



HAL
open science

Exploitation de la base de données expérimentale de la 'Station de Long Terme' pour la classification des conditions de propagation acoustique

Benoit Gauvreau, Manuel Bellanger, Bernard Bonhomme, Hervé Poirier

► **To cite this version:**

Benoit Gauvreau, Manuel Bellanger, Bernard Bonhomme, Hervé Poirier. Exploitation de la base de données expérimentale de la 'Station de Long Terme' pour la classification des conditions de propagation acoustique. 10ème Congrès Français d'Acoustique, Apr 2010, Lyon, France. hal-00542600

HAL Id: hal-00542600

<https://hal.science/hal-00542600v1>

Submitted on 3 Dec 2010

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

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

10ème Congrès Français d'Acoustique

Lyon, 12-16 Avril 2010

Exploitation de la base de données expérimentale de la "Station de Long Terme" pour la classification des conditions de propagation acoustique

Benoit Gauvreau¹, Manuel Bellanger¹, Bernard Bonhomme², Hervé Poirier³

¹Laboratoire Central des Ponts et Chaussées, Route de Bouaye, 44341 Bougenais Cedex, France
benoit.gauvreau@lcpc.fr, manuel.bellanger@orange.fr

²Laboratoire Régional des Ponts et Chaussées, 11 rue Laplace, 41000 Blois, France
bernard.bonhomme@developpement-durable.gouv.fr

³Centre d'Etudes et de Construction de Prototypes, 2Bis av Général Foy, 49100 Angers
herve.poirier@developpement-durable.gouv.fr

On utilise ici les données expérimentales issues du site expérimental permanent du LCPC : la Station de Long Terme (SLT). Après avoir brièvement rappelé les modalités d'acquisition et de validation de ces données pour la constitution d'une base de données robuste de référence, on présente une exploitation de ces données pour la classification des conditions de propagation acoustique. Cette étude statistique, basée sur l'algorithme des "k-means", est menée de manière à mettre en exergue les problèmes de représentativité spatiale et temporelle des conditions atmosphériques et des niveaux sonores. Du point de vue spatial, on met ainsi en évidence un "effet de site local" en comparant les classifications obtenues en des points distincts du site. Du point de vue temporel, les données de la SLT, relevées sur le "long terme" i.e. sur la période 2002-2007, soulèvent le problème de la classification des régimes de propagation en regard des préconisations normatives, en particulier les difficultés pour y appliquer la grille UiTi.

1 Introduction

L'influence combinée des effets micrométéorologiques et des effets de sol conduit à une grande dispersion des niveaux sonores à grande distance d'une source sonore à l'étude. Ces effets varient sur des échelles de temps très variables et leur influence relative sur le champ acoustique dépend fortement de la configuration géométrique étudiée, des caractéristiques de sol et du milieu de propagation traversé.

Afin d'évaluer cette dispersion sur les prévisions des niveaux sonores, il existe un certain nombre de méthodes numériques et analytiques, plus ou moins sensibles aux paramètres d'entrée (observables influentes). Parmi ces observables, les conditions micrométéorologiques présentent des variations à la fois spatiales ("effet de site") et temporelles, ces dernières étant pour une part déterministes et donc aisément modélisables (notion de moyen et long terme pour la "réfraction moyenne"), et pour une autre part stochastiques et plus difficilement prises en compte dans les modèles (notion de court terme pour la "turbulence atmosphérique") [1]. A ces considérations physiques doivent s'ajouter les incertitudes numériques [2] et expérimentales (métrologiques) [3].

En considérant la propagation sonore comme un phénomène pleinement aléatoire dans le temps et dans l'espace, un traitement statistique particulier basé sur la Géostatistique est réalisable [4]. Les méthodes géostatistiques sont d'un grand intérêt dès que l'on considère un phénomène variable spatialement. Elles sont justifiées à la fois d'un point de vue théorique (cadre probabiliste de l'interpolation) et d'un point de vue pratique (interprétation physique des cartes face à la modélisation de la structure du phénomène). Plus récemment, une autre

approche statistique à été développée afin de quantifier globalement la dispersion des niveaux sonores à l'aide de la "calibration sous incertitudes", qui permet de prendre en compte la variabilité physique, ainsi que les incertitudes associées aux modèles et aux mesures [5].

L'approche statistique présentée ici est différente : il s'agit d'utiliser l'algorithme des "k-means" puis les outils d'analyse en composantes principales (ACP) pour représenter graphiquement la classification des conditions de propagation acoustique en milieu extérieur. L'intérêt particulier de cette étude, menée dans le cadre du stage Master 2 de M. Bellanger au LCPC [6], tient dans l'importante base de données expérimentale utilisée, i.e. celle issue du site expérimental permanent du LCPC : la Station de Long Terme (SLT) [7].

La Section 2 décrira brièvement ce site expérimental, ainsi que les opérations effectuées sur les données (acquisition, traitement, validation) avant leur analyse. La Section 3 abordera les outils statistiques utilisés, puis la Section 4 présentera les résultats d'analyse.

2 Site expérimental du LCPC

2.1 Présentation

La Station de Long Terme (SLT) a été mise en place dans l'objectif d'appréhender les phénomènes physiques relatifs au domaine de l'acoustique environnementale. Cette thématique de recherche présente des verrous scientifiques encore importants malgré l'intérêt que lui porte la communauté scientifique internationale et les moyens qu'elle lui consacre depuis quelques dizaines d'années.

L'intérêt de l'installation d'un tel site d'observation en continu (« monitoring ») pendant une longue période (10 ans) est de pouvoir quantifier l'effet des observables influentes (topographie du terrain, caractéristiques de sol, humidité, pluviométrie, *etc.*) sur la variabilité d'un champ acoustique à l'échelle locale (celle du site). Les travaux de recherche portent autant sur l'aspect spatial (effet de site) que sur l'aspect temporel (court/long terme), dans l'objectif d'accéder à l'estimation de la *variabilité et de la représentativité spatio-temporelle* de l'ensemble des grandeurs d'intérêt sur un site quelconque à court, moyen et long terme. En outre, les données expérimentales issues de ce site permettent de valider les modèles numériques de référence – acoustiques ET micrométéorologiques – développés par le LCPC et ses partenaires scientifiques.

Ce site expérimental a fait l'objet d'une Opération de Développement (OD) du LCPC, mise en place en 1999 et achevée en 2001. Un certain nombre d'évolutions matérielles et logicielles ont eu lieu en 2008. La période d'observation considérée dans ce papier est donc 2002-2007 (6 ans). La Figure 1 et la Figure 2 présentent de façon schématique les principales caractéristiques du site et la disposition des différents équipements [7].

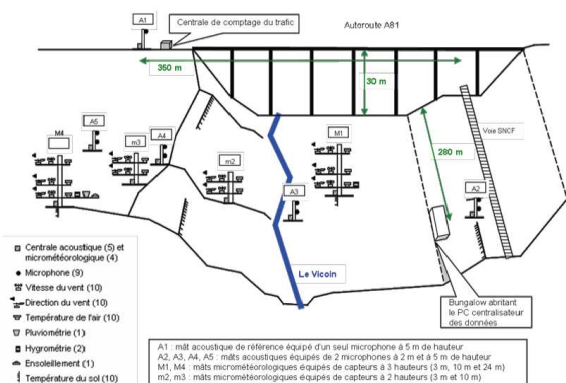


Figure 1 : Station de Long Terme – Représentation schématique

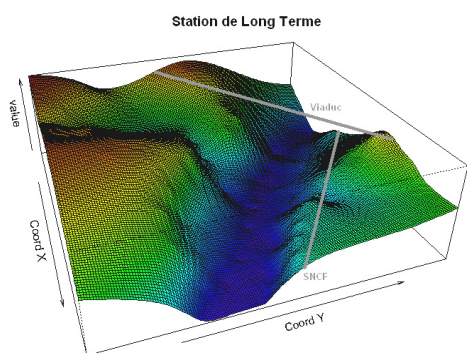


Figure 2 : Station de Long Terme – Représentation topographique

2.2 Acquisition

Les données recueillies consistent en une acquisition permanente (« monitoring ») sur une longue période (de l'ordre de 10 ans) avec un échantillonnage temporel relativement élevé (10 secondes). Ceci concerne les grandeurs acoustiques (niveau global, 1/1 octave, *etc.*) et

micrométéorologiques (vitesse et direction du vent, température de l'air et du sol, pluviométrie, solarimétrie, *etc.*) en plusieurs points du site : 5 mâts acoustiques de 5m (2 hauteurs de capteurs), 2 mâts météo de 25m (3 hauteurs de capteurs) et 2 mâts météo de 10m (2 hauteurs de capteurs). Parallèlement, une station de comptage de trafic routier est également en fonctionnement 24h/24 et 365 j/an sur le site. La station de comptage de trafic a été adaptée à la problématique concernée. Elle permet, à l'aide de deux boucles électroacoustiques et d'un capteur piézoélectrique par voie, de discriminer 14 types de véhicules (poids, longueur, nombre d'essieux), d'indiquer la voie concernée par le véhicule, d'associer l'horodatage précis à chaque véhicule et de fournir la vitesse de passage de chaque véhicule. Ces données sont ensuite concaténées pour chaque échantillon de 10s, donnant accès aux informations suivantes (pour chaque voie) : nombre de véhicules légers, nombre de poids lourds et vitesses moyennes respectives.

2.2 Traitement

L'ensemble des données expérimentales acoustiques et micrométéorologiques (échantillons 10s) est ensuite synchronisé et concaténé à l'aide d'un logiciel développé par le CCEP d'Angers, puis transféré par protocole ftp au LRPC de Blois, en charge de la validation des données. Ce post-traitement – qui a fait l'objet de différents stages et du développement d'un logiciel dédié – consiste en l'application de différents filtres, afin de détecter des dysfonctionnements de capteurs, des données erronées ou des événements sonores parasites (trains, avions, animaux, *etc.*). C'est la base de données ainsi "nettoyée" qui est ensuite utilisée pour reconstituer des échantillons temporels de périodes supérieures à 10 secondes, *e.g.* 15 minutes dans ce papier. Les présents travaux d'analyse statistique portent donc sur une base de données expérimentale *validée* et échantillonnée en *15min* sur la période 2002-2007 (6 ans).

2.3 Observables et paramètres influents

Afin de dégager des tendances nettes en termes de représentativité spatiale ("effet de site"), ce papier se focalise sur les données issues de 2 régions marquées du site, *i.e.* en fond de *vallée* (mât acoustique A3 et mât météo M1) et sur le *plateau* (mât acoustique A5 et mât météo M4).

Il convient de noter que les niveaux sonores aux mâts A3 et A5 sont exprimés en termes d'atténuation par rapport au microphone de référence A1, localisé très près de la voie routière (*Cf* Figure 1). Ceci permet de minimiser les effets propres à l'émission sonore (source non stationnaire : trafic cyclique, influence de la température, de l'état hydrique de chaussée, *etc.*). En outre, nous avons choisi de focaliser cette étude sur :

- les bandes d'octave centrées sur certaines fréquences caractéristiques du bruit routier (250Hz et 1kHz),
- une seule hauteur de mesure acoustique de 5m (après avoir vérifié que les résultats à 2m donnent des résultats statistiquement très proches – *Cf*[6]).

Concernant la météo, l'analyse a porté sur des paramètres estimés depuis les valeurs des observables thermiques (T) et aérodynamiques (V). Si l'on s'affranchit des effets de turbulence atmosphérique, alors on peut considérer l'expression approchée suivante pour le gradient moyen vertical de célérité $\langle c(z) \rangle$ [1] :

$$\frac{\partial \langle c(z) \rangle}{\partial z} \approx \frac{1}{2} \cdot \frac{\gamma \cdot R}{c_0} \cdot \frac{\partial \langle T(z) \rangle}{\partial z} + \frac{\partial \langle V(z) \rangle}{\partial z} \cdot \cos \alpha \quad (1)$$

où α est l'angle entre la direction du vent (mesuré à 10m, par exemple) et la direction de propagation θ (pour une source ponctuelle). Dans le cas du bruit routier (source linéique), en première approximation, la direction de propagation privilégiée est la perpendiculaire à la voie routière, soit ici au viaduc, *i.e.* $\theta \approx 320^\circ$ (Ref=Nord). Si l'on fait l'hypothèse de profils verticaux moyens du type "log" et indépendants de la distance pour le vent $\langle V(z) \rangle = a_v \cdot \ln(1 + z / z_0)$ et la température $\langle T(z) \rangle = a_t \cdot \ln(1 + z / z_0) + T_0$, où $z_0 = 0.01m$ est le paramètre de rugosité pour la SLT, l'expression (1) donne alors :

$$\frac{\partial \langle c(z) \rangle}{\partial z} \approx \frac{1}{2} \cdot \frac{\gamma \cdot R}{c_0} \cdot \frac{a_t}{z} + \frac{a_v}{z} \cdot \cos \alpha = \frac{1}{z} (a_{tp} + a_{vp}) = \frac{a_c}{z} \quad (2)$$

Il est alors possible de distinguer les contributions *relatives* des paramètres moyens de réfraction pour la température a_{tp} (où "p" = pondéré) et le vent a_{vp} (où "p" = projeté), exprimés en $m.s^{-1}$, tels que :

$$a_{tp} = \frac{1}{2} \cdot \frac{\gamma \cdot R}{c_0} \cdot a_t \quad (3)$$

$$a_{vp} = a_v \cdot \cos \alpha \quad (4)$$

3 Outils et méthodes statistiques

3.1 Exploration de la base de données "SLT"

La base de données sur laquelle porte la classification est constituée d'une population de 665 individus (lignes complètes d'échantillons acoustiques et micrométéorologiques – Cf Section 2.3), pour lesquels nous avons sélectionné 8 variables d'intérêt :

> 4 variables acoustiques :

- A3_250_5M : atténuation à 250 Hz en A3 à 5m (en dB) ;
- A3_1K0_5M : atténuation à 1 kHz en A3 à 5m (en dB) ;
- A5_250_5M : atténuation à 250 Hz en A5 à 5m (en dB) ;
- A5_1K0_5M : atténuation à 1 kHz en A5 à 5m (en dB) ;

> 4 variables micrométéorologiques (réfraction) :

- a_Vp_M1 : para. aérodyn. (projeté) en M1 (en $m.s^{-1}$) ;
- a_Tp_M1 : para. thermique (pondéré) en M1 (en $m.s^{-1}$) ;
- a_Vp_M4 : para. aérodyn. (projeté) en M4 (en $m.s^{-1}$) ;
- a_Tp_M4 : para. thermique (pondéré) en M4 (en $m.s^{-1}$).

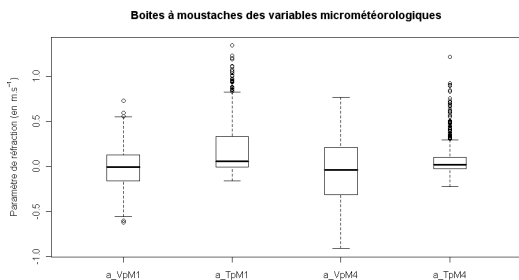


Figure 3 : visualisation des données expérimentales micrométéorologiques

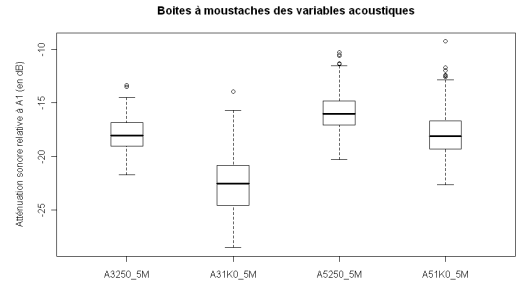


Figure 4 : visualisation des données expérimentales acoustiques

Les statistiques de base de ces données sont récapitulées dans [6], et les "boxplots" des différentes variables (météorologiques et acoustiques) sont respectivement présentés sur la

Figure 3 et la Figure 4. En ce qui concerne les données acoustiques, on vérifie que, pour chaque mât, l'atténuation sonore est plus grande à 1 kHz qu'à 250 Hz. En outre, l'effet de site est déjà aisément observable : les atténuations (moyenne et dispersion) sont plus élevées en A3 qu'en A5, pourtant équidistants de la source (viaduc). En ce qui concerne les paramètres micrométéorologiques, l'effet de site est très marqué, en particulier sur les différences de dispersion des valeurs entre M1 et M4. On observe également que les conditions de vent (paramètres a_{VpM1} et a_{VpM4}) sont bien réparties entre conditions favorables et conditions défavorables (Cf. roses des vents relativement homogènes dans [6]). A l'inverse, on remarque que les boxplots thermiques (a_{TpM1} et a_{TpM4}) sont très "penchés" et qu'il y a très peu de conditions défavorables pour la température. Enfin, la contribution relative des effets de température à la réfraction semble plus importante en M1 qu'en M4, traduisant là encore un effet de site local.

3.2 Stratégies et méthodes de classification

La classification consiste à regrouper les individus d'un échantillon en un nombre limité de classes (ou groupes) qui ne sont pas prédéfinies. Ces classes doivent réunir les individus ayant des caractéristiques similaires et séparer ceux ayant des caractéristiques différentes. Dans notre cas, on souhaite classifier les conditions de propagation acoustique (conditions micrométéorologiques) tout en tenant compte de l'atténuation sonore (variables acoustiques). La méthode de classification que nous appliquons est l'algorithme des "k-means". Plus précisément, l'algorithme utilisé est celui de Hartigan et Wong [8]. Il est considéré comme étant plus robuste que l'algorithme des "k-means" de base introduit par McQueen en 1967 [9]. Sans en donner le détail, rappelons simplement que l'algorithme des "k-means" cherche à minimiser la somme des carrés des distances au sein de chaque groupe. Le nombre de groupes doit être prédéfini, et chacun d'entre eux sont disposés autour d'un "centre mobile" qui est recalculé à chaque itération. La partition initiale peut être donnée par l'utilisateur, faute de quoi elle peut également être établie au hasard. L'algorithme a convergé lorsque la partition ne change plus.

Afin de déterminer le nombre de groupes et de se fixer la partition initiale, nous utilisons le dendrogramme avec le critère de Ward sur le même échantillon que pour la classification. Le dendrogramme de l'échantillon pour la classification en M1 est présenté sur la Figure 5. D'après celui-ci, nous avons choisis de classifier les individus en 4 groupes, bien que le dendrogramme avec les conditions météo en M4 soit sensiblement différent [6]. Notons que d'autres classifications, notamment avec 6 groupes, ont également été menées. Elles ne sont cependant pas exposées dans ce papier car leur intérêt s'est avéré être limité pour une telle source sonore (bruit routier, *i.e.* source linéique) et pour les distances de propagation considérées (de l'ordre de 300m).

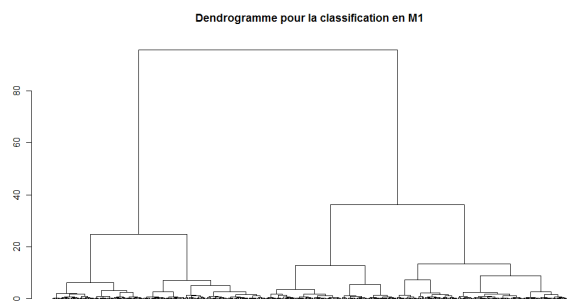


Figure 5 : dendrogramme utilisant le critère de Ward sur l'échantillon servant à la classification des données comprenant les conditions météo en M1

3.3 Poids et silhouettes

Pour chaque mât météo, chacune des classifications utilise donc 6 variables, dont 2 variables micrométéorologiques et 4 variables acoustiques. Pour la classification, il convient de centrer et réduire (c'est-à-dire diviser par l'écart-type) chaque variable afin de s'affranchir des unités et que leur variance soit identique. De plus, on souhaite donner un poids plus important aux variables micrométéorologiques qui sont moins nombreuses que les variables acoustiques. Pour cela, on multiplie chaque variable par un scalaire. Les poids ont été définis de sorte que l'ensemble des paramètres météo et l'ensemble des paramètres acoustiques aient la même pondération.

Enfin, étant donné le nombre important d'individus et l'utilisation future des classes que nous déterminons, il ne nous est pas nécessaire de conserver la totalité des individus d'un groupe issu de la classification. On souhaite en effet déterminer des conditions de propagation bien distinctes. Ainsi les individus dont l'indice d'appartenance à sa propre classe n'est pas satisfaisant peuvent être écartés de la partition finale. L'outil utilisé pour juger l'appartenance à une classe est la « silhouette » [10], et nous avons choisi de garder uniquement les individus dont la largeur de la silhouette est supérieure à une valeur seuil, à déterminer ultérieurement.

4 Résultats

4.1 Résultats dans le plan "météo"

Pour représenter graphiquement les résultats de la classification, il est courant de recourir à l'analyse en composantes principales (ACP). Le premier plan de l'ACP est en effet celui qui généralement permet de distinguer au mieux les différentes classes. Cependant, afin que les résultats de la classification soient plus facilement interprétables, nous avons représenté le nuage de points sur des plans ayant un sens physique au lieu des premiers plans de l'ACP. Dans ce paragraphe, notre analyse se concentre sur la classification utilisant les conditions météo mesurées en M1. Les résultats de la classification pour les conditions météo relevées en M4 sont présentés dans [6].

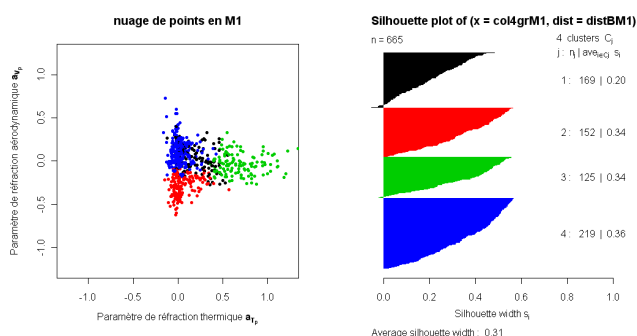


Figure 6 : représentation du nuage de points en fonction du paramètre de réfraction thermique pondéré (en $m.s^{-1}$) et du paramètre de réfraction aérodynamique (en $m.s^{-1}$) en M1(a) et graphique des silhouettes associé à la classification réalisée en utilisant les conditions météo en M1(b)

Nous avons tracé sur la Figure 6(a) le nuage de points projeté sur le plan des conditions météo. Ce plan est très utile pour classifier visuellement (*i.e.* sans outil statistique) les conditions de propagation. Le groupe vert correspond aux conditions de température favorables à la propagation avec des conditions de vent plutôt homogènes et le groupe rouge est constitué de conditions de vent défavorables avec des conditions de température plutôt homogènes. Les groupes les plus proches du point de vue météo sont les groupes noir et bleu ; tous deux correspondent à des situations favorables voire homogènes en vent et plutôt homogènes en température. Le groupe noir contient également quelques conditions légèrement favorables en température, ce qui n'est majoritairement pas le cas du groupe bleu.

Le graphique des silhouettes est tracé sur la Figure 6(b). La largeur moyenne des silhouettes est de 0.31. La classe la moins stable est la classe noire, avec une silhouette moyenne de 0.20. Les autres classes sont en moyenne plus stables, bien que chacune d'entre elles contienne des individus ayant une silhouette nulle ou presque nulle. Ces individus, qui peuvent être interprétés comme étant situés entre deux classes, ne nous posent pas problème. En effet, nous choisissons de conserver uniquement les individus dont la largeur de la silhouette est supérieure à 0.20. Le nuage de points projeté sur le plan des conditions météo en prenant en compte cette condition est tracé sur la Figure 7(a).

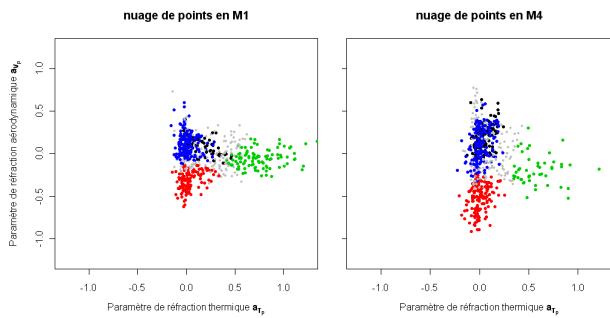


Figure 7 : représentation du nuage de points en fonction du paramètre de réfraction thermique pondéré (en m.s^{-1}) et du paramètre de réfraction aérodynamique (en m.s^{-1}) des individus pour lesquels la largeur de la silhouette est supérieure à 0.20, en M1 (a) et en M4 (b).

Les caractéristiques des groupes représentés sur la Figure 7(a) n'ont bien sûr pas évolué par rapport à la Figure 6(a), mais les points en gris correspondent aux individus ne satisfaisant pas la condition d'appartenance à une classe que nous avons fixée (largeur de silhouette > 0.2). Les groupes semblent alors effectivement se distinguer davantage les uns des autres, à l'exception des groupes noir et bleu, qui sont justement l'objet d'une attention particulière dans le paragraphe suivant.

La Figure 7(b) présente les résultats obtenus par la même technique en M4. On observe en M4 moins de conditions de température favorables à la propagation qu'en M1. De plus, l'étendue des valeurs du paramètre de réfraction aérodynamique est plus grande en M4 qu'en M1. Ceci a pour conséquence que les groupes noir et vert ont un paramètre de réfraction global a_c similaire en M4, ce qui n'est pas le cas en M1. Ces observations sont liées aux caractéristiques thermiques de chaque localisation (fond de vallée proche du ruisseau, plateau sans masse d'eau). D'autre part, les conditions de vent de travers sont plus nombreuses en M4 qu'en M1 (effet "canyon" en M1, dans l'axe de la vallée et donc dans l'axe de propagation). On remarque dans [6] que les individus satisfaisant les conditions de vent de travers en M4 s'apparentent à un groupe de conditions homogènes. Cependant, les niveaux sonores enregistrés sont très dispersés pour ces individus, ceci étant lié au fait que la source de bruit soit linéique. Les conditions de vent de travers sont donc à considérer avec prudence, notamment pour l'étude des conditions homogènes.

4.2 Résultats dans le plan "acoustique"

On s'intéresse sur la Figure 8 à l'atténuation sonore correspondante qui est représentée sur les 4 plans relatifs aux 4 variables acoustiques en fonction du paramètre de réfraction global $a_c = a_{Tp} + a_{Vp}$ (Cf Section 2), *i.e.* la valeur du gradient vertical de célérité calculée à 1m de hauteur (Cf Eq. (2)) sur le mât M1. La première remarque qui peut être faite est que la position relative des classes les unes par rapport aux autres ne varie pas ou très peu entre les mâts A5 et A3 et les bandes d'octave 1kHz et 250Hz. La seconde est que les deux classes qui se ressemblent le plus du point de vue météo (noire et bleu) sont celles qui se distinguent le

plus du point de vue atténuation sonore. Autrement dit, pour ces deux groupes, des conditions micrométéorologiques semblables correspondent à des atténuations sonores bien différentes. Le paragraphe suivant s'attache à expliquer par la physique les causes probables de ces différences.

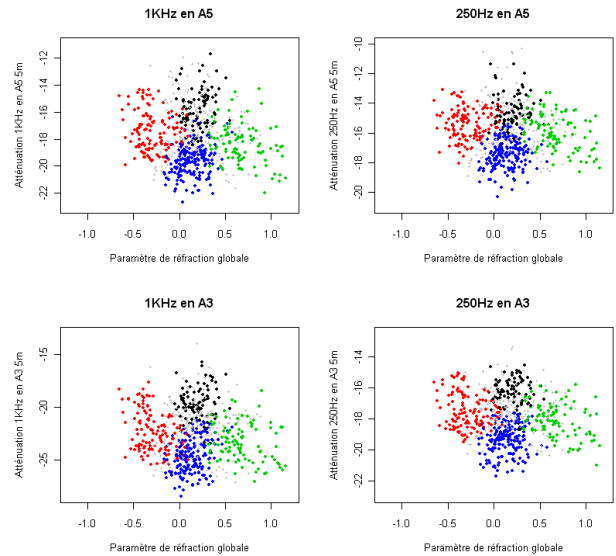


Figure 8 : atténuation sonore (en dB, relativement aux niveaux enregistrés en A1) aux mâts A5 et A3 pour les bandes d'octave 1kHz et 250 Hz en fonction du paramètre de réfraction globale (en m.s^{-1}). Classification en utilisant la météo de M1.

4.3 Discussion

Nous avons vu dans les résultats de la classification que des conditions de propagation similaires du point de vue météo peuvent correspondre à des situations acoustiques différentes. Deux familles de phénomènes physiques peuvent en être la cause : ceux liés à l'émission et ceux liés à la propagation.

> Emission

Les caractéristiques de la source de bruit sont des données essentielles pour l'analyse de la propagation acoustique à longue distance. Dans le cas d'une source de bruit routier, c'est le contact pneumatique/chaussée qui génère cette source à partir de 50km/h. Ainsi, nous savons par exemple que la température de la voie et son état hydrique sont des paramètres influents, tout comme les données de trafic (nombre de véhicules, pourcentage de poids lourds, vitesse moyenne, *etc.*). Nous nous intéressons ici au paramètre le plus influent, à savoir le nombre de véhicules. En-deçà de 200 véhicules par 15 minutes, le trafic ne peut pas être considéré comme étant homogène [11].

Des études complémentaires développées dans [6] montrent que :

- les données de trafic et de la météo ne sont pas corrélées. En effet, les données de trafic faible sont réparties de manière homogène sur le plan des conditions micro-météorologiques;
- les individus pour lesquels le trafic total est inférieur à 200 véhicules par minute correspondent majoritairement à des atténuations sonores plus faibles que la moyenne du nuage de points pour chaque octave

et chaque mât considérés. On vérifie que ces échantillons à faible trafic (qui conduisent donc à un faible rapport signal/bruit) sont plus nombreux en conditions favorables à la propagation, les autres ayant été filtrés lors des différents processus de validation (Cf Section 2.2).

> Propagation

i) Conditions du milieu de propagation

Les conditions du milieu dans lequel se propagent les ondes sonores sont précisément l'objet de notre classification. Cependant, certains paramètres n'ont pas été directement pris en compte dans notre étude. On sait par exemple que les données de turbulence atmosphérique seraient nécessaires pour cette analyse des phénomènes propagatifs. Malheureusement, les capteurs dédiés à leur mesure sur le site de la SLT ont été mis en place après 2007 et par conséquent elles ne sont pas disponibles. D'autre part, la direction moyenne du vent n'intervient dans notre classification que lorsque l'on projette le coefficient de réfraction aérodynamique sur cette direction (notion de "célérité effective"). Néanmoins, le fait que nous soyons en présence d'une source de bruit linéique (autoroute+viaduc) confère à la direction de vent une importance toute particulière, notamment lorsque celle-ci est perpendiculaire à l'axe de propagation principal (cet axe est la perpendiculaire à la route passant par le récepteur à l'étude). On observe ainsi que les conditions de vent de travers correspondent à des situations acoustiques diverses. En effet, pour chaque bande d'octave et chaque mât, on constate à la fois des atténuations sonores faibles et fortes pour ces conditions. Etant donné les difficultés d'interprétation des conditions de propagation pour une source linéique lorsque l'on est en présence d'un vent de travers, il peut être envisagé de considérer une classification où l'on aurait supprimé de l'échantillon ces individus [6].

ii) Frontières du milieu de propagation

La propagation acoustique à grande distance est également influencée par les frontières du milieu, c'est-à-dire les caractéristiques de sol (e.g. la résistance spécifique au passage de l'air du sol, le paramètre d'épaisseur, etc.). Il est difficile de rendre compte de ces caractéristiques avec précision. Néanmoins, nous avons pu observer des tendances saisonnières [6]. Il paraît donc naturel d'envisager la classification sous l'angle de la saisonnalité : on observe alors que les conditions de température défavorables à la propagation correspondent principalement à des individus issus des saisons d'été et d'équinoxe. On observe également que les individus provenant de l'hiver sont généralement situés parmi les atténuations les plus faibles. En particulier, le groupe bleu ne contient que très peu d'éléments appartenant à l'hiver. A l'inverse, le groupe noir ne contient pas d'individus issus de l'été. La saisonnalité et donc les conditions de sol peuvent permettre d'expliquer partiellement le fait que des conditions météo similaires peuvent correspondre à des atténuations acoustiques très différentes [6].

4.4 Analyse en regard des pratiques normatives (UiTi)

A ce stade de l'étude, il est intéressant de comparer notre classification avec celle proposée par V. Zouboff [12][13][14], méthode actuellement intégrée dans les

documents normatifs idoines [11][15] et largement utilisée dans la communauté des acousticiens de l'environnement. Ainsi, la Figure 9 représente les conditions micro-météorologiques de nos échantillons (paramètres de réfractions aérodynamique et thermique) superposées aux classes de la grille UiTi.

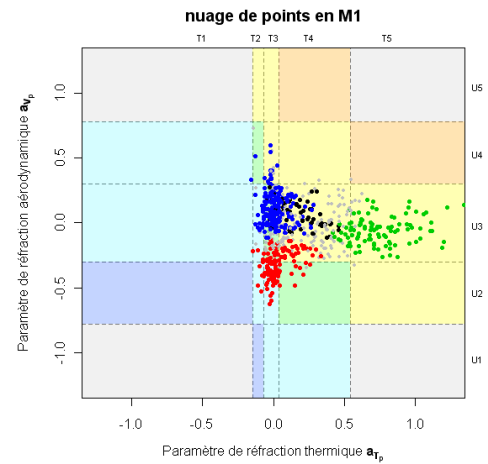


Figure 9 : représentation du nuage de points en fonction du paramètre de réfraction thermique pondéré (en $m.s^{-1}$) et du paramètre de réfraction aérodynamique (en $m.s^{-1}$) en M1, avec indications sur les classes UiTi

La Figure 9 fait clairement apparaître les limites de la grille UiTi telle qu'elle est pratiquée aujourd'hui : certaines populations (e.g. points bleus) chevauchent plusieurs classes de température T_i (e.g. T2, T3, T4) qui semblent trop proches les unes des autres; à l'inverse, certaines classes UiTi (e.g. U4T4) semblent trop étendues, avec un très faible nombre d'échantillons présents malgré les conditions de propagation favorables (et donc a priori en présence d'un bon rapport S/B, et donc d'un grand nombre d'échantillons). Ces considérations viennent confirmer la nécessité de poursuivre les travaux de recherche dans ce domaine [16][17], puis de les valoriser en les intégrant dans les documents normatifs afférents [15].

5 Conclusions et perspectives

La classification des régimes de propagation est généralement réalisée en définissant des critères sur les gradients verticaux de vent et de température. L'approche que nous avons retenue est différente : nous intégrons ici l'atténuation sonore pour caractériser les conditions de propagation. Les classes ont été déterminées à l'aide de méthodes statistiques ne supposant aucune connaissance *a priori* de l'effet des conditions micrométéorologiques sur la propagation acoustique. L'analyse des résultats a permis de déterminer les caractéristiques de chacune des classes, malgré les contraintes de notre étude eu égard aux phénomènes liés à l'émission et la propagation. Par ailleurs, les données de la SLT ont servi à mettre en évidence l'effet de site sur la classification des régimes de propagation.

Cette étude a également permis de montrer les limites des méthodes usuelles de caractérisation des conditions de propagation acoustique (grille UiTi), et ainsi de contribuer à leurs améliorations : au-delà de la révision des limites inter-

classes, la prise en compte des incertitudes expérimentales (et de la dispersion acoustique associée) s'avère être un futur enjeu majeur pour les ingénieurs d'étude. Il s'agira également d'introduire dans les documents normatifs afférents les effets d'autres paramètres influents tels que la distance à la source, la hauteur de la source, le spectre à l'émission, les caractéristiques de sol, etc.

Remerciements

Les auteurs remercient les collègues du réseau des Laboratoires des Ponts et Chaussées pour leur contribution à l'acquisition/validation des données expérimentales de la Station de Long Terme. Les auteurs remercient également les enseignants du Master "Ingénierie mathématique – Spécialité Statistiques" de l'Université de Nantes.

Références

- [1] B. Gauvreau, D. Écotière, H. Lefèvre, B. Bonhomme, (2009), *Propagation acoustique en milieu extérieur complexe – Caractérisation expérimentale in-situ des conditions micrométéorologiques – Éléments méthodologiques et météorologiques*, Coll. Études et Recherches des Laboratoires des Ponts et Chaussées, Ref EG21, 68 pages, Mai 2009
- [2] Pierre Aumond, Gwenaél Guillaume, Benoit Gauvreau, Judicael Picaut, Guillaume Dutilleux, Christine Lac, Valéry Masson, Michel Bérengier, "Couplage d'un modèle numérique météorologique avec le modèle numérique de propagation acoustique TLM", 10^{ème} Congrès Français d'Acoustique, Lyon (F), 12-16 avril 2010
- [3] O. Leroy, B. Gauvreau, F. Junker, "Propagation d'incertitudes pour l'estimation des paramètres micrométéorologiques influents en acoustique environnementale", 10^{ème} Congrès Français d'Acoustique, Lyon (F), 12-16 avril 2010
- [4] O. Baume, B. Gauvreau, M. Bérengier, F. Junker, H. Wackernagel, J.P. Chilès, (2009), "Geostatistical modeling of sound propagation: principles and a field application experiment", *J. Acoust. Soc. Amer.*, Vol. 126(6), pp 2894–2904
- [5] O. Leroy, B. Gauvreau, F. Junker, E. de Rocquigny, M. Bérengier, (2008), "A statistical method of calibration under uncertainty – A first application to ground effects on acoustic propagation", *Proc. 12th LRSP Symp.*, Lyon (F), October 2008
- [6] M. Bellanger, "Application d'outils géostatistiques et de méthodes de classification aux données de la Station de Long Terme", rapport de stage de Master 2 "Ingénierie Mathématique – Spécialité Statistiques", Université de Nantes, Septembre 2009
- [7] <http://www.lpc.fr/fr/presentation/moyens/slt/index.dml>
- [8] Hartigan John A. et Wong Manchek A., (1979), "A K-means clustering algorithm", *Applied Statistics* 28, 100-108
- [9] MacQueen James, "Some methods for classification and analysis of multivariate observations", (1967), *Proceedings of the Fifth Berkeley Symposium on Mathematical Statistics and Probability*, Eds L. M. Le Cam & J. Neyman, 1, pp. 281-297, Berkeley.
- [10] Rousseeuw Peter J., (1987), "Silhouettes: a Graphical Aid to the Interpretation and Validation of Cluster Analysis", *Computational and Applied Mathematics* 20, 53-65
- [11] Norme AFNOR NF S 31-085 de Novembre 2002 (version révisée) – caractérisation et mesurage du bruit dû au trafic routier
- [12] V. Zouboff, Y. Brunet, M. Bérengier, E. Séchet, "A qualitative approach of atmospheric effects on long-range sound propagation", 6th Inter. Symp. On Long Range Sound Prop., Ottawa, Canada, June 1994
- [13] V. Zouboff, J.C. Laporte, Y. Brunet, "Effets des conditions météorologiques sur la propagation du bruit – Prise en compte pratique", *Collection Techniques et Méthodes des Laboratoires des Ponts et Chaussées*, N°51, mai 1998
- [14] V. Zouboff, B. Gauvreau, Y. Brunet, M. Bérengier, (2005), "Méthode de reconstitution d'un niveau sonore de long terme – Principe et applications", Coll. Études et Recherches des Laboratoires des Ponts et Chaussées, Ref CR36, mars 2005
- [15] Norme AFNOR NF S 31-110 de Février 1985 (révision en cours) – caractérisation et mesurage des bruits de l'environnement – Grandeurs fondamentales et méthodes générales
- [16] F. Junker, B. Gauvreau, Ph. Blanc-Benon, C. Cremezi-Charlet, D. Écotière, (2006), "Classification de l'influence relative des paramètres physiques affectant les conditions de propagation à grande distance", 8^{ème} Congrès Français d'Acoustique 2006, Tours (F), Avril 2006
- [17] F. Junker, B. Gauvreau, D. Écotière, C. Cremezi-Charlet, Ph. Blanc-Benon, (2007), "Meteorological classification for environmental acoustics – Practical implications due to experimental accuracy and uncertainty", invited paper to International Congress on Acoustics (ICA) 2007, Madrid (S), 2-7 sept 2007