

Calcul couplé fluide-structure pour déterminer les origines du bruit rayonné par un transformateur ferroviaire

J.-B. Dupont^a, C. Clerc^a, C. Prudhomme^b

a. *Vibratec, 28 chemin du petit bois, BP 36, 69131 Ecully Cedex, FRANCE*

b. *JST Transformateurs, 84 avenue Paul Santy, 69371 Lyon Cedex 08, FRANCE*

Résumé :

Les courants alimentant les transformateurs de traction ferroviaire sont à l'origine d'efforts électromagnétiques (notamment, la magnétostriction) appliqués au circuit magnétique. Ces vibrations peuvent être transmises à la coque extérieure par les cales qui maintiennent le circuit mais aussi par l'huile qui assure isolation et refroidissement. Un modèle éléments finis est utilisé pour étudier le comportement dynamique du transformateur, en prenant en compte les couplages fluide-structure, il permet de mettre en évidence les rôles complexes des cales et de l'huile dans la transmission des vibrations et de comparer différentes configurations.

Abstract :

For traction transformers, supply currents cause electromagnetic forces (mainly magnetostriction) applied to the magnetic core. These vibrations can be transmitted to the outer shell by the wedges that hold the core but also through the oil that provides insulation and cooling. A finite element model is used to study the dynamic behaviour of the transformer. It takes the fluid-structure coupling into account. Thanks to the simulations, the complex roles of wedges and oil in the transmission of vibrations can be highlighted and configurations can be compared.

Mots clefs : Transformateur ; Couplage fluide-structure ; Magnétostriction

1 Introduction

Le transformateur étudié ici est un transformateur de traction ferroviaire. La principale contrainte de conception liée à ce type de transformateur est que leur usage impose une forte puissance pour un encombrement réduit. L'appareil étudié présente un niveau de puissance acoustique important, en particulier dans la bande 600-2000 Hz, à cause des nombreuses harmoniques de courant dues à l'alimentation MLI. Cela a motivé cette démarche d'analyse des origines du bruit et des pistes de réduction.

Le principe de l'étude décrite dans ce document est de développer un modèle éléments finis du transformateur permettant notamment de prendre en compte les effets de couplage entre la structure du transformateur et l'huile qu'il contient. Ce modèle pourra alors être utilisé pour :

- Comprendre les mécanismes de transmission des vibrations
- Evaluer des solutions de réduction du bruit rayonné

La modélisation d'une structure si complexe nécessite plusieurs hypothèses fortes. Les deux principales hypothèses concernent la modélisation des liaisons mécaniques entre les différents composants du transformateur et l'excitation (l'excitation mécanique vue par un transformateur est difficilement modélisable). Compte tenu de l'importance des hypothèses formulées, l'objectif du modèle numérique

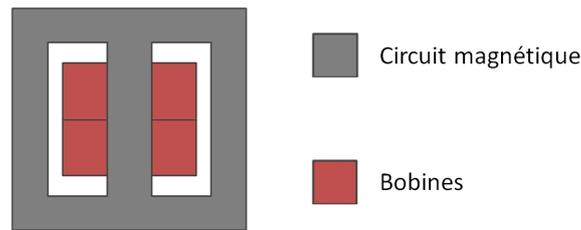


FIGURE 1 – Schéma de principe d'un transformateur « cuirassé »

du transformateur est plus d'évaluer les gains apportés par des modifications que de prédire quantitativement la puissance rayonnée par le transformateur. Il s'inscrit donc dans une démarche comparative entre les solutions envisageables. Les modifications évaluées sont de deux types :

- augmentation de l'épaisseur de tôle
- modification du matériau des cales servant à situer le circuit magnétique dans la cuve du transformateur

Étant donné que les déformées (notamment les longueurs d'onde de flexion constatées sur la structure) ne changent pas radicalement d'une configuration à l'autre, on peut supposer que le facteur de rayonnement est constant. L'ensemble des comparaisons entre les configurations s'effectue donc en termes de vitesse vibratoire sur la peau extérieure du transformateur. Appliquer les gains obtenus sur la vitesse vibratoire permettra d'estimer la réduction de bruit.

2 Description du transformateur

Dans le but d'adapter la tension d'une source électrique alternative pour pouvoir l'utiliser, un transformateur est constitué de plusieurs bobines de cuivre reliées entre elles par un circuit magnétique. On alimente l'enroulement d'entrée (appelé primaire) par un courant alternatif, ce qui génère un flux magnétique transmis par l'intermédiaire du circuit magnétique à un enroulement secondaire, qui génère à son tour une tension de sortie dépendant du ratio des nombres de spires des deux enroulements.

Le transformateur étudié ici est de type « cuirassé » : le circuit magnétique entoure les bobines (voir figure 1). Cela permet d'obtenir une conception plus compacte à puissance équivalente. En outre, pour des raisons de refroidissement et de propriétés diélectriques, les bobines et le circuit magnétique sont immergés dans l'huile.

La structure du transformateur se compose donc de trois parties principales : le circuit magnétique, les enroulements et la cuve. La cuve constitue le corps du transformateur, c'est la structure qui contient l'huile et les composants électromagnétiques. Le circuit magnétique et les bobines sont bloqués dans la cuve grâce à une série de cales.

3 Excitations électromagnétiques

D'une manière générale, il existe trois principaux types d'excitation électromagnétique :

- La pression de Maxwell
- Les forces de Laplace
- La magnétostriction

La pression de Maxwell intervient lorsqu'un flux magnétique franchit un entrefer. C'est l'origine principale du bruit des moteurs électriques. Dans un transformateur, il n'y a théoriquement pas d'entrefer, la pression de Maxwell est donc négligée. Les forces de Laplace s'appliquent sur les conducteurs parcourus par un courant en présence d'un champ magnétique. Le flux magnétique étant supposé parfaitement canalisé par le circuit magnétique, le champ magnétique dans l'air est très faible. Les forces de Laplace sont donc négligées dans le cas du transformateur.

La magnétostriction est la propriété qu'ont les matériaux ferromagnétiques de modifier leurs dimensions lorsqu'ils sont soumis à des champs magnétiques. L'explication de l'effet magnétostrictif réside



FIGURE 2 – L'effet magnétostrictif

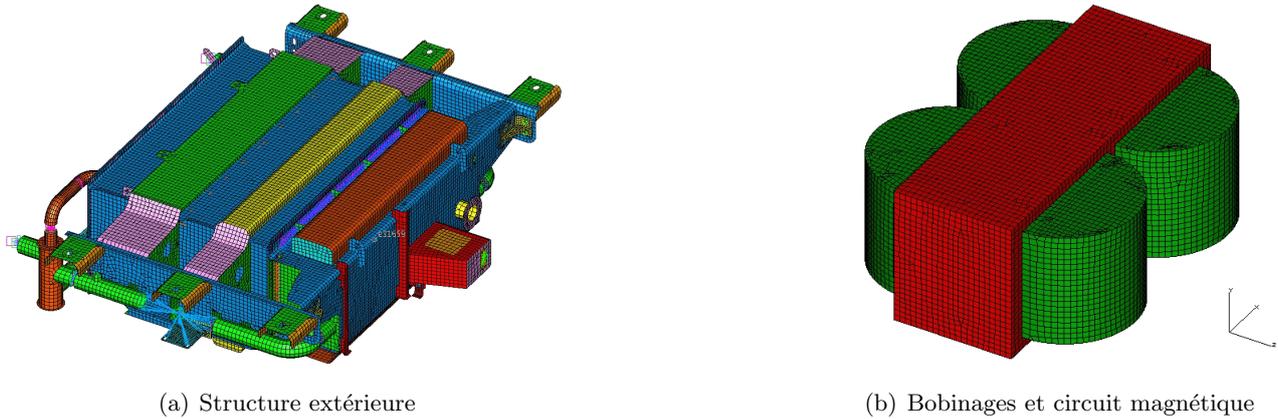


FIGURE 3 – Modèles de la structure du transformateur

dans la structure d'un matériau ferromagnétique. Ces matériaux peuvent être considérés comme des ensembles de grains de matière, qui agissent comme des aimants permanents. Lorsque le matériau n'est pas magnétisé, ces grains se disposent dans l'espace de manière aléatoire. Dès que le matériau est magnétisé, elles orientent leur axe dans la même direction, provoquant un allongement dans la direction du champ (figure 2).

Une induction positive et une induction négative étirent le matériau selon le même axe. L'allongement est donc positif dans les deux cas. Pour une induction sinusoïdale, un phénomène de redressement se produit donc et la fréquence de la déformation est le double de celle de l'induction. La magnétostriction n'est pas modélisable. On peut en revanche la caractériser pour un échantillon de matériau.

4 Description du modèle

4.1 Modèle structure

La figure 3(a) présente le modèle éléments finis de la structure extérieure du transformateur. Il est essentiellement composé d'éléments de type plaque mince. Il décrit la cuve contenant les composants électromagnétiques et l'huile. Les composants non concernés par le rayonnement acoustique directe ne sont pas modélisés (en particulier l'aéroréfrigérant assurant l'évacuation de la chaleur vers l'extérieur).

Pour les besoins du calcul couplé, les bobinages et le circuit magnétique doivent présenter une interface avec le fluide. On ne peut donc se contenter de masses ponctuelles insérées dans la cuve. Les éléments électromagnétiques ont donc été modélisés par des éléments de type plaque. La modélisation obtenue est présentée sur la Figure 3(b). Compte tenu de la faible raideur de contact entre les enroulements (en vert) et le circuit magnétique (en rouge), ils sont considérés totalement découplés.

4.2 Modèle fluide

Le volume d'huile contenu dans le transformateur a été défini à partir du modèle de la structure. Les frontières ont été dégagées, puis le volume intérieur a été maillé pour obtenir le modèle éléments finis présenté sur la figure 4. Il est réalisé en éléments volumiques tétraédriques paraboliques.

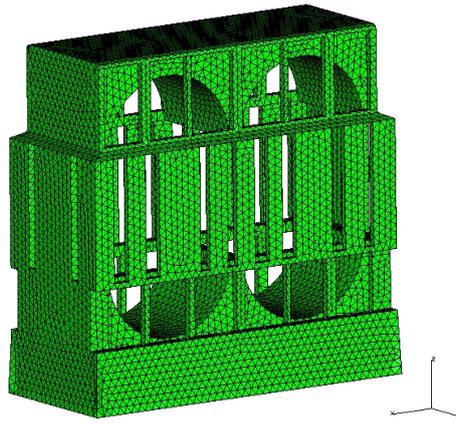


FIGURE 4 – Modèle éléments finis du fluide

Configuration	Description
Initiale	Configuration initiale
Huile sans cales	Les cales sont retirées
Cales sans huile	L'huile est remplacée par de l'air
6mm	Les tôles de 4mm sont portées à 6mm d'épaisseur
Cales résilientes	Le matériau des cales est un matériau résilient plus souple
Cales résilientes 6mm	Conf. « 6 mm » + Conf. « Cales résilientes »

TABLE 1 – Les configurations de calcul

4.3 L'excitation

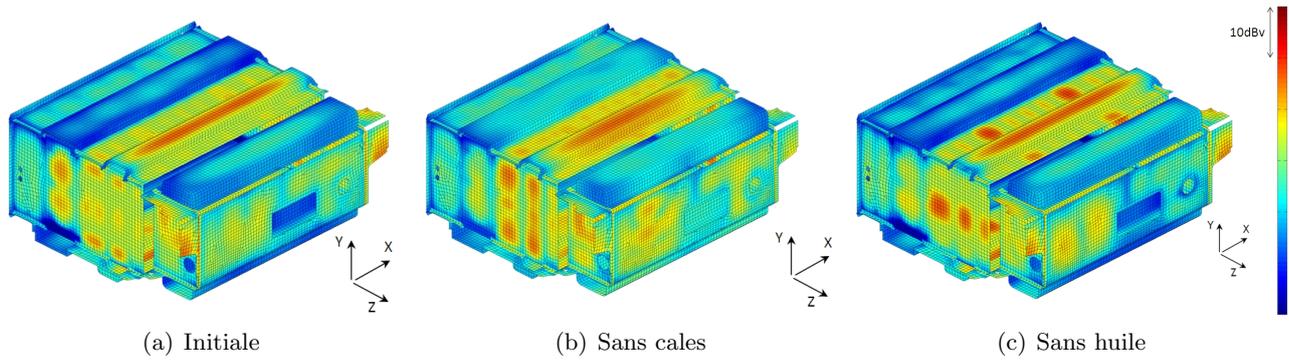
L'excitation est supposée due aux phénomènes de magnétostriction, ce qui impose une déformation au circuit magnétique, et non un effort. L'excitation retenue est donc un déplacement imposé : une accélération normale est définie uniformément sur les quatre faces principales du circuit magnétique. Étant donnée la méconnaissance des phénomènes magnétostrictifs, il semble impossible de définir quantitativement l'excitation due à la magnétostriction. Ce modèle ne peut donc pas être quantitativement prédictif. Une accélération normale unitaire est constante sur toute la bande de fréquences de l'étude est imposée sur la surface du circuit magnétique afin de pouvoir comparer entre elles les différentes configurations simulées.

5 Principe du calcul

Les calculs ont été réalisés grâce à MSC.Nastran 2007. Le principe du calcul fluide/structure est de calculer les bases modales du fluide (0-4000 Hz) et de la structure (0-3000 Hz) séparément dans un premier temps. La condition de continuité du déplacement à l'interface permet de calculer une base modale couplée. Par superposition modale, on obtient alors la réponse du système sur 350-2250 Hz. La donnée de sortie est la vitesse normale de la peau extérieure du transformateur : elle est liée à la puissance rayonnée par le facteur de rayonnement, supposé constant. Les configurations étudiées sont données par le tableau 1.

6 Résultats

La figure 5 présentent les niveaux globaux de vitesse vibratoire normale pour chaque configuration. Les vitesses sont données en dBv (ref. $5 \times 10^{-8} m/s$). L'échelle est commune à toutes les cartographies.

FIGURE 5 – Vitesse vibratoire normale [dBv ref. $5 \times 10^{-8}m/s$]

6.1 Configuration initiale

On constate d'une manière générale que les niveaux vibratoires sont forts dans les zones où la cuve est directement excitée par le circuit magnétique par le biais des cales, c'est-à-dire sur la zone milieu des faces X et Y. Sur la face Y+, les structures situées à l'intérieur du volume du premier raidisseur (raidisseur de gauche) évitent les trop forts niveaux vibratoires à sa surface. Le second raidisseur, en revanche, est creux. Il peut donc entrer en mouvement sur ses modes de flexion. Son premier mode, situé à 900 Hz, est responsable du fort niveau vibratoire visible sur la figure 5(a). Le troisième raidisseur est également creux, mais sa forte épaisseur et le fait qu'il ne se situe pas directement au voisinage du circuit magnétique ont pour conséquence des faibles niveaux vibratoires.

6.2 Rôles des cales et de l'huile

Lorsqu'on supprime les cales de bois, la zone milieu de la cuve n'est plus directement excitée par le circuit magnétique. Les niveaux vibratoires sont donc plus homogènes sur l'ensemble du transformateur (figure 5(b)). Pour autant, ils ne sont pas plus faibles car, outre la transmission des vibrations du circuit, les cales ont un effet de raideur sur les parois du transformateur, limitant ainsi la dimension des parties de tôle susceptibles de battre librement.

Lorsqu'on supprime l'huile contenue dans le transformateur, les niveaux vibratoires sont essentiellement concentrés sur la partie milieu de la cuve (figure 5(c)). Dans cette zone, elle est directement excitée par les cales. Dans cette configuration, les tôles ne profitent plus de des effets de masse et de raideur apportés par l'huile. Les parties de tôle libre entre les cales sont donc beaucoup plus en mesure de vibrer librement.

L'étude des configurations « huile sans cales » et « cales sans huile » indique donc qu'aucun chemin n'est privilégié dans le transfert de l'énergie vibratoire depuis le circuit magnétique vers la peau vibrante du transformateur. L'huile et les cales ont chacun un rôle dans la transmission des vibrations mais ont également un second effet (effet de raideur pour les cales, effets de masse et de raideur pour l'huile) qui a tendance à atténuer la transmission par l'autre voie : l'huile limite les vibrations dues aux cales, et inversement.

6.3 Comparaison des configurations

La figure 6 présente la vitesse vibratoire quadratique normale moyennée à chaque fréquence de calcul sur toute la peau vibrante du transformateur. L'excitation est constante à 1 m.s^{-2} pour toutes les fréquences.

Le comportement basse fréquence est approximativement le même pour toutes les configurations : les écarts de vitesse quadratique moyenne n'excèdent pas 3 dBv autour de 380 Hz. Pour les configurations « huile sans cales » et « cales résilientes », la vitesse rencontre un premier maximum aux environs de 600 Hz. Ce pic correspond à un mouvement d'ensemble des faces supérieure et inférieure (Y+ et Y-). Ce mouvement d'ensemble est permis soit par l'absence de cale, soit par la souplesse des cales

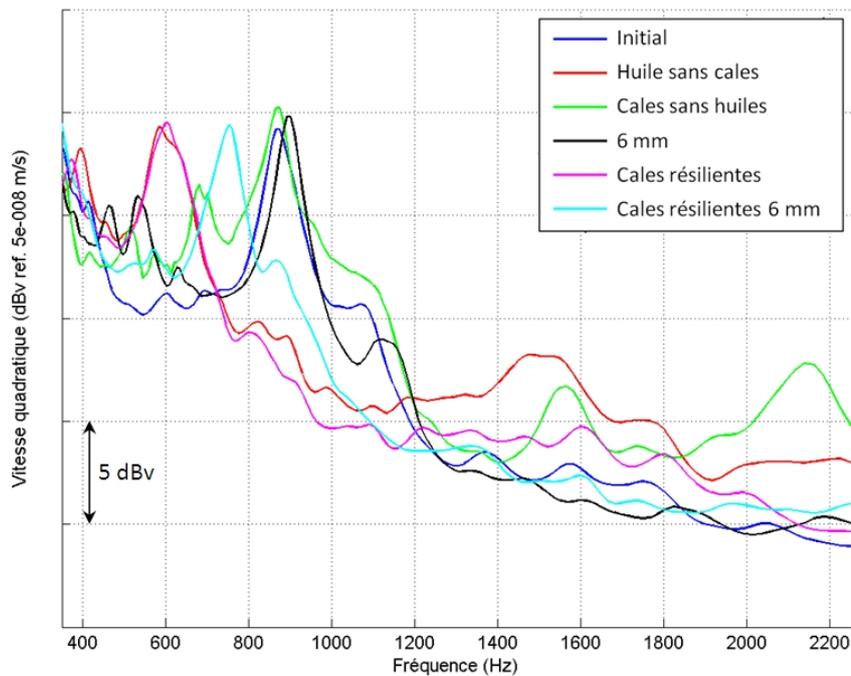


FIGURE 6 – Vitesse quadratique moyenne sur le transformateur - Comparaison des configurations

résilientes (comparées aux cales en bois). Pour les autres configurations, les cales ne permettent pas ce mouvement d'ensemble de la face. Pour la configuration « cales résilientes 6 mm », la face est plus épaisse donc plus raide : le pic est visible à 750 Hz environ.

Lorsque les cales ne permettent pas le mouvement d'ensemble des faces supérieure et inférieure, le comportement des faces se rapproche d'un déplacement imposé et le second raidisseur est excité sur son premier mode de flexion, aux environs de 900 Hz. Les trois configurations intégrant les cales en bois présentent donc un maximum de vitesse vibratoire à 900 Hz, essentiellement dû au second raidisseur.

Au-delà de 1000 Hz, la densité modale devient très importante et le caractère modal de la réponse du transformateur s'estompe. Le comportement du transformateur est alors piloté par les effets de masse. Les configurations embarquant le plus de masse (« 6 mm » et « cales résilientes 6 mm ») sont donc les plus favorables. Viennent ensuite les configurations embarquant la masse initiale. Enfin, les configurations sans cales ou sans huile sont celles qui présentent les plus forts niveaux vibratoires : on ne peut profiter de l'effet de raideur ou de masse apporté par les cales ou l'huile.

7 Conclusions

Ce document a présenté une démarche de modélisation d'un transformateur visant à estimer les vitesses vibratoires d'un transformateur de traction ferroviaire dans différentes configurations. La structure de ce transformateur est excitée par les effets magnétostrictifs dus aux nombreuses harmoniques de courant générées par l'alimentation MLI.

Un calcul couplé fluide/structure a été réalisé grâce au logiciel MSC.Nastran 2007 afin de tenir compte des effets de couplage entre la structure du transformateur et l'huile qu'il contient.

Les calculs ont tout d'abord permis de mettre en lumière le rôle des cales et de l'huile dans la transmission des vibrations : ces deux éléments contribuent substantiellement à la transmission des vibrations. Cependant, ils ont également un effet modérateur sur les niveaux vibratoires : les cales et l'huile ont un effet de masse et de raideur ajoutées.

Les modifications ont une influence d'une part sur le comportement modal du transformateur entre 600 Hz et 1000 Hz, et d'autre part sur la masse en mouvement : elles influent sur le comportement hautes fréquences du transformateur, domaine où la puissance acoustique rayonnée est maximum.