# CFA/VISHNO 2016

# Calibration d'un réseau de capteurs dans le cadre de cartographies du bruit participatives

A. Can<sup>a</sup>, G. Guillaume<sup>b</sup> et J. Picaut<sup>a</sup>

<sup>a</sup>Ifsttar, Centre de Nantes, Route de Bouaye, CS 4, 44344 Bouguenais Cedex, France

<sup>b</sup>IRSTV FR CNRS 2488, Ecole Centrale de Nantes, Bâtiment T, 1 rue de la Noë, BP

92101, 44321 Nantes, France

arnaud.can@ifsttar.fr



11-15 avril 2016, Le Mans CFA 2016 / VISHNO

Les mesures participatives apparaissent comme une technique prometteuse pour l'élaboration de cartes de bruit. Cependant, la faible qualité des données collectées (manque de précision, disparité des modèles, problèmes métrologiques, etc.), notamment lorsque des smartphones sont utilisés, rendent, jusqu'à présent, peu fiables les cartes produites.

Dans cet article, une méthode de calibration d'un réseau de capteurs est proposée, et vise à sélectionner les meilleurs capteurs (détection des valeurs aberrantes) et à améliorer les données brutes collectées, en s'appuyant sur l'ensemble des capteurs mobiles et sur un réseau de capteurs fixes. L'efficacité de l'approche, pour différentes caractéristiques du réseau de capteurs mobiles, est évaluée sur sa capacité à reconstituer un champ acoustique artificiel de référence, qui est constitué de l'évolution des niveaux sonores équivalents 10 secondes ( $L_{10s}$ ) sur une durée d'un mois, sur un réseau couvrant vingt rues.

Les principales conclusions sont les suivantes : (i) les erreurs systématiques des capteurs peuvent être efficacement corrigées par une procédure de calibration croisée ; (ii) le réseau de capteurs fixe permet d'estimer l'erreur systématique moyenne associée au réseau de capteurs mobiles ; (iii) la dispersion des mesures pour un capteur individuel donné est plus dommageable que l'erreur systématique et doit être rigoureusement repérée lors d'une phase de recherche des valeurs aberrantes ; (iv) bien que la méthode proposée améliore la qualité des données collectées, des erreurs subsistent sur l'estimation du  $L_{\rm den}$ , en raison de la brièveté des échantillons collectés ; (v) l'augmentation du nombre de capteurs n'améliore pas l'estimation du  $L_{\rm den}$  tant que la dispersion dans les mesures individuelles reste élevée.

#### 1 Introduction

Les mesures participatives sont de plus en plus considérées comme une alternative aux modélisations classiques, pour caractériser les environnements sonores urbains. Elles présentent en effet de nombreux avantages : (i) le grand nombre de participants potentiels garantit une bonne résolution spatio-temporelle, (ii) les mesures sont sensibles à l'ensemble des sources de bruit impactant les environnements sonores, (iii) les applications développées permettent aux participants d'être à la fois producteurs et consommateurs d'informations environnementales. De nombreuses applications ont vu le jour ces dernières années, telles que NoiseTube [1][2], WideNoise [3], NoiseSpy [4], NoizCrowd [5], EarPhone [6][7], etc. De plus, la possibilité d'estimer les niveaux sonores en milieu urbain à partir de données recueillies de manière participative est montrée. Cependant, la précision des données recueillies pose problème, et n'a pas fait encore l'objet d'études approfondies. En effet, la précision des capteurs, les durées d'acquisition très courtes [8], ou les biais protocolaires liés à l'opérateur, peuvent engendrer des erreurs importantes. De ce fait, une grande dispersion est souvent observée d'un opérateur à l'autre, ou d'un modèle de smartphone à l'autre [9]. Des calibrations individuelles peuvent permettre de réduire cette dispersion [10], mais elles s'avèrent coûteuses et ne suffisent pas à prendre en compte la dispersion liée à l'opérateur.

Dans cet article, une méthode de calibration d'un réseau de capteurs est proposée, et vise à sélectionner les meilleurs capteurs (détection des valeurs aberrantes) et à améliorer les données brutes collectées, en s'appuyant sur l'ensemble des capteurs mobiles et sur un réseau de capteurs fixes. L'efficacité de l'approche, pour différentes caractéristiques du réseau de capteurs mobiles, est évaluée sur sa capacité à reconstituer un champ acoustique artificiel de référence, qui est constitué de l'évolution des niveaux sonores équivalents

 $10~{\rm secondes}~(L_{10s})~{\rm sur}~{\rm une}~{\rm dur\'ee}~{\rm d'un}~{\rm mois},~{\rm sur}~{\rm un}~{\rm r\'eseau}$  couvrant vingt rues.

## 2 Principe

# 2.1 Création d'une carte de bruit de référence

L'aire urbaine simulée consiste en un carré de 500m de côté, fait de 10 rues horizontales et 10 rues verticales, distantes de 50 m. Chaque rue est discrétisée en points distants de 25 m, formant une carte de 297 points. La carte de référence créée représente, pour chacun de ces 297 points, l'évolution des  $L_{\rm Aeq,10s}$  pour une durée de 30 jours.

L'évolution des L<sub>Aeq,10s</sub> est obtenue en sommant les contributions plausibles de sources permanentes (trafic routier) et épisodiques (travaux, écoles, trafic aérien), et est conçue pour être en accord avec les variations spatiotemporelles des niveaux de bruit observées en milieu urbain; voir **Figure 2**. Les détails sur l'élaboration de la carte sont donnés dans [11].

La carte dynamique ainsi générée sera considérée dans la suite de l'article comme l'environnement sonore de référence, que le réseau de capteurs cherche à estimer.

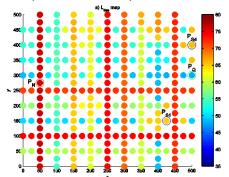


Figure 1: a) Carte de bruit de référence

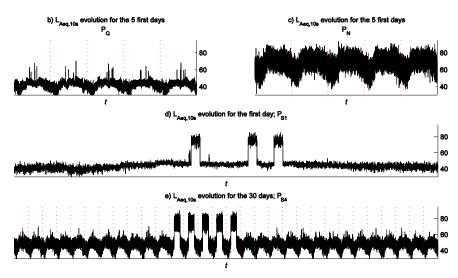


Figure 2: b) Evolution temporelle des niveaux en différents points de la carte de bruit de référence.

# 2.2 Caractéristiques du réseau de capteurs

Un réseau de *n* capteurs mobiles réalisant ponctuellement des mesures, est généré. Le nombre de capteurs déployés est fixé à 100. Les capteurs sont caractérisés par les paramètres suivants :

- Une erreur systématique ε<sub>s</sub> liée à chaque capteur S, définie par ε<sub>s</sub> = ε̄<sub>s</sub> + μ<sub>s</sub>, où ε̄<sub>s</sub> est la moyenne des erreurs systématiques calculées sur le réseau des capteurs, et μ<sub>s</sub> un nombre aléatoire suivant une distribution normale d'écart type ο̄<sub>s</sub>;
- Un écart type  $\sigma_u$ , appliqué sur chaque mesure, ayant une double origine: (i) l'opérateur, qui respecte plus ou moins bien le protocole de mesure ; ii) le capteur, qui peut fournir des données dispersées.  $\sigma_u$  est un nombre aléatoire suivant une distribution de Gamma, calibrée de manière à ce que la moyenne des valeurs  $\sigma_u$  calculées sur le réseau soit  $\overline{\sigma_u}$  ;
- Un nombre moyen de contributions journalières N<sub>s</sub>. N<sub>s</sub> est un nombre aléatoire suivant une distribution de Gamma, calibrée de manière à ce que la moyenne des valeurs N<sub>s</sub> calculées sur le réseau soit N<sub>s</sub>. Dans cette étude, N<sub>s</sub> est fixé à 5 contributions par jour, et la variation dans le nombre de mesures par jour est contrôlé au travers du nombre de capteurs n;
- Un profil d'utilisateur P<sub>s</sub>, qui définit la probabilité que l'utilisateur réalise une mesure, en fonction de la plage horaire.

#### 2.3 Mesures

Des mesures mobiles sont réalisées tout au long des 30 jours de la simulation, selon la procédure suivante:

- Un échantillon de longueur 30 x N<sub>s</sub>, qui contient les tranches de 10s pendant lesquelles chaque capteur réalise une mesure, est déterminé en fonction des profils P<sub>s</sub> correspondants;
- La position où chaque mesure est réalisée est choisie parmi les 297 points de la carte;

• La mesure brute  $L_{Aeq,10s,raw}$  est simulé selon :  $L_{Aeq,10s,raw} = L_{Aeq,10s,ref} + \epsilon_s + \mu_{mes}$ , (1) où  $\mu_{mes}$  est un nombre aléatoire ayant pour écart type  $\sigma_u$ .

Le nombre total de mesures de 10s collecté durant les 30 jours est  $30 \times n \times N_s$ , ce qui donne plus de 41 h pour un réseau de 100 capteurs réalisant en moyenne 5 mesures par jour. Dans un cas opérationnel, un nombre plus réduit de mesures est attendu sur un mois de déploiement ; cela étant, le procédé de mesures ne serait pas interrompu au bout d'un mois et donc la quantité de mesures récoltées serait plus importante.

## 2.4 Réseau de capteurs fixes

Des capteurs de haute qualité, au nombre de 5, sont distribués aléatoirement sur le réseau, qui mesurent de manière permanente l'évolution des niveaux. On suppose que ces capteurs donnent précisément l'évolution des  $L_{\text{Aeq},10s}$  en chacun des 5 points et durant un mois, et seront utiles pour estimer l'erreur systématique  $\overline{\epsilon_s}$  du réseau de capteurs.

# 2.5 Indicateurs utilisés pour tester la qualité des cartes produites

Les méthodes de post-traitement proposées sont testées sur : (i) l'erreur quadratique moyenne RMSE $_{L10s}$  calculée sur les valeurs  $L_{10s}$  estimées grâce au réseau de mesures, (ii) le RMSE $_{Lden}$  calculé sur les 297 valeurs de  $L_{den}$  estimées. Les erreurs sur le  $L_{den}$  peuvent être importantes même dans le cas d'une estimation précise des  $L_{10s}$ , dans le cas où le nombre d'échantillons collectés est insuffisant pour rendre compte des variations temporelles des niveaux de bruit au point considéré. A l'inverse, des erreurs importantes sur les  $L_{10s}$ , mais centrées sur 0, occasionneront de faibles erreurs sur les valeurs de  $L_{den}$  estimés.

## 2.6 Méthode de post-traitement

La méthode de post-traitement vise à corriger les données brutes collectées, qui peuvent contenir potentiellement des erreurs importantes.

11-15 avril 2016, Le Mans CFA 2016 / VISHNO

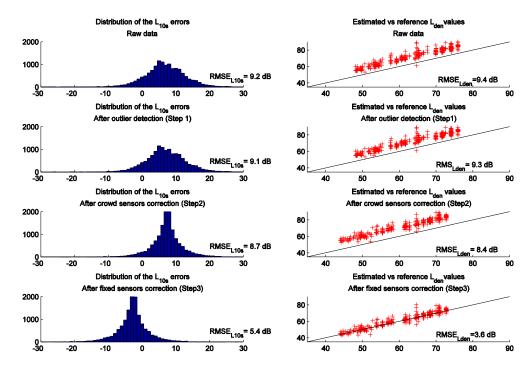


Figure 3: Estimation de la carte de bruit après chaque étape du post-traitement. A gauche : distribution des erreurs de  $L_{10s}$ ; à droite valeurs  $L_{den}$  estimées et de référence; cas avec  $\overline{\varepsilon_s} = 10$  dB,  $\overline{\sigma_s} = 4$  dB.

La méthode comporte les 4 étapes décrites ci-après. La méthode est illustrée dans la Figure 3, qui représente la distribution des erreurs  $L_{10s}$  et  $L_{den}$ , dans un exemple avec  $\overline{\epsilon}_s = 10 \text{ dB}$ ,  $\overline{\sigma}_s = 4 \text{ dB}$ , et  $\overline{\sigma}_u = 4 \text{ dB}$ .:

- Etape 0: Acquisition des données brutes. Dans l'exemple donné, les erreurs systématiques et la dispersion sur Les données brutes engendrent une erreur RMSE<sub>L10s</sub> de 9.2 dB comparé à la carte de référence, ainsi qu'une surestimation des valeurs de L<sub>den</sub>, avec un RMSE<sub>Lden</sub> de 9.4 dB.
- Etape 1: Détection des capteurs défectueux.
   L'objectif est de détecter les capteurs fournissant des données imprécises (voir section 3).
   L'élimination des capteurs défectueux permet de réduire légèrement les erreurs, résultant en un RMSE<sub>L10s</sub> de 9.1 dB.
- Etape 2: Correction basée sur les capteurs mobiles. Les erreurs individuelles de chaque capteur sont corrigées à l'aide du réseau de capteurs mobiles, en s'appuyant sur la différence entre les niveaux mesurés par un capteur donné, et la moyenne des niveaux mesurés par le réseau de capteurs, dans la même plage horaire (pas nécessairement le même jour) et la même rue. L'hypothèse sous-jacente est qu'une mesure accidentellement élevée peut correspondre à un événement sonore réel, tandis que des mesures systématiquement différentes sont probablement liées à une erreur de mesure. La Figure 3 souligne le fait que la distribution des erreurs est beaucoup moins large après cette étape.
- Etape 3: Correction basée sur les capteurs fixes.

  Les capteurs fixes sont ensuite utilisés pour estimer l'erreur moyenne commise par le réseau de capteurs mobiles. Cette erreur est évaluée en calculant la différence entre les niveaux mesurés par les capteurs fixes, et les niveaux mesurés par

les capteurs mobiles quand ils passent à leur proximité. L'objectif de cette étape est d'estimer  $\overline{\epsilon_s}$ ; de ce fait la distribution des erreurs  $L_{10s}$  est davantage centrée sur 0 dB après cette étape ; voir Figure 3. Les erreurs restantes sur les  $L_{10s}$  estimés sont dues à la dispersion  $\overline{\sigma_u}$  dans les mesures, qui correspond à une dispersion liée à la mesure même (opérateur, directivité de la source, etc.). Cette erreur est de ce fait difficilement compressible ; c'est pourquoi cette dispersion est un élément clé de l'étape de détection des couples opérateur / capteur défectueux (voir section 3). A la fin de la procédure, les erreurs sont largement réduites, avec un RMSE<sub>L10s</sub> de 5.4 dB (proche de  $\overline{\sigma_u}$ ) et un RMSE<sub>Lden</sub> de 3.6 dB.

• Etape 4: Calcul du L<sub>den</sub>. Une fois post-traitées, les valeurs de L<sub>10s</sub> collectées sont utilisées pour calculer, en chacun des 297 points, les 24 valeurs moyennes journalières de L<sub>1h</sub> pour chacune des 24 tranches horaires, puis le L<sub>den</sub>.

# 3 Détection des capteurs défectueux

### 3.1 Principe

Détecter les capteurs défectueux est capital pour garantir la précision des cartes produites. Les capteurs sont définis par leur erreur systématique  $\epsilon_s$  et par leur écart type  $\sigma_u$ , qui sont les paramètres clés pour déterminer lesquels sont défectueux ; malheureusement ces caractéristiques ne sont pas directement accessibles.

Les données fournies par un capteur ayant une grande erreur systématique  $\varepsilon_s$  mais une faible dispersion dans les mesures  $\sigma_u$ , peuvent être facilement corrigées par la procédure décrite dans la section 2.6. En revanche, les capteurs caractérisés par une forte dispersion  $\sigma_u$  (même si

 $\epsilon_s$  est faible) doivent impérativement être détectés comme défectueux, car ils correspondent à des mesures peu fiables.

L'estimation de  $\sigma_u$  est réalisée en calculant la dispersion  $\widehat{\sigma_u}$  dans les différences entre les niveaux mesurés par un capteur, et les niveaux mesurés par le réseau de capteurs mobiles, aux même périodes de la journée (pas nécessairement le même jour) et dans la même rue.

 $\widehat{\sigma_u}$  est une estimation de  $\sigma_u$  qui est toutefois biaisée par la forte variabilité des valeurs de  $L_{10s}$ : une valeur élevée de  $\widehat{\sigma_u}$  peut résulter d'une grande variabilité dans les mesures réalisées par le couple opérateur / capteur, mais également d'événements apparus durant la mesure. La méthode de détection des capteurs défectueux doit être suffisamment robuste pour ne pas écarter un capteur effectuant une mesure durant une période où les niveaux sont anormalement faibles ou élevés, et un nombre de capteurs suffisant doit être gardé pour pouvoir prendre en compte les variations naturelles des niveaux de bruit.

### 3.2 Résultats

Des tests sont menés pour trouver le bon équilibre dans la déviation  $\widehat{\sigma_u}$  acceptée dans la recherche des capteurs défectueux. 9 différents seuils  $D_u$  sont considérés, variant de 4 à 20 dB par pas de 2 dB. Un capteur est détecté comme

défectueux lorsque  $\widehat{\sigma_u} > D_u$ , tandis qu'un capteur est considéré comme réellement défectueux lorsque  $\sigma_u > D_u$ . 9 valeurs différentes de  $\overline{\sigma_u}$  considérées, variant de 0 à 16 dB par pas de 2 dB.  $\overline{\epsilon_s}$  et  $\overline{\sigma_s}$  sont fixés à 5dB.

La qualité de la détection de capteurs défectueux est jugée sur les indicateurs suivants, moyennés sur 10 réplications :

- Le nombre de capteurs détectés comme défectueux ;
- Le nombre de vrais positifs (TP) : pourcentage de capteurs réellement défectueux détectés comme défectueux ;
- Les faux négatifs (FN) : pourcentage de capteurs réellement défectueux prédits comme capteurs précis;
- Les faux positifs (FP) : pourcentage de capteurs réellement précis détectés comme défectueux ;
- Les vrais négatifs (TN): pourcentage de capteurs réellement précis détectés comme précis.

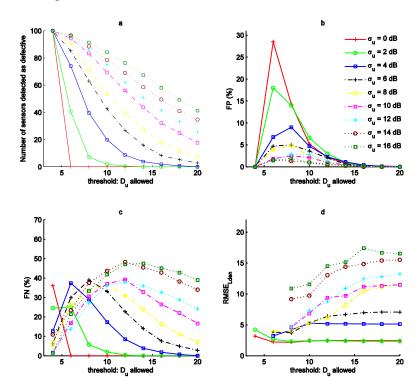


Figure 4: Détection des capteurs défectueux, pour différentes valeurs de  $\overline{\sigma_u}$ : a) nombre de capteurs détectés comme défectueux; b) faux positifs; c) faux négatifs; d) RMSE<sub>Lden</sub> par rapport à la carte de référence.

L'amélioration de l'estimation de la carte de bruit par le rejet des capteurs défectueux est mesurée en calculant le RMSE<sub>Lden</sub>. Les résultats sont consignés sur la Figure 4. Le nombre de capteurs détectés comme défectueux augmente : (i) lorsque la dispersion  $\widehat{\sigma_u}$  autorisée décroit, (ii) lorsque  $\overline{\sigma_u}$  augmente. Cependant,  $\widehat{\sigma_u}$  est un estimateur de  $\sigma_u$  qui est biaisé par la variabilité naturelle des niveaux de bruit. Ce biais peut être illustré par deux points : (i) même lorsque  $\overline{\sigma_u}$  = 0, certains capteurs sont détectés comme défectueux, (ii) lorsque  $D_u = \overline{\sigma_u}$ , plus de la moitié des capteurs sont détectés comme défectueux ( $\widehat{\sigma_u}$  est généralement plus élevé que  $\sigma_u$ ).

Les erreurs dans la détection des capteurs défectueux sont illustrées dans la Figure 4b-c. Un seuil  $D_u$  trop strict entraîne une détection d'un nombre trop important de capteurs défectueux (taux élevé de FP), ce qui réduit le nombre de capteurs valides restants pour l'élaboration de la carte de bruit. A l'inverse, un seuil trop laxiste augmente le nombre de capteurs défectueux détectés comme valides (nombre de FN élevé). L'observation des valeurs de RMSE<sub>Lden</sub> (Figure 4d), montre qu'une valeur basse de  $D_u$  diminue l'erreur. Par exemple, dans un cas extrême avec  $\overline{\sigma_u}$  = 16 dB, un seuil  $D_u$  = 8 dB fait chuter le RMSE<sub>Lden</sub> sous 10 dB, alors qu'il atteint presque 20 dB avec  $D_u$  = 14 dB,

11-15 avril 2016, Le Mans CFA 2016 / VISHNO

même si dans ce cas extrême plus de 90% des détecteurs sont écartés. Ainsi, en présence de capteurs de mauvaise qualité, il s'avère plus efficace de ne garder qu'un nombre très bas de capteurs, mais de confiance.

On peut s'attendre en pratique à des valeurs de  $\overline{\sigma_u}$  comprises entre 4 et 8 dB. En conséquence, un seuil  $D_u = 10$  dB semble un bon compromis : (i) il diminue les valeurs de RMSE<sub>Lden</sub>, (ii) il écarte environ la moitié des capteurs, lorsque  $\overline{\sigma_u} = 8$  dB, ce qui est déjà une déviation élevée, (iii) il permet de garder suffisamment de capteurs pour reconstruire la carte de bruit. En conséquence, un seuil  $D_u = 10$  dB est conseillé, et pris pour la suite de l'article.

# 4 Influence des caractéristiques des capteurs mobiles

Les paramètres  $\overline{\sigma_u}$ ,  $\overline{\varepsilon_s}$  et  $\overline{\sigma_s}$  impactent potentiellement les estimations. Dans cette section, 567 simulations sont menées en faisant varier ces paramètres, de manière à déterminer leur influence relative :  $\overline{\varepsilon_s}$  prend 7 valeurs entre -15 to 15 dB par pas de 5 dB,  $\overline{\sigma_u}$  varie entre 0 et 16 dB par pas de 2 dB, et  $\overline{\sigma_s}$  varie de 0 à 16 dB par pas de 2 dB. Les résultats sont consignés dans la Figure 5.

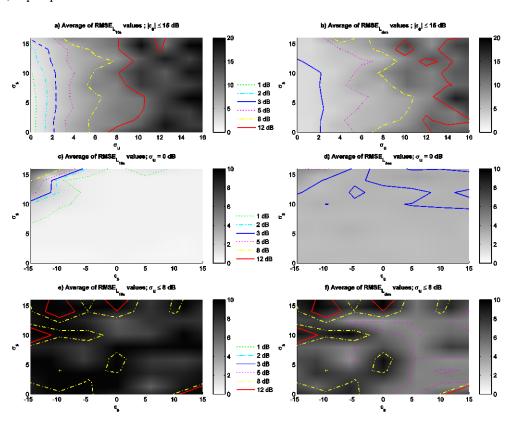


Figure 5: Influence des paramètres  $\overline{\epsilon}_s$ ,  $\overline{\sigma}_s$  and  $\overline{\sigma}_u$  sur les valeurs de RMSE<sub>L10s</sub> et RMSE<sub>Lden</sub>.

La Figure 5 (a-b) compare l'influence combinée des paramètres  $\overline{\sigma}_{\overline{s}}$ et  $\overline{\sigma}_{\overline{u}}$ , en montrant pour chaque couple  $\{\overline{\sigma}_{\overline{s}}; \overline{\sigma}_{\overline{u}}\}$  les RMSE<sub>L10s</sub> et RMSE<sub>Lden</sub> moyennés sur les valeurs de  $\overline{\varepsilon}_{\overline{s}}$ . Le paramètre  $\overline{\sigma}_{\overline{u}}$ a clairement un plus grand impact que  $\overline{\sigma}_{\overline{s}}$  sur les erreurs. Par exemple, les courbes d'erreurs de 1 à 5 dB ne dépendent presque pas de la valeur de  $\overline{\sigma}_{\overline{s}}$ , pour des valeurs  $\overline{\sigma}_{\overline{s}} < 10$  dB. Ceci confirme que la méthode proposée peut efficacement corriger les fortes valeurs de  $\overline{\sigma}_{\overline{s}}$ , alors qu'une valeur élevée  $\overline{\sigma}_{\overline{u}}$  (c'est-à-dire quand chaque capteur fournit des mesures dispersées) est plus difficile à corriger, malgré la recherche de capteurs défectueux.

Ainsi, l'influence relative des paramètres  $\overline{\varepsilon}_s$  et  $\overline{\sigma}_s$  est recherché pour une valeur  $\overline{\sigma}_u$  fixée à 0 dB. La Figure 5 (c-d) montre les RMSE<sub>L10s</sub> et RMSE<sub>Lden</sub> pour chaque couple  $\{\overline{\varepsilon}_s: \overline{\sigma}_s\}$ , avec  $\overline{\sigma}_u=0$ . Quelques soient les valeurs de  $\overline{\varepsilon}_s$  et  $\overline{\sigma}_s$ , les RMSE<sub>L10s</sub> restent très bas (inférieurs à 1 dB) pour la plupart des couples  $\{\overline{\varepsilon}_s: \overline{\sigma}_s\}$ , ce qui souligne l'efficacité de la méthode présentée dans la section 2.6.

De plus, l'influence relative des deux paramètres est équilibrée dans cette plage de valeurs : les courbes d'erreurs de 1 à 5 dB dépendent des deux paramètres. Toutefois, la précision décroit pour l'estimation des valeurs de  $L_{\text{den}}$ , avec

des erreurs comprises entre 2 et 3 dB pour presque l'ensemble des couples  $\{\overline{\pmb{\epsilon}_s} : \overline{\pmb{\sigma}_s}\}$ . Ceci est dû à la variabilité des niveaux de bruit : même si les mesures sont fiables, le nombre et la durée des échantillons doivent être assez élevés pour éradiquer l'erreur dans l'estimation du  $L_{den}$ . Des procédures ont été proposées dans [8] pour augmenter artificiellement le nombre d'échantillons grâce à des interpolations spatiales réalisées à partir d'échantillons collectés dans la même rue et à courte distance.

En pratique, des valeurs de  $\overline{\sigma_u}$  pouvant atteindre 8 dB peuvent être attendues. La Figure 5(e-f) donne, pour chaque couple  $\{\overline{\varepsilon_s} : \overline{\sigma_s}\}$ , les RMSE<sub>L10s</sub> et RMSE<sub>Lden</sub> moyennés sur les 5 valeurs de  $\overline{\sigma_u}$  entre 0 et 8 dB. Le faible impact de  $\overline{\varepsilon_s}$  et  $\overline{\sigma_s}$  sur la précision des estimations est confirmé dans ce cas, mettant une fois encore le potentiel de la méthode proposée. Les valeurs de RMSE<sub>Lden</sub> correspondantes varient entre 3 et 5 dB pour la plupart des couples  $\{\overline{\varepsilon_s} : \overline{\sigma_s}\}$ .

#### 5 Conclusion

Dans cet article, une méthode de calibration est proposée, qui vise à améliorer les données brutes données par un réseau de capteurs participatifs ou à bas coût. La méthode s'appuie sur 4 étapes : (i) une détection et mise à l'écart des couples opérateur / capteur défectueux, (ii) une correction basée sur le réseau de capteurs mobiles, (iii) une correction basée sur des capteurs fixes, (iv) un calcul de L<sub>den</sub>. L'efficacité de la méthode est évaluée sur sa capacité à estimer une carte dynamique de bruit de référence construite artificiellement et consistant en l'évolution des L<sub>10s</sub> en 297 points, et veillant à ce que cette carte reproduise la dynamique réelle des niveaux en milieu urbain. Différentes caractéristiques du réseau de capteurs mobiles sont simulées : l'erreur systématique et la dispersion des erreurs du réseau de capteurs, ainsi que la dispersion individuelle des mesures.

La méthode proposée corrige efficacement les erreurs systématiques commises par chaque capteur, car elles peuvent être évaluées par comparaison avec le reste des capteurs. A l'inverse, la dispersion dans les mesures individuelles, qui peuvent être dues soit à l'opérateur soit à un capteur peu fiable, sont plus dommageables. Pour pallier à cette difficulté, une procédure de détection des capteurs défectueux est proposée, qui s'appuie justement sur la dispersion des mesures réalisées par chaque capteur, relativement au reste du réseau de capteurs. Une étude complémentaire, menée dans [11], a montré en outre que les estimations restaient précises même lorsque le nombre de capteurs était réduit. Néanmoins, une erreur incompressible subsiste dans l'évaluation des valeurs de L<sub>den</sub>, due à la brièveté des échantillons de mesure collectés.

Pour conclure, ce travail s'inclut dans un projet plus large, qui prévoit un déploiement réel de capteurs en milieu urbain. Cette prochaine étape permettra de tester la méthode de post-traitement proposée dans cet article dans un contexte réel de caractérisation des environnements sonores urbains sur la base de mesures participatives.

#### Remerciements

Ce travail a été réalisé dans le cadre du projet ENERGIC OD, financé par la Commmission Européenne via le Programme ICT Policy Support.

#### References

- [1] Maisonneuve N, Stevens M, Niessen ME, Steels L. NoiseTube: Measuring and mapping noise pollution with mobile phones. Proceedings of the 4th International ICSC Symposium. Thessaloniki, Greece; May 28-29 2009.
- [2] D'Hondt E, Stevens M, Jacobs A. Participatory noise mapping works! An evaluation of participatory sensing as an alternative to standard techniques for environmental monitoring. Pervasive and Mobile Computing 2013; 681-94.
- [3] Becker M, Caminiti S, Fiorella D, Francis L, Gravino P, (Muki) Haklay M, Hotho A, Loreto V, Mueller J, Ricchiuti F, Servedio VDP, Sîrbu A, Tria F. Awareness and Learning in Participatory Noise Sensing. PLoS

ONE 2013; 8(12). DOI: 10.1371/journal.pone.0081638.

- [4] Kanjo E. NoiseSPY: A Real-Time Mobile Phone Platform for Urban Noise. Monitoring and Mapping Mob Netw Appl 2010;15(4):562-74.
- [5] Wisniewski M, Demartini G, Malatras A, Cudré-Mauroux P. NoizCrowd: A Crowd-Based Data Gathering and Management System for Noise Level Data. Proceedings of the 10th International Conference on Mobile Web Information Systems (MobiWIS 2013). Paphos, Cyprus; 2013.
- [6] Rana RK, Chou CT, Kanhere SS, Bulusu N, Hu W. Ear-Phone: An End-to-End Participatory Urban Noise Mapping System. Proceedings of the 9th ACM/IEEE International Conference on Information Processing in Sensor Networks. Stockholm, Sweden, p.105-16; 2010.
- [7] Rana RK, Chou CT, Bulusu N, Kanhere S, Hu W. Ear-Phone: A context-aware noise mapping using smart phones. Pervasive Mob. Comput. vol. In Press, 2013.
- [8] Can A, Dekoninck L, Botteldooren D. Measurement network for urban noise assessment: Comparison of mobile measurements and spatial interpolation approaches. Appl Acoust 2014;83:32-9.
- [9] Kardous CA, Shaw PB. Evaluation of smartphone sound measurement applications. J Acoust Soc Am 2014; EL186-EL192.
- [10] Lavandier C, Delaitre P, D'Hondt E, Gonzales BE, Kambona K. Urban sound quality assessment with mobile technology: the Cart\_Asur project. Proceedings of Acoustics 2013. New Delhi, India; 2013.
- [11] Can A, Guillaume G, Picaut J. Cross-calibration of participative sensor networks for nvironmental noise mapping, soumis pour publication (Septembre 2015), Applied Acoustics.