

Contrôle directif du bruit d'un transformateur de puissance

P. Herzog^a, R. Guillermin^a, V. Chritin^b, E. Van Lancker^b, P. Lorin^c et R. Labbé^d

^aLMA/CNRS, 31 chemin Joseph Aiguier, 13402 Marseille Cedex 20, France

^bIAV Engineering SARL, Ch. des Coulevres 4A, CH-1295 Tannay, Suisse

^cABB Sécheron, Rue des Sablières 4-6, CH-1217 Meyrin, France

^dHexanium, 17 Grande Rue, 28310 Oinville Saint Liphard, France
herzog@lma.cnrs-mrs.fr

Les transformateurs de moyenne puissance utilisés dans les sous-stations de distribution sont susceptibles de générer un bourdonnement audible, et parfois gênant si des habitations sont situées à proximité immédiate. La densité croissante de l'urbanisation de zones où ont été implantés ces matériels (de très longue durée de vie) conduit ainsi parfois à des situations où il serait souhaitable de pouvoir réduire légèrement l'émergence du bruit tonal rayonné par ces transformateurs. Il s'agit souvent d'un besoin ponctuel, correspondant à un secteur angulaire restreint. Une solution passive est alors inutilement onéreuse, tout en constituant une gêne lors d'opérations de maintenance du site.

Une solution de contrôle actif directionnel a ainsi été développée, basée sur un petit nombre de sources pilotées en temps réel d'après les pressions enregistrées par des microphones placés en limite de sous-station. Parmi ceux-ci, un petit nombre correspond à la direction de réduction, tandis que le plus grand nombre sert classiquement à éviter que le dispositif n'accroisse le niveau sonore dans une autre direction. Dans l'approche présentée ici, le contrôle est effectué en deux temps : une identification off-line permet de synthétiser un jeu de "sources virtuelles" ayant chacune une directivité marquée vers la direction de contrôle. Dans un deuxième temps, un contrôle feedforward utilise ce jeu de "sources virtuelles" pour minimiser la pression quadratique moyennée sur les quelques microphones placés dans la direction à contrôler.

1 Introduction

La distribution d'électricité dans les grandes agglomérations nécessite d'installer des "sous-stations" de transformation relativement proches des habitations. Le bourdonnement de leurs transformateurs conduit parfois à des plaintes du voisinage car même si le niveau sonore généré est faible, il peut devenir obsédant et envahir ainsi le quotidien des riverains. Ceci peut poser problème aux sociétés d'électricité : un équipement en milieu de vie peut se trouver désigné comme non conforme, alors que l'investissement qu'il représente est encore loin d'être amorti. Une isolation acoustique implique souvent des solutions contraaires aux contraintes d'exploitation : les basses fréquences émises par les transformateurs sont très peu absorbées par les matériaux isolants, et contournent aisément d'éventuels écrans anti-bruit - or enfermer totalement un transformateur de puissance nécessite de déporter ou assister ses refroidisseurs, et gêne certaines opérations de maintenance.

Inversement, le bruit des transformateurs semble être un candidat idéal pour un traitement par contrôle actif du bruit : la source est stable, et le spectre à traiter ne comporte souvent que quelques raies fréquentielles parfaitement synchronisées avec la fréquence du réseau électrique. De nombreuses publications ont donc déjà traité de ce problème, et des solutions industrielles ont même déjà été commercialisées. L'approche généralement retenue a été de disposer sur la cuve du transformateur des actionneurs (vibratoires ou acoustiques) pilotés par un contrôleur d'après les signaux d'un ensemble de capteurs placés à proximité. D'excellents résultats ont été obtenus sur des sites dont certains sont en exploitation depuis plus de dix ans, mais la solution est cependant loin de se généraliser. Parmi les raisons de cette réticence, on peut citer le coût de l'installation, essentiellement lié à la nécessité d'effectuer une étude spécifique à chaque situation, et qui ne peut être dimensionnée qu'après une campagne de mesures sur site.

L'approche décrite ici est née d'une analyse menée conjointement par trois partenaires : les sociétés ABB et IAV Engineering, et le Laboratoire de Mécanique et d'Acoustique. Son objectif est de répondre par une solution active simple dans les cas qui ont été considérés comme les plus favorables, *c.a.d.* un petit groupe de maisons gênées par

le bruit d'un transformateur installé dans une sous-station voisine, ce qui se produit en général si elles sont dans un lobe de directivité et à courte distance. Dans ce cas, les solutions passives usuelles sont a priori peu intéressantes, ce qui joue en faveur d'une nouvelle technologie si son coût est raisonnable. L'enjeu est donc ici de proposer une solution aussi simple que possible en réponse à un problème a priori lui aussi relativement simple.

2 Hypothèses retenues

Nous considérons ici le cas d'un seul transformateur de puissance, susceptible de gêner un petit groupe d'habitations situées dans un secteur angulaire réduit, et à distance assez faible (ce qui sous-entend que la réfraction - atmosphérique ou géométrique - n'est pas prise en compte). Le rayonnement du transformateur est considéré comme stationnaire et invariant, et concerne des fréquences "basses" : typiquement entre 100Hz et 400Hz (les dimensions usuelles des transformateurs traités sont alors de l'ordre de une à quelques longueurs d'onde). Le sol est assimilé à un plan parfaitement réfléchissant et donc simplement pris en compte par des sources "images". Les hauteurs de sources et récepteurs considérées sont de l'ordre de un à quelques mètres, ce qui correspond aux dimensions usuelles des transformateurs d'une part, et à la hauteur de pavillons d'habitation d'autre part. Les angles d'élévation considérés ici sont donc petits.

Une hypothèse importante est que les habitations ciblées sont situées dans un unique lobe de directivité horizontale, caractérisé par une ouverture angulaire réduite dans laquelle le niveau rayonné est significativement supérieur à celui rayonné dans les directions adjacentes (lobe de directivité émergent). Cette hypothèse peut sembler réductrice, mais elle est assez typique des conditions de rayonnement de sources ayant les dimensions considérées (transformateurs de l'ordre de quelques dizaines de MVA, installés près de quartiers résidentiels périphériques). Un exemple d'implantation est illustré par la Figure 1.

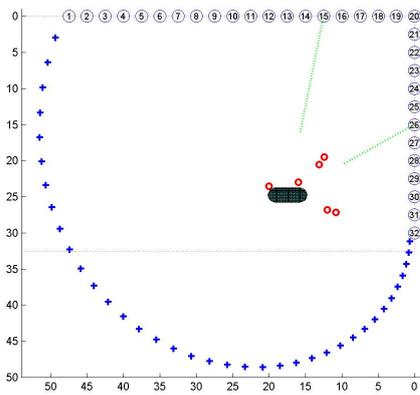


FIGURE 1 – Exemple d’implantation : sous-station de Cossonay près de Lausanne (CH).

3 Principe du dispositif

Dans le système considéré ici, le contrôle est effectué "par anticipation" ("feedforward"). Ceci suppose d'utiliser un signal de référence du bruit à atténuer, référence qui est ici obtenue sous forme électrique à partir de la tension de sortie des transformateurs à contrôler. En pratique, l'installation est constituée de générateurs synchrones du secteur, pilotés directement dans le domaine fréquentiel, la référence étant alors implicitement donnée via la synchronisation du système. Ces générateurs sont intégrés aux sources de contrôle, qui rayonnent en demi-espace (comme le transformateur).

Dans la suite, le principe retenu pour le dispositif est présenté par éléments successifs (sources, capteurs, contrôle) en donnant les formulations associées. D'après les hypothèses présentées ci-dessus, le problème est calculé dans un plan. Les résultats sont présentés sur des positions correspondant aux microphones installés sur le site expérimental, placés en limite du terrain de la sous-station. Les résultats sont donc présentés en 1D, en suivant la ligne (brisée) correspondant à ces positions de microphones.

Le système opère donc implicitement comme un contrôle de directivité, dans lequel une double consigne est imposée : d'une part le niveau sonore doit être atténué dans le secteur angulaire correspondant au lobe à traiter, et d'autre part le niveau sonore ne doit autant que possible pas être augmenté dans les autres directions, sous peine de re-créer une nuisance chez d'autres riverains. Cette double consigne conduit à chercher un pilotage des sources assurant un contraste acoustique entre deux secteurs angulaires.

Pour illustrer l'objectif du système, la figure 2 repropose le champ rayonné par un transformateur à 100Hz. La mesure d'une telle cartographie de pressions étant quasi-impossible, il s'agit d'une simulation effectuée en utilisant un code BEM développé au LMA (code FELIN), qui extrait les modes de rayonnement d'une structure vibrante de forme quelconque. L'identification des coefficients modaux correspondant est effectuée par inversion avec une contrainte similaire à celle présentée au §3.4. Le diagramme de rayonnement ainsi calculé est

alors réaliste dans le secteur angulaire couvert par les microphones, et plausible ailleurs. La figure 2 fait ainsi apparaître un lobe de rayonnement principal dirigé vers l'angle de la sous-station, justifiant le choix du secteur de contrôle représenté sur la figure 1.

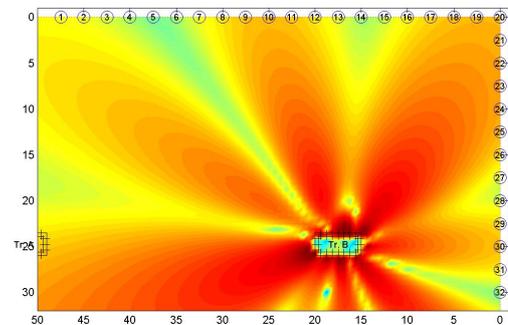
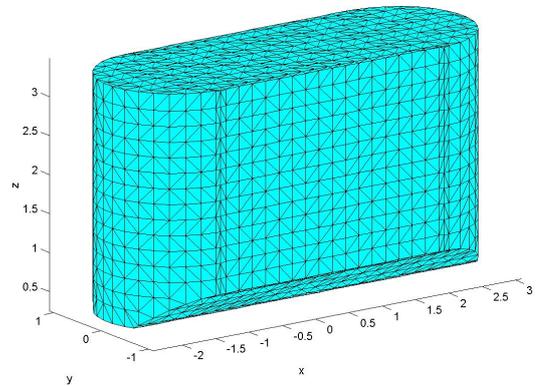


FIGURE 2 – Simulation du rayonnement d'un transformateur à 100Hz : maillage de calcul BEM (h) et pression rayonnée dans le plan horizontal (b)

3.1 Actionneurs de contrôle

Les actionneurs de contrôle sont ici des sources monopolaires, réalisées sous forme d'enceinte "band-pass" (charge arrière close, charge avant résonante rayonnant par des événements). Cette conception assure un bon rendement dans la gamme de fréquences à reproduire dont la largeur est limitée. Physiquement, il s'agit de composants facilement manipulables par une personne seule, afin de simplifier la maintenance sur site. Elles sont simplement posées au sol, à proximité (*c.a.d.* à une distance a priori inférieure à la longueur d'onde) de la base du transformateur.

La disposition des sources est un problème crucial dans la conception de nombreux systèmes de contrôle actif. Le contrôle "à la source" (proximité immédiate des sources de contrôle avec la source primaire) permet par exemple de limiter l'effort de contrôle en le focalisant sur l'efficacité de rayonnement. La disposition des sources de contrôle autour et à faible distance de la source primaire permet de faciliter l'obtention d'un diagramme de directivité horizontal similaire pour les deux, mais le principe du contrôle reste

interférentiel car - en étant placées au sol - les sources secondaires ne sont pas à proximité immédiate de la surface rayonnante du transformateur (surélevé par rapport au sol).

Verticalement, les sources de contrôle sont à peu près confondues avec leur source "image" (réflexion sur le sol). Compte tenu de la symétrie implicite de la source primaire par rapport au plan du sol, les sources de contrôle rayonnent ainsi de manière similaire au transformateur pour les angles d'élévation faibles considérés ici. Cette disposition au sol des sources de contrôle est donc a priori favorable au contrôle du champ acoustique à faible hauteur, ce qui correspond aux situations ciblées.

3.2 Capteurs de minimisation

Les seuls capteurs de l'installation sont des microphones, utilisés pour estimer l'erreur de contrôle et donc adapter ce dernier. Toujours dans l'esprit d'une installation aussi aisée que possible, ils sont placés en limite de sous-station, a priori sur les poteaux de la clôture existante. Cette disposition leur permet d'être autant que possible en champ lointain des sources, mais aussi le plus près possible de la zone ciblée pour le contrôle. Pour des raisons à la fois pratiques et réglementaires, il est en effet rarement possible d'implanter des microphones de contrôle au niveau des habitations gênées.

Compte tenu de la double contrainte évoquée ci-dessus, il serait a priori nécessaire de prévoir un réseau de microphones couvrant l'intégralité de la limite de la sous-station, avec une densité suffisante (*c.a.d.* espacés de moins d'une demi-longueur d'onde). Une telle installation serait coûteuse et difficile à installer, aussi ce réseau est-il réduit à un simple segment couvrant largement le secteur angulaire à contrôler. Les paragraphes 3.4 et 3.3 décrivent l'artifice utilisé pour assurer un contrôle efficace malgré tout.

Le fait de placer les microphones sur une seule ligne horizontale ne permet pas de garantir une adaptation du contrôle dans le plan vertical. Cependant, la présence du sol réfléchissant conduit à un rayonnement approximativement maximal à la hauteur du sol, et décroissant lentement pour de faibles angles d'élévation. Ceci est aussi le cas pour le rayonnement des sources de contrôle, posées au sol. Une ligne de microphones placée à une hauteur correspondant approximativement au demi-angle d'élévation ciblé permet alors d'estimer de manière a priori satisfaisante l'efficacité du contrôle, au moins pour de faibles élévations.

Dans le plan horizontal, les microphones ont des rôles différents selon leur position : situés dans le secteur angulaire ciblé, ils servent à adapter le contrôle de manière à réduire la pression totale (champ primaire + rayonnement des sources de contrôle). Situés à l'extérieur de ce secteur, leur rôle est d'éviter que les sources de contrôle n'augmentent la pression totale, ce qui peut être réalisé par une condition de non-rayonnement de ces sources en dehors du secteur angulaire contrôlé.

Ainsi, si les sources de contrôle avaient une directivité optimisée pour ne rayonner que dans le secteur angulaire

ciblé, seuls les microphones situés dans ce secteur seraient utiles. C'est le principe utilisé par le dispositif final, dont le nombre de microphones est alors relativement faible par rapport à une installation classique utilisant des sources de contrôle non spécifiques.

3.3 Sources virtuelles

Les sources réelles étant a priori omnidirectionnelles (hormis les effets de la diffraction sur le transformateur), elles ne peuvent pas être utilisées telles quelles. La directivité nécessaire est alors obtenue en pilotant ces sources physiques sous forme de sous-réseaux optimisés dans ce but, chaque sous-réseau constituant ainsi une source "virtuelle".

Les dimensions horizontales du réseau des sources de contrôle sont par construction plus grandes que celles du transformateur, ce qui favorise l'obtention de directivités plus accentuées que le lobe de directivité ciblé. Il est donc possible, à partir de l'ensemble des sources physiques installées, de synthétiser plusieurs sources "virtuelles" permettant de couvrir la totalité du secteur angulaire à contrôler, chacune ayant une direction spécifique de rayonnement maximal.

Bien évidemment le nombre limité de sources physiques ne permet pas d'obtenir des directivités arbitraires très marquées. L'optimisation des sources "virtuelles" ne peut donc que gérer un compromis (classique) entre la largeur du lobe principal et le niveau des lobes secondaires : le nombre de sources physiques à utiliser est donc d'autant plus important que l'on cherche à obtenir une forte atténuation ou que le secteur angulaire ciblé est étroit. Dans beaucoup de situations, l'objectif de réduction est cependant assez limité, car visant uniquement à éviter l'émergence des composantes tonales du bruit primaire par rapport au bruit ambiant. La directivité à réaliser est alors peu contrastée, donc réalisable avec un petit nombre de sources physiques compte tenu de leur répartition autour du transformateur.

Les sources "virtuelles" correspondent à un jeu de vecteurs de coefficients multiplicatifs appliqués aux sources physiques pour chacune des fréquences à traiter. Le débit q des sources physiques (à une fréquence donnée) est alors la combinaison matricielle des commandes s appliquées aux sources "virtuelles" avec les coefficients fixant leurs directivités individuelles, regroupés dans une matrice $[D]$ de dimensions $N_q \times N_s$ où N_q est le nombre de sources physiques et N_s celui de sources "virtuelles" :

$$q = [D] s \quad (1)$$

Le calcul des lignes de la matrice $[D]$, correspondant chacune à une source "virtuelle", est effectué "off-line", *c.a.d.* lors de l'installation. Il n'est pas très critique puisque le contraste nécessaire est limité; la mise à jour de ces coefficients n'est donc normalement pas nécessaire, sauf à devoir couvrir des plages de conditions climatiques extrêmes.

Le vecteur d_i (ligne i de la matrice $[D]$) des coefficients correspondant à la source "virtuelle" i est celui à appliquer aux sources physiques pour obtenir une directivité spécifique, et peut être obtenu en minimisant la norme

du vecteur \mathbf{e}_i des erreurs estimées aux positions des microphones, défini par la relation 2 :

$$\mathbf{e}_i = \begin{bmatrix} \mathbf{p}_i + ([\mathbf{H}_{on}] \mathbf{d}_i) \\ [\mathbf{H}_{off}] \mathbf{d}_i \end{bmatrix} \quad (2)$$

où $[\mathbf{H}_{off}]$ est la matrice de transfert entre les sources physiques et les microphones situés hors du secteur angulaire à contrôler, $[\mathbf{H}_{on}]$ celle correspondant aux microphones situés à l'intérieur de ce secteur, et \mathbf{p}_i le vecteur des pressions que l'on souhaite voir imposer par la source "virtuelle" sur ces derniers microphones.

Une solution minimisant l'erreur $\|\mathbf{e}_i\|$ peut être obtenue via pseudo-inversion pénalisée :

$$\begin{aligned} \mathbf{d}_i &= \frac{-[\mathbf{H}_g]^* [\mathbf{w}_i]}{([\mathbf{H}_g]^* [\mathbf{w}_i] [\mathbf{H}_g]) + \mu} \mathbf{p}_g \\ [\mathbf{H}_g] &= \begin{bmatrix} [\mathbf{H}_{on}] \\ [\mathbf{H}_{off}] \end{bmatrix} \\ \mathbf{p}_g &= \begin{bmatrix} \mathbf{p}_i \\ \mathbf{0} \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (3)$$

Dans la relation 3, la matrice diagonale $[\mathbf{w}_i]$ permet d'introduire une pondération relative des différentes positions de microphones, par exemple pour ajuster l'importance relative de la précision obtenue sur \mathbf{p}_i et du contraste de pression (c'est ce qui a été fait en pratique, via un simple coefficient donnant le poids relatif des deux séries de positions).

De même, le paramètre de régularisation μ permet de régulariser l'inversion. En pratique, le nombre de positions à prendre en compte pour discrétiser correctement l'ensemble des directions de l'espace est a priori largement supérieur à celui des sources de contrôle, et le problème est donc nettement surdéterminé. La valeur de μ est donc faible, et peu critique.

Les paramètres d'inversion jouant un rôle mineur, les caractéristiques des sources "virtuelles" sont donc surtout fixées par la directivité "cible" donnée par le vecteur \mathbf{p}_i . Dans les résultats présentés ci-après, celle-ci est définie comme l'image de la pression primaire pondérée par une fenêtre gaussienne (réelle) dont le centre est décalé pour chaque valeur de i . Cette consigne peut être plus ou moins compatible avec le critère de contraste, et donc parfois sacrifiée au profit de la directivité. Les solutions ainsi obtenues sont cependant nettement différentes d'une valeur à l'autre de i .

Les sources "virtuelles" obtenues par ce pilotage de directivité ont ainsi des traces plus nettement différenciées sur les microphones de contrôle que les sources physiques (sensiblement omnidirectionnelles). En pratique, elles sont de plus égalisées en niveau. La matrice de contrôle associée est donc bien conditionnée, limitant le besoin de régularisation lors du contrôle (ce qui en favorise la précision).

La figure 3 illustre le rayonnement d'une source réelle et celui d'une source virtuelle. Il s'agit là encore de simulations, cette fois effectuées avec l'hypothèse de

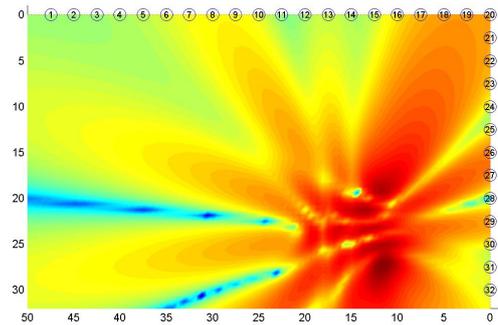
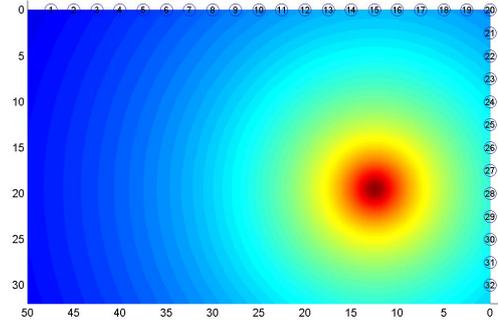


FIGURE 3 – Simulation du rayonnement d'une source réelle (h) et d'une source virtuelle (b)

sources monopôlaire sur sol rigide, et sans tenir compte de la présence du transformateur. Il ne s'agit donc que d'illustrations, un calcul plus précis nécessitant d'utiliser à nouveau le modèle BEM du transformateur pour prendre en compte sa diffraction.

Cette figure illustre comment la combinaison de 6 sources monopôlaire permet de réaliser une source dont la directivité est très prononcée, même à basses fréquences. Le contraste obtenu ici est limité compte tenu de la simplification du calcul ; les mesures sur site indiquent un meilleur résultat.

3.4 Microphones virtuels

Dans les limites des hypothèses évoquées ci-dessus, seuls les microphones situés dans le secteur angulaire ciblé par le contrôle sont utilisés pour minimiser la pression. Par contre, lors de la définition "off-line" des sources "virtuelles", il est nécessaire de disposer d'un grand nombre de microphones refermant un périmètre autour de la source, servant à imposer la contrainte de contraste sur l'ensemble des directions.

Il serait envisageable de prévoir, lors de l'installation, une série de microphones transportables à disposer sur site le temps de l'identification des transferts $[\mathbf{H}_{off}]$ - et qui seraient ensuite démontés. Cependant, une approximation de $[\mathbf{H}_{off}]$ peut être obtenue analytiquement, compte tenu des hypothèses de rayonnement considérées ici. Les positions

associées correspondent alors à des microphones "virtuels"

La qualité de cette approximation est relativement peu critique en pratique, tant que la directivité à réaliser n'est pas très prononcée - ce qui est précisément le cas des sources "virtuelles" utilisées dans notre approche. En particulier, la condition de "contraste" (*c.a.d.* ici de rayonnement réduit hors du secteur angulaire ciblé) est surtout sensible à la position relative des sources, qui peut être déterminée avec une très bonne précision sur site. La réponse relative des sources intervient également, et elle est identifiable d'après les transferts $[\mathbf{H}_{on}]$ effectivement mesurés.

En pratique, l'utilisation d'une matrice $[\mathbf{H}_{off}]$ estimée d'après un modèle analytique monopolaire s'est avérée conduire à des performances tout à fait raisonnable, avec l'avantage qu'elle peut alors être estimée à un nombre important de positions arbitraires (le calcul étant très rapide), sans que les microphones physiques correspondants ne soient nécessaires pour autant. Le fait d'identifier le débit des sources d'après $[\mathbf{H}_{on}]$ pour calculer ensuite $[\mathbf{H}_{off}]$ assure la cohérence entre les deux parties de la matrice $[\mathbf{H}_g]$ utilisée dans la relation 3.

3.5 Contrôle

Une fois la détermination des sources "virtuelles" effectuées, le système ne pilote plus que ces dernières, dont le nombre N_s est a priori inférieur ou égal au nombre N_q de sources physiques. La matrice de contrôle H_c (transferts entre les commandes et les microphones d'erreur) est alors de taille réduite à $N_m \times N_s$ où N_m est le nombre de microphones couvrant le secteur angulaire ciblé. Elle s'exprime par :

$$[\mathbf{H}_c] = [\mathbf{H}_{on}] [\mathbf{D}] \quad (4)$$

Cette matrice est la seule à être utilisée pour le contrôle effectif du système, donc en temps réel. Le nombre de microphones N_m est a priori bien supérieur à celui de sources "virtuelles" N_s , et ces dernières sont conçues pour avoir des réponses nettement différentes au niveau des microphones de contrôle : la matrice $[\mathbf{H}_c]$ est donc bien conditionnée.

La minimisation de la pression totale au niveau des microphones de contrôle peut alors être faite par un algorithme adaptatif classique, type LMS par exemple. La source primaire que constitue un transformateur de puissance peut être considérée comme invariante à des échelles temporelles relativement longues (plusieurs minutes typiquement), tout comme le sont les transferts des sources physiques. Il n'est donc pas nécessaire de prévoir une adaptation rapide, qui poserait éventuellement des problèmes de convergence ; à la limite, des essais de contrôles ont même été effectués en "boucle ouverte" sans que cela ne se traduise par des écarts significatifs par rapport aux performances simulées. Dans ce cas la commande s'était obtenue d'après la pression primaire \mathbf{p}_{pri} via une simple pseudo-inversion pénalisée :

$$\mathbf{s} = \frac{-[\mathbf{H}_c]^*}{([\mathbf{H}_c]^* [\mathbf{H}_c]) + \lambda} \mathbf{p}_{pri} \quad (5)$$

A nouveau, le conditionnement de la matrice $[\mathbf{H}_c]$ permet d'utiliser une valeur faible et peu critique pour le paramètre de régularisation λ .

Un contrôle en temps réel peut être implémenté, avec l'avantage que le rang de la matrice de contrôle est réduit à N_s : 4 à 8 canaux de contrôle sont typiquement nécessaires pour contrôler un lobe de directivité. De plus, la mise à jour des consignes peut être faite à une cadence très lente, ne nécessitant donc pas une puissance de calcul significative.

4 Mesures sur site

Un site expérimental a été installé dans une sous-station comportant deux transformateurs triphasés de 30MVA chacun, distants d'environ 30m. Ce site, situé dans la banlieue de Lausanne, est entouré de champs, ce qui a permis d'effectuer des essais sans gêner le voisinage.

32 microphones ont été installés sur la clôture, à une hauteur de 1m50, répartis tous les 2m50 afin de couvrir assez largement deux côtés du site. Le relevé de la pression rayonnée par les transformateurs a mis en évidence un lobe de directivité principal relativement large en direction d'un des coins du site, principalement lié au transformateur (T2) le plus proche.

Six sources de contrôle ont été positionnées au sol, à proximité de la base du transformateur T2. Quelques positions ont été testées, mais aucune optimisation n'a été réellement effectuée. La configuration retenue est schématisée sur la Figure 1, ou figurent également les positions des microphones.

Un jeu de sources "virtuelles" a été calculé d'après une identification effectuée à 100Hz, pour le contrôle du seul transformateur T2. Pour cet exemple, 5 sources "virtuelles" ont été pré-calculées, chacune utilisant les 6 sources physiques disponibles sur le site. Le secteur angulaire "ciblé" correspond à 12 microphones (n° 15 à 26) sur les 32 disponibles sur site.

La figure 4 montre un exemple de contrôle obtenu avec un jeu de "sources virtuelles" calculées off-line, puis utilisé pour contrôler dans le secteur angulaire défini sur la figure 1. La courbe rouge représente le niveau sans contrôle (champ primaire), et la noire celle avec contrôle. La barre verte matérialise les microphones utilisés pour la minimisation pendant le contrôle, les autres servant de "témoins" en dehors du secteur à contrôler.

L'atténuation obtenue dans le secteur à contrôler est de l'ordre de 10dB, avec quelques irrégularités selon les positions. En dehors de ce secteur, l'atténuation n'est pas nulle, mais le niveau moyen sur les 20 microphones reste à peu près inchangé, confirmant l'intérêt du principe proposé.

L'algorithme de calcul des sources "virtuelles" était pondéré de manière à privilégier la directivité, au détriment de la précision (poids relatif de 10). Le contrôle a alors été simulé d'après des mesures d'identification effectuées

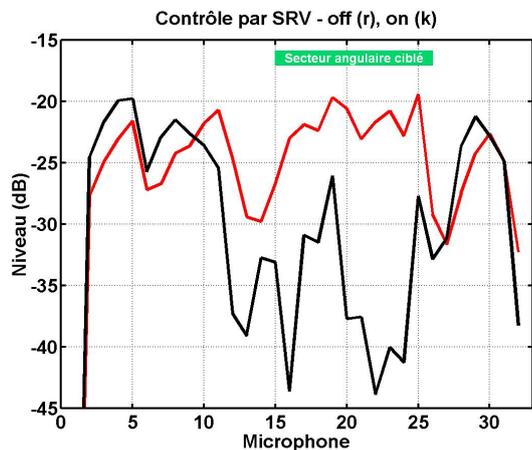


FIGURE 4 – Exemple de réduction en dB obtenue sur l'harmonique $100Hz$.

régulièrement, mais en utilisant systématiquement les sources "virtuelles" calculées initialement. Quelques essais de contrôle sur site (en "boucle ouverte") ont permis de vérifier la concordance des simulations (basées sur les identifications mesurées) et des résultats de contrôle sur site.

Le contrôle directif utilisant les sources "virtuelles" pré-calculées a ainsi été simulé pour une large gamme de conditions d'environnement : pendant la période des mesures, la température a varié entre environ $-1\text{ }^{\circ}C$ et $+28\text{ }^{\circ}C$, la charge moyenne des transformateurs reflétant sensiblement la température, avec un partage parfois variable entre eux. La figure 5 présente les performances du système, en comparant deux approches de contrôle. En abscisse figure le temps, exprimé en jours, la date d'identification étant indiquée par un cercle rouge. Le transformateur traité a été arrêté le 44^{ème} jour.

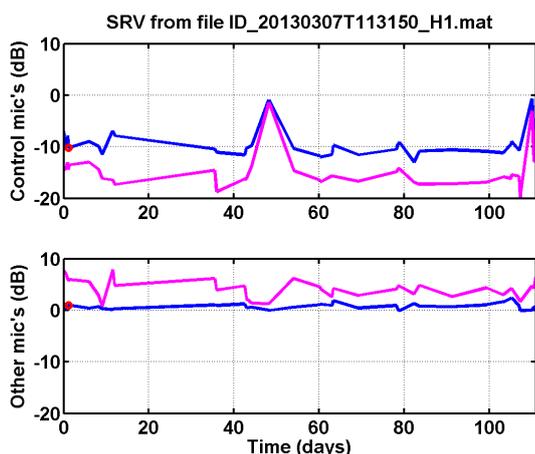


FIGURE 5 – Robustesse de la réduction obtenue sur l'harmonique $100Hz$.

La courbe du haut présente la réduction de pression sur les microphones "ciblés" (en dB), et celle du bas le résultat du contrôle sur les autres microphones. Ces deux critères sont des moyennes quadratiques sur l'ensemble des microphones concernés. La courbe en magenta correspond à une minimisation uniquement sur les microphones du secteur angulaire "ciblé", sans contrainte sur les autres : l'effort de contrôle est alors totalement utilisé pour la

réduction de pression, qui dépasse $15dB$ sur l'harmonique $100Hz$. La contrepartie est une augmentation du niveau sur les autres microphones, qui est de l'ordre de $+5dB$. L'effet d'un tel contrôle ciblant exclusivement un lobe principal de rayonnement du transformateur est d'homogénéiser sa directivité, qui tend à devenir uniforme.

En comparaison, la courbe bleu foncé (minimisation via les sources "virtuelles") augmente moins le niveau en dehors du lobe « ciblé », au prix d'une moindre réduction de ce lobe : la réduction de niveau en est d'environ $10dB$. Cette performance reste cependant meilleure qu'un contrôle global (sur une couronne complète de microphones).

Les courbes présentée ici illustrent ainsi le compromis réalisé par les "sources virtuelles", qui utilisent implicitement une partie de l'effort de contrôle pour éviter d'augmenter le niveau sonore en dehors du secteur contrôlé, malgré l'absence de microphones dédiés à ce critère.

5 Conclusion

Le principe présenté ici permet de simplifier considérablement une installation de contrôle du bruit d'un transformateur, mais cela repose sur les hypothèses listées au §2. Il reste à voir si cela correspond à un nombre de cas suffisants pour justifier de l'intérêt commercial d'un éventuel produit ; ceci dépasse bien évidemment le cadre purement scientifique.

Une première validation expérimentale sur un site "pilote" a permis de s'assurer de la validité de ces hypothèses dans ce cas, et d'estimer la robustesse des sources "virtuelles" face à des fluctuations climatiques. Le fait que ces sources identifiées a priori puissent être utilisées sur une large gamme de température ne signifie pas qu'elles ne sont pas impactées par ces fluctuations climatiques, mais plutôt que le contrôle par minimisation qui les utilise est suffisant pour compenser leurs variations : c'est le principe du concept baptisé "dual layer" développé au LMA.

Les résultats expérimentaux montrant l'intérêt potentiel de l'approche, une étude plus exhaustive est prévue, basée sur des simulations BEM prolongeant le calcul illustré par la figure 2. Ceci permettra d'explorer l'influence du nombre et de la position des sources, pour des configurations variées. Enfin, il restera à estimer la limite du concept quand la fréquence augmente, la complexité du rayonnement des sources risquant alors de compliquer significativement l'installation.

Remerciements

Les auteurs tiennent à remercier Arnaud Juignier (AJ Prod) pour sa patience lors de la mise au point des différents éléments de l'installation expérimentale.