

CFA/VISHNO 2016

Diagnostic qualité de boîtes de vitesse automatiques à partir de mesures acoustiques et vibratoires

J. Drouet

Punch Powerglide Strasbourg, 81, rue de la Rochelle, BP 33, 67026 Strasbourg Cedex,
France

julie.drouet@punchpowerglide.com



LE MANS

Le monde automobile est soumis à une demande de plus en plus exigeante en termes de confort sonore. Ainsi, la production de boîtes de vitesses automatiques se doit de satisfaire un certain niveau de qualité. Des bancs de test ont donc été développés en incluant des systèmes de mesure vibro-acoustique. La réponse à une excitation donnée permet aussi de détecter d'éventuelles défaillances dans la boîte de vitesse. Cet article présente une application industrielle vibro-acoustique visant à détecter, identifier puis corriger les défaillances de transmission automatique. Pour cela il est nécessaire de mener une analyse spectrale des mesures de bancs d'essai, puis une investigation via une méthodologie adaptée aux contraintes industrielles.

1 Introduction

Une production de qualité est un élément clé pour la réussite et le développement d'une entreprise. Des moyens performants ont donc été développés ces dernières décennies pour l'analyse des défaillances produits, tels que des systèmes de mesure vibratoire et acoustique. La propagation d'ondes acoustiques est complexe à interpréter puisque les voies de transfert modifient le signal émis par la source d'excitation.

Ces travaux présentent des cas d'étude concrets dans lesquels l'utilisation de l'acoustique fut l'unique moyen d'identifier certains types de défauts dans les boîtes de vitesses automatiques.

Pour se faire, la composition et le fonctionnement de ce produit seront abordés ainsi que les équipements de mesure et les conditions de tests. Ensuite les techniques d'investigation seront présentées sur des exemples concrets afin de mettre en évidence la complexité d'identification et de correction de la défaillance, compte tenu des contraintes industrielles.

2 Contexte et notions générales

2.1 Production de boîtes de vitesses automatiques

Punch Powerglide Strasbourg (PPS) est une entreprise spécialisée dans la production de boîtes de vitesse automatiques. Anciennement General Motors l'usine changea de groupe en 2013, mais pas d'activités.

Fort de son expérience l'usine démarra en 2013 la production de la transmission 8 vitesses. Contrairement aux modèles 3, 4, 5 puis 6 vitesses qui furent développées au centre R&D interne, le produit 8 vitesses a été conçu par ZF Friedrichshafen AG. PPS n'est donc pas libre de modifications techniques ou d'amélioration des procédés de fabrication sans accord préalable de ZF. Ce point est une contrainte non négligeable dans le cadre d'amélioration continue visant à réduire la génération de défaut.

2.2 Composition et fonctionnement

La boîte 8 vitesses automatique a été développée par le constructeur allemand ZF. La documentation [1] sur ce produit est donc soumise à la confidentialité. Ne seront donc présentés ici que les notions utiles à la compréhension des points abordés dans l'article.

La boîte automatique 8 vitesses produites à PPS se compose de plusieurs éléments pouvant partager en sous-ensembles :

- L'enveloppe externe dont le but principal est de protéger les composants internes et faire le lien avec les éléments du véhicule;

- La partie électronique de la transmission qui commande et régule la pression d'huile et l'application des embrayages ;
- Le convertisseur de couple servant à transférer de manière souple les rapides et importantes variations de couple issues du moteur du véhicule ;
- Le sous-ensemble pompe, alimentant l'huile nécessaire à la lubrification ;
- La partie mécanique, communément appelée la tour, qui se compose essentiellement de trains épicycloïdaux (figure 1), d'embrayages et de roulements.

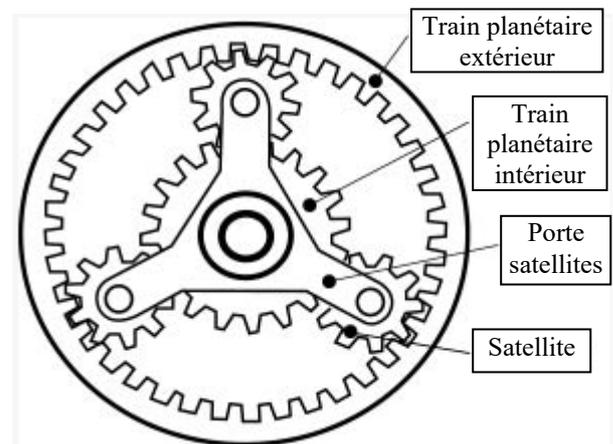


Figure 1: Représentation des composants d'un train épicycloïdal.

Le fonctionnement de la transmission est basé sur l'application d'une combinaison d'embrayage, cette combinaison variant pour chaque rapport engagé. Ainsi, les engrenements sont sollicités différemment d'un rapport à l'autre. Plus de détails seront apportés dans le cadre d'illustrations.

3 Mesures

3.1 Bancs d'essai

Dans une démarche de qualité produit optimale, un contrôle 100% des transmissions finies (avant expédition) est effectué sur 4 bancs d'essai identiques. Ces machines sont équipées de 2 moteurs électriques indépendants simulant les contraintes en entrée et en sortie de la boîte de vitesses (soit respectivement le moteur du véhicule et la vitesse de rotation des roues).

Divers capteurs sont présents pour vérifier le bon fonctionnement mécanique, électronique et hydraulique du produit. Un accéléromètre et un microphone sont disposés comme illustré en figure 1, de manière à vérifier le comportement vibro-acoustique de la transmission.

L'accéléromètre de type KS03 MeTool vient en contact sur le côté de la transmission (emplacement conçu sur l'enveloppe externe).

Le microphone de type 4189 B&K est associé à un préamplificateur et est protégé des projections d'huile par une boule en mousse. Le capteur est positionné au-dessus de la transmission selon une spécification dépendant de la géométrie de la boîte de vitesses testée.



Figure 1: Emplacement des capteurs vibro-acoustique par rapport à la transmission en phase de test.

Le système d'acquisition et de traitement des signaux est géré par le logiciel AVONIS de Saab Medav.

3.2 Conditions de test

Afin de détecter un maximum de défaut en un minimum de temps, les conditions de test ont été optimisées.

Les rampes de vitesses appliquées sont illustrées en figure 2. Bien que la boîte de vitesse soit conçue pour aller jusqu'à 8 rapports, les mesures NVH ne sont effectuées que que 4 d'entre eux: 1, 2, 4 et 5. Les raisons sont simples. Ces rapports sont suffisants pour pouvoir déceler les défaillances impliquant tous les composants.

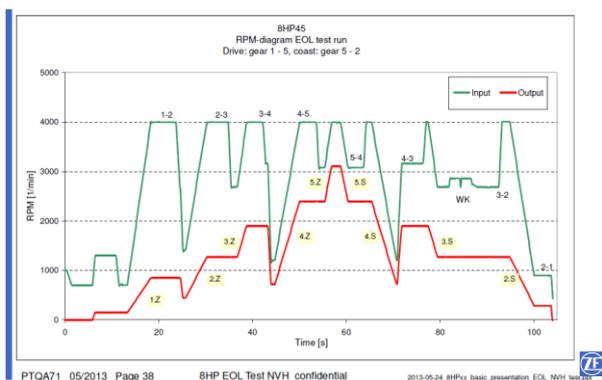


Figure 2: Rampe de vitesse d'entrée (vert) et de sortie (rouge) appliquées à la transmission.

3.3 Comportement vibro-acoustique

Comme défini en partie 3.2, les mesures vibro-acoustiques sont effectuées lors de rampes de vitesse. L'analyse spectrale en fréquence est donc complexe puisque la fréquence (f) évolue proportionnellement au régime moteur (rpm). Cependant cette relation de proportionnalité peut être utilisée pour permettre une

analyse spectrale plus adaptée. La notion d'ordre (o) est alors introduite comme définie dans l'équation (1):

$$f = o \times \frac{rpm}{60} \quad (1)$$

L'analyse en ordre demande donc de connaître la vitesse de rotation prise pour référence : vitesse d'entrée de la transmission ou vitesse de sortie. En fonctionnement, de nombreux éléments sont en mouvement et par conséquent génèrent des ondes vibratoires. Ces derniers constituent alors la signature vibro-acoustique d'une boîte saine, tel qu'illustré en figure 3. Des ordres caractéristiques, dépendant de la géométrie des pièces, sont donc identifiables. Par exemple l'ordre #13,125 et ses harmoniques selon la vitesse d'entrée pour la pompe seront visibles en tout rapport. Ces ordres connus sont repérés sur la figure 3 par des marqueurs orange intitulés "pu_n°".

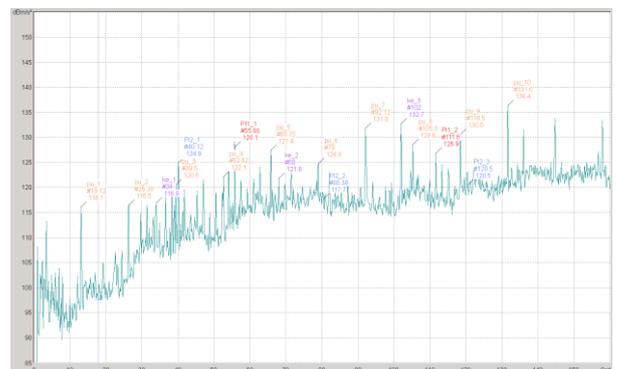


Figure 3: Spectre vibratoire d'une boîte de vitesse saine selon la vitesse d'entrée.

Bien d'autres éléments connus sont aussi repérés par un marqueur. La surveillance s'effectue de deux manières : seuil d'amplitude selon un ordre ou un intervalle d'ordres donné (point de mesure), ou définition d'une courbe limite maximale dont le franchissement équivaut à un défaut.

Ainsi lorsqu'une variable de test est mauvaise, on parle de rejet puisque la transmission est orientée en zone de réparation et non en expédition. Dans ce cas la nature du rejet peut donner des informations utiles pour définir le type de réparation à effectuée sur la boîte de vitesse.

4 Cas pratiques

De multiples défauts peuvent être identifiés grâce aux mesures vibro-acoustique. Cependant, le lien entre l'anomalie spectrale et la défaillance dans la transmission est parfois très complexe à définir. Les deux cas les plus pertinents seront présentés dans cette étude.

4.1 Excitation d'un train épicycloïdal

Dans un véhicule, la boîte de vitesse est employée comme lien entre le moteur et les roues, en termes de vitesse de rotation et de couple. Elle doit donc pouvoir supporter des différences importantes de condition de fonctionnement entre l'entrée et la sortie. Pour répondre à ces contraintes la transmission étudiée ici se compose de 4 trains épicycloïdaux de différentes dimensions.

Le premier cas d'étude porte sur une anomalie spectrale caractérisée par un peigne de raie de modulation #2,1 en

rapport 5 et de #1,74 en rapport 4. Ce peigne de raie est aussi bien observé dans les hauts ordres que les bas ordres, en montée et/ou en descente de régime. De nombreuses transmissions ont présenté ce comportement vibratoire (figure 4 en bleu) selon des intervalles de temps variables.

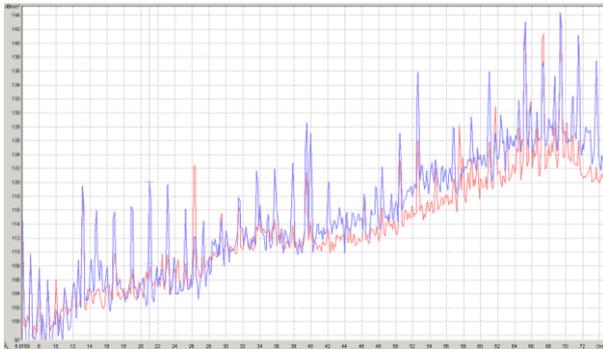


Figure 4: Spectre vibratoire en montée de régime de rapport 5 d'une transmission rejetée (bleu) et une saine (rouge).

Le système d'analyse AkuDat [2] comporte toutes les informations dimensionnelles et fonctionnelles des composants de la boîte de vitesse. Ce système est alors conçu pour aider l'interprétation physique des ordres en établissant pour chaque élément de la transmission les ordres théoriques correspondant pour chaque rapport. En renseignant les données du rejet, AkuDat indique (valeurs en bleu en figure 5) que la modulation du peigne de raie pourrait être liée à la vitesse de rotation du train planétaire intérieur 1 ou 2, qui constituent une seule et même pièce.

| So1 | So1_r | St1 | Pl1 | Hr1 | Hr1_r | So2 | So2_r | St2 | Pl2 | Hr2 | Hr2_r |
|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| | | | | | | | 1,0000 | 1,0000 | 2,5714 | 1,5625 | 0,5625 |
| | | | | | | | 1,0000 | 1,0000 | 2,5714 | 1,5625 | 0,5625 |
| 1,0000 | 0,6667 | 0,3333 | 1,3913 | | 0,3333 | 1,0000 | | 1,0000 | | 1,0000 | |
| 1,7442 | 1,1628 | 0,5814 | 2,4267 | | 0,5814 | 1,7442 | 0,7442 | 1,0000 | 1,9136 | 0,5814 | 0,4186 |
| 2,1042 | 1,4028 | 0,7014 | 2,9276 | | 0,7014 | 2,1042 | 1,1042 | 1,0000 | 2,8393 | 0,3789 | 0,6211 |
| 1,0000 | | 1,0000 | | 1,0000 | | 1,0000 | | 1,0000 | | 1,0000 | |
| | 1,2704 | 1,2704 | 2,6513 | 1,9056 | 0,6352 | | 1,0000 | 1,0000 | 2,5714 | 1,5625 | 0,5625 |
| | 1,5625 | 1,5625 | 3,2609 | 2,3437 | 0,7812 | | 1,0000 | 1,0000 | 2,5714 | 1,5625 | 0,5625 |
| | | | | | | | 1,0000 | 1,0000 | 2,5714 | 1,5625 | 0,5625 |
| So1 | So1_r | St1 | Pl1 | Hr1 | Hr1_r | So2 | So2_r | St2 | Pl2 | Hr2 | Hr2_r |
| 0,990 | 1,485 | 2,970 | 0,711 | | 2,970 | 0,990 | 1,886 | 2,083 | 0,734 | 5,497 | 3,354 |
| 1,030 | 1,545 | 3,090 | 0,740 | | 3,090 | 1,030 | 1,963 | 2,167 | 0,763 | 5,719 | 3,489 |

Figure 5: Affichage Akudat en réponse des données du rejet.

Le train épicycloïdal 2 a pour particularité d'avoir son porte satellite cannelé avec l'arbre d'entrée de la transmission. Ainsi la denture des satellites 2 est menante puisqu'elle entraîne les autres dentures en mouvement, qui sont alors menées. Une fois la fréquence de rotation (Pl2) du satellite déterminée, la formule de Willis déployée dans l'Eq. 2 permet d'obtenir les fréquences de rotation des autres pièces aussi appelée vitesse relative. Il suffit de connaître le nombre de dents Z des différents composants.

$$So2_r = \frac{Z_{Pl2} \times Pl2}{Z_{So2}} \quad (2)$$

La vitesse de rotation d'une pièce par rapport à l'arbre d'entrée (qui constitue la vitesse de référence pour le calcul des ordres) requiert un simple changement de référentiel. La vitesse So2_r est définie dans le référentiel centré sur le satellite alors que la vitesse So2 dans celui centré sur l'arbre d'entrée. Aucune rotation n'est à considérer entre les deux

référentiels. Les valeurs obtenues sont donc renseignées dans l'Eq. 3.

$$So2 = So2_r + 1 \quad (3)$$

La défaillance semble donc être localisée sur le train planétaire 1 ou 2, qui constitue une seule et même pièce. Cependant le remplacement de ce composant suspecté défectueux par un mauvais ne permet pas de retirer le défaut sur la transmission.

Ainsi une investigation est débutée en se basant sur une méthode de résolution de problèmes complexes. Plusieurs méthodes existent [3], ce qui impose un choix. La méthode 6Sigma est la plus communément employée compte tenu de son aspect multidisciplinaire et sa visée à améliorer les procédés, la qualité et plus encore. Cependant l'objectif principal ici consiste à identifier la cause principale des rejets décrits précédemment.

La méthode Shainin RedX® apparaît donc comme la plus favorable puisqu'elle est requiert un projet d'investigation pouvant être mené par un individu. En outre cette méthode adopte une phase d'approche puis une phase de convergence par comparaison, qui sont adaptées à la résolution de problèmes vibro-acoustiques.

La méthode Shainin RedX® se décompose en 7 étapes. Elle commence par une focalisation sur le sujet afin d'établir une problématique tenant compte des impacts et influences éventuels. Dans notre cas le projet consiste à identifier la cause principale de défaillance puis à travailler sur les procédés pour tenter d'éradiquer la génération de ce défaut. L'impact majeur sera donc une amélioration de la capacité de production via une réduction du nombre de rejets.

Par la suite l'étape d'approche permet de vérifier les paramètres influant sur le problème afin d'orienter les investigations dans la bonne direction. Les systèmes de mesure ont donc été vérifiés, ainsi que l'éventuel lien entre les rejets et le banc d'essai, ou tout autre paramètre. Aucune relation n'a pu être déterminée. Les variables de l'étude Y et X sont alors respectivement définies par le spectre vibro-acoustique et la pièce défectueuse. Ainsi le paramètre Green Y (à améliorer), correspondant au RedX® (contributeur majeur), est le peigne de raie modulé par la vitesse de rotation du train planétaire intérieur 1. Le paramètre Y acceptable vers lequel on souhaite aller correspond donc au spectre d'une transmission saine. La stratégie d'investigation sélectionnée est liée à l'étape de convergence.

Afin de converger vers la variable RedX®, l'investigation est menée par comparaison entre une transmission master d'investigation, la Best Of Best (BOB), et une très fortement rejetée, la Worst Of Worst (WOW). Le principe consiste à utiliser la transmission master comme référence. La première étape procède au désassemblage puis réassemblage de la transmission WOW dans sa configuration d'origine. Si le défaut disparaît (test OK au banc de test) alors le problème est généré à l'assemblage d'un composant. Dans notre étude la transmission est restée rejetée suite à cette manipulation, le défaut est donc confirmé, ce qui assure qu'il est localisé sur un élément de la boîte. Les actions suivantes consistent en un échange de composant entre les deux transmissions jusqu'à obtenir un contraste dans les résultats. Ce contraste fut obtenu pour le train planétaire extérieur 1, tel qu'indiqué dans le tableau 1.

Tableau 1: Contraste lors d'échange d'élément.

| Configuration d'assemblage de la transmission | Résultat de test au banc d'essai | |
|---|----------------------------------|-----|
| | BOB | WOW |
| Origine | OK | nOK |
| Echange train extérieur 1 | nOK | OK |
| Origine | OK | nOK |

Le retour à l'origine des deux transmissions après l'analyse des résultats de test sert de confirmation de la défaillance. Ce point appartient à l'étape de test de la méthode. Une estimation du risque pour le client est définie en assemblant une transmission défectueuse sur véhicule pour mesure vibro-acoustique et évaluation subjective. Une fois sur véhicule, la boîte de vitesse n'émet pas de gêne sonore ou vibratoire. Ainsi le client est protégé et la qualité des transmissions vendue est donc assurée.

La méthode Shainin RedX® oriente ensuite sur la compréhension de la relation entre la variable RedX® et Green Y. Dans cette étude, la défaillance est portée par le train planétaire extérieur 1, mais le spectre révèle une excitation du train planétaire intérieur 1. Ainsi la source d'excitation sonore est localisée sur le train extérieur, mais le train intérieur rayonne l'énergie de la défaillance. Le porte-satellite et les satellites se trouvent en contact entre les deux trains planétaires, par conséquent il est difficilement concevable que l'énergie de l'onde de défaillance ne passe pas au travers de ces éléments. Cependant rien n'est visible d'un point de vue spectral. La compréhension de la relation entre les paramètres Y et X reste donc actuellement non maîtrisée.

Afin d'aider à éclaircir le phénomène de propagation d'onde dans la transmission, de nombreuses mesures ont été effectuées sur des caractéristiques sélectionnées d'une population de composants défectueux. Aucune caractéristique n'est apparue hors spécification sur ces pièces. De plus, aucun contraste n'est ressorti dans les comparatifs entre une pièce mauvaise et une bonne (issue de la transmission BOB).

Cette investigation est toujours en cours. Le manque crucial d'informations sur le comportement vibro-acoustique R&D du produit accroît les difficultés d'interprétation et de compréhension des phénomènes vibratoires, et donc des moyens de parvenir à identifier la cause de défaillance. Les mesures d'autres caractéristiques sont planifiées. La complexité de cette analyse implique une stratégie rigoureuse et innovante dans les étapes à suivre, et illustre la difficulté qui peut être rencontrée à relier et identifier la cause de défaillance et l'anomalie spectrale engendrée.

4.2 Excédent de matière

Le défaut présenté dans cette partie montre la sensibilité de la réponse acoustique de la transmission en certaines zones.

L'anomalie spectrale porte sur un franchissement de courbe limite pour l'ordre #21 en rapport 5 lors de la

montée de régime. L'analyse spectrale est importante car elle permet de décrire plus précisément l'anomalie vibro-acoustique.

Dans ce cas d'étude, le spectre (figure 6 en rouge) informe que le défaut est représenté par des bandes latérales espacées de #2,1 et non un simple pic. La comparaison avec le spectre (bleu) d'une transmission saine confirme l'anomalie.



Figure 6: Spectre vibratoire en montée de régime du rapport 5.

L'observation des autres rapports indiquent qu'en montée de régime des rapports 1 et 2 un pic unique à l'ordre #19 se distingue.

D'après ces données le système Akudat oriente les analyses sur les valeurs « relatives » du train planétaire extérieur 2 ($Hr2_r$) et le train planétaire intérieur 2 ($So2_r$). La notion de valeur « relative » est liée au référentiel pris pour définir la vitesse de rotation de la pièce concernée.

| So2 | So2_r | St2 | Pl2 | Hr2 | Hr2_r | So3 |
|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 18,874 | 18,874 | 7,340 | 12,079 | 33,553 | 12,079 | |
| 19,126 | 19,126 | 7,438 | 12,241 | 34,002 | 12,241 | |
| 19,000 | 19,000 | 19,000 | 19,000 | 19,000 | 19,000 | 19,000 |
| 19,000 | 19,000 | 19,000 | 19,000 | 19,000 | 19,000 | 19,000 |
| 19,000 | 19,000 | 12,160 | | | | 12,160 |
| 14,140 | 19,000 | 14,140 | 7,070 | 14,140 | 7,070 | |
| 20,979 | 19,000 | 20,979 | 4,607 | 20,979 | 4,607 | |
| | 19,000 | | 12,160 | | | 12,160 |
| 19,000 | 19,000 | 19,000 | 19,000 | 19,000 | 19,000 | 19,000 |
| 19,000 | 19,000 | 19,000 | 19,000 | 19,000 | 19,000 | 19,000 |
| 19,000 | 19,000 | 19,000 | 19,000 | 19,000 | 19,000 | 19,000 |

Figure 7: Affichage de l'ordre du rejet selon les rapports et les composants de la transmission Akudat.

Une investigation basée sur la méthode RedX® a été effectuée pour identifier la pièce défectueuse. Les conclusions étaient que le défaut est porté par le train planétaire intérieur 2.

La fréquence d'engrènement Fe et celle relative Fe_r est obtenue par la relation en Eq. 4.

$$Fe = Z_{So2} \times So2 \quad \text{et} \quad Fe_r = Z_{So2} \times So2_r \quad (4)$$

En partant de l'hypothèse que la notion d'ordre o peut être perçue comme la fréquence de rotation du défaut selon la vitesse de référence, alors on peut définir via l'Eq 5 le nombre théorique de dents impliquées dans la génération du défaut.

$$Z_{rejet} = \frac{Fe}{o} \quad \text{et} \quad Z_{rejet_r} = \frac{Fe_r}{o} \quad (5)$$

Le nombre de dent relatif Z_{rejet} r reste identique en chaque rapport d'une valeur de 2,84 contrairement au nombre de dents Z_{rejet} . Ainsi il apparaît que le défaut généré correspond à la sollicitation de 2,84 dents du train planétaire intérieur.

De nombreuses mesures sur la denture ont donc été menées, sans permettre de définir une caractéristique expliquant le rejet. Après diverses analyses, un excès de matière sur une surface de contact avec un roulement a été décelé sur toutes les pièces générant un rejet. Pour valider cette hypothèse l'excès de matière a été retiré via un polissage de la surface, et cette pièce a été assemblée dans une transmission master avant et après rectification. La comparaison, illustrée en figure 8 est évidente, l'excès de matière est bien la cause de défaillance.

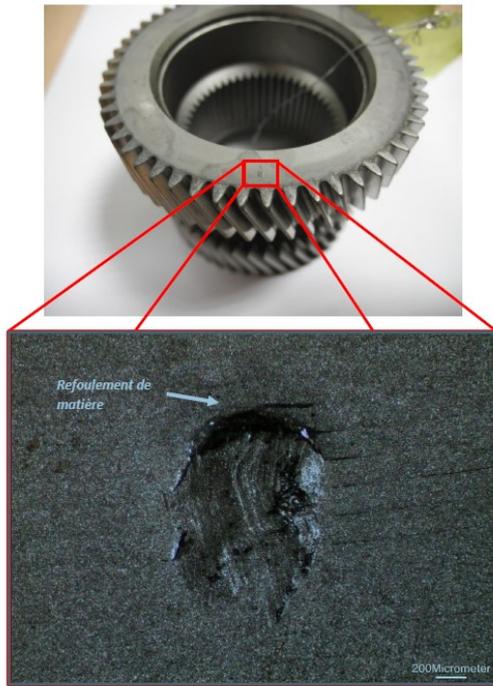


Figure 8: Illustration de la zone défectueuse.

Il a été nécessaire de comprendre la génération de cet excès de matière en vue d'éradiquer ce problème. Au fil des analyses trois causes furent identifiées : un impact avec refoulement de matière, une contamination par une particule amovible ou une incrustation. La connaissance des procédés d'usinage a permis de repérer et de corriger ces causes de défaillances : manipulations des pièces avant traitement thermique et changement de la fréquence de nettoyage des bains de rinçages de pièces.

5 Conclusion

La vibro-acoustique est une aide considérable pour le diagnostic de défaillance. Cependant la complexité d'interprétation de la propagation des ondes rend souvent difficile le lien entre l'analyse des spectres et l'identification de la défaillance.

Néanmoins des outils, tels que le système Akudat et les méthodes de résolution de problèmes complexes aident à identifier le ou les composants défectueux, et par conséquent à améliorer la qualité des transmissions.

L'objectif final consiste à rentabiliser les coûts de production en réduisant le nombre de réparations et en obtenant un résultat de test bon dès le premier passage des transmissions aux bancs de test.

Remerciements

Les analyses autres que vibro-acoustiques ont pu être conduites grâce à la collaboration des autres services de l'entreprise PPS, je tiens donc à les remercier très cordialement pour le temps pris à m'aider dans ces recherches et le partage de leur expérience.

Références

- [1] ZF Friedrichshafen AG, *8-Speed General / Functional description*, ZF Friedrichshafen AG, Germany (2011).
- [2] T. Bischof, Root cause analysis of acoustically suspicious transmissions during EOL testing, *SAE International* **2012-01-1528**, (2012).
- [3] J. Kosina, Quality improvement methods for identification and solving of large and complex problems, *AD ALTA: Journal of Interdisciplinary Research*, **volume 3 issue 1**, 142-145 (2013).