

L'EXCELLENCE EN CONCEPTION

# Les transformateurs ABB se mettent en sourdine

Le niveau de bruit d'un transformateur compte au moins autant que ses caractéristiques de puissance et de tension, ou que ses pertes. De nouvelles méthodes de mesure couplant analyse vibroacoustique et modélisation numérique aident à définir des règles de conception permettant de réduire cette pollution sonore.

**Michał Kozupa**  
**Grzegorz Kmita**  
ABB Corporate Research  
Cracovie (Pologne)

michal.kozupa@  
pl.abb.com  
grzegorz.kmita@  
pl.abb.com

**Roberto Zannol**  
**Gianluca Bustreo**  
ABB Technology Center  
Monselice (Italie)

roberto.zannol@  
it.abb.com  
gianluca.bustreo@  
it.abb.com

Le marché des transformateurs est féroce-ment concurrentiel. Tout constructeur souhaitant se distinguer aux yeux de la clientèle doit trouver une manière de sortir du lot. Réduire le niveau sonore de ses appareils en est une.

Si le bruit figure au rang des pollutions industrielles, c'est encore plus vrai des émissions sonores d'un transformateur, du fait des harmoniques. ABB s'est donc toujours attaché à concevoir les transformateurs les moins bruyants possibles.

De nouveaux outils de mesure vibroacoustiques aident à analyser et à identifier les sources de bruit et de vibrations.

L'apparition de nouvelles techniques a changé la donne : la vibrométrie laser 3D et la mesure d'intensité acoustique par balayage, adossées à de puissants outils numériques de modélisation multiphysique, permettent aujourd'hui l'analyse détaillée et l'identification des sources sonores et vibratoires.

Leur précision et leur efficacité inégalées sont un atout supplémentaire lorsqu'il s'agit de concevoir des systèmes visant à réduire le bruit des transformateurs.

## Bruit et vibrations

Le ronflement, causé par des phénomènes physiques dans les enroulements et le noyau, est une caractéristique intrinsèque d'un transformateur. À vide, il est dû principalement à la magnétostriction du noyau, tandis qu'en charge, ce sont les vibrations des enroulements qui sont en cause [1,2]. Dans les deux cas, ce bruit est de nature harmonique mais la fréquence dominante et le spectre fréquentiel diffèrent d'un mode à l'autre →1.





Photo : ABB a mis au point des techniques d'atténuation du bruit dans les transformateurs.

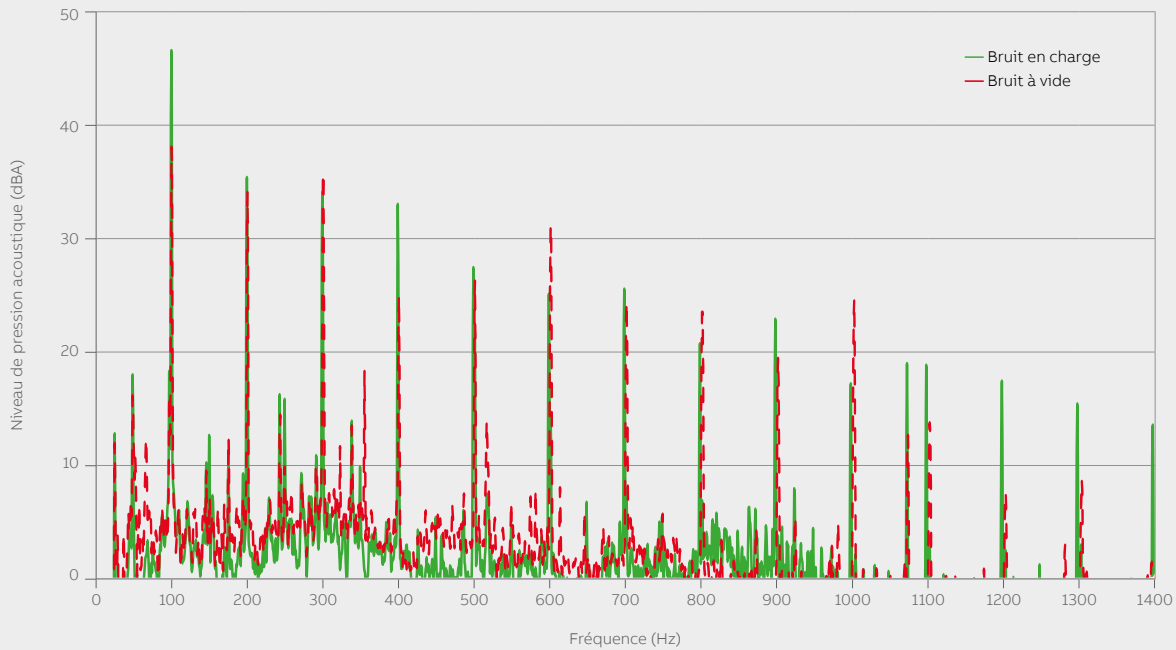
Si les vibrations sont générées par les parties actives (généralement immergées dans l'huile) d'un transformateur de puissance, c'est la cuve du transformateur qui fait rayonner le bruit. Une mauvaise conception mécanique de l'appareil peut être à l'origine de résonances structurelles locales qui amplifient ce phénomène. Bien identifier les sources vibroacoustiques est donc un préalable pour en contrer les effets.

#### Mesure laser

La vibrométrie laser à balayage Doppler (LDV), qui mesure directement la vitesse vibratoire, est la technique de prédilection pour connaître les vibrations et les déformées opérationnelles. Elle utilise l'effet Doppler pour mesurer le décalage en fréquence d'un faisceau laser réfléchi par une surface vibrante.

La fréquence très élevée du laser (environ 400 THz) garantit une mesure précise. La LDV étant une technique sans contact, elle présente le double avantage de ne pas interférer avec l'appareil à tester et surtout de pouvoir s'effectuer à bonne distance de ce dernier →2. Un gage de sécurité dans le cas de transformateurs de puissance haute tension !

Par ailleurs, là où la mesure traditionnelle par accéléromètre, en plus de devoir tenir compte de la situation de charge du transformateur, pâtit de sa lenteur et de sa faible résolution, la LDV effectue en continu un balayage 3D haute résolution et enregistre, en un temps très court, des milliers de points de mesure vibratoire et des informations de déformation détaillées →3.



01

### Intensimétrie

La mesure de l'intensité acoustique par balayage est une très bonne méthode pour identifier et localiser les sources de bruit problématiques. L'intensité acoustique étant une grandeur vectorielle, elle renseigne aussi bien sur la direction que sur l'amplitude du son, à la différence des mesures

—

La vibrométrie laser effectue un balayage 3D haute résolution et enregistre, en un temps très court, des milliers de points de mesure et des informations de déformation détaillées.

par différence de pression, qui n'indiquent que ce dernier paramètre. Les sondes intensimétriques, très directionnelles, sont moins sensibles aux interférences du bruit de fond. La mesure s'effectue perpendiculairement à une surface définie par une grille de points équidistants. Les résultats servent à calculer la puissance acoustique sur toute la grille ou à créer des courbes isosoniques. Ensuite, on peut extraire par interpolation les lignes isosoniques pour une seule fréquence ou un niveau global →4.



—  
01 Spectre acoustique en charge et à vide d'un transformateur de puissance

—  
02 Mesure de vibrations par laser à balayage Doppler

### Corrélation entre vibration et bruit

L'analyse des images acoustiques et des profils vibratoires d'un transformateur exige de solides connaissances sur la conversion des vibrations de structure en bruit audible, dont les principales

—  
L'analyse numérique permet d'évaluer l'efficacité des éventuelles mesures d'atténuation sonore.

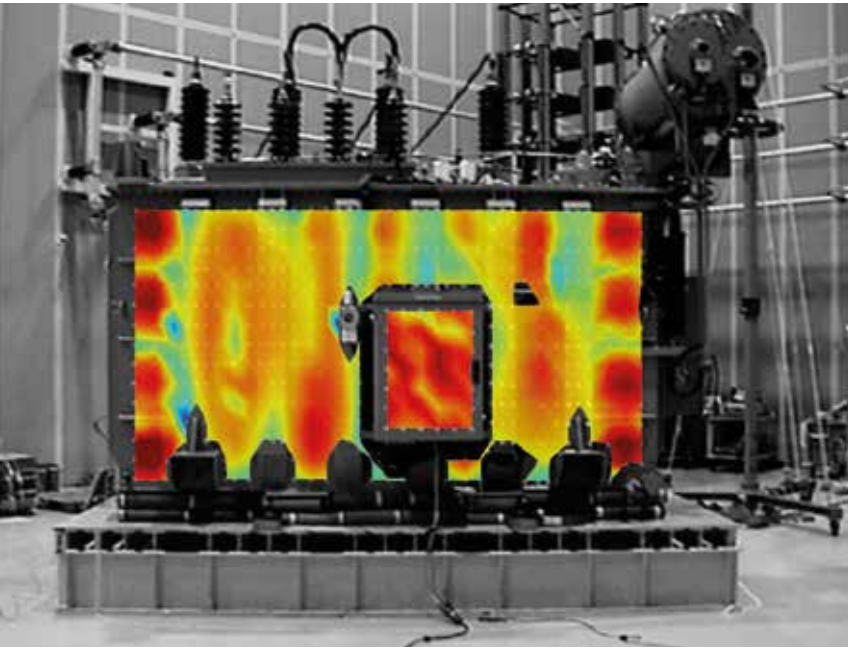
étapes sont rappelées en →5. En connaissant la surface d'une structure, le coefficient de rayonnement et la vitesse vibratoire, on en déduit la puissance acoustique rayonnée, dont la formule

donne la valeur en décibel. Le bruit du transformateur étant mesuré en unités de pression acoustique pondérée A, la vitesse vibratoire présente elle aussi une pondération A [3,4].

### Modélisation multiphysique

L'analyse numérique, en plus d'éclairer sur l'origine du bruit, sert à évaluer l'efficacité des éventuelles techniques d'atténuation sonore. Le prototypage virtuel, source de gains de temps et d'argent, est de la partie, tout comme les essais avant mise en œuvre et validation de la solution.





03

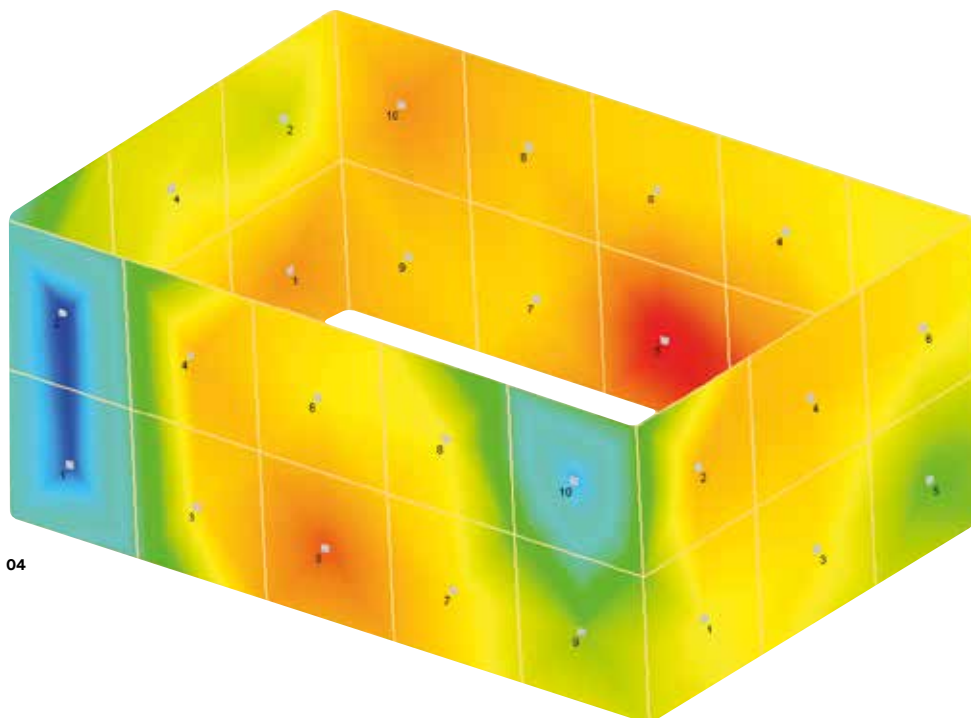
Le transfert d'énergie à l'œuvre dans la formation du son est un phénomène multiphysique classique, qui s'appréhende à l'aide de prédictions numériques couplant dynamique des structures, électromagnétisme et acoustique →6,7. Le modèle structurel, forces d'excitation comprises, dérive d'une analyse complète des harmoniques en tenant compte de l'interaction fluide-structure, paramètre clé du profil vibratoire de la cuve. Toute analyse complète de la structure, qui débouche sur la réponse acoustique, doit commencer par une analyse modale en fonctionnement précise et une bonne corrélation avec les valeurs propres du système dérivées des données d'essais réelles fournies par la vibrométrie laser en 3D.

Un modèle de vibration bien défini des surfaces périphériques ne fournit pas seulement un bon profil du bruit rayonné mais aussi des informations sur les zones de forte amplitude vibratoire : un atout de taille pour déterminer les mesures d'atténuation adéquates !

—  
Un modèle de vibration bien défini des surfaces périphériques fournit un bon profil du bruit rayonné et des informations sur les zones de forte amplitude.

#### Atténuation du bruit

La mesure la plus courante, qui n'est pas exclusive aux transformateurs, consiste à isoler l'appareil par une enveloppe (capot) ; on gagne ainsi 20 à 30 dB, ce qui n'est pas négligeable, mais insuffisant pour arrêter les spectres de fréquences de certains transformateurs.



04

03 Déformées opérationnelles à 100 Hz de la cuve d'un transformateur de 40 MVA

04 Champs d'intensité acoustique autour du transformateur

05 Principe de conversion des vibrations de structure en pression acoustique

06 Modèle numérique complet du transformateur de puissance avec couplage électromagnéto-mécanique et acoustique

07 Rayonnement acoustique de la cuve du transformateur dans le champ de pression

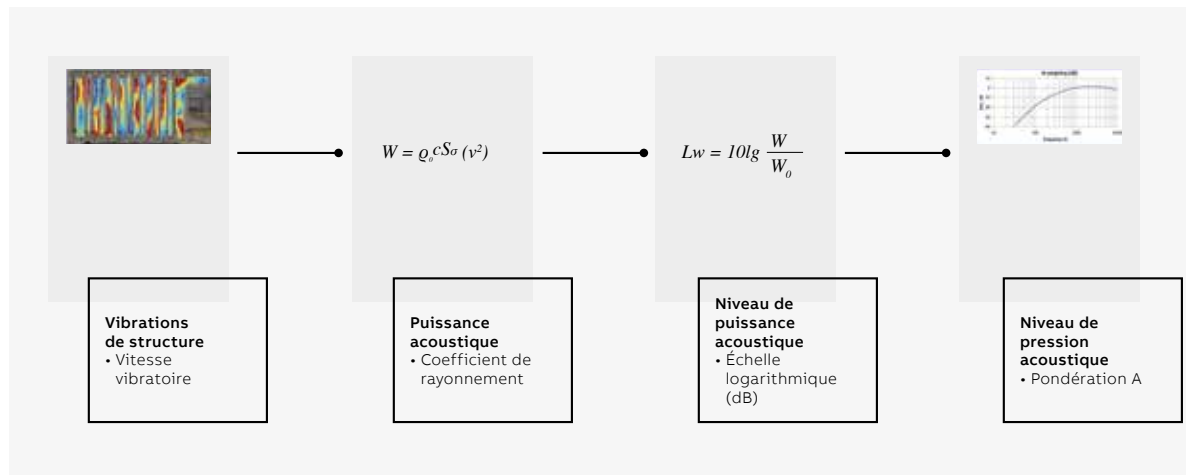
#### Bibliographie

[1] Kavasoglu, M., et al., « Prediction of Transformer Load Noise », *Conférence COMSOL*, Paris, 2010.

[2] Girgis, R. S., et al., « Comprehensive Analysis of Load Noise of Power Transformers », *IEEE Power Energy Society General Meeting*, p. 1-7, 2009.

[3] Hrkac, M., et al., « Vibroacoustic behavior of SPT transformer », *International Colloquium Transformer Research and Asset Management*, CIGRÉ, 2012.

[4] Kozupa, M., Kmita, G., « Investigation on noise radiation to structure vibration correlation in vibroacoustic of transformer », *Vibroengineering PROCEDIA*, vol. 3, p. 160-164, Katowice (Pologne), 2014.



05

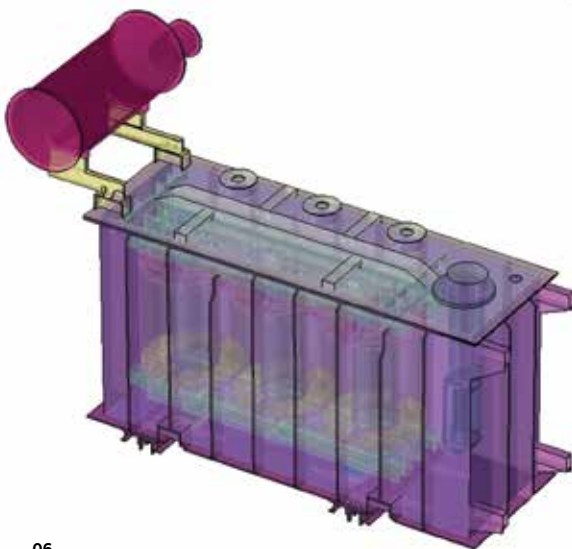
C'est pourquoi, entre autres raisons, ABB s'intéresse à des solutions intégrées au transformateur et invisibles de l'extérieur, qui ne perturbent en rien la maintenance de l'appareil par le client.

Les méthodes vibroacoustiques de mesure du bruit émis par un transformateur de puissance ont bien d'autres applications.

#### Nouveaux champs d'application

Ces méthodes vibroacoustiques destinées aux transformateurs de puissance ont bien d'autres usages : diagnostic des paliers et de la transmission vibratoire dans les moteurs de forte puissance, atténuation du bourdonnement

des batteries de condensateurs, analyse structurelle des turbocompresseurs, pour ne citer que quelques exemples. Les clients étant de plus en plus soucieux de minimiser les nuisances environnementales, donc sonores, la vibroacoustique et la modélisation multiphysique sont promises à un bel avenir. Fort de son expertise dans la vibrométrie laser et la modélisation acoustique, ABB est tout disposé à leur prêter une oreille attentive. ●



06



07