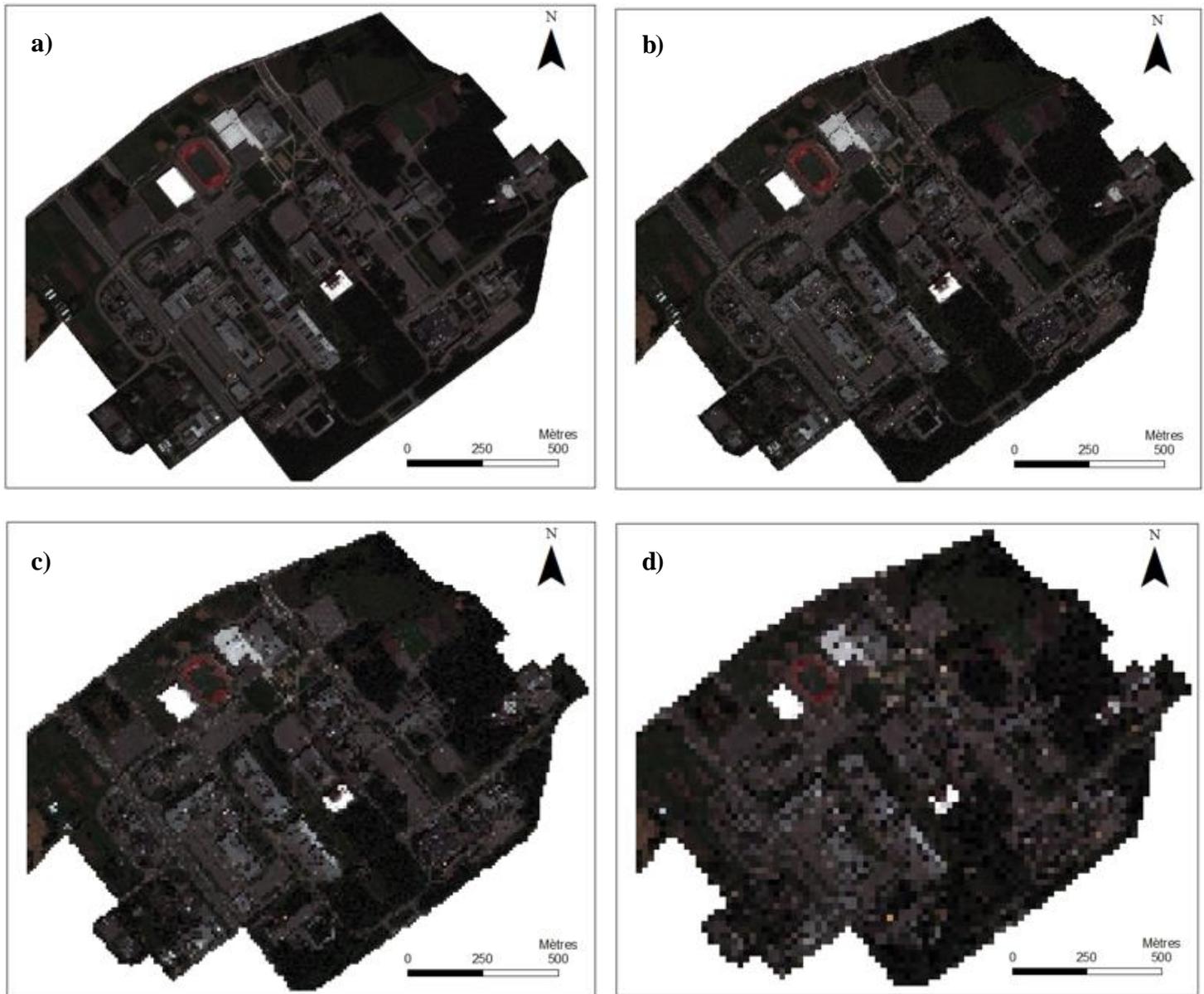


Figure 5.2: Ré-échantillonnage de l'image satellite originale du campus de l'Université Laval : a) Image originale ré-échantillonnée à 1 m. b) Image originale ré-échantillonnée à 5 m. c) Image originale ré-échantillonnée à 10 m. d) Image originale ré-échantillonnée à 20 m.

- **Segmentation de l'image**

Le processus de segmentation est primordial pendant la classification d'une image par l'approche orientée-objet (Achbun *et al.*, 2011). A la section -2.2.3- du chapitre -I-, on a choisi comme approche « la classification orientée-objet ». Cependant, afin de faire l'extraction des objets environnementaux du campus de l'Université Laval, la division de l'image en régions homogènes est la base de la classification orientée-objet. Ainsi, Boon et Rochen (1992) ont défini le processus de segmentation. Celui-ci permet de créer des objets environnementaux en regroupement des pixels adjacents de l'image satellite à classifier ayant certaines informations (i.e. la signature spectrale (réflectance), la forme, la texture et la topologie etc.), qui sont semblables.

La segmentation va être appliquée sur l'image originale ré-échantillonnée à 1mètre (figure 5.3a). Deux logiciels ont été testés afin d'effectuer la méthode « *Mean shift* » de segmentation d'images. Le premier logiciel était Monteverdi. Les paramètres d'ajustements de ce logiciel sont nombreux et complexes. Il nous a été difficile de définir les paramètres (Range radius et Spatial radius) de l'algorithme de segmentation *Mean shift* de ce logiciel, ainsi que le temps d'exécution de la segmentation était toujours long (une journée). Le deuxième logiciel était le QGIS. En effet, le processus de segmentation a été fait via l'outil segmentation par Mean-Shift de la bibliothèque Orfeo Toolbox. Cependant, on a fait intégrer cette bibliothèque dans le logiciel QGIS et la manipulation des paramètres Range radius et Spatial radius était plus facile que celui du logiciel Monteverdi. Plusieurs segmentations ont été testées, tout en établissant plusieurs combinaisons entre ces deux paramètres, afin de voir et choisir la segmentation qui donne le résultat le plus approprié des objets de l'image les plus proches de la réalité. Le temps de la segmentation était aux alentours d'une demi-heure. A la fin, on a choisi les paramètres suivants : Range radius de 5 et Spatial radius de 50. Les résultats issus de ce premier partitionnement sont présentés dans la figure (5.3b) où la couche obtenue contient un nombre assez grand d'entités polygonales. Il s'agit donc d'une sur-segmentation préliminaire des objets environnementaux présents sur l'image satellite où ces derniers sont mal définis, limités et individualisés et que la qualité de l'image segmentée n'est pas bonne et satisfaisante (Sheeren *et al.*, 2007). Dans ce cas, il est difficile d'avoir les contours exacts des objets qu'on souhaitait identifier et extraire de l'image. Pour résoudre ce problème, on a envisagé d'utiliser une approche qui va nous fournir un résultat de segmentation de meilleure qualité que celui obtenu à la figure (5.3b). Vu que chaque objet a été divisé en plusieurs entités

polygonales, on a pensé aller agréger ces entités polygonales composant chaque objet en un seul polygone représentant le contour exact de ce même objet. Ainsi, le résultat de sur-segmentation obtenu à la figure (5.3b) sera utilisé comme une couche d'entrée à l'étape suivante qui est l'agrégation des polygones sur-segmentés. Cette approche d'agrégation est fondée sur l'utilisation d'un ensemble de données spatiales autres que l'image satellitaire (tableau 5.1). Ces couches vectorielles sont recueillies à partir de la base de données d'Open Street Map où chacune regroupe les contours des objets de la zone d'étude tels que les contours des stationnements, des bâtiments, des forêts etc.

Toutefois, la troisième image (figure 5.3c) montre le résultat final de l'agrégation. Cette étape nous a permis d'obtenir un petit nombre d'entités polygonales décrivant avec une grande précision les contours des différents objets de la scène.

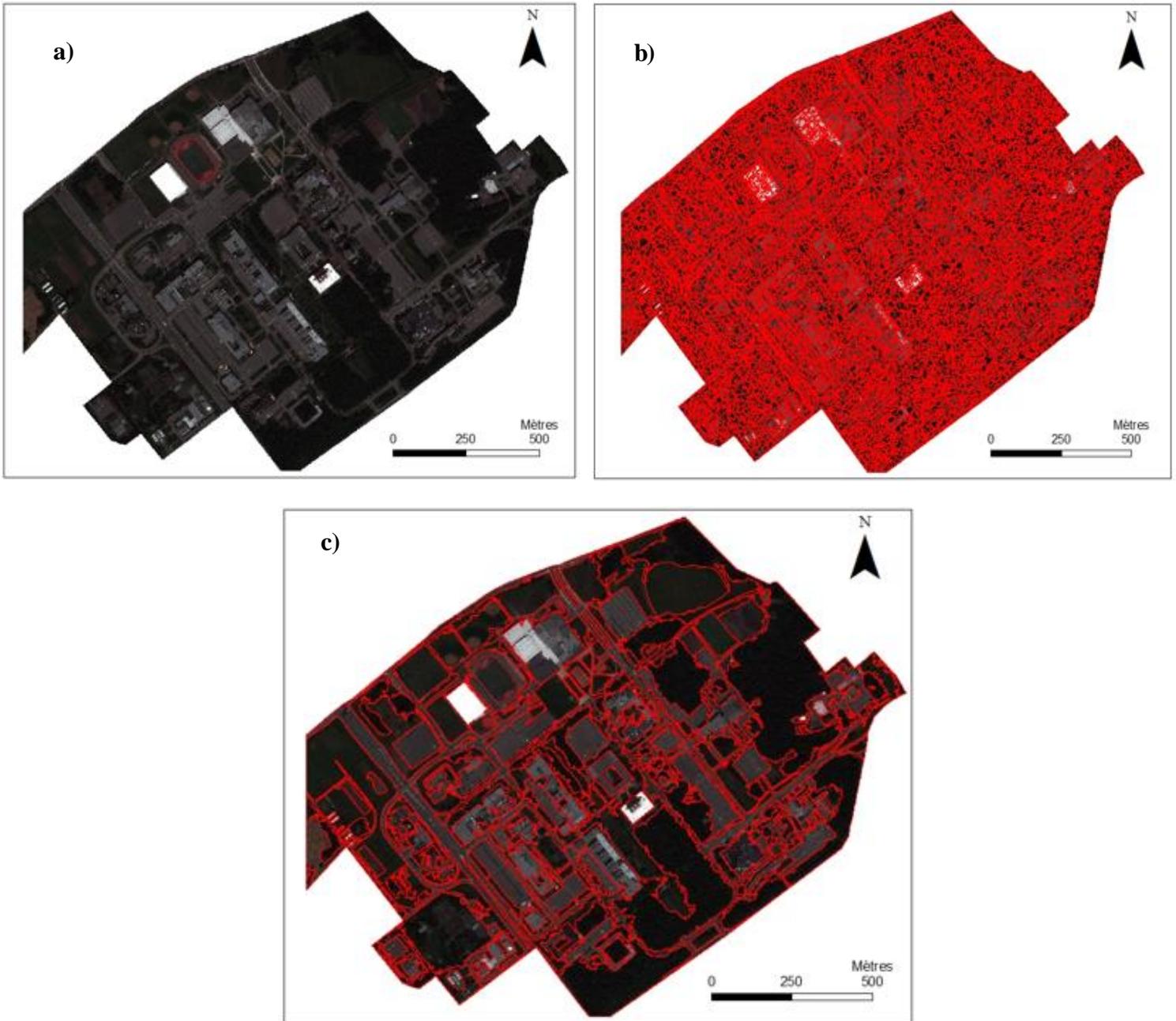


Figure 5.3: Segmentation de l'image satellite du campus de l'Université Laval par l'algorithme Mean shift. a) Image originale ré-échantillonnée à 1 m. b) Illustration du premier niveau de segmentation sur l'image originale. c) Deuxième niveau de segmentation après l'agrégation de certains polygone.

-Classification orientée-objet de l'image

Après avoir obtenu la couche de la segmentation finale (figure 5.3c) des différents objets de la zone d'étude, on passe maintenant à l'étape de classification de ces objets.

En effet, la classification a été réalisée à partir d'une superposition de la couche finale de l'étape de segmentation (figure 5.3c) avec les différentes couches vectorielles extraites d'Open Street Map (tableau 5.1). Cette approche a pour but d'attribuer à chaque polygone, présentant le contour d'un objet, la classe thématique à laquelle il appartient. Cependant, le choix des noms des classes thématiques s'est basé sur les différents objets environnementaux qu'on a déjà détaillé à la section -2.3- du chapitre -I-, qui ont des influences sur l'atténuation des niveaux d'intensité acoustique et affectent la propagation de l'onde acoustique en milieu extérieur.

De ce fait, six différentes classes thématiques ont été retenues. Cependant à travers la revue bibliographique qui a été faite à la section -2.3- du chapitre -I- afin d'identifier la liste des composantes environnementales qui ont des effets sur l'énergie acoustique et la propagation de l'onde sonore, nous a permis de mettre en place les principaux éléments environnementaux. Ces classes nous ont permis d'identifier et représenter les principaux objets environnementaux caractéristiques du campus de l'Université Laval. Le tableau -5.2-, ci-dessous, nous présente l'ensemble des classes identifiées.

Tableau 5.2: Tableau récapitulatif des six classes d'occupation du sol du campus de l'Université Laval

	Classes	Description
1	Bâtiments	<p>Cette classe regroupe tous les espaces du campus qui sont dominés par différents types de bâtiments (pavillons, résidences, tous les espaces sportifs et de loisirs qui sont présents sur le campus).</p>
2	Parkings (stationnements)	<p>Cette classe comporte les zones et les surfaces recouvertes artificiellement (surfaces cimentées, asphaltées etc.) présentes sur le campus et utilisées comme des stationnements pour les véhicules.</p>
3	Réseau routier	<p>Cette classe contient les espaces imperméables du campus utilisées comme étant des réseaux de communications.</p>
4	Forêts	<p>Cette classe regroupe les différents boisés qui sont présents sur le campus : formations végétales majoritairement constituées par des arbres à feuillus et on trouve quelques conifères comme le sapin.</p>
5	Végétation	<p>Cette classe comprend les terres gazonnées présentes sur le campus, ainsi que les arbres à feuillus et conifères qui sont dispersés. aussi, on trouve le jardin botanique Roger-Van den Hende du campus de l'université Laval qui est composé d'une diversité botanique : plantes ornementales, plantes herbacées, arbustes et arbres à feuillus et conifères.</p>
6	Sol nu	<p>Dans cette classe, nous avons spécifié la classe du sol nu : surface perméable que l'on peut trouver dans les zones urbaines, péri-urbaines et surtout les espaces ruraux.</p>

Après avoir identifié les six composantes environnementales à classer sur le campus de l'Université Laval, on a lancé la classification orientée-objet sur l'image satellite du campus. La figure -5.4- présente le résultat de classification obtenu par l'approche orientée-objet. Ce résultat obtenu montre une bonne classification des composantes environnementales du campus où on voit bien les contours exacts des bâtiments, des stationnements, du réseau routier, ainsi que la végétation et les forêts.



Figure 5.4: Résultat de la classification de l'image satellite du campus de l'Université Laval

Après la classification, la validation de celle-ci est nécessaire (Achbun *et al.*, 2011). Tout d'abord, une couche de points sous Arc GIS a été créée sur toute la zone d'étude (figure 5.5), dont les points sont répartis d'une façon aléatoire sur le terrain et par une simple appréciation visuelle des différentes composantes environnementales. Ces points jouent le rôle de sites de validation terrain pour chaque classe d'objet. Ainsi, un total de 185 points ont été défini et projeté aléatoirement sur l'image satellitaire (figure 5.5). Puis, chaque point a été attribué à sa classe. De ce fait, un nombre particulier de points a été affecté à chaque classe thématique et cette couche va servir après comme données terrain. Par la suite, nous avons effectué une opération de combinaison entre cette couche et celle obtenue de la classification afin d'avoir la matrice de confusion. A l'aide de la fonction 'table croisée' de Arc GIS, la matrice de confusion a été construite.

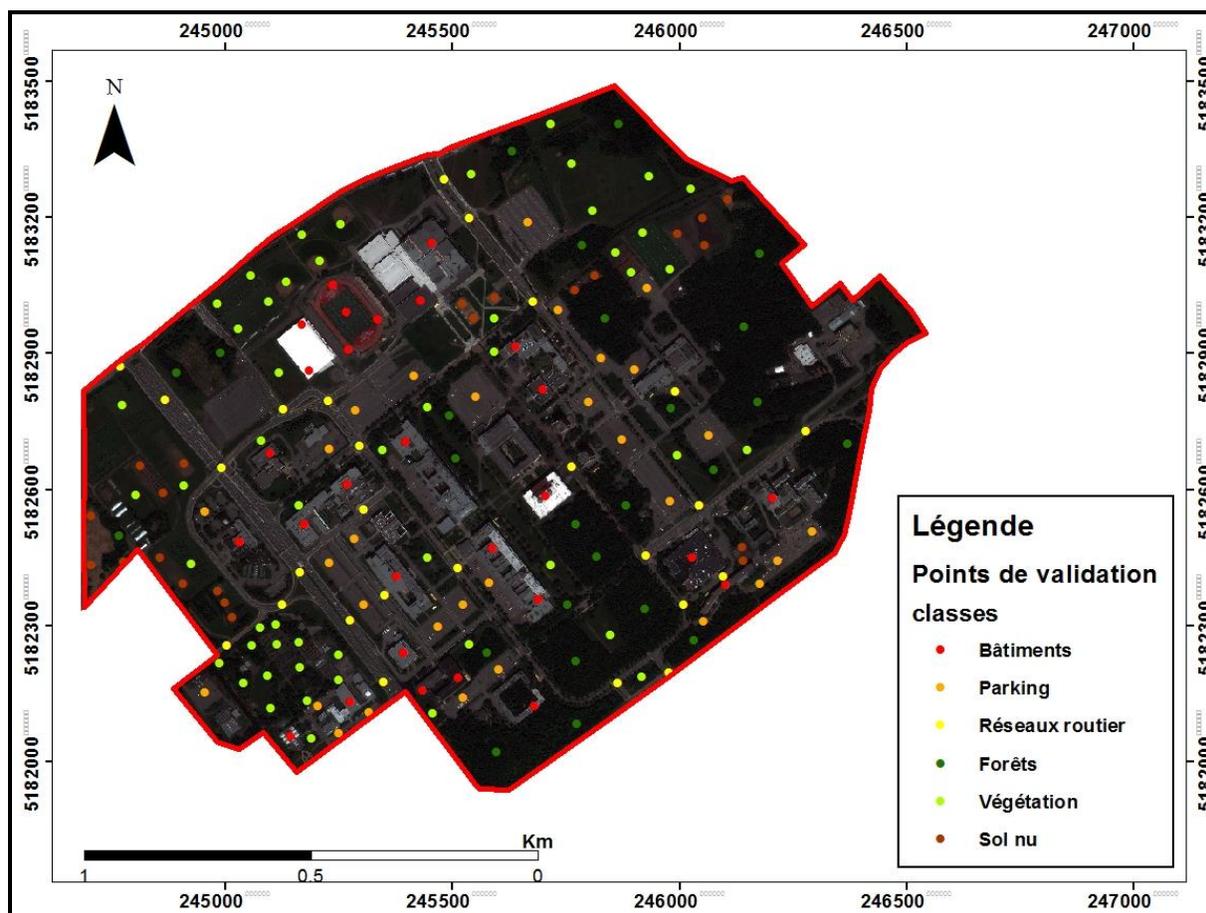


Figure 5.5: Les 185 points de validation du résultat de classification de l'image satellite du campus de l'Université Laval

Après avoir mis en place les points d'échantillonnage qui servent à valider notre classification, il faut maintenant estimer la qualité de la classification. Alors, la construction de la matrice de confusion est nécessaire afin de juger la qualité de la classification obtenue. Le tableau -5.3- présente le résultat de la matrice de confusion de notre classification obtenu par le logiciel Arc-GIS. Ce tableau présente trois importants résultats.

L'approche de classification orientée-objet s'est avérée efficace pour la classification du couvert du campus de l'université Laval. En effet, selon la matrice de confusion, la précision globale est de 100%. Cela signifie que 0% de pixels classifiés sont mal attribués à leurs classes thématiques de la classification orientée-objet (Achbun *et al.*, 2011).

Tableau 5.3: Matrice de confusion de la classification

	1	2	3	4	5	6	Total	Précision Producteur (%)	Erreur de commission (%)
1	26	0	0	0	0	0	31	100	0
2	0	25	0	0	0	0	30	100	0
3	0	0	25	0	0	0	26	100	0
4	0	0	0	12	0	0	25	100	0
5	0	0	0	0	30	0	51	100	0
6	0	0	0	0	0	26	22	100	0
Total	26	25	25	12	30	26	185		
Précision utilisateur (%)	100	100	100	100	100	100			
Erreur d'omission (%)	0	0	0	0	0	0	0		

Avec : 1-Bâtiments ; 2-Parkings ; 3-Réseau routier ; 4-Forêts ; 5-Végétation ; 6-Sol nu

Cependant, l'analyse de notre matrice de confusion montre l'efficacité de notre méthode à identifier et classer correctement les éléments environnementaux présents sur l'image. Alors, la méthode utilisée afin de combiner les données vectorielles extraites à partir de la base de données d'OSM (2017) avec la couche vectorielle obtenue auprès de la segmentation de l'image satellite a permis d'avoir avec une haute précision les limites des différents éléments territoriaux présents sur la zone d'étude.

5.3 Simulation de la méthode

5.3.1 Localisation de la source sonore

La station principale d'autobus du campus s'appelle « Université Laval ». Cette station est localisée juste en face du pavillon Desjardins. En effet, elle est la station principale du campus et la plus dynamique car elle est le point de rencontre de plusieurs parcours d'autobus de la ville de Québec. De ce fait, on a choisi un autobus passant par cette station comme source sonore de notre projet. Dans la figure -5.6-, on a choisi le point noir comme le point source. Il est localisé à quelques mètres de la station pour ne pas déranger les gens lors du débarquement et d'embarquement pendant la prise des mesures sonores. Ainsi, la mesure du bruit causé par le passage d'un autobus par le point noir représente la mesure de notre source sonore de ce projet.

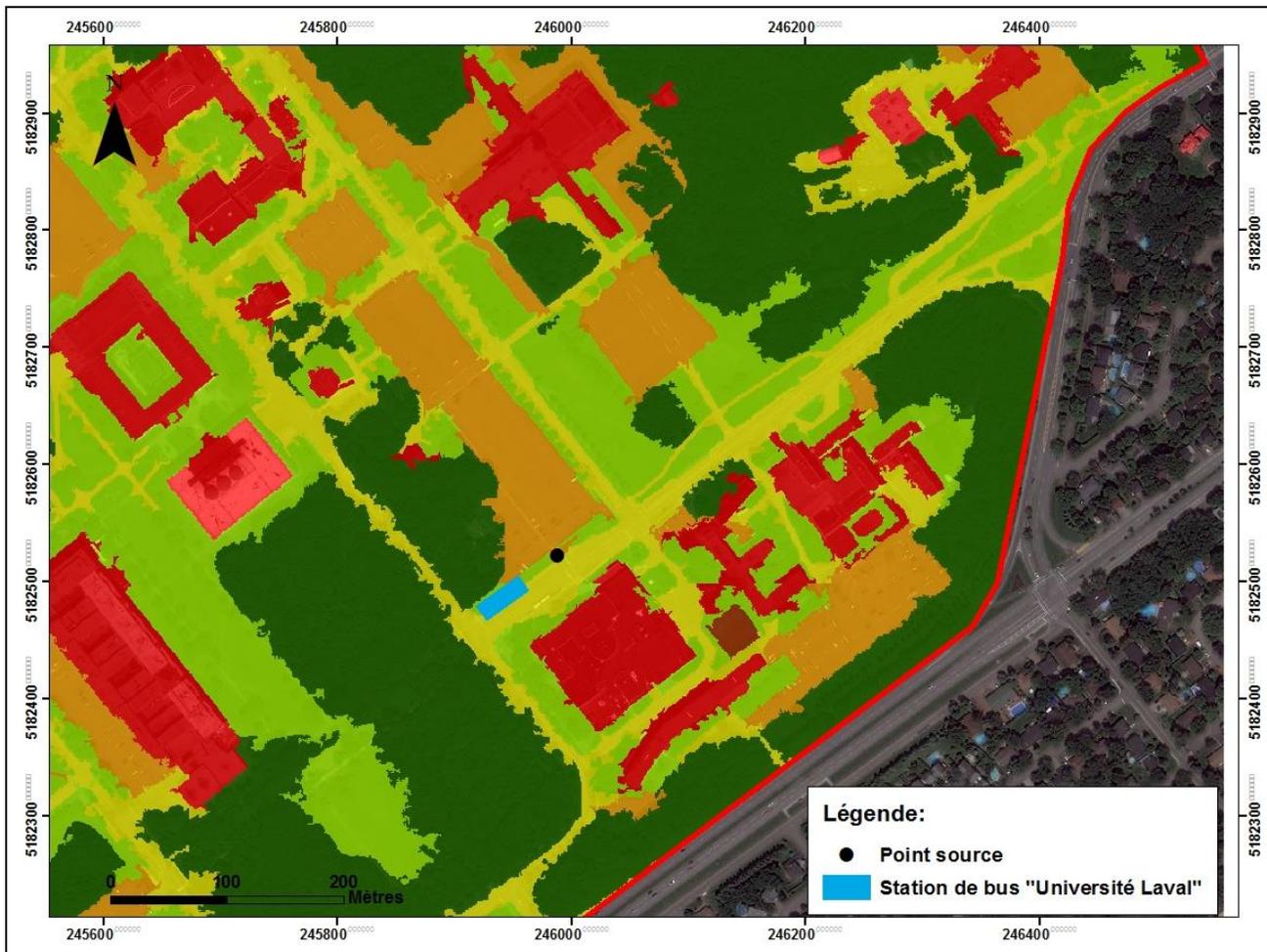


Figure 5.6: Localisation de la source sonore sur le campus de l'Université Laval

5.3.2 Localisation des points récepteurs

Dans cette partie, on va transmettre le modèle conceptualisé au niveau de la figure -4.2- du chapitre -III- destiné à localiser les points récepteurs du son sur notre zone d'étude. De ce fait, on a 96 points récepteurs localisés aux alentours du point de la source sonore de la station d'autobus « Université Laval » sur 4 rayons 50, 100, 150 et 200 mètres. On a ajouté le rayon 150 mètres afin d'ajouter plus de points récepteurs sur le milieu d'étude dans le but d'améliorer la grille des récepteurs, le calcul acoustique et éventuellement l'interpolation.

La figure -5.7- montre la schématisation du modèle sur la zone d'étude

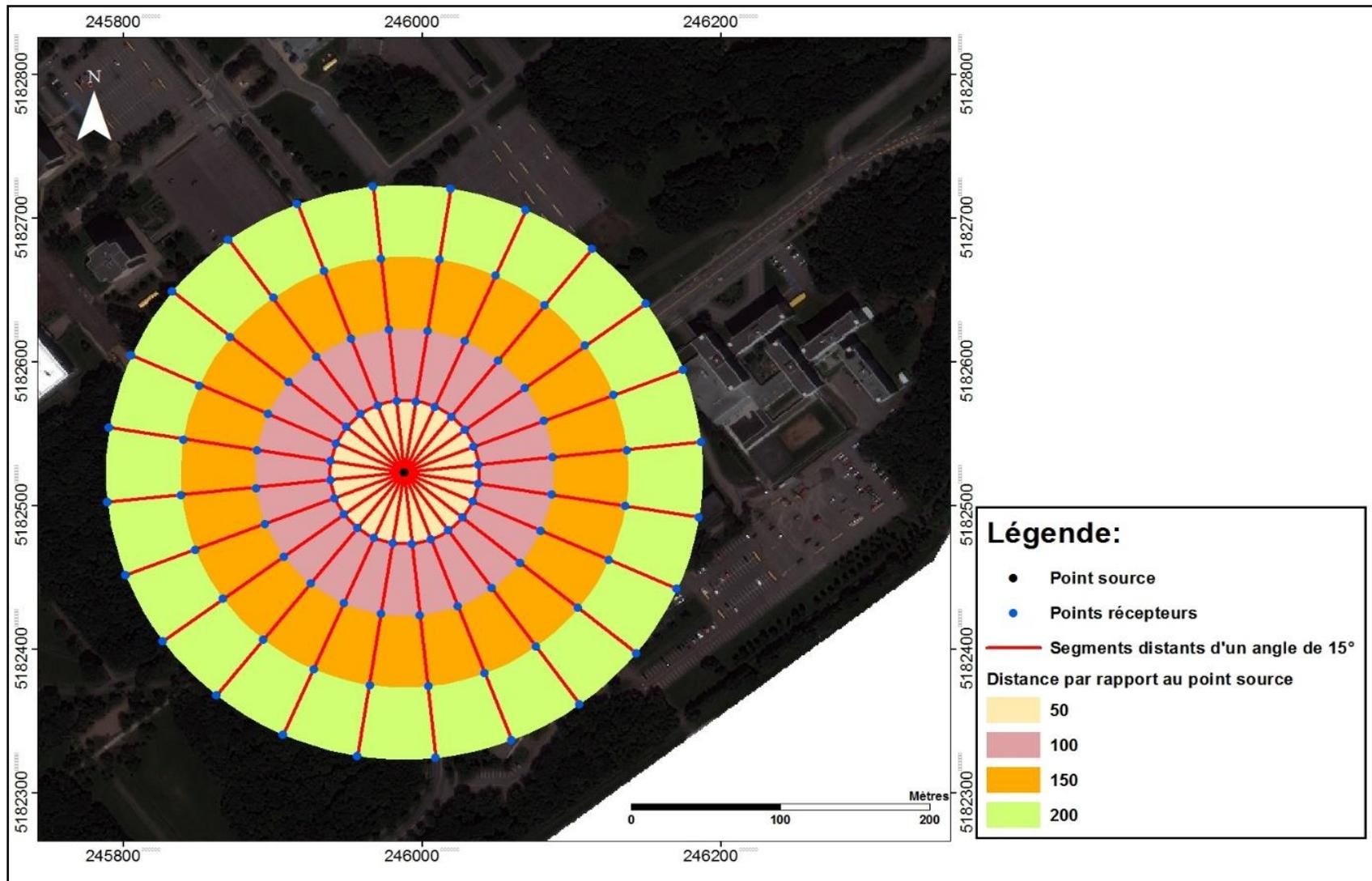


Figure 5.7: Localisation des points récepteurs du son sur le campus de l'Université Lava

5.3.3 Calcul de l'effet de la distance sur le son émis par la source sonore

Comme mentionné à la section -2.3.1- du chapitre -I-, la divergence géométrique est le premier facteur à prendre en considération pour faire le calcul acoustique et estimer l'atténuation du premier niveau d'intensité acoustique émis par la source sonore sur différentes distances. Cependant, une première valeur de ce niveau d'intensité acoustique doit être mesurée pour commencer le calcul de l'effet de la divergence géométrique. En effet, on a enregistré une valeur moyenne d'un niveau d'intensité acoustique qui est égale à 71.5 dB d'un son émis par un autobus à une distance de 50 mètres de la source sonore qui est le point noir de la figure -5.6-. A partir de cette valeur, on pouvait estimer le reste des niveaux d'intensité acoustique à chaque fois que la distance entre le point source et le point récepteur double. Cela est à l'aide de l'équation [3.1] destinée au calcul du niveau d'intensité acoustique en fonction de la distance.

Cependant, à partir de l'équation [3.1], on pourrait estimer la valeur de l'intensité acoustique I_1 issue de la valeur du niveau d'intensité acoustique mesuré et enregistré d'un autobus. Ainsi, cette valeur de I_1 va nous permettre d'estimer ensuite le reste des niveaux d'intensité acoustique avec lesquels on va travailler. Donc, on peut déterminer maintenant l'intensité acoustique du son du bus à un rayon de 50 mètres de la source sonore :

On a:

$$L_1 = 10 \times \log\left(\frac{I_1}{I_0}\right) \quad (\text{en dB})$$

$$I_1 = I_0 \times 10^{\frac{L_1}{10}} = 10^{-12} \times 10^{\frac{71.5}{10}} = 1.41 \cdot 10^{-5} \quad (\text{en W.m}^{-2})$$

Vu qu'on sait que lorsque la distance à la source double, l'intensité acoustique est divisée par quatre. A ce moment, on peut calculer le reste des niveaux d'intensité acoustique avec lesquels on va travailler. Le tableau -5.4- montre le calcul théorique des intensités acoustiques, ainsi que les niveaux d'intensité acoustique d'un autobus à 50, 100 et 200 mètres.

Tableau 5.4: Calcul de l'effet de la distance sur le son émis par un bus

Distance à la source sonore (m)	Intensité acoustique (W.m⁻²)	Niveau d'intensité acoustique (dB)
$d_1 = 50$	$I_1 = 1.41.10^{-5}$	$L_1 = 71.5$
$d_2 = 2d_1 = 100$	$I_2 = 0.25. I_1 = 3.53.10^{-6}$	$L_2 = 65.5$
$d_3 = 4d_1 = 2d_2 = 200$	$I_3 = 0.25. I_2 = 8.825.10^{-7}$	$L_3 = 59.5$

L'application de l'équation [3.1] a bien montré l'affaiblissement de 6 dB à chaque fois que la distance entre le point source et le point récepteur double. En effet, à une distance de 50 mètres de la source sonore, le niveau d'intensité acoustique mesuré est égal à 71.5 dB. Celui-là a été utilisé afin d'estimer le reste des niveaux d'intensités acoustiques à différentes distances. De ce fait, à une distance 100 mètres à la source, on a obtenu un niveau d'intensité acoustique qui est égal à 65.5 dB. Enfin, pour une distance de 200 mètres, le niveau d'intensité acoustique calculé est égal à 59.5 dB.

La figure -5.8- montre la représentation spatiale de l'effet de l'atténuation de l'énergie acoustique sous l'effet de la distance. La modélisation obtenue de l'effet de la divergence géométrique présente l'étape primordiale pour le reste de nos calculs acoustiques.

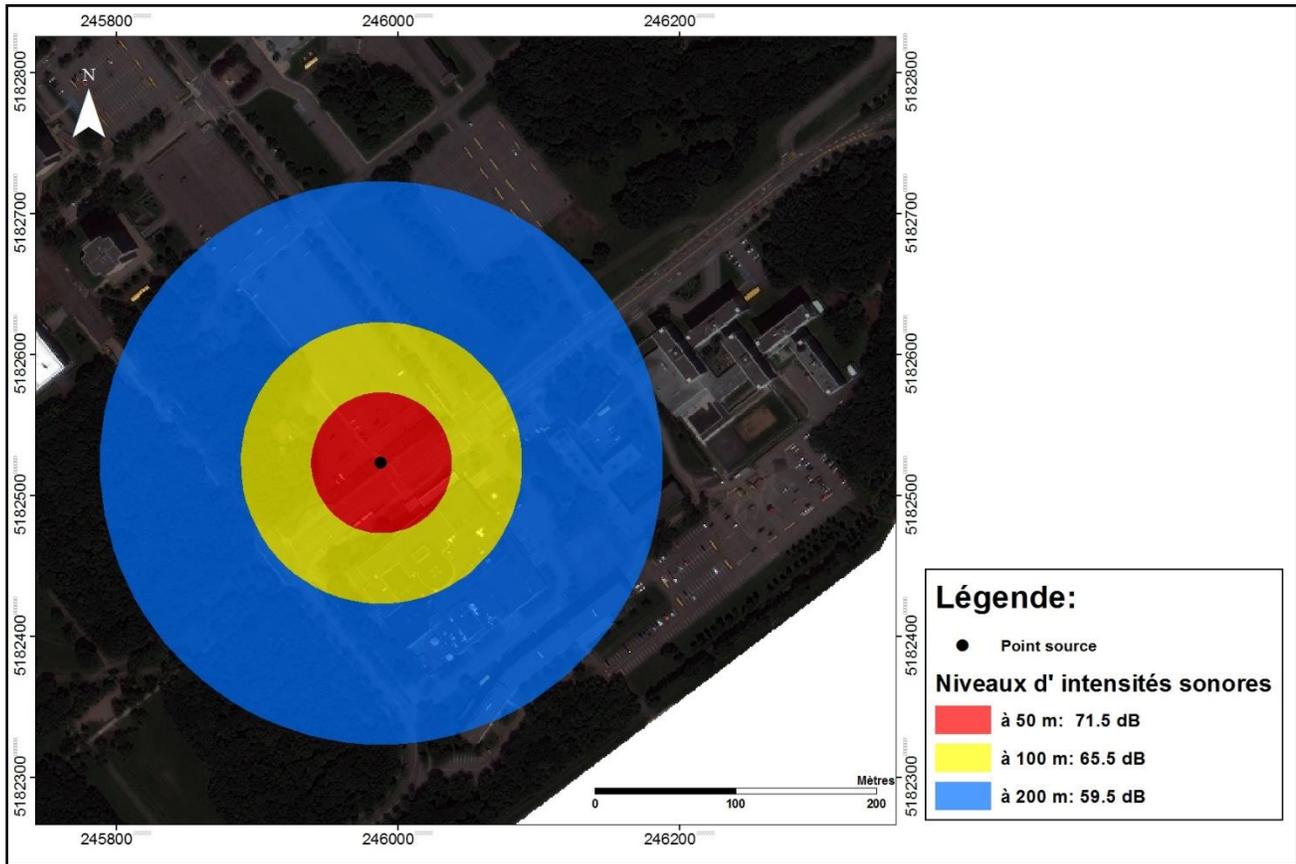


Figure 5.8: Carte schématique de l'affaiblissement phonique de l'onde acoustique dû à la divergence géométrique

5.3.4 Calcul de l'effet des conditions atmosphériques sur le son émis par la source sonore

La divergence géométrique s'ajoute l'effet des conditions atmosphériques. En effet le calcul acoustique de ces deux facteurs est commun pour n'importe quel récepteur sonore placé à une certaine distance à la source. Avec la méthode de la norme ISO 9613-2 (1996) destinée à estimer l'effet des conditions atmosphériques sur les niveaux d'intensité acoustique émis par la source, seulement deux variables, la température ainsi que l'humidité relative de l'air, entrent dans le calcul acoustique de l'effet des conditions atmosphériques sur l'absorption de l'énergie acoustique et la propagation du son. De ce fait, sur le campus de l'Université Laval, les valeurs de ces deux variables correspondent à la moyenne des différentes valeurs de la température et de l'humidité relative (HR) de l'air enregistrées par la station météorologique la plus proche de la zone d'étude au cours de la journée des mesures qui était le 12 juillet 2017. Ces valeurs enregistrées à chaque heure de la journée se trouvent au niveau du tableau -1- de l'annexe (C). Les valeurs moyennes de la température et de l'humidité relative de l'air, de la journée des mesures, ont été calculées où :

- La température moyenne est égale à 16.85 °C
- L'humidité relative moyenne de l'air est égale à 10.85 %

En résumé, en se référant aux valeurs moyennes de la température et de l'humidité relative de l'air le jour de l'enregistrement et au tableau -1- de l'annexe (B) : on a $\alpha = 8.2$ dB/km à une fréquence de 1000 Hz, $T = 15^\circ\text{C}$ et $HR = 20\%$.

Maintenant, il faut calculer l'atténuation atmosphérique pour les quatre distances 50, 100, 150 et 200 mètres tout en utilisant l'équation [10] de l'atténuation atmosphérique extraite de l'ISO 9613-2 (1996). On présente ci-après les valeurs calculées de l'atténuation atmosphérique pour les récepteurs sonores placés sur les différentes distances citées juste ci-dessus.

- à 50 mètres : $A_{\text{atm}} = 0.41$ dB
- à 100 mètres : $A_{\text{atm}} = 0.82$ dB
- à 150 mètres : $A_{\text{atm}} = 1.23$ dB
- à 200 mètres : $A_{\text{atm}} = 1.64$ dB

5.3.5 Calcul de l'effet des objets environnementaux sur le son émis par la source sonore

En faisant référence aux différentes classes d'objets environnementaux (bâtiments, stationnements, réseaux routier, forêts, sol nu et végétation) identifiés sur la zone d'étude grâce à la classification de l'image satellite du campus de l'Université Laval (figure 5.4), on peut maintenant attribuer à chaque objet environnemental identifié son influence vis-à-vis l'onde acoustique.

Après avoir identifié les propriétés acoustiques des différents objets environnementaux qui entourent la source sonore, c'est le moment de mieux les caractériser par d'autres propriétés acoustiques en relation avec les deux méthodes de calculs acoustiques mentionnées à la section - 4.2- du chapitre -III- et adoptées pour faire les calculs acoustiques de l'effet des obstacles environnementaux sur l'absorption de l'énergie acoustique et la propagation de l'onde en milieu extérieur.

5.3.5.1 Effet de la barrière acoustique : bâtiments

Le tableau -5.5- ci-dessous qui est un extrait du tableau -6- de l'annexe (A) présente les propriétés acoustiques (densité volumique, célérité et l'impédance acoustique) des bâtiments avec lesquels on va travailler. On a choisi le « béton » comme matériau de construction des bâtiments présents aux alentours de la source sonore.

Tableau 5.5: Caractéristiques physiques du matériau "béton"

	Densité volumique « ρ » (kg/ m³)	Célérité « c » (m/s)	Impédance acoustique « Z » (Pa.s/m)
Béton	2 600	3 100	8.0 × 10 ⁶

Ainsi, l'affaiblissement de l'onde acoustique à la traversée des façades des bâtiments se calcule avec l'équation [8] du facteur de transmission de l'onde acoustique, ainsi qu'avec l'équation [9] de la perte de l'énergie acoustique par transmission comme il est expliqué ci-dessous :

$$T = \frac{I_{\text{Transmise}}}{I_{\text{Incidente}}} = \frac{4Z_1 Z_2}{(Z_1 + Z_2)^2} = \frac{4c_1 \rho_1 c_2 \rho_2}{(c_1 \rho_1 + c_2 \rho_2)^2}$$

$$T = \frac{4 \times 1.3 \times 343 \times 2 \, 600 \times 3 \, 100}{(1.3 \times 343 + 2 \, 600 \times 3 \, 100)^2} = 2.2 \cdot 10^{-4}$$

$$A_{\text{ff}} = L_1 - L_2 = 10 \times \log \frac{I_{\text{Incidente}}}{I_{\text{Transmise}}} = 10 \times \log \frac{1}{T} \quad (\text{en dB})$$

$$A_{\text{ff}} = 10 \log(2.2 \cdot 10^{-4}) = -36.55 \quad (\text{en dB})$$

Après avoir calculé la perte de l'énergie acoustique par transmission provoquée par la façade des bâtiments en béton, on passe maintenant à calculer l'atténuation de l'énergie acoustique au-delà de ces bâtiments. Dans notre cas d'étude, la fréquence utilisée lors de l'enregistrement du son d'un autobus était de 1 200 Hz. Selon le tableau -2- de l'annexe (B), l'atténuation des niveaux d'intensité acoustique augmente de 0.02 dB/m à travers les bâtiments ainsi qu'à travers toutes installations présentes.

5.3.5.2 Effet de la barrière acoustique : végétation (forêt)

Pour cette partie, on va détailler le calcul acoustique de l'effet de la forêt sur l'absorption de l'énergie acoustique. Pour notre cas d'étude, la fréquence de mesure d'un son d'autobus était 1 200 Hz. De ce fait, pour une fréquence de 1 000 Hz et en se basant sur le tableau -4- de l'annexe (B), on a deux cas de calcul selon la densité « d_f » des arbres entre le point source et le point récepteur (ISO 9613-2, 1996):

- Si $10 \text{ mètres} \leq d_f \leq 20 \text{ mètres}$
 \Rightarrow L'atténuation est égale à 1 dB/m
- Si $20 \text{ mètres} \leq d_f \leq 200 \text{ mètres}$
 \Rightarrow L'atténuation est égale à 0.06 dB/m

Après avoir identifié la valeur de la fréquence sur laquelle on va se baser pour réaliser le calcul de l'effet de la forêt sur l'absorption de l'énergie acoustique, on procède maintenant à identifier les points récepteurs situés dans la forêt, puis à mesurer l'épaisseur total des arbres entre le point source et le point récepteur.

5.3.5.3 Effets de la surface du sol

Dans notre cas d'étude, vu que notre fréquence de mesure du son sur le terrain était 1 200 Hz et la bande de fréquence la plus proche de celle-ci est de 1 000 Hz dans le tableau -3- de l'annexe (B), le calcul des deux atténuations de sol « A_s » et « A_r » sera fait par les deux formules [13] et [14] extraites de la ligne 5 de ce même tableau.

$$A_s = -1.5 + G_s \times d' (h_s) \quad (\text{en dB}) \quad \text{Eq [13]}$$

Et

$$A_r = -1.5 + G_r \times d' (h_r) \quad (\text{en dB}) \quad \text{Eq [14]}$$

Avec :

A_s : Les atténuations causées par le sol à la région source en (dB).

A_r : Les atténuations causées par le sol à la région réceptrice en (dB).

G_s : Le facteur de sol de la région source

G_r : Le facteur de sol de la région réceptrice

h_s : La hauteur de captation du son à la source sonore en (m).

h_r : La hauteur de captation du son au récepteur sonore en (m).

d' : Influence de la distance source-récepteur notée « d_p » avec la hauteur de captation du son au niveau de la source sonore ou la hauteur de captation du son au niveau du récepteur sonore en (dB).

En effet, l'estimation de la valeur de la variable « d' » sera fait avec l'abaque (d) de la figure -3- de l'annexe (B), où les valeurs de « h_s » et « h_r » correspondent à 1.50 mètres qui est la hauteur de captation du son d'autobus au point de la source sonore et du point récepteur du son.

On passe maintenant à l'estimation de l'effet de la région moyenne sur la propagation du son pour la fréquence de mesures 1 200 Hz. Cependant, le calcul de l'effet de la région moyenne « A_m » se fait par l'équation [15] qui est extraite aussi du tableau -3- de l'annexe (B) et qui correspond à la fréquence 1 000 Hz la plus proche de notre fréquence de mesures. La région moyenne « A_m » est exprimée en (dB) et elle est extraite de la norme ISO 9613-2 (1996):

$$A_m = -3q (1 - G_m) \quad (\text{en dB}) \quad \text{Eq [15]}$$

Avec :

A_m : Les atténuations causées par le sol au niveau de la région moyenne en (dB).

G_m : Le facteur de sol de la région moyenne

q : Une variable qui est égale à :

$$\bullet \quad q = 0 \quad \text{si } d_p \leq (30h_s + 30h_r) \quad \text{Eq [15.1]}$$

$$\bullet \quad q = 1 - \frac{30(h_s + h_r)}{d_p} \quad \text{si } d_p > (30h_s + 30h_r) \quad \text{Eq [15.2]}$$

5.3.6 Résultat de la simulation

La figure -5.9- montre le résultat préliminaire de la simulation de l'interpolation des niveaux d'intensité acoustique calculés pour chaque point récepteur grâce à la méthode de calcul théorique conceptualisée au chapitre -III-. En effet, en observant la carte obtenue au niveau de la figure -5.9-, on constate que le résultat de la simulation est fait sous forme de « courbes isoniques ». Ces courbes relient les points ayant les mêmes niveaux d'intensité acoustique (exprimés en dB) en fonction d'une fréquence donnée (Baron, 1962). Cependant, les courbes isoniques obtenues, comme résultat préliminaire, sont simulées à une fréquence de 1 200 Hz et par un pallier de 5 dB.

En observant ces courbes-là, on remarque que la propagation de l'onde acoustique, dans un milieu complexe plein de facteurs et d'objets environnementaux affectant la propagation sonore, n'est plus circulaire et homogène comme la propagation sonore dans un milieu théorique qui ne présente aucun élément de perturbation. De ce fait, avec ce résultat, on a bien représenté et cartographié le phénomène de la propagation sonore. De plus, le résultat nous a aidés à mettre en évidence et à justifier que la variation des niveaux d'intensité acoustique dépend fortement de l'élément environnemental rencontré par l'onde acoustique a rencontré lors de sa propagation. En effet, on remarque que l'effet des bâtiments sur les niveaux d'intensité acoustique est très remarquable par rapport à l'effet du gazon ou des surfaces asphaltées. En contact avec les bâtiments, la propagation de l'onde est bloquée et cette dernière perd brusquement son énergie, alors que lorsque l'onde acoustique se propage sur une surface de sol, l'atténuation se fait petit à petit en fonction de la distance et la nature de la surface sur laquelle la propagation a été faite. L'effet de la forêt est similaire à l'effet de la nature de la surface du sol et l'atténuation se fait en fonction de la distance et de l'épaisseur des arbres entre le point source et le point récepteur.

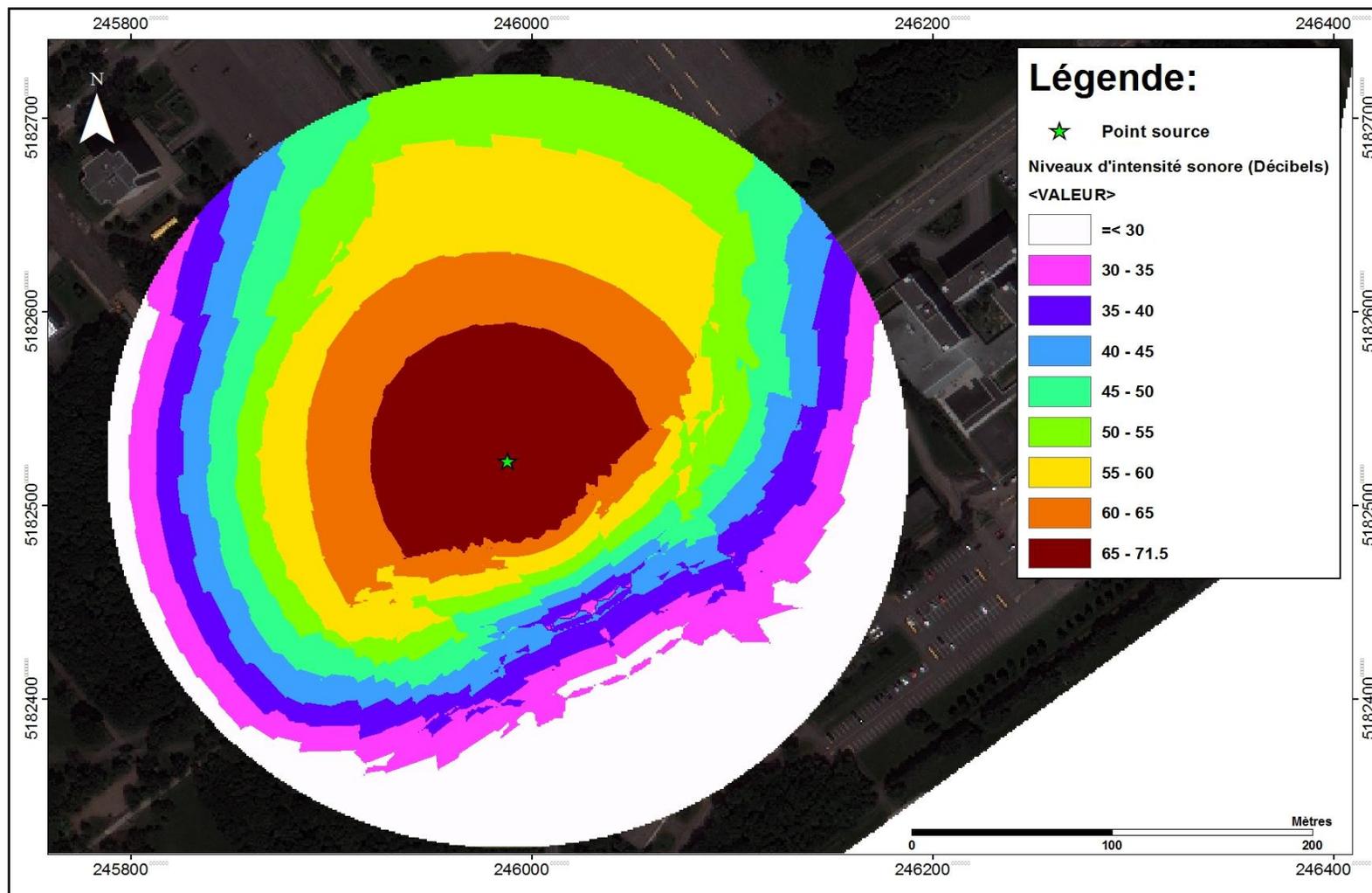


Figure 5.9: Résultat de la simulation de la méthode de modélisation en 2D de la propagation d'un son généré par un autobus

5.4 Validation de la méthode

5.4.1 Campagne de mesures acoustiques

On présente dans cette section la campagne des mesures d'un son généré par un autobus passant à côté de la station d'autobus « Université Laval ». Toutefois, le but de faire cette campagne d'enregistrements est d'utiliser les mesures obtenues comme données réalistes (Faure, 2014) afin de valider la méthode conceptualisée au chapitre -III-. Ainsi, le 12 juillet 2017, une campagne de mesure et de captage d'un son généré par un autobus passant par la source sonore (le point noir de la figure -5.6-), à différents points récepteurs de la source sonore, a été faite. Elle consistait à mesurer le niveau d'intensité acoustique provoqué par l'accélération et la décélération des autobus aux alentours de la station d'autobus du campus « Université Laval ».

Papadimitriou *et al.* (2009) ont affirmé que pour avoir de l'information sonore sur un milieu donné, il faut que celle-ci soit captée à différents points de l'espace d'étude et à des moments distincts afin de caractériser la variabilité spatiale et temporelle du son en fonction de la nature du milieu (Faure, 2014) vu que le son change en fonction de l'espace et du temps. Ainsi, la figure -5.10- schématise notre technique d'acquisition de données sonores. En effet, elle montre la localisation de la source sonore ainsi que la disposition choisie des trois axes adoptés pour faire les levés sonores. Ainsi, le schéma adopté pour les levés sonores est extrait du travail de Baume (2007) : la source est placée à une certaine distance des différents obstacles présents autour d'elle et les trois axes forment un angle de 90° autour d'elle. De plus, autour de cette source sonore et jusqu'à une distance de 200 mètres, quatre points de mesure sur chacun des trois axes ont été placés et ils sont espacés l'un de l'autre de 50 mètres. À partir de ces quatre distances, les enregistrements sonores ont été faits. Les données acoustiques ont été captées à partir d'un total de 12 points d'enregistrements (voir figure 5.10). Ces points ont été localisés à l'aide d'un GPS et ils représentent les points récepteurs d'un bruit émis par un autobus passant par la station « Université Laval ». Ainsi, ces trois axes et les 12 points de validations des niveaux d'intensité acoustique sur le terrain correspondent avec les segments et les points récepteurs établis théoriquement (figure -5.7-). En effet, le but de ces points de validation est de capter le niveau d'intensité acoustique

reçu par chaque point récepteur le moment du passage d'un autobus par le point de la source sonore.

Maintenant, on passe à la présentation de l'équipement utilisé afin de faire les levés sonores. Cependant, les mesures acoustiques étaient faites par une application compatible avec les produits Apple tels que les iPods et les iPhones. Elle s'appelait « Décibel Ultra » et elle est développée par Patrick Schaefer (2010). Il ne s'agit pas d'un sonomètre spécialisé mais par contre elle c'est un outil ultra précis qui pourrait remplacer un sonomètre, en cas de non disponibilité de ce dernier, pour faire une telle étude. En effet, cette application permet de capter et d'enregistrer le niveau d'intensité acoustique qui entoure un point donné sous forme de décibels, puis de transformer l'enregistrement en un fichier texte contenant les valeurs des niveaux d'intensité acoustique captées à chaque seconde pendant la période de l'enregistrements et de l'envoyer par courriel.

La période d'enregistrement sonore à chaque point de mesure a été adoptée à partir des travaux de Papadimitriou *et al.* (2009) où la période d'enregistrement était de 10 minutes. À l'aide de l'application, les enregistrements des niveaux d'intensité acoustique (en dB) ne se font pas à chaque bande d'octave (63, 125, 250, 500, 1 000, 2 000, 4 000, 8 000 et 16 000 Hz) mais plutôt par le choix d'une fréquence donnée avec laquelle on fait les mesures. En effet, cette option permettait d'avoir des mesures des niveaux d'intensité acoustique à n'importe quelle fréquence qu'on souhaitait étudier. Pendant nos enregistrements, la fréquence de mesures était fixée, par défaut, à 1 200 Hz.

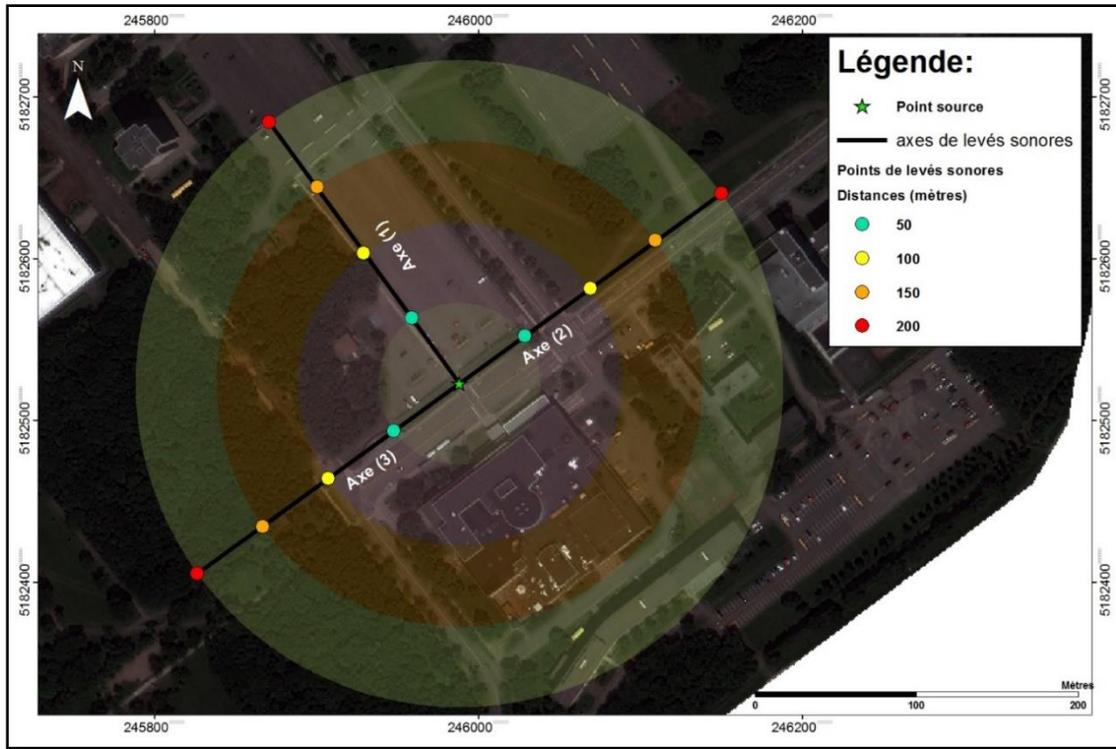


Figure 5.10: Schéma récapitulatif de la source sonore et les points considérés pour les levés sonores

Pratiquement et sur le terrain, on a fait des enregistrements sonores sur les trois axes schématisés sur la carte (figure 5.10).

Le tableau -5.6- résume les valeurs des différentes mesures des niveaux d'intensité acoustique d'un autobus passant par la station « Université Laval ». En effet, ces valeurs correspondent à quatre mesures successives des niveaux d'intensité acoustique sur quatre distances (50, 100, 150 et 200 mètres) sur les axes (1), (2) et (3) comme il est montré à la figure -5.10-. Ainsi, les valeurs de ces mesures ont été extraites à partir des enregistrements transformés en fichiers textes, spécifiques pour chacun point de mesure et ils sont justifiés par des enregistrements vidéo pour bien identifier le moment du passage de l'autobus.

De plus, les mesures n'ont pas été faites en même temps, mais elles étaient espacées dans le temps au cours des enregistrements. Ceci a permis d'avoir des sources sonores supplémentaires à celle des autobus lors des enregistrements telles que les oiseaux, les véhicules passants, les piétons, etc. Le jour où on a pris les enregistrements, le vent était absent sur la zone d'étude et n'a eu aucune influence sur les niveaux d'intensité acoustique sur les trois axes puisqu'il s'agit d'une journée ensoleillée tout au long des moments de captation.

Tableau 5.6: Tableau récapitulatif des niveaux d'intensité acoustique d'un autobus captés sur la zone d'étude

Distance à la source sonore (m)	Niveaux d'intensité acoustique mesurés sur le terrain (dB)		
	Axe (1)	Axe (2)	Axe (3)
$d_1 = 50$	$L_1 = 71.5$	$L_1 = 80$	$L_1 = 65.4$
$d_2 = 100$	$L_2 = 68.8$	$L_2 = 78$	$L_2 = 62$
$d_3 = 150$	$L_3 = 72$	$L_3 = 76$	$L_3 = 61.3$
$d_4 = 200$	$L_4 = 71$	$L_4 = 75$	$L_4 = 50$

En consultant le tableau ci-dessus, on remarque que les niveaux d'intensité acoustique enregistrés changent d'un point à l'autre tout au long du même axe et aussi en allant d'un axe à un autre. Cette variation est causée par la présence des conditions extérieures complexes entourant chaque point de mesures citant comme exemple les sources sonores existantes près de l'appareil de mesures qui sont différentes de celle des sons des autobus (i.e. les cris des corbeaux, le bruit des trafics sur le campus, etc.). Ces sources sonores ont une grande influence sur les niveaux d'intensité acoustique des autobus, ainsi que sur les niveaux d'intensité acoustique du son ambiant. Pour chaque point de mesure sur les trois axes, une vidéo de 10 minutes a été enregistrée afin d'identifier les multiples sources sonores rencontrées lors des enregistrements et leur possible influence sur les niveaux d'intensité acoustique mesurés.

On passe maintenant à discuter les résultats des mesures obtenues sur chaque axe.

- Sur l'axe (1), on remarque d'après le tableau -5.6- qu'allant d'une distance de 50 mètres à 100 mètres de la source sonore le niveau d'intensité acoustique mesuré sur le terrain diminue de 2.7 dB par doublement de distance. À 150 mètres et 200 mètres de la source, il y avait une remontée du niveau d'intensité acoustique mesuré et il avait atteint presque la valeur mesurée à 50 mètres à ces deux distances. De ce fait, le principe de l'affaiblissement phonique dû à la distance (divergence géométrique) expliqué au niveau de la section -2.3.1- du chapitre -I- n'était pas appliqué. En effet, cela pouvait être expliqué qu'à ces deux distances, il y avait d'autres sources de sons qui se sont ajoutées au son de l'autobus pendant la période d'enregistrement. Ainsi, la présence des autres sources sonores pendant la période d'enregistrement est justifiée par les vidéos enregistrées lors des mesures sonores. Ces sons proviennent des bruits du trafic qui était près du pavillon Bonenfant. De ce fait, ces valeurs ne correspondent pas à celles du son des autobus qu'on souhaitait capter à ces deux distances.
- Sur l'axe (2), comme il est montré à la figure -5.10-, il est en parallèle avec la rue de l'Université. Cette rue est le lieu de passage de plusieurs circuits d'autobus et de différents véhicules (i.e. voitures, camions, bicyclettes etc.) à presque toutes les minutes. De ce fait, en analysant les valeurs obtenues au cours des enregistrements effectués sur cet axe-là (tableau -5.6-), on trouve que les niveaux d'intensité acoustique mesurés sont très élevés et ne décroissent pas avec la distance tout en s'éloignant du point de la source sonore. En fait, ces valeurs dépassent même la valeur utilisée pour faire la simulation de notre modèle qui est égale à 71.5 dB. Cependant, le mélange de différents sons lors des enregistrements ne nous permet pas d'avoir le vrai niveau d'intensité acoustique émis par l'autobus en passant par le point source et capté à ces différentes distances.
- Sur l'axe (3), une partie de celui-là est située dans la forêt d'érables de l'université. De ce fait, la forêt est considérée parmi les principaux obstacles qui absorbe l'énergie acoustique et influe la propagation de l'onde dans l'air. Lors des mesures, il était un peu difficile de capter l'arrivée et le départ des autobus à la station, tout en s'éloignant petit à petit de la source à cause des différentes composantes végétales de la forêt. Le décalage

des valeurs s'explique par la présence d'autres sources sonores lors des enregistrements telles que les cris des corbeaux, les chants des oiseaux, le passage des gens, les bicyclette s et plein d'autres choses qui ont fait augmenter les niveaux d'intensité acoustique mesurés.

5.4.2 Validation des résultats

Dans cette section, on va faire une comparaison entre les valeurs des niveaux d'intensité acoustique mesurés sur le campus de l'Université Laval et celles des niveaux d'intensité acoustique de l'autobus modélisées par notre modèle. Cette comparaison est pertinente car elle va nous permettre de comparer les mesures réelles avec les valeurs projetées par le modèle et modélisées au niveau de la figure -5.9

- Validation des résultats sur l'axe (1)

Le tableau -5.7- donne les résultats des niveaux d'intensité acoustique obtenus par la simulation de notre modèle conceptualisé au chapitre -III- ainsi que les valeurs réelles des niveaux d'intensité acoustique mesurés sur différentes distances sur l'axe (1). En effet, les valeurs obtenues par la simulation sont extraites à partir de la figure -5.9-.

Tableau 5.7: Comparaison des niveaux d'intensité acoustique obtenus par la simulation du modèle avec ceux mesurés sur le terrain au niveau de l'axe (1)

Distance à la source sonore (m)	Niveaux d'intensité acoustique mesurés sur le terrain (dB)	Niveaux d'intensité acoustique simulés par le modèle (dB)
	Axe (1)	Axe (1)
$d_1 = 50$	$L_1 = 71.5$	$65 = < L_1 = < 71.5$
$d_2 = 100$	$L_2 = 68.8$	$60 = < L_2 = < 65$
$d_3 = 150$	$L_3 = 72$	$50 = < L_3 = < 55$
$d_4 = 200$	$L_4 = 71$	$40 = < L_4 = < 45$

Selon le tableau -5.7-, les deux niveaux d'intensité acoustique d'un autobus, mesurés sur le terrain à 50 mètres et 100 mètres sont dans les intervalles des niveaux d'intensité acoustique simulés à ces deux mêmes distances, par notre modèle de propagation d'une onde acoustique dans un milieu extérieur plein d'objets et facteurs environnementaux. Les niveaux d'intensité acoustique mesurés à 150 mètres et à 200 mètres à la source sonore sont très loin des valeurs obtenues par le modèle vu les inconvénients survenus le jour des enregistrements sonores. Ceci s'explique par la présence d'autres sources sonores que celui des autobus, ce qui crée un chevauchement au niveau des niveaux d'intensité acoustique, provoquant une augmentation de décibels. Ainsi les valeurs mesurées ne correspondent pas à celles d'un autobus. En effet, sur l'axe (1), on trouve que les niveaux d'intensité acoustique mesurées descendent et remontent et ne subissent pas le phénomène de la divergence géométrique en s'éloignant de la source vu que le son ambiant change constamment ce qui provoque la non-stabilisation des niveaux d'intensité acoustique du son ambiant et par conséquent la non-stabilisation des niveaux d'intensité acoustique des autobus.

- **Validation des résultats sur l'axe (2)**

Le tableau -5.8- illustre une comparaison entre les mesures réelles des niveaux d'intensité acoustique faites sur l'axe (2) avec les valeurs des niveaux d'intensité acoustique obtenus par la simulation du modèle sur le même axe.

Tableau 5.8: Comparaison des niveaux d'intensité acoustique obtenus par la simulation du modèle avec ceux mesurés sur le terrain au niveau de l'axe (2)

Distance à la source sonore (m)	Niveaux d'intensité acoustique mesurés sur le terrain (dB)	Intervalles des niveaux d'intensité acoustique simulés par le modèle (dB)
	Axe (2)	Axe (2)
$d_1 = 50$	$L_1 = 80$	$65 \leq L_1 \leq 71.5$
$d_2 = 100$	$L_2 = 78$	$60 \leq L_2 \leq 65$
$d_3 = 150$	$L_3 = 76$	$45 \leq L_3 \leq 50$
$d_4 = 200$	$L_4 = 75$	$40 \leq L_4 \leq 45$

En se basant sur le tableau -5.8-, on remarque que les données enregistrées au quatre points de l'axe (2) dépassent la valeur maximale simulée par le modèle au niveau de chaque point. Cependant, cela s'explique par le mélange des niveaux d'intensité acoustique des différentes sources sonores présentes au même temps lors de la captation du son d'un autobus qui ont camouflées le niveau d'intensité acoustique des autobus sur cet axe-là. Même si les valeurs des niveaux d'intensité acoustique enregistrés dépassent les valeurs obtenues par le modèle, on remarque qu'il y a diminution des valeurs des niveaux d'intensité acoustique enregistrées tout en s'éloignant de la source sonore.

En effet, l'isolement de notre source sonore est quasiment impossible car l'axe (2) coïncide avec la rue de l'Université qui est la rue la plus dynamique du campus universitaire au cours de la journée ou même le soir. Cependant, les données enregistrées ne permettent pas de valider les valeurs obtenues par le modèle au niveau de l'axe (2).

- Validation des résultats sur l'axe (3)

Comme les tableaux -5.7- et -5.8-, le tableau -5.9- résume une comparaison entre les mesures réelles des niveaux d'intensité acoustique faites sur l'axe (3) avec les valeurs des niveaux d'intensité acoustique obtenus par la simulation du modèle sur le même axe.

Tableau 5.9: Comparaison des niveaux d'intensité acoustique obtenus par la simulation du modèle avec ceux mesurés sur le terrain au niveau de l'axe (3)

Distance à la source sonore (m)	Niveaux d'intensité acoustique mesurés sur le terrain (dB)	Intervalles des niveaux d'intensité acoustique simulés par le modèle (dB)
	Axe (3)	Axe (3)
$d_1 = 50$	$L_1 = 63.6$	$65 \leq L_1 \leq 71.5$
$d_2 = 100$	$L_2 = 62$	$60 \leq L_2 \leq 65$
$d_3 = 150$	$L_3 = 61.3$	$45 \leq L_3 \leq 50$
$d_4 = 200$	$L_4 = 50$	$L_4 \leq 30$

D'après le tableau -5.9-, on constate que les valeurs des niveaux d'intensité acoustique mesurées sur le terrain diminuent d'un point à l'autre tout au long de l'axe (3) où la forêt couvre tout cet axe. On remarque que les valeurs des enregistrements obtenues sur les deux distances d_1 et d_2 sont proches de celles obtenues par le modèle comme il est montré au niveau du tableau -5.9-, alors qu'au niveau des deux distances d_3 et d_4 les valeurs enregistrées sont plus élevées que celles obtenues par le modèle. Cela s'explique par les variations des niveaux d'intensité acoustique du son ambiant causées par la présence des sources sonores le moment des enregistrements. Cela a affecté les valeurs des niveaux d'intensité acoustique enregistrées des autobus.

Au tableau -5.10-, on a récapitulé les niveaux d'intensité acoustique mesurés du son des autobus ainsi que les niveaux d'intensité acoustique du son ambiant à chaque point de mesure. Les valeurs des niveaux d'intensité acoustique du son ambiant correspondent aux niveaux d'intensité acoustique mesurés aux alentours du point de mesure lorsqu'on n'a pas d'autobus au cours des enregistrements. Pour extraire les valeurs du son ambiant au niveau de chaque point de mesure, on a considéré les valeurs des niveaux d'intensité acoustique enregistrées pendant quelques instants avant et après le passage de l'autobus. Cela a été fait à l'aide des vidéos enregistrées au niveau de chaque point de mesure pendant la campagne d'enregistrement. Ceux-ci nous ont aidés à comparer et voir les variations des niveaux d'intensité acoustique en présence et en absence des autobus et les justifier par des vidéos.

Tableau 5.10: Tableau comparative entre le son ambiant mesuré sur le terrain ainsi que les niveaux d'intensité acoustique du son de bus mesurés sur le terrain

Distance à la source sonore (m)	Axe (1)		Axe (2)		Axe (3)	
	Son mesuré (dB)	Son ambiant (dB)	Son mesuré (dB)	Son ambiant (dB)	Son mesuré (dB)	Son ambiant (dB)
d ₁ = 50	71.50	48.55	80	60.50	65.40	57.45
d ₂ = 100	68.80	48.50	78	60.45	62	56
d ₃ = 150	72	55.20	76	64.50	61.30	54.10
d ₄ = 200	71	51.10	75	60	50	47.10

À partir du tableau ci-dessus, on remarque bien que le son ambiant n'est pas stable. En effet, il varie d'un point à un autre au niveau du même axe et aussi en allant d'un axe à un autre. La variation du son ambiant provoque la variation immédiate des niveaux d'intensité acoustique des autobus mesurés sur le campus. Cela induit à ne pas avoir les valeurs réelles et exactes des niveaux d'intensité acoustique des autobus qu'on souhaitait capter. Alors, la comparaison entre le son ambiant et les niveaux d'intensité acoustique mesurés sur le terrain met logiquement en lumière la difficulté de faire des mesures acoustiques précises pendant la journée sur le territoire et finalement une comparaison quasi impossible à réaliser dans de telles conditions. De ce fait, on conclue que la nuit est le moment de la journée le plus optimal pour la réalisation des levés sonores, en raison de la variation des sources sonores au cours de la journée.

A la figure -5.11-, on a utilisé les valeurs des niveaux d'intensité acoustique du tableau -5.10- afin de créer des courbes. En effet, ces différentes courbes schématisent les niveaux d'intensité acoustique du son de l'autobus enregistrés à chaque distance de mesures sur les trois axes ainsi que les courbes du son ambiant à chaque distance de mesures sur les mêmes axes.

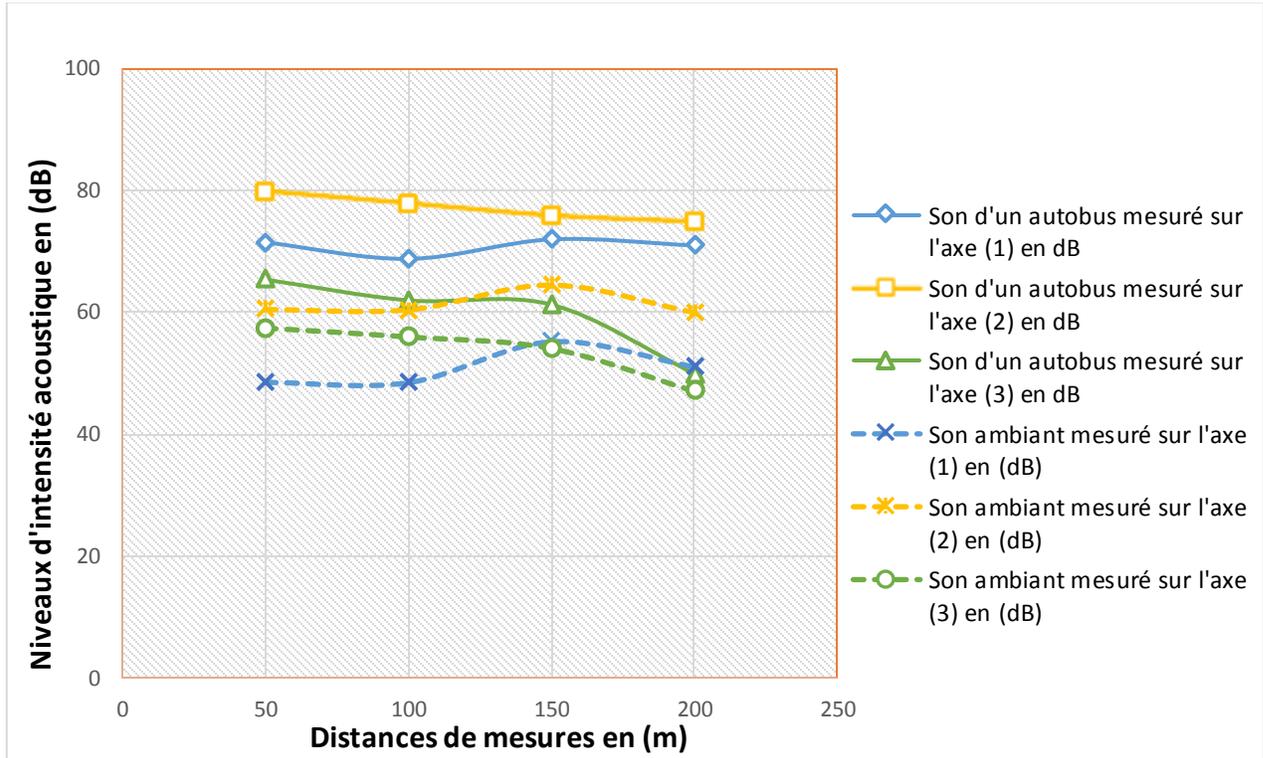


Figure 5.11: Courbe illustrative des valeurs des niveaux d'intensité acoustique de l'autobus et du son ambiant sur les 3 axes

5.5 Conclusion

Ce chapitre a été consacré à l'expérimentation de la méthode théorique conçue au chapitre - III- qui était destinée à la modélisation de la propagation d'un son dans un milieu extérieur complexe. On a choisi à expérimenter la méthode sur le campus de l'Université Laval vu la présence de multiples phonies telles que la biophonie, la géophonie et l'anthropophonie ainsi que la majorité des composantes environnementales sans oublier la disponibilité de données géospatiales multi-sources (i.e. images satellites à THRS, couches vectorielles/matricielles, données Lidar, etc.). Un ensemble de mesures a été fait sur le campus afin de valider le modèle dans le but de discuter la fiabilité de la méthode, ainsi que la qualité du résultat simulé par celle-ci.

Conclusion et perspectives

Dans ce travail nous avons cherché à étudier l'environnement sonore d'un territoire qu'il soit urbain, semi-urbain ou forestier tout en se basant sur des outils géomatiques (télédétection et SIG) et des données géospatiales multi-sources (données vectorielles, données matricielles, images satellites etc.). En effet, le travail vise à conceptualiser une méthode théorique de calcul et de modélisation des niveaux d'intensité acoustique d'un son produit par une source sonore, sur différentes distances dans un territoire plein de facteurs et d'éléments environnementaux affectants la propagation du son (i.e. bâtiments, forêts). Le but de cette méthode est de visualiser le phénomène de propagation de l'énergie acoustique émise par le son aux alentours de la source émettrice et ainsi d'estimer les niveaux d'intensité acoustique aux à différents points récepteurs de cette énergie acoustique.

Afin de répondre à l'objectif principal de ce travail, on a pensé comme première étape d'extraire de la littérature tous les facteurs et les éléments environnementaux qui pourraient affectant la propagation de l'onde acoustique dans un environnement extérieur complexe. De ce fait, celui-là était notre premier objectif afin de comprendre le fonctionnement de l'environnement sonore et l'interaction du son lors de sa propagation avec le milieu de propagation et tous les éléments qui le composent. Ce premier objectif a été atteint au niveau du chapitre -II-, où on a extrait toute une liste des différents objets environnementaux existants dans la littérature qui ont de l'influence sur la propagation de l'onde acoustique tels que les bâtiments, la végétation, la nature de la surface du sol, etc. et aussi les facteurs environnementaux qui ont un effet sur l'onde acoustique et qu'ils absorbent son énergie comme le vent, la température, l'humidité relative de l'air etc.

Après avoir identifié la liste des éléments environnementaux qui affectent la propagation sonore, on a passé à la mise en place d'une bibliothèque de données géospatiales générale au niveau de laquelle on a fait l'acquisition des données nécessaires pour étudier un environnement sonore et la propagation d'une onde acoustique dans un milieu extérieur plein

d'objets environnementaux. Le but de cette bibliothèque de données est de collecter des données géospatiales nécessaires pour atteindre l'objectif principal du projet qui est l'étude d'un environnement sonore d'un territoire quelconque tout en modélisant l'interaction d'une onde acoustique émise par une source sonore avec les différents éléments du territoire. Cela est dans le but de faire une modélisation cartographique de la propagation d'un son dans un milieu extérieur. Les données correspondent aux données géospatiales caractéristiques pour chaque objet environnemental (i.e. données vectorielles sur les bâtiments, forêts, réseaux routiers etc.). Cet objectif spécifique a été atteint au chapitre -II- afin d'attacher après pour chaque élément environnemental ses propriétés acoustiques vis-à-vis l'onde acoustique. Aussi, dans le même chapitre, on a développé une méthode de traitement de ces données géospatiales multi-sources permettant de détecter avec une haute précision les objets environnementaux qui sont présents sur un territoire donné, ainsi que leurs contours. Cette méthode vise à améliorer la qualité de la classification des images satellites à THRS et à caractériser les éléments environnementaux dans une image. Enfin, le développement de cette méthode de traitement vise aussi à l'automatiser dans des futurs travaux.

Pendant notre revue bibliographique sur l'environnement sonore et les effets des éléments environnementaux sur la propagation de l'onde acoustique dans un milieu extérieur plein d'objets environnementaux, on a trouvé la norme ISO 9613-2 (1996) comme document de référence qui résume l'ensemble des éléments et des facteurs environnementaux déjà extraits au chapitre -I- ainsi que leurs propriétés acoustiques. De ce fait, on a pris ce document comme moyen afin d'atteindre notre deuxième objectif spécifique, à savoir la conceptualisation d'une méthode théorique de calcul des niveaux d'intensité acoustique pour différents points récepteurs d'un son émis dans un milieu extérieur pleins d'objets et de facteurs environnementaux affectant la propagation de l'onde acoustique dans le but de visualiser et cartographier ce phénomène. L'approche de conception de cette méthode était divisée en deux étapes indépendantes. En effet, vu que notre objectif est d'étudier et de cartographier l'environnement sonore à partir d'une approche théorique, c'est-à-dire sans avoir à aller sur le terrain afin d'installer des sonomètres comme points récepteurs de l'onde acoustique, alors la première étape consistait à mettre en place une méthode générale de localisation de ces points récepteurs qui serait transposable sur tous les territoires. La première partie du chapitre

-III- détaille notre méthode retenue afin de localiser des points récepteurs sur le terrain. Cette méthode a été créée à partir de la propagation théorique de l'onde acoustique dans un milieu vide sans obstacles où l'onde se propage sous forme de cercles concentriques. La deuxième étape est d'extraire à partir de la littérature et de mettre en place les algorithmes et les équations mathématiques associés aux facteurs et éléments environnementaux qui affectent la propagation de l'onde acoustique. Cette deuxième partie explique bien les propriétés acoustiques de ces différents facteurs et éléments environnementaux vis-à-vis l'onde acoustique et permet d'estimer le niveau d'intensité acoustique de l'onde sonore lorsque cette dernière croise le long de sa propagation l'un de ces éléments.

Le dernier objectif spécifique de ce travail de maîtrise visait de simuler la méthode conceptualisée au chapitre -III- et la valider en fonction d'un cas d'étude qui est le campus de l'Université Laval. En effet, une carte de propagation d'un son d'un autobus a été générée en utilisant une interpolation linéaire par krigeage universel sous ArcGIS 10.6. Ce premier résultat issu de la simulation de la méthode montre l'estimation des niveaux d'intensité acoustique aux différents points récepteurs localisés par notre méthode qui est destinée à mettre les récepteurs du son sous une forme assez originale, spécifique et unique sur le plan scientifique. Chaque valeur représente le niveau de l'intensité acoustique de l'onde sonore après avoir interagi avec les différents facteurs et éléments environnementaux qui les a croisés pendant sa propagation et avant qu'elle n'atteigne le point récepteurs. En effet, dans la littérature, la plupart des chercheurs mettaient d'une façon aléatoire leurs récepteurs sonores sur leurs territoires d'études et ne subissaient pas des modèles ou des grilles spécifiques de localisation. L'invention de notre modèle de localisation permettait de faire une comparaison entre la propagation théorique de l'onde acoustique qui se fait sous forme de cercles concentriques avec la propagation réelle. Cette dernière se fait lorsque l'onde croisait dans son chemin de propagation des obstacles. Ces obstacles engendrent des courbures des cercles concentriques de la propagation théorique. Ainsi, l'intensité de courbure diffère avec l'objet que l'onde croise et avec la nature du matériau qui le compose.

Une validation de la méthode conceptualisée pour modéliser la propagation d'une onde acoustique engendrée par un son et des valeurs des niveaux d'intensité acoustique simulées

par le modèle a été faite par des mesures réelles qui ont été prises, pendant une campagne de mesures, sur le campus de l'Université Laval. Ainsi, les résultats des enregistrements sonores obtenus sont différents des valeurs du modèle à plusieurs points de la zone d'étude. Cela s'explique par le fait de la présence d'autres sources sonores à part celle des autobus lors des enregistrements. Ces sources sonores ont causé la perturbation des niveaux d'intensité acoustique des autobus et ils ont modifié et amplifié ces niveaux d'intensité acoustique. Cependant, on a remarqué que pour avoir la mesure exacte des niveaux d'intensité acoustique des autobus, il faut procéder d'une autre manière pour faire les enregistrements sonores. En effet, le campus de l'Université Laval est très dynamique tout au long de la journée, ainsi que tout le long de la semaine. Aussi vu les activités qui sont présentes en permanence et la variabilité des horaires des cours du matin au soir, il y a toujours les autobus qui passent par la station d'autobus « Université Laval » et il y a toujours d'autres sources sonores. De ce fait, à partir de minuit, le campus commence à être calme vu la diminution du nombre des autobus, du nombre des véhicules, des gens circulant sur le campus, des sons biophoniques (i.e. oiseaux) etc. Donc, on a conclu que pour faire des bons enregistrements des niveaux d'intensité acoustique des autobus, il faut faire ces enregistrements pendant la nuit où il y a moins de circulation sur le campus et moins de sources sonores qui perturbent le son ambiant ainsi que les purs niveaux d'intensité acoustique des autobus qu'on souhaitait enregistrée. Alors, la non-exactitude de nos mesures sonores qui étaient faites sur le campus pendant la journée présente une limitation au niveau de notre projet. Une campagne de mesure pendant la nuit est suggérée dans le futur pour éviter ces problèmes et améliorer la qualité des enregistrements.

L'approche visée dans ce projet a réussi à modéliser visuellement le phénomène de la propagation d'une onde acoustique, émise par un son environnemental, où le milieu de propagation est un milieu extérieur complexe plein d'objets et facteurs environnementaux affectant cette propagation. En effet, l'approche proposée et appliquée a permis de produire des cartes en 2D appelées « cartes spatiophoniques ». Ce produit cartographique représente le résultat de l'interaction du son avec son entourage. Notre approche a conduit à des résultats satisfaisants et elle a répondu aux objectifs que l'on s'était fixés. Concernant le résultat de la carte finale qui représente la simulation des niveaux d'intensité acoustique du son d'un

autobus, des travaux futurs pourraient être réalisés afin d'ajuster les intervalles des niveaux d'intensité acoustique et amélioré la représentation des courbes isosoniques. Ainsi, le modèle conceptualisé choisi pour positionner les récepteurs sur le territoire pourrait faire l'objet d'une amélioration afin d'obtenir une simulation de mesures plus proche de la réalité, notamment en ajoutant plus de points au niveau de la grille des points récepteurs de la figure -4.2-.

Cependant, vu que la propagation sonore est un phénomène qui se produit dans les trois dimensions (x, y, z) de l'espace, il faudrait alors penser à ajouter dans le futur et les prochains travaux l'aspect 3D car avec l'approche en 3D le projet soit plus cohérent avec la réalité et permettra d'obtenir une vue globale sur l'environnement sonore dans ces trois dimensions. Ensuite, la méthode théorique de modélisation de la propagation d'un son dans un milieu extérieur complexe conceptualisée au chapitre -III- lui manque quelques composantes qui n'étaient pas prises en considération dans la méthode comme la topographie du territoire, l'eau et la neige. Alors, dans le futur, il faut prendre en considération d'ajouter ces composantes à la méthode pour qu'elle soit plus cohérente avec la réalité. Ensuite, l'approche de notre projet ne s'agit pas d'une approche automatique. Toutefois, pour des futures perspectives, il serait pertinent de développer un algorithme basé sur la méthode théorique conceptualisée afin de mettre en place un outil géomatique permettant d'étudier l'environnement acoustique d'un territoire et la production de sa carte spatiophonique d'une façon automatique. Pour ce volet de développement d'un outil automatique, une équipe d'étudiants en génie géomatique, au département sciences géomatiques de l'Université Laval, a développé un algorithme qui a les mêmes principes que notre méthode. Puis, ces étudiants ont produit une application web s'appelant SONO-MAP permettant de produire une carte spatiophonique d'un territoire basée principalement sur une seule composante environnementale qui est « les bâtiments ». Un autre projet futur pourrait aussi être fait. Il consiste à utiliser un matériel spécialisé pour faire les mesures sonores qui est le sonomètre et les comparer à celles obtenues par des appareils tels que les téléphones/tablettes intelligents qui ne sont pas destinés à mesurer avec une haute précision les niveaux d'intensité acoustique. Le premier but de ce projet est de vérifier la qualité des mesures par les deux méthodes. Le deuxième but est de voir si les valeurs des mesures faites avec le sonomètre

sont proches à celles obtenues par notre modèle. Aussi, ce projet permet de valider encore une fois notre méthode adoptée tout au long de ce projet de recherche.

A la fin, dans notre projet, on a fait quelque chose de nouveau qui n'avait pas été fait auparavant sur le plan scientifique et en recherche. Cette innovation est d'utiliser des images satellites à THRS pour la représentation de l'environnement sonore et la modélisation de la propagation acoustique dans un milieu extérieur complexe. L'utilisation des images satellites à THRS permet d'identifier le moindre détail sur le territoire d'étude afin de collecter toutes les propriétés acoustiques des différentes composantes environnementales présentes sur le milieu dans le but de réaliser la modélisation de la propagation de l'onde acoustique la plus proche de la réalité.

Bibliographies

- Abdmouleh, M., et Dahech, S. (2014). Répartition spatiale de la pollution sonore dans l'agglomération de Sfax de la mesure à la modélisation. Faculté des Lettres et Sciences Humaines de Sfax, Tunisie, Laboratoire SYFACTE .
- Achbun, A., Mansour, M., Layelmam, M., et Smiej, F. (2011). Etude comparative de la classification orientée objet d'une image spot5 pour la cartographie de l'occupation du sol via eCognition 9. GEO OBSERVATEUR, 1-13.
- Alonso-Benito, A., Arroyo, L. A., Arbelo, M., Hernández-Leal, P., et González-Calvo, A. (2013). Pixel and object-based classification approaches for mapping forest fuel types in Tenerife Island from ASTER data. *International Journal of Wildland Fire*, 22, 306-317.
- Antoni, J. P., Klein, O., et Moisy, S. (2004). Cartographie interactive et multimédia: vers une aide à la réflexion géographique. *Cybergeog: European Journal of Geography* [En ligne]. <https://journals.openedition.org/cybergeog/2621?lang=en#citedby>. [Consulté le 19 juillet 2017].
- Attenborough, K. (2002). Sound propagation close to the ground. *Annual Review of Fluid Mechanics*, 34, 51-82.
- Baron, P. (1962). L'ambiance du travail. Problèmes posés par les bruits industriels. Paris, France, Presses universitaires de France, « Le Travail Humain », pp.217-250.
- Barrière, N., Gabillet, Y., et Defrance, J. (2000). La forêt : Un écran anti-bruit météorologique. 1ère partie: Une nouvelle méthode de calcul de la propagation du bruit en forêt. *Acoustique et Technique*, 23, 41-48.
- Baume, O. (2007). Estimation de l'impact acoustique des infrastructures routières : la géostatistique appliquée à la propagation sonore à grande distance. XXVèmes rencontres universitaires de génie civil 2007 - PRIX RENE HOUPERT.
- Bernoux, M., Arrouays, D., Cerri, C., de Alencastro Graça, P. M., Volkoff, B., et Trichet, J. (1998). Estimation des stocks de carbone des sols du Rondônia (Amazonie brésilienne). *Etude et gestion des sols*, 5, 31-42.
- Bobbia, M., Pernelet, V., et Roth, C. (2016). L'intégration des informations indirectes à la cartographie géostatistique des polluants. *Pollution atmosphérique*, 170, 251-262.
- Bocher, E., Petit, G., Picaut, J., Fortin, N., et Guillaume, G. (2017). Collaborative noise data collected from smartphones. *Data in Brief*, 14, 498-503.
- Bolon, P., Chassery, J., Cocquerez, J., Demigny, D., Graffigne, C., Montanvert, Philippe, S., Zéboudj, R. et Zerubia. J. (1995). Analyse d'images : Filtrage et segmentation. MASSON, 457p.
- Brown, C. L., Reed, S. E., Dietz, M. S., et Frstrup, K. M. (2013). Detection and classification of motor vehicle noise in a forested landscape. *Environmental Management*, 52, 1262-1270.

- Caloz, R., et Collet, C. (2001). Précis de télédétection: traitements numériques d'images de télédétection. Presses de l'Université du Québec, 386p.
- Chen, Z., et Maher, C. (2004). Atmospheric Sound Propagation Considerations for the Birdstrike Project. Rapport, Montana State University.
- Chevret, P. (1994). Turbulence sur la propagation du son dans l'atmosphère. Thèse de doctorat. École centrale de Lyon, France, 185p.
- Chételat, J. (2009). La figuration cartographique de l'espace sonore. Images Re-Vues : Histoire, anthropologie et théorie de l'art, 7, 2-16.
- Cosens, S. E., et Falls, J. B. (1984). A comparison of sound propagation and song frequency in temperate marsh and grassland habitats. Behavioral Ecology and Sociobiology, 15, 161–170.
- Cotté, B. (2008). Propagation acoustique en milieu extérieur complexe: Problèmes spécifiques au ferroviaire dans le contexte des trains à grande vitesse. Thèse de doctorat. Ecole Centrale de Lyon, France, 215p.
- Crocq, M., (2009). Ondes du monde : Territoires sonores de l'écologie. Journal of environmental studies [En ligne]. <https://www.wildproject.org/journal/4-edito>. [Consulté le 18 mars 2017].
- Drapeau, L. (2000). Statistiques et Interpolations dans les SIG. Rapport, Centre I.RD Montpellier, France, 7p.
- Dubois, M. (1951). L'absorption des sons et ultrasons dans les gaz. Journal de Physique et le Radium, 12, 876-884.
- Eason, S. A. (2013). Strategic Noise Mapping with GIS for the Universitat Jaume I Smart Campus: best methodology practices. Mémoire de maîtrise (M. Sc.). Institute of New Imaging Systems, Universitat Jaume I, Castellon, Spain, 143p.
- Environnement et ressources naturelles Canada (2017). Rapport de données horaires pour le 12 juillet 2017 [En ligne]. http://climat.meteo.gc.ca/climate_data/hourly_data_f.html?hlyRange=1996-07-17%7C2018-03-17&dlyRange=1997-11-13%7C2018-03-17&mlyRange=%7C&StationID=27377&Prov=QC&urlExtension=_f.html&searchType=stnProx&optLimit=specDate&Month=7&Day=12&StartYear=2017&EndYear=2018&Year=2017&selRowPerPage=25&Line=1&txtRadius=25&optProxType=city&selCity=46%7C49%7C71%7C13%7CQu%C3%A9bec&selPark=&txtCentralLatDeg=&txtCentralLatMin=0&txtCentralLatSec=0&txtCentralLongDeg=&txtCentralLongMin=0&txtCentralLongSec=0&timeframe=1. [Consulté le 20 juillet 2017].
- Faure, O. (2014). Analyse numérique et expérimentale de la propagation acoustique extérieure : effets de sol en présence d'irrégularités de surface et méthodes temporelles. Thèse de doctorat. Ecole Centrale de Lyon, France, 163p.
- Frappart, F. (2006). Développement d'applications pour l'utilisation de la télédétection sur les grands bassins fluviaux. Thèse de doctorat. Université Toulouse III- PAUL SABATIER, 284p.

- Gage, S., Ummadi, P., et Shortridge, A. (2004). Using GIS to Develop a Network of Acoustic Environmental Sensors. In: ESRI international user conference, 9-13 Aout, San Diego, CA.
- Geisler, E. (2011). Élaboration d'une méthode de qualification du paysage sonore. Le cas des quartiers durables allemands Kronsberg et Vauban. Thèse de doctorat. Institut des Sciences et Industries du Vivant et de l'Environnement (AgroParisTech), France, 493p.
- Golebiewski, R. (2007). Simple methods for determination of the acoustical properties of ground surfaces. *Archives of Acoustics*, 32, 827–837.
- Gratton, Y. (2002). Le krigeage: la méthode optimale d'interpolation spatiale. Rapport. Institut National de la Recherche Scientifique : INRS-eau-terre-environnement, Québec, Canada, 4p.
- Guastavino, C. (2003). Étude sémantique et acoustique de la perception des basses fréquences dans l'environnement sonore urbain. Thèse de doctorat. Université Paris 6, France, 245p.
- Hong, J. Y., et Jeon, J. Y. (2016). Exploring spatial relationships among soundscape variables in urban areas: A spatial statistical modelling approach. *Landscape and Urban Planning*, 157, 352-364.
- ISO 9613-2, (1996). Acoustics-Attenuation of sound propagation outdoors. Part 2: General method of calculation. World Health Organization. Geneva: International Organization for Standardization.
- Joly, D., Brossard, T., Cardot, H., Cavailhès, J., Hilal, M., et Wavresky, P. (2008). Interpolation par recherche d'information locale. *Climatologie*, 5, 27-47.
- Kim, M. J., Yang, H. S., et Kang, J. (2014). A case study on controlling sound fields in a courtyard by landscape designs. *Landscape and Urban Planning*, 123, 10-20.
- Kinsler, L. E., Frey, A. R., Coppens, A. B., et Sanders, J. V. (1999). Fundamentals of acoustics. *Fundamentals of Acoustics*, 4th Edition. Jhon Wiley & Sons, 560p.
- Klæboe, R., Engeliën, E., et Steinnes, M. (2006). Context sensitive noise impact mapping. *Applied Acoustics*, 67, 620-642.
- Leroy, O. (2010). Estimation des incertitudes pour la propagation acoustique en milieu extérieur. Thèse de doctorat. Ecole doctorale Sciences pour l'Ingénieur, Géosciences, Architecture, Centrale de Nantes, France, 187p.
- Liu, J., Kang, J., Luo, T., Behm, H., et Coppack, T. (2013). Spatiotemporal variability of soundscapes in a multiple functional urban area. *Landscape and Urban Planning*, 115, 1-9.
- Martin, M., Deshaies, P., et Maurice, P. (2015). Avis sur une politique québécoise de lutte au bruit environnemental : pour des environnements sonores sains. Rapport, INSPQ, 11-25, 267 p.
- Matsinos, Y. G., Mazaris, A. D., Papadimitriou, K. D., Mniestris, A., Hatzigiannidis, G., Maioglou, D., et Pantis, J. D. (2008). Spatio-temporal variability in human and natural sounds in a rural landscape. *Landscape Ecology*, 23, 945–959.

- Minard, A., Lemaitre, G., Boussard, C., et Lambourg, P. (2014). Synthèse de bruits de passage d'avion dans le cadre du projet PARASOFT. 12ème Congrès Français d'Acoustique, 22-25 avril, Université de Poitiers, France.
- Murphy, E., et King, E. A. (2016). Science of the Total Environment Smartphone-based noise mapping: Integrating sound level meter app data into the strategic noise mapping process. *Science of the Total Environment*, 562, 852- 859.
- Öhlund, O., et Larsson, C. (2015). Meteorological effects on wind turbine sound propagation. *Applied Acoustics*, 89, 34-41.
- Oliveira, A. P. (2012). The effect of wind and turbulence on sound propagation in the atmosphere. Mémoire de maîtrise (M. Sc.). Université technique de Lisbonne, Portugal, 106p.
- OSM, (2017). OpenStreetMap. [En ligne]. <https://www.openstreetmap.org/about> [Consulté le 3 janvier 2017].
- Papadimitriou, K. D., Mazaris, A. D., Kallimanis, A. S., et Pantis, J. D. (2009). Cartographic Representation of the Sonic Environment. *The Cartographic Journal*, 46(2), 126–135.
- Picaut, J. (2005). Application numérique du concept de particules sonores à la modélisation des champs sonores en acoustique architecturale. Rapport, Centre Nantes, France, 30p.
- Picaut, J., Guillaume, G., et Dutilleul, G. (2012). Ambiances sonores urbaines et interaction ville-bâtiment. *RéférenceS*, 34-50.
- Pijanowski, B. C., Villanueva-Rivera, L. J., Dumyahn, S. L., Farina, A., Krause, B. L., Napoletano, B. M., Pieretti, N. (2011). Soundscape Ecology: The Science of Sound in the Landscape. *BioScience*, 61(3), 203-216.
- Potel, C., et Bruneau, M. (2006). Acoustique Générale, équations différentielles et intégrales, solutions en milieux fluide et solide, applications. Ellipse collection Technosup, 352p.
- Raichel, D. R. (2003). *The Science and Applications of Acoustics*. Springer Science & Business Media, 598p.
- Reed, S. E., Boggs, J. L., et Mann, J. P. (2012). A GIS tool for modeling anthropogenic noise propagation in natural ecosystems. *Environmental Modelling and Software*, 37, 1–5.
- Renaud, P., Métivier, J. M., Castelier, E., Pourcelot, L., et Louvat, D. (2004). Cartographie des dépôts de 137 Cs en mai 1986 sur l'ensemble du territoire français métropolitain. *Radioprotection*, 39, 23-38.
- Roulier, F. (1999). Pour une géographie des milieux sonores. *Cybergeog: European Journal of Geography, Environnement, Nature, Paysage* [En ligne]. <https://journals.openedition.org/cybergeog/5034>. [Consulté le 5 février 2017].
- Sahlin, P. J. (2014). Modélisation et interpolation spatiale 3D pour l'étude de l'écosystème pélagique marin. Mémoire de maîtrise (M. Sc.). Université Laval, 105p.
- Schaefer, P. (2010). Décibel Ultra. [En ligne]. <https://itunes.apple.com/app/decibel-ultra/id410139517>. [Consultée le 5 juin 2018].

- Sheeren, D., Lefèvre, S., et Weber, J. (2007). La morphologie mathématique binaire pour l'extraction automatique des bâtiments dans les images THRS. *Revue internationale de géomatique*, 17, 333-352.
- Shi, X., et Xue, B. (2017). Parallelizing maximum likelihood classification on computer cluster and graphics processing unit for supervised image classification. *International Journal of Digital Earth*, 10, 737-748.
- Skupinski, G., Tran, B. D. et Weber, C. (2009). Les images satellites Spot multi-dates et la métrique spatiale dans l'étude du changement urbain et suburbain : Le cas de la basse vallée de la Bruche (Bas-Rhin, France). *Cybergeo : European Journal of Geography, Systèmes, Modélisation, Géostatistiques* [En ligne]. <https://journals.openedition.org/cybergeo/21995>. [Consulté le 15 septembre 2017].
- Smith, M. (2016). La cloche dans le paysage sonore du roman arthurien français médiéval. Thèse de doctorat. Honors Thesis Collection, 92p.
- Southworth, M. F. (1967). The sonic environment of cities. Mémoire de maîtrise (M.Sc.). University de Minnesota, USA, 94p.
- Sparfel, L., Gourmelon, F., et Berre, I. Le. (2008). Approche orientée-objet de l'occupation des sols en zone côtière. *Revue Télédétection*, 8, 237-256.
- Sueur, J., et Farina, A. (2015). Ecoacoustics: The Ecological Investigation and Interpretation of Environmental Sound. *Biosemiotics*, 8, 493-502.
- Woloszyn, P. (2012). Du paysage sonore aux sonotopes. Territorialisation du sonore et construction identitaire d'un quartier d'habitat social. *Communications*, 90, 53-62.
- Yang, H. S., Kang, J., et Cheal, C. (2013). Random-incidence absorption and scattering coefficients of vegetation. *Acta Acustica united with Acustica*, 99, 379-388.
- Zhou, W., et Troy, A. (2008). An object-oriented approach for analysing and characterizing urban landscape at the parcel level. *International Journal of Remote Sensing*, 29, 3119-3135.

Annexe (A)

**Tableau -1- Les propriétés physiques des solides
(Kinsler *et al.*, 1999)**

Solid	Density, ρ (kg/ m ³)	Young's Modulus, E (Gpa)	Shear Modulus, G (Gpa)	Poisson's Ratio, ν	Speed, c (m/s)	Characteristic Impedance, $\rho_0 c$ 10 ⁶ ×Pa.s/m
Aluminum	2,700	71	24	0,33	5150	13,9
Brass	8,500	104	38	0,37	3500	29,8
Copper	8,900	122	44	0,35	3700	33,0
Iron (cast)	7,700	105	44	0,28	3700	28,5
Lead	11,300	16.5	5,5	0,44	1200	13,6
Nickel	8,800	210	80	0,31	4900	43,0
Silver	11,300	78	28	0,37	2700	28,4
steel	7,700	195	83	0,28	5050	39,0
Glass (Pyrex)	2,300	62	25	0,24	5200	12,0
Quartz (X-cut)	2,650	79	39	0,33	5450	14,5
Lucite	1,200	4	1,4	0,4	1800	2,15
Concrete	2,600	-	-	-	-	-
Ice	920	-	-	-	-	-
Cork	240	-	-	-	-	-
Wood, oak	720	-	-	-	-	-
Wood, pine	450	-	1	0,4	1450	1,6
Hard rubber	1,100	2.3	-	0,5	70	0,065
Soft rubber	950	0,005	-	-	-	-
Rubber, $\rho. c$	1,000	-	-	-	-	-

**Tableau -2- Les propriétés physiques des liquides
(Kinsler *et al.*, 1999)**

Liquide	Temperature (°C)	Density, ρ_0 (kg/m ³)	Bulk Modulus, B (Gpa)	Ratio of Specific Heats, γ	Speed (m/s)	Characteristic Impedance, ρ_0/c 10 ⁶ (Pa.s/m)	Coefficient Shear viscosity, η (Pa.s)
Alcohol (ethyl)	20	790	-	-	1150	0,91	0,0012
Castor oil	20	950	-	-	1540	1,45	0,96
Glycerine	20	1,260	-	-	1980	2,5	1,2
Mercury	20	13,600	25,3	1,13	1450	19,7	0,0016
Seawater	10	1,026	2,28	1,01	1500	1,54	0,001
Turpentine	13	870	1,07	1,27	1250	1,11	0,0015
Water (fresh)	20	998	2,18	1,004	1481	1,48	0,001
Fluid-like sea bottoms							
Red clay	-	1,340	-	-	1460	1,96	
Calcareous ooze	-	1,570	-	-	1470	2,31	
Coarse silt	-	1,790	-	-	1540	2,76	
Quartz sand	-	2,070	-	-	1730	3,58	

**Tableau -3- Les propriétés physiques des gaz
(Kinsler *et al.*, 1999)**

Gas	Temperature (°C)	Density, ρ_0 (kg/m ³)	Ratio of Specific Heats, γ	Speed (m/s)	Characteristic Impedance, $\rho_0 \cdot c$ (Pa.s/m)	Coefficient of Shear viscosity, η (Pa.s)
Air	0	1,293	1,402	331,6	428	0,000017
Air	20	1,21	1,402	343	415	0,0000181
Hydrogen	0	0,09	1,41	1269,5	114	0,0000088
CO ₂ (low-frequency)	0	1,98	1,304	258	512	0,0000145
CO ₂ (high-frequency)	0	1,98	1,40	268,6	532	0,0000145
Oxygen	0	1,43	1,40	317,2	453	0,00002
Steam	100	0,6	1,324	404,8	242	0,000013

Annexe (B)

Tableau (1): Le coefficient d'atténuation atmosphérique α pour les bandes d'octave (ISO 9613-2, 1996)

Temperature (°C)	Relative Humidity %	Atmospheric attenuation coefficient α , dB/km							
		Nominal midband frequency, Hz							
		63	125	250	500	1 000	2 000	4 000	8 000
10	70	0,1	0,4	1,0	1,9	3,7	9,7	32,8	117
20	70	0,1	0,3	1,1	2,8	5,0	9,0	22,9	76,6
30	70	0,1	0,3	1,0	3,1	7,4	12,7	23,1	59,3
15	20	0,1	0,6	1,2	2,7	8,2	28,2	88,8	202
15	50	0,1	0,5	1,2	2,2	4,2	10,8	36,2	129
15	80	0,1	0,3	1,1	2,4	4,1	8,3	23,7	82,8

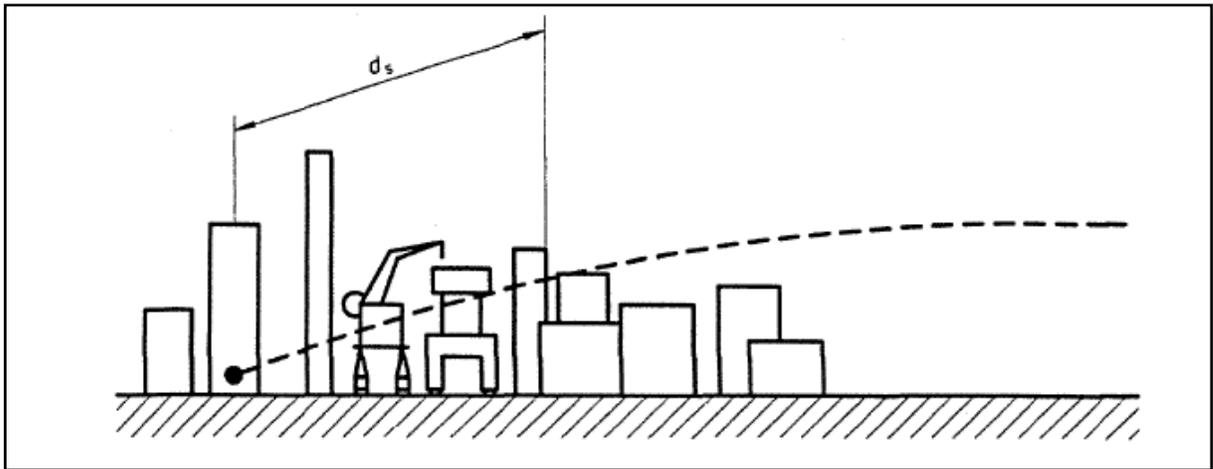


Figure (1): L'atténuation A_{site} augmente linéairement avec la distance de propagation d_s à travers les installations industrielles (ISO 9613-2, 1996).

Tableau (2): Le coefficient d'atténuation d'un bruit par bande d'octave lors de la propagation à travers les installations industrielles (ISO 9613-2, 1996)

Nominal midband frequency, Hz	63	125	250	500	1 000	2 000	4 000	8 000
A_{site} , dB/m	0	0,015	0,025	0,025	0,02	0,02	0,015	0,015

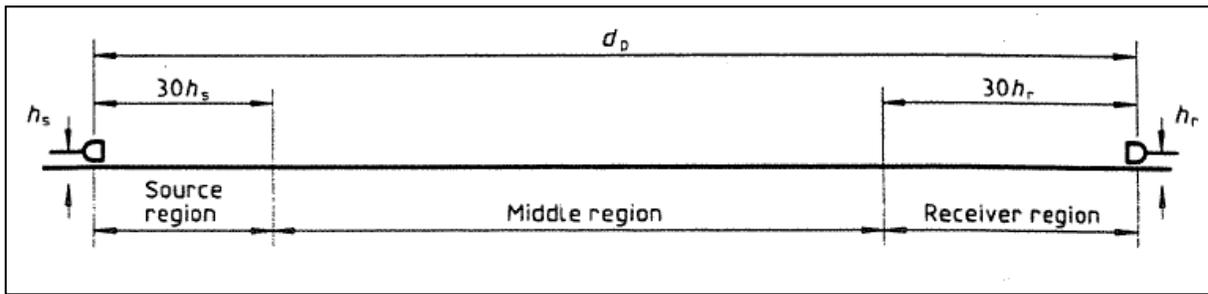


Figure (2): Les trois régions distinctes pour la détermination de l'atténuation du sol (ISO 9613-2, 1996)

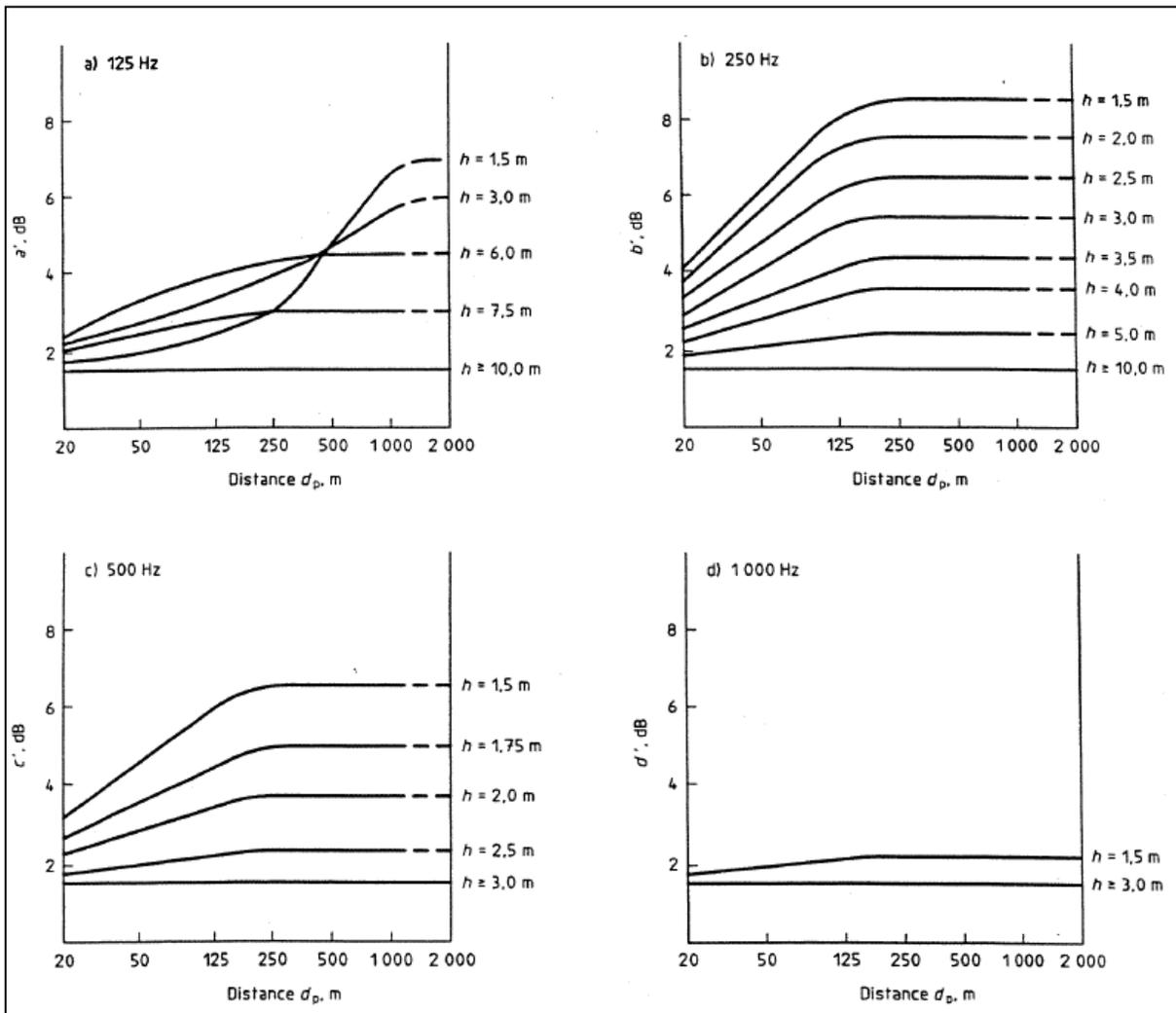


Figure (3): Les fonctions a', b', c' et d' qui représentent l'influence de la distance source-récepteur (d_p) et de la hauteur de la source (h_s) ou du récepteur (h_r) sur l'atténuation du sol A (calculée à partir des équations du tableau 3)

(ISO 9613-2, 1996)

Tableau (3): Expressions à utiliser pour calculer les contributions d'atténuation du sol A_s , A_r et A_m en bandes d'octave (ISO 9613-2, 1996)

Nominal midband frequency Hz	A_s or A_r ¹⁾ dB	A_m dB
63	-1,5	$-3q$ ²⁾
125	$-1,5 + G \times a'(h)$	$-3q(1-G_m)$
250	$-1,5 + G \times b'(h)$	
500	$-1,5 + G \times c'(h)$	
1 000	$-1,5 + G \times d'(h)$	
2 000	$-1,5(1-G)$	
4 000	$-1,5(1-G)$	
8 000	$-1,5(1-G)$	

NOTES

$a'(h) = 1,5 + 3,0 \times e^{-0,12(h-5)^2} (1 - e^{-\frac{d_p}{50}}) + 5,7 \times e^{-0,09h^2} (1 - e^{-2,8 \times 10^{-6} \times d_p^2})$
 $b'(h) = 1,5 + 8,6 \times e^{-0,09h^2} (1 - e^{-\frac{d_p}{50}})$
 $c'(h) = 1,5 + 14,0 \times e^{-0,46h^2} (1 - e^{-\frac{d_p}{50}})$
 $d'(h) = 1,5 + 5,0 \times e^{-0,9h^2} (1 - e^{-\frac{d_p}{50}})$

1) For calculating A_s , take $G = G_s$ and $h = h_s$. For calculating A_r , take $G = G_r$ and $h = h_r$. See 7.3.1 for values of G for various ground surfaces.
 2) $q = 0$ when $d_p \leq 30(h_s + h_r)$
 $q = 1 - \frac{30(h_s + h_r)}{d_p}$ when $d_p > 30(h_s + h_r)$
 Where d_p is the source-to-receiver distance, in meters, projected onto the ground planes.

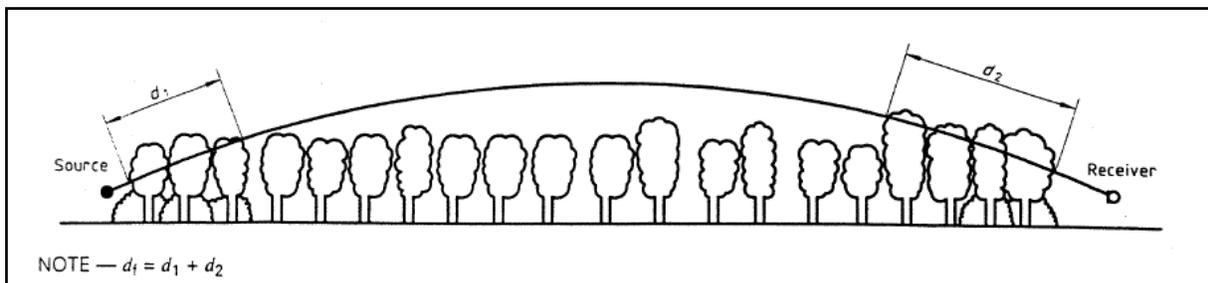


Figure (4): L'atténuation due à la propagation dans le feuillage augmente linéairement avec la distance de propagation d_f dans le feuillage (ISO 9613-2, 1996)

Tableau (4): L'atténuation du bruit au niveau d'une bande d'octave due à la propagation d'une distance d_f à travers un feuillage dense (ISO 9613-2, 1996)

Temperature (°C)	Relative Humidity %	Nominal midband frequency, Hz							
		63	125	250	500	1 000	2 000	4 000	8 000
$10 \leq d_f \leq 20$		Attenuation, dB:							
		0	0	1	1	1	1	2	3
$20 \leq d_f \leq 200$		Attenuation, dB/m:							
		0,02	0,03	0,04	0,05	0,06	0,08	0,09	0,12

Annexe (C)

Tableau (1): Les conditions atmosphériques correspondant au jour de captation du son d'autobus sur le campus de l'Université Laval tirées d'Environnement et ressources naturelles Canada (2017)

Année	Mois	Jour	Heure	Température (°C)	Humidité relative (%)	Vitesse du vent (km/h)
2017	7	12	0:00	18.5	15.6	5
2017	7	12	1:00	17.8	15.2	4
2017	7	12	2:00	17.4	14.9	4
2017	7	12	3:00	16.5	14.6	5
2017	7	12	4:00	15.8	10.3	7
2017	7	12	5:00	14.5	9.3	4
2017	7	12	6:00	14.6	8.7	6
2017	7	12	7:00	14.4	7.2	10
2017	7	12	8:00	14.8	7.3	6
2017	7	12	9:00	15.0	8.2	6
2017	7	12	10:00	15.3	8.3	6
2017	7	12	11:00	16.9	9.7	4
2017	7	12	12:00	16.5	8.3	7
2017	7	12	13:00	17.5	10.3	9
2017	7	12	14:00	17.9	10.1	8
2017	7	12	15:00	18.0	10.8	11
2017	7	12	16:00	19.4	11.6	10
2017	7	12	17:00	18.9	10.6	9
2017	7	12	18:00	18.4	10.0	9
2017	7	12	19:00	18.3	11.8	6
2017	7	12	20:00	17.8	11.5	9
2017	7	12	21:00	17.2	11.8	3
2017	7	12	22:00	16.7	12.0	2
2017	7	12	23:00	16.5	12.4	4