

caractérisation non-destructive et multiéchelle de surface denture, mesures de bruit de frottement et développement d'un banc d'essai vibratoire instrumenté

1. Introduction

Ce chapitre est consacré à la présentation des moyens mis en place et développés dans ce travail pour la mise en œuvre d'une méthodologie expérimentale capable : 1) de mesurer la signature process générée par le procédé de finition denture et 2) de corrélérer par cette mesure les paramètres process avec le fonctionnel de bruyance. Les moyens expérimentaux utilisés pour ces travaux et présentés dans ce chapitre sont situés sur trois sites différents : le laboratoire MSMP sur le campus de Châlons-en-Champagne de l'ENSAM, le site de l'usine Renault à Cléon et le laboratoire du LTDS à l'Ecole Centrale de Lyon. Dans un premier temps sera présentée la métrologie multiéchelle des flancs de denture développée et utilisée. Dans une seconde partie, les moyens expérimentaux, le montage pour la mesure du bruit de frottement à l'échelle du contact et le banc d'engrènement instrumenté, seront décrits.

Démarche expérimentale

Ces travaux de recherches se placent au centre du triptyque liant le procédé de finition denture, la fonctionnalité de bruyance de l'engrenage et la surface des flancs générés. L'objectif a donc été de mesurer la signature process générée par la finition denture pour ensuite la corrélérer avec les paramètres process et le fonctionnel bruyance.

Pour atteindre ces objectifs, la démarche entreprise pour cette étude a été de caractériser expérimentalement la bruyance denture à différentes échelles. Pour ce faire, des mesures de vibrations générées à l'échelle de la surface et à l'échelle de l'engrenage d'un côté, et des analyses surfaciques multiéchelles d'un autre côté, ont été réalisées. Ces moyens se sont donc inscrits au cœur de la démarche expérimentale décrite ci-dessous :

- 1) Générer des dentures par différents procédés : sans finition après traitement thermo-chimique, après finition par rectification, après finition par powerhoning ;
- 2) Mesurer des paramètres de forme et des topographies des flancs des dentures ainsi générés ;
- 3) Faire une analyse multiéchelle fine des surfaces pour en extraire les paramètres géométriques, les topographies 3D ainsi que les paramètres texturaux ;
- 4) Mesurer le bruit de rugosité des flancs de denture et des vibrations générées par l'engrenage afin de caractériser fonctionnellement le produit ;

- 5) Corréler les aspects d'états de surface avec les performances vibratoires ainsi que les procédés étudiés.

Dans ce chapitre, nous avons réalisé une description détaillée des moyens expérimentaux nécessaires à l'étude de la corrélation entre l'état de surface denture et les vibrations générées par l'engrenage qui s'articule comme suit :

- A l'échelle microscopique, une méthode de réplique de surface a été mise en place pour la caractérisation non destructive des surfaces de denture et un dispositif de mesures de bruit de frottement a été utilisé pour mesurer le bruit généré par les aspérités de surface ;
- A l'échelle macroscopique, des machines de mesures de forme spécialisées pour les dentures et un banc d'essai vibratoire instrumenté pour un engrenage simple étage, développé dans le cadre de ces travaux, ont été utilisés.

3. Métrologie multiéchelle des flancs de denture

Mesure de la forme des dents (macro-échelle)

Les paramètres de forme des flancs caractérisant les dimensions et la qualité des dentures étudiées, tels que les écarts de forme, le rayon sous bille, les bombés ou encore les écarts de pas, ont été mesurés [28]. Pour ce faire, une machine à mesurer tridimensionnelle spécialisée pour le contrôle de dentures de l'atelier de l'usine de Cléon a été utilisée. Pour effectuer la mesure, la pièce est prise entre pointes, comme en fabrication (**Figure 2.1a**). L'opération de contrôle se déroule ensuite en deux temps. Dans un premier temps, un palpeur vient en contact avec trois dents pour mesurer les critères de profil et d'hélice. Dans un second temps, un passage est effectué à nouveau sur toutes les dents afin de pouvoir calculer les critères de division. A la fin de la mesure, un procès-verbal est fourni par la machine (**Figure 2.1b**). Celui-ci illustre et indique les valeurs numériques pour l'hélice, le profil et la division (HPD).

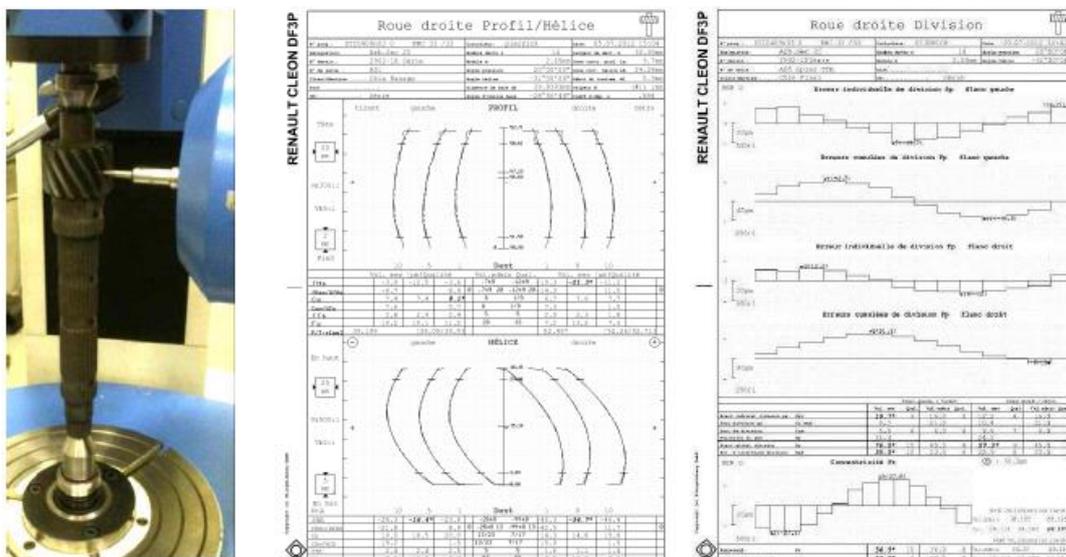


Figure 2.1. (a) Photographie d'un arbre secondaire de boîte J pris entre pointes sur la machine tridimensionnelle, le palpeur venant en contact avec les dents ; (b) Exemple de document produit par la machine après la mesure (procès-verbal) regroupant l'ensemble des mesures des critères macro-géométriques [81].

3.1.1. Profil et hélice

La denture d'un engrenage est caractérisée généralement par deux directions : celle du profil et celle de l'hélice (**Figure 2.2**). Les paramètres associés à ces directions sont annotés d'un α (ou a) et d'un β (ou b) respectivement.

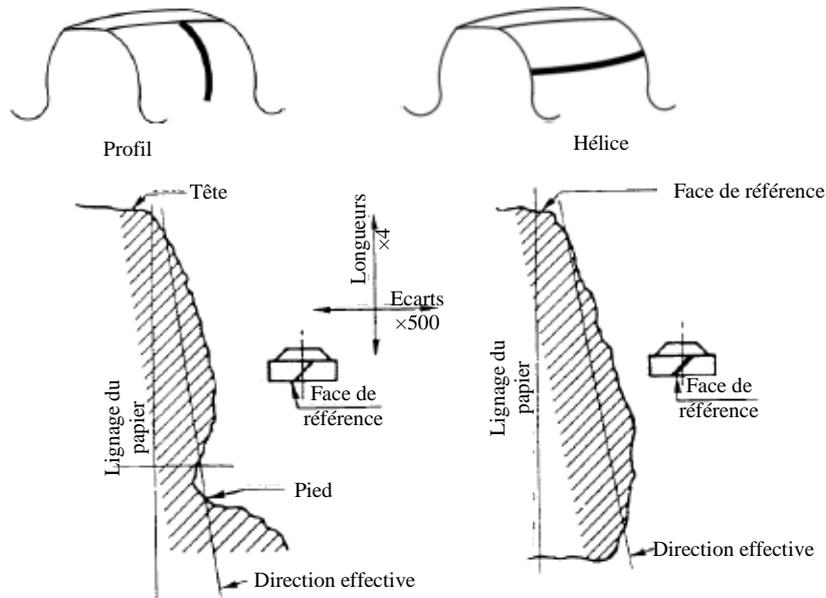


Figure 2.2. Exemple de relevé de profil et d'hélice [28].

L'écart de forme, dans l'une ou l'autre des deux directions, est défini comme l'amplitude de la translation, perpendiculaire à la direction théorique, de la courbe effective de manière à envelopper la courbe réelle. Ceci est illustré sur la **Figure 2.3**. Noté respectivement $F_{f\alpha}$ ou $F_{f\beta}$, l'écart de forme rend compte des différences entre le profil théorique et le profil réel. Afin de pouvoir étudier l'influence des échelles inférieures, nous avons choisi des pièces ayant peu de différences sur cette caractéristique en particulier.

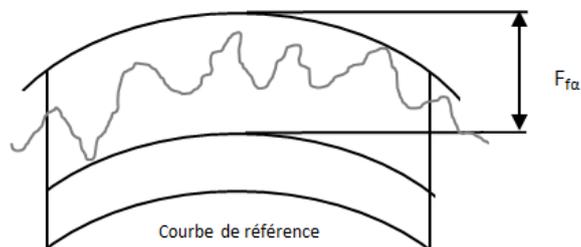


Figure 2.3. Mesure de l'écart de profil, ici noté $F_{f\alpha}$ [28].

3.1.2. Rayon sous bille (RSB)

Le rayon sous bille correspond à la moyenne des mesures des rayons sous bille R sur toute la circonférence d'un engrenage (**Figure 2.4**). Il s'agit d'une caractéristique dimensionnelle importante pour le fonctionnement de l'engrenage car il permet de voir si le jeu fonctionnel entre les dents est dans les tolérances indiquées par le bureau d'études.

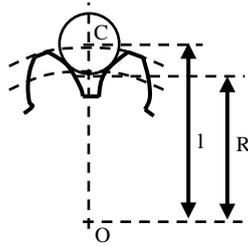


Figure 2.4. Le rayon sous bille RSB correspond à la moyenne des mesures de rayons R [28].

3.1.3. Battement simple radial F_r

Le battement simple radial à la bille F_r ou Faux-rond est la variation totale d'enfoncement d'une bille, tangente aux deux profils utiles de chaque creux de dent successif, mesurée radialement dans un plan de mesure spécifié ou au voisinage du plan médian, sur un tour complet autour de l'axe fonctionnel de rotation [28]. Cette mesure permet de vérifier la concentricité des cercles de base et primitif de la roue dentée.

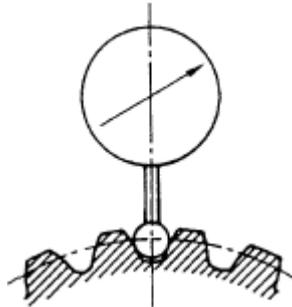


Figure 2.5. Battement simple radial à la bille F_r dans le cas d'une denture extérieure [28].

3.1.4. Ecart cumulé total de pas F_p

L'erreur individuelle de pas est la différence entre le pas effectif et le pas théorique, c'est-à-dire les distances entre chaque dent de la roue (**Figure 2.6**). L'erreur cumulée sur un secteur de k pas est la somme algébrique des erreurs individuelles de ces mêmes k pas. Enfin, l'écart cumulé total de pas ou erreur totale de division F_p est l'amplitude totale du diagramme d'erreur accumulée [82].

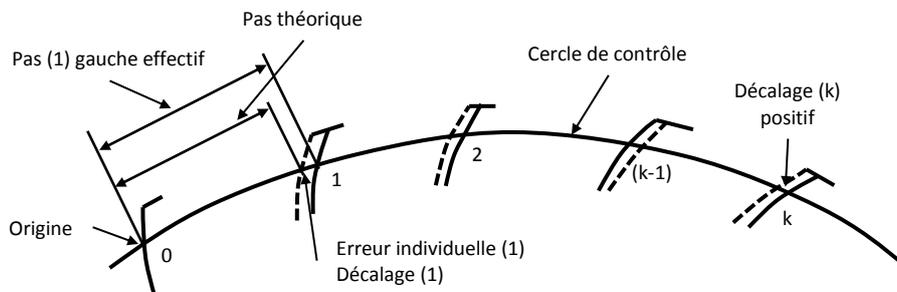


Figure 2.6. Erreur cumulée de pas (décalage circulaire) [82].

3.1.5. Ecart de direction de profil fH_α et d'hélice fH_β

La forme effective respectivement dans la direction du profil et d'hélice est calculée par approximation à une parabole de leurs tracés respectifs par la méthode des moindres carrés [28]. La direction effective est ainsi obtenue par le tracé de la

droite qui joint les points d'intersection de la parabole de la forme effective avec les lignes déterminant la longueur d'exploitation. On peut le voir sur la **Figure 2.7**. Les écarts de direction de profil sont mesurés sur le flanc gauche et le flanc droit [28].

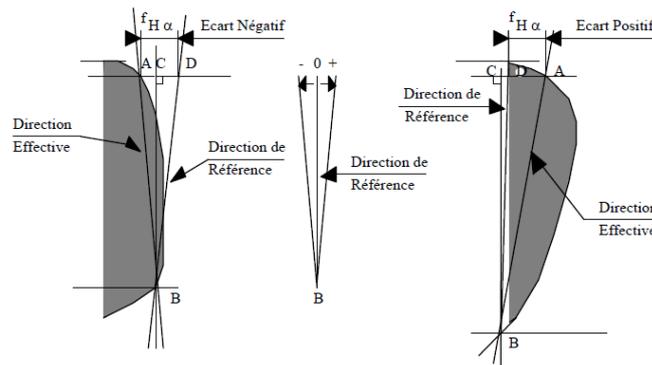


Figure 2.7. Définition du bombé de profil mesuré [28]. B et D sont les intersections de la droite représentant la direction de référence et les limites de la longueur d'exploitation. A et C sont les intersections entre la droite représentant la direction effective et les limites de la longueur d'exploitation. La longueur AD correspond à l'écart de direction de profil.

3.1.6. Bombé de profil C_α et d'hélice C_β

Le bombé est une modification intentionnelle de la forme du profil ou de l'hélice ayant pour but d'améliorer l'engrènement, comme illustré en **Figure 2.8**. Le bombé est défini en métrologie comme étant la flèche de la courbe de régression par rapport à la direction effective, mesurée dans le sens des écarts, comme indiqué sur la **Figure 2.9** [28]. La définition du bombé d'hélice est la même mais dans la direction de l'hélice, c'est-à-dire de l'épaisseur de la dent. Les symboles respectifs C_α et C_β sont utilisés pour désigner le bombé de profil et le bombé d'hélice.

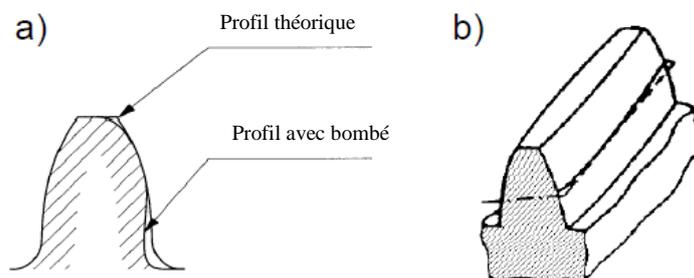


Figure 2.8. Descriptif des bombés (a) de profil et (b) d'hélice [28].

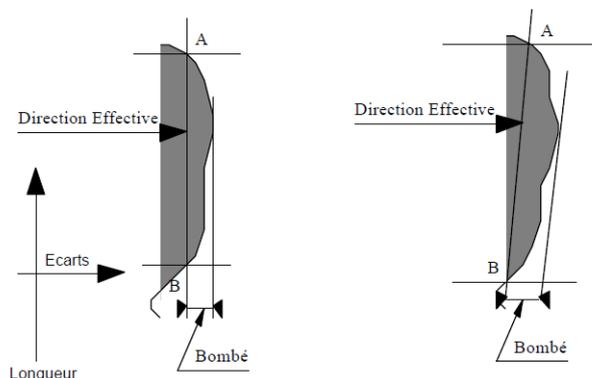


Figure 2.9. Définition du bombé de profil [28].

3.2. Mesure des états de surface (micro-échelle)

A la suite des mesures de forme des dentures, une méthode de caractérisation complémentaire s'intéressant à l'état de surface des flancs, c'est-à-dire aux échelles micro-géométriques, a été développée et mise en place. Pour ce faire, la topographie en trois dimensions (3D) des flancs des pignons étudiés a été mesurée avec un interféromètre optique WYKO NT3300 illustré en **Figure 2.10**. Les caractéristiques de la mesure 3D utilisées sont les suivantes :

- Filtrage de type « PSI high mag » ou Phase Shifting Interferometry (interférométrie à décalage de phase qui est adaptée aux surfaces de faible rugosité) ;
- Objectif d'agrandissement $\times 5$;
- Amplitude de mesure maximale de $500 \mu\text{m}$;
- Résolution verticale (en z) de 10 nm ;
- Résolution latérale (en x et y) de $2 \mu\text{m}$.

Deux types de mesures ont été réalisés au cours de ces travaux et sont différenciés par leur taille. La première est une mesure directe d'une taille de $1,2 \text{ mm}$ par $0,9 \text{ mm}$. La seconde est une mesure d'une surface plus grande, $2 \text{ mm} \times 2 \text{ mm}$, qui est en fait un assemblage de douze mesures rassemblées par l'utilisation d'un algorithme de stitching intégré dans le logiciel « Vision 3.6 » utilisé pour la mesure. Après mesure, la composante de forme des topographies a été enlevée en utilisant la méthode des moindres carrés utilisant une fonction Spline cubique.

Les mesures ont ensuite été analysées sur toutes les échelles présentes par décomposition multiéchelle utilisant la transformée par ondelettes continues. Cette méthode permet de calculer la rugosité moyenne de chaque composante de la surface et d'acquérir ainsi une information sur l'amplitude moyenne des irrégularités de surface sur chaque échelle. Il s'agit d'une méthode appropriée pour discriminer des surfaces issues de différentes conditions process ainsi que pour décrire finement les évolutions des surfaces au cours d'une opération de finition ou lors du fonctionnement, comme cela a été démontré dans des études effectuées par Sabri et al. sur le procédé de rodage ou bien par Mezghani et al. sur le toilage de portées cylindriques [76,83].



Figure 2.10. Interféromètre optique WYKO pour la mesure des topographies 3D.

3.3. Méthodologie de réplification de surface

3.3.1. *Intérêt de la méthode de réplification*

Afin d'accéder aux topographies flancs sans destruction des échantillons ainsi que pendant les essais vibratoires une méthode de réplification de surface a été mise en place. Avec ce type de méthode, une géométrie maîtresse est transférée sur un substrat copiant ainsi la géométrie initiale. La notion de précision lors de ce procédé est importante car elle décrit la ressemblance entre la pièce originale et sa copie, et définit donc la qualité de la réplique. De nombreuses études ont été entreprises afin de quantifier ce que l'on appelle le degré de réplification. On pourra se référer à l'étude bibliographique sur les procédés de micro- et nano-réplification effectuées par Hansen et al. [84]. En effet, l'auteur a montré que très souvent une seule échelle, dépendante de l'application, était prise en compte lors de la définition du degré de réplification d'un procédé. Gasparin et al. [85] ont étudié par exemple la réplification de surfaces polies très finement et ont montré, en utilisant des paramètres standards ISO d'état de surface, que des matériaux mous donnaient de meilleurs résultats en termes de degré de réplification.

Pour notre application, nous avons choisi d'étudier cinq types de résines afin de déterminer la plus adaptée aux surfaces générées par des procédés de finition denture.

3.3.2. *Procédure expérimentale*

3.3.2.1. *Echantillons étudiés*

Afin de comparer les résines entre elles, cinq surfaces de référence ont été considérées. Il s'agit de surfaces usinées dont l'état de surface est représentatif de la finition denture effectuée par des procédés standards tels que la rectification. Cinq mesures interférométriques ont été réalisées sur chaque surface. Les surfaces ont été échantillonnées à 640×480 points dans chaque direction x et y, avec un pas de $1,94 \mu\text{m}$. Les topographies représentatives des surfaces de référence sont données en **Figure 2.11**. Leur rugosité surfacique moyenne S_a varie de $0,29 \mu\text{m}$ à $1,55 \mu\text{m}$.

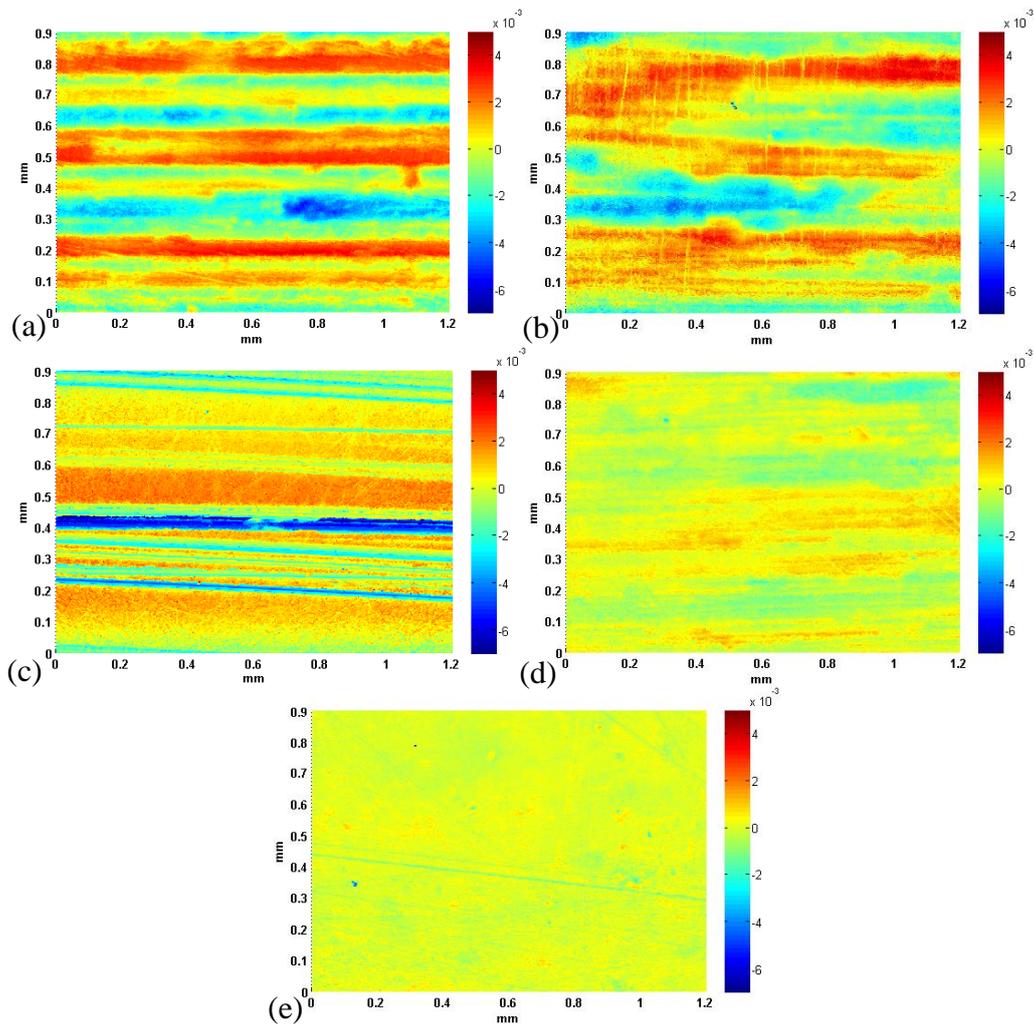


Figure 2.11. Micro-topographies 3D des cinq surfaces de référence. L'échelle de couleur est en millimètres. (a) $S_a = 1.55 \mu\text{m}$; (b) $S_a = 1.34 \mu\text{m}$; (c) $S_a = 0.96 \mu\text{m}$; (d) $S_a = 0.44 \mu\text{m}$; (e) $S_a = 0.29 \mu\text{m}$.

3.3.2.2. Résines comparées

La **Figure 2.12** illustre les résines comparées dans notre étude. Elles sont au nombre de cinq et possèdent des caractéristiques différentes qui sont données dans le **Tableau 2.1**. Hormis pour la résine Technovit3040 qui indique $1 \mu\text{m}$, les précisions de celles-ci sont assez proches et sont autour de $0,1 \mu\text{m}$. D'un point de vue qualitatif, il est intéressant de noter que les résines Microset101RF, Repliset F1 et F5 sont les plus flexibles, tandis que la Technovit3040 est la plus dure. La résine Provil Novo se situe entre les deux groupes.



Figure 2.12. Exemple d'échantillons répliqués par chaque résine. De gauche à droite : Technovit, Provil Novo, Microset, ReplisetF1, ReplisetF5.

Tableau 2.1. Caractéristiques des cinq résines étudiées données par les fournisseurs.

Nom	Réf	Fournisseur	Type	Précision	Durée d'emploi 25 °C (min)	Séchage à 25 °C (min)	Couleur
Repliset	F1	Struers	A base de silicone / caoutchouc	0.1 µm	0.5-1	5	Noir
	F5			0.1 µm	5	18	Noir
Microset	101 RF	Microset Products	Silicone	N/C	0.5	5	Noir
Technovit	3040	Heraeus Kulzer	A base de Methyl-Methacrylate	1 µm	2	5	Jaune
Provil Novo	N/A		Silicone à faible viscosité	~0.1 µm	N/C	4.5	Vert foncé

3.3.2.3. Classification des rigidités des résines en utilisant la microscopie par modulation de force (FMM)

Les différentes résines ont été classifiées suivant leur rigidité à l'aide d'un microscope à force atomique (AFM) utilisant le mode de mesure par modulation de force (FMM). Il s'agit d'une méthode employée pour caractériser les modules d'Young de matériaux hétérogènes. Le principe est illustré en **Figure 2.13a**. La pointe est excitée par des oscillations d'amplitude constante et est mise en contact régulier avec la surface. Pendant la mesure, l'amplitude des vibrations de la pointe est modifiée par son interaction avec la surface. En effet, la déviation d'amplitude augmente lorsque le matériau est dur. Les résultats sont donnés suivant une cartographie des tensions qui sont directement liées aux amplitudes mesurées. Des modèles peuvent être développés afin d'obtenir directement le module d'Young à partir de cette cartographie. Dans notre étude, le but est limité à une comparaison qualitative des différentes rigidités des résines.

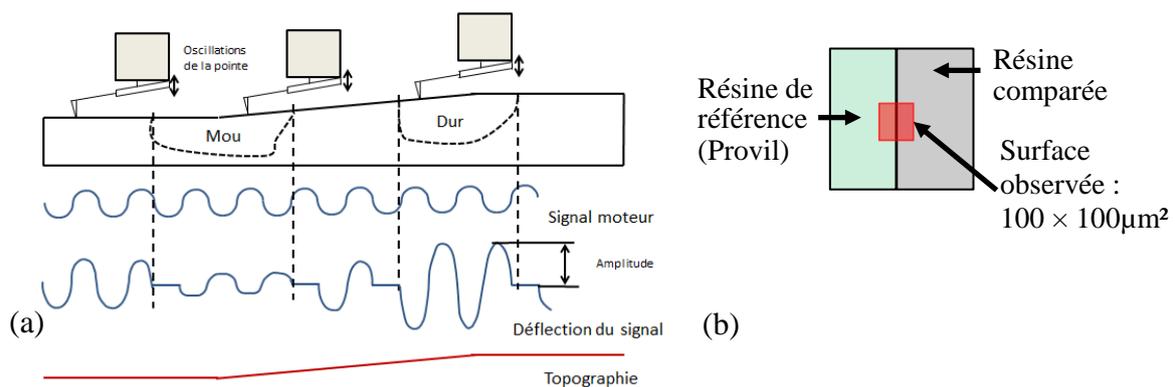


Figure 2.13. (a) Principe des mesures par modulation de force ; (b) vue de dessus de la zone mesurée.

Les résines ont ainsi été comparées à une même référence (**Figure 2.13b**). Provil Novo a été choisie pour ce rôle pour trois raisons : elle semblait être d'une rigidité intermédiaire comparées aux autres ; elle adhérait à toutes les autres résines, ce qui a permis de réaliser des interfaces planes ; sa couleur particulière rendait clairement identifiable l'interface sous microscopie. La surface mesurée est de 100 µm × 100 µm. A partir des cartographies obtenues, des tensions moyennes pour chaque résine ont été calculées. Cinq mesures pour chaque résine ont été effectuées et trois

campagnes ont été réalisées. Pour la comparaison, la valeur arbitraire 100 a été attribuée à la résine de référence Provil Novo, tandis que les valeurs pour les autres ont été calculées à partir de l'équation (éq. 2.1).

$$U_{\text{calculé}}(\text{résine comparée}) = \frac{U_{\text{mesuré}}(\text{résine comparée})}{U_{\text{mesuré}}(\text{référence})} \times 100 \quad (\text{éq. 2.1})$$

La **Figure 2.14** montre sous forme d'histogramme les résultats obtenus en termes de rigidité relative entre les résines étudiées. Ces rigidités ont été moyennées sur trois campagnes de mesures. On peut noter qu'une rigidité plus faible a entraîné une répétabilité plus faible, les écart-types étant les plus élevés. Par ailleurs, les résines Microset et RepliF1 sont particulièrement proches, ce qui corrèle bien avec leurs caractéristiques similaires.

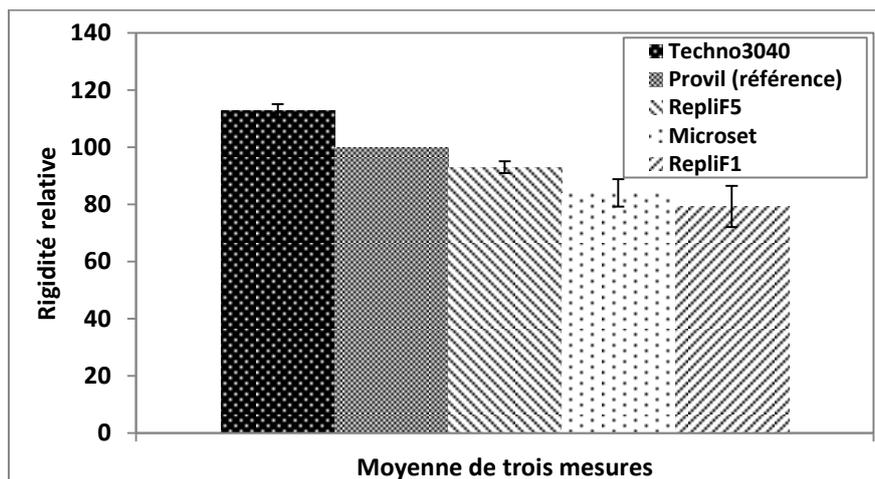


Figure 2.14. Rigidités relatives des différentes résines.

3.3.3. Résultats et conclusions

La **Figure 2.15** montre les résultats de la décomposition multiéchelle des cinq surfaces de référence mesurées directement, dont des exemples de topographies sont donnés en **Figure 2.11**. Le spectre de rugosité SMA montre la différence d'amplitude à chaque échelle présente.

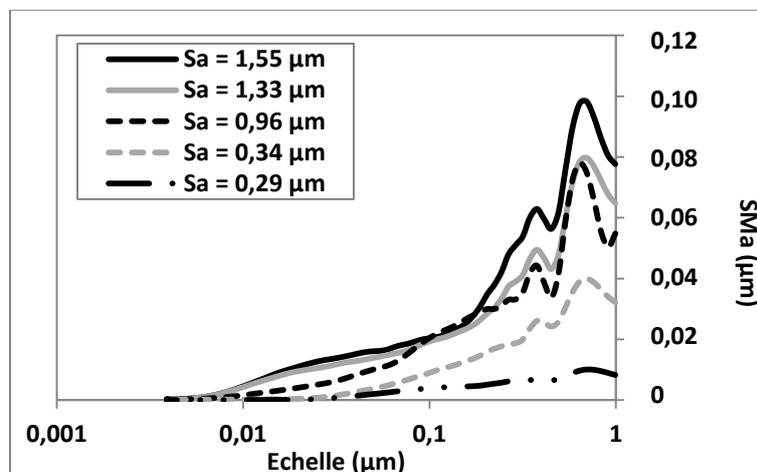


Figure 2.15. Spectres de rugosité SMA des cinq surfaces de référence issus de mesure directe par interférométrie.

Des répliques des échantillons ont été réalisées avec toutes les résines. Leurs caractéristiques topographiques ont été calculées tel que décrit dans la norme ISO 25178 sur les états de surface 3D. La rugosité arithmétique 3D S_a ainsi que trois paramètres fonctionnels ont été considérés :

- la rugosité à cœur (S_k) qui est une mesure de la surface de laquelle ont été enlevés les pics et les vallées prépondérantes ;
- la profondeur des vallées réduite (S_{vk}) qui est une mesure de la profondeur moyenne des vallées plus profondes que la rugosité à cœur ;
- la hauteur des pics réduite (S_{pk}) qui est une mesure de la hauteur moyenne des pics au-dessus de la rugosité à cœur.

Afin de comparer les paramètres d'état de surface mesurés sur les répliques et ceux mesurés directement sur les surfaces de référence, la différence relative en pourcentage, « D » entre les deux mesures a été calculée (éq. 2.2) :

$$D(X) = \frac{|X_{réf} - X_{résine}|}{X_{réf}} \times 100 \quad (\text{éq. 2.2})$$

Par ailleurs un critère de discrimination « A » a été mis en place et calculé afin de vérifier si les variations de rugosité entre la mesure directe et indirecte sont significatives lorsque l'on prend en compte la répétabilité des mesures. Il est défini par la formule suivante (éq. 2.3) :

$$A(X) = \frac{|X_{réf} - X_{résine}|}{\sqrt{\sigma_{X_{réf}}^2 + \sigma_{X_{résine}}^2}} \quad (\text{éq. 2.3})$$

Avec X un paramètre quelconque de la norme ISO 25178 et σ son écart-type associé.

Si le critère « A » est inférieur à 2, cela signifie que la différence est inférieure à deux fois son écart-type (éq. 2.4). Dans ce cas, on peut considérer que l'écart entre la mesure sur réplique et la mesure directe n'est pas significatif.

$$\begin{aligned} \text{Si } A(X) < 2 & \quad X_{résine} \pm \sigma_{X_{résine}} \in [X_{réf} - \sigma_{X_{réf}}, X_{réf} + \sigma_{X_{réf}}] \\ \text{sinon} & \quad X_{résine} \pm \sigma_{X_{résine}} \notin [X_{réf} - \sigma_{X_{réf}}, X_{réf} + \sigma_{X_{réf}}] \end{aligned} \quad (\text{éq. 2.4})$$

La **Figure 2.16** montre la différence relative en pourcentage entre la rugosité arithmétique, S_a , mesurée sur la réplique et celle mesurée directement sur la surface de denture, ainsi que les zones pour lesquelles le critère « A » est supérieur à la valeur 2. On peut clairement noter que les différences sont plus importantes quand la surface est plus lisse et que la résine est plus rigide.

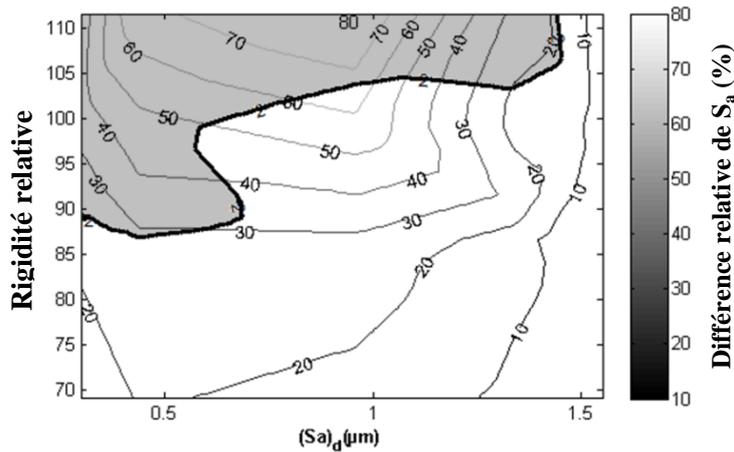
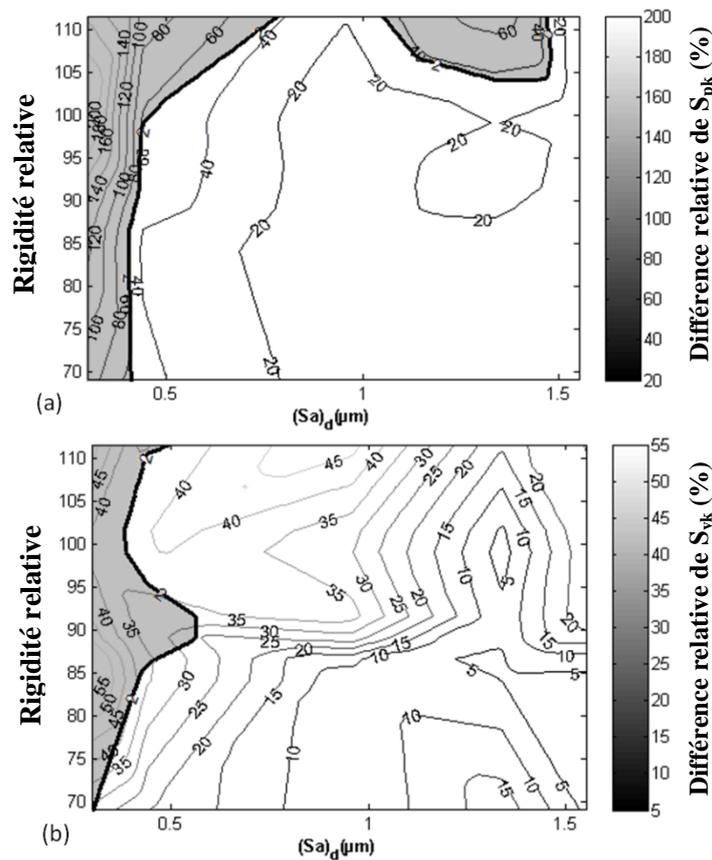


Figure 2.16. Différence relative pour le paramètre S_a en fonction de la rugosité des surfaces de référence et de la rigidité relative des résines. La partie grisée est la zone où $A \geq 2$ et indique que la différence entre les mesures directes et indirectes est importante lorsque l'on prend en compte la répétabilité de chaque mesure.

La **Figure 2.17** quant à elle décrit les mêmes évolutions mais pour les paramètres fonctionnels S_{pk} (a), S_{vk} (b) et S_k (c). On peut relever que des pics tendent à apparaître sur des surfaces peu rugueuses, donc le S_a est inférieur à $0,4 \mu m$, pour toutes les résines. C'est particulièrement vrai pour les résines les plus dures. En ce qui concerne les vallées, les résultats sont homogènes, la différence relative ne dépassant pas 45 %. Enfin, pour le S_k , les résultats montrent qu'une résine plus souple est plus intéressante pour répliquer des surfaces peu rugueuses, tandis que, inversement, une résine plus rigide sera plus à même de répliquer la rugosité à cœur de surfaces plus rugueuses.



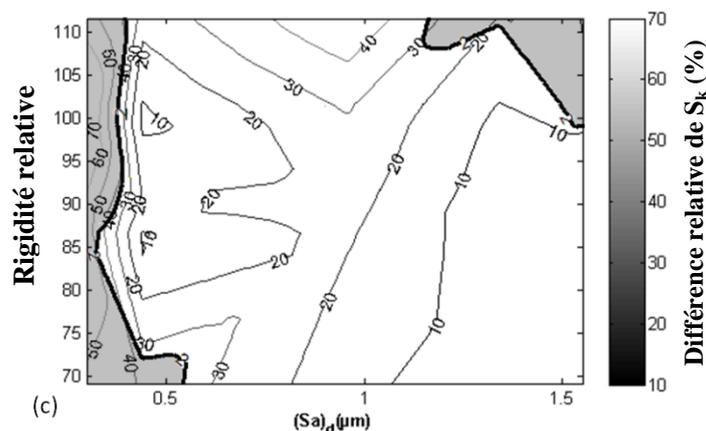


Figure 2.17. Différence relative pour les paramètres fonctionnels en fonction de la rugosité des surfaces de référence et de la rigidité relative des résines. (a) S_{pk} ; (b) S_{vk} et (c) S_k . La partie grisée est la zone où $A \geq 2$ et indique que la différence entre les mesures directes et indirectes est d'importance lorsque l'on prend en compte la répétabilité de chaque mesure.

Afin d'analyser plus précisément le transfert de rugosité sur toute la bande de longueurs d'onde de la surface, le coefficient de corrélation a été utilisé pour attester des variations entre les spectres de rugosité multiéchelles. Si le coefficient est inférieur à 0,75 alors les variations ont été jugées trop différentes de celles de la référence. Les coefficients ont été calculés sur plusieurs bandes d'échelle afin d'avoir une meilleure précision sur le résultat. Ces bandes ont été déterminées directement sur les spectres des surfaces de référence et sont définies ainsi :

- 0 – 100 μm ;
- 100 – 225 μm ;
- 225 – 500 μm ;
- 500 – 1000 μm .

Un exemple de différence entre le spectre de rugosité SMA d'une mesure directe et d'une mesure sur réplique est donné en **Figure 2.18**.

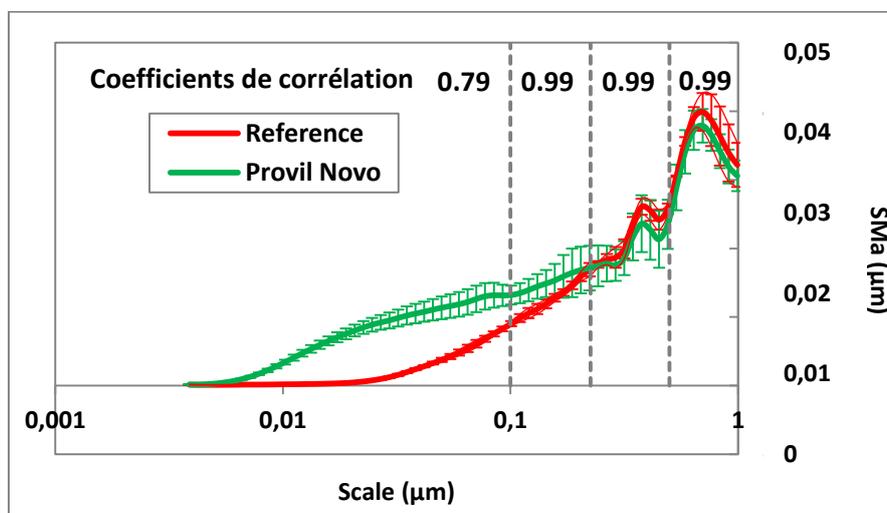


Figure 2.18. Exemple de spectre de rugosité multiéchelle entre une mesure directe et une mesure sur une réplique. Ici la résine utilisée est Provil Novo et la surface de référence possède un S_a de 0,44 μm . Les coefficients de corrélation sont indiqués pour chaque bande d'échelles.

On peut conclure des résultats montrés en **Figure 2.19** que si la surface est très lisse ($S_a \leq 0,3 \mu\text{m}$) alors le procédé de réplcation par résine va engendrer une perte d'informations sur certaines échelles. La tendance générale, qui est bien corrélée avec ce qu'a montré l'étude des paramètres statistiques, est qu'une résine plus dure est moins précise sur des surfaces plus lisses. On peut enfin noter que sur la bande d'échelle 225 – 500 μm il existe une perte d'information quel que soit la résine utilisée lorsque le S_a est inférieur à 0,3 μm .

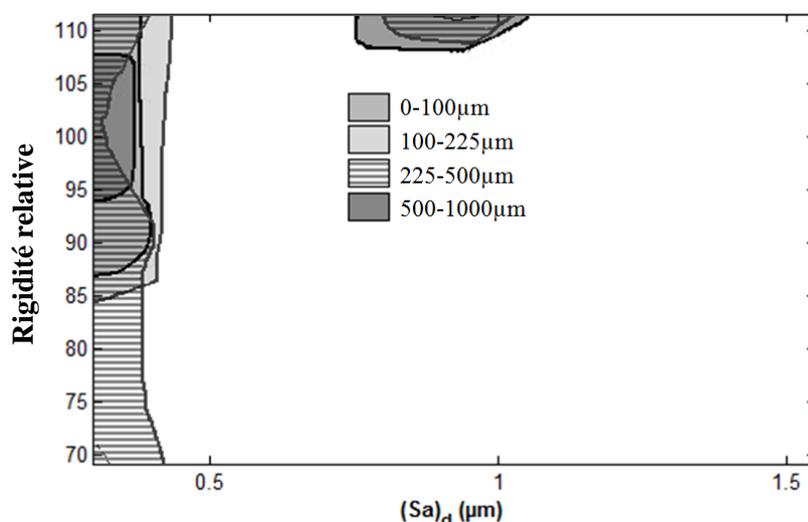


Figure 2.19. Coefficients de corrélation inférieurs à 0,75 entre les spectres de rugosité S_{Ma} des mesures sur les répliques et celles directes, en fonction de la rugosité S_a des surfaces de référence et de la rigidité relative des résines.

Au final, cette étude a permis de mettre en avant que la méthode de réplcation surface comme méthode non-destructive d'évaluation d'état de surface dépend grandement du choix adéquat de la résine utilisée pour un certain niveau de rugosité. Pour la suite des travaux, comme la rugosité S_a des échantillons étudiés varie de 0,4 à 1,1 μm , la résine Repliset F1 (la moins rigide) a été choisie.

3.4. Conclusions

Les caractéristiques de forme ont été mesurées à l'aide d'une machine de forme tridimensionnelle spécialisée pour les engrenages. Les pièces ont ainsi pu être comparées entre-elles après fabrication. Par la suite, une méthode de réplcation de surface a été mise en place et utilisée afin de permettre une étude plus fine des surfaces de flancs de denture à l'aide d'un interféromètre optique.

4. Moyens expérimentaux

En parallèle du développement d'une méthodologie de caractérisation fine de surfaces de flancs, deux moyens expérimentaux ont été mis en place afin de qualifier et quantifier la performance fonctionnelle des dentures au niveau bruit. Le premier, développé au laboratoire du LTDS à l'Ecole Centrale de Lyon, permet de mesurer le bruit de frottement des surfaces dentures, c'est-à-dire les vibrations générées. Le second est un banc d'essai de faible puissance développé dans le cadre de cette thèse et permettant de mesurer les vibrations d'un engrenage simple étage.

4.1. Echantillons étudiés

L'engrenage étudié a été développé par Renault pour le réducteur RA0 équipant un moteur électrique. La **Figure 2.20** montre la gamme de fabrication des échantillons pour les arbres primaires, qui sont ceux étudiés. Tous les échantillons sont tout d'abord taillés dans la matière brute à l'aide d'une opération de taillage par fraise-mère. Ces pièces passent ensuite par une opération de rasage, c'est-à-dire de finition avant traitement thermo-chimique. Ce dernier, appliqué ensuite, est une carbonituration super profonde, dont les détails ne seront pas explicités. Enfin, un grenailage est appliqué sur les flancs des pièces.

C'est sur ce point que les trois configurations étudiées diffèrent les unes des autres : les flancs des pièces de la première configuration n'ont pas été finis après le grenailage post-traitement thermo-chimique, alors que les deux autres ont subis soit une opération de rectification soit une opération de powerhoning, aussi appelée rodage de puissance.

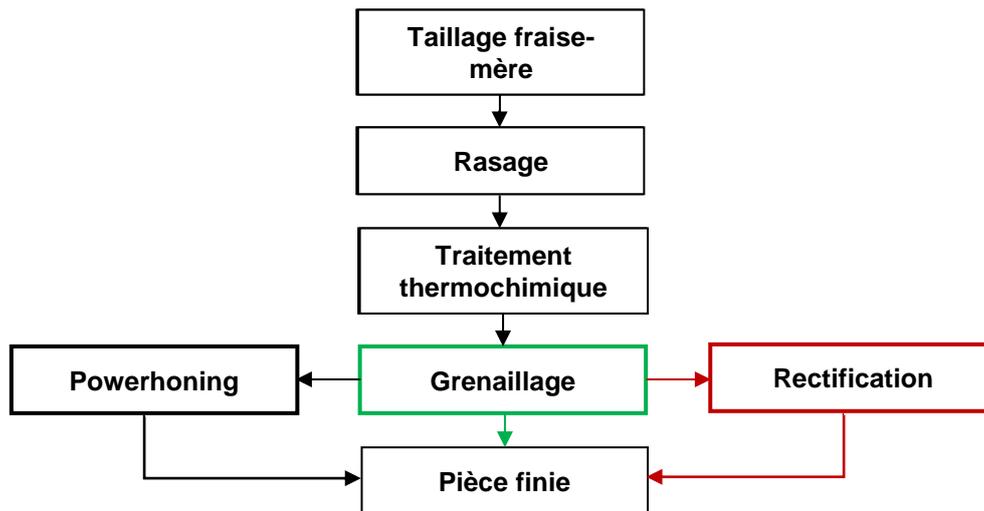


Figure 2.20. Gamme de fabrication simplifiée des échantillons. Seules les opérations affectant la surface des flancs sont indiquées.

4.2. Mesures du bruit de frottement

Afin de mesurer le bruit de frottement, c'est-à-dire le bruit généré par les aspérités de surface, un dispositif a été développé au laboratoire du LTDS.

4.2.1. Caractéristiques du moyen de mesure

Le dispositif utilisé pour ces mesures est illustré en **Figure 2.21**. Une brosse en mousse habillée d'un tissu permettant une meilleure adhérence sur la surface vient frotter contre le flanc de la dent. Un accéléromètre est fixé dessus pour mesurer les vibrations générées par les aspérités de surface denture. Une table magnétique déplace l'échantillon linéairement durant la mesure.

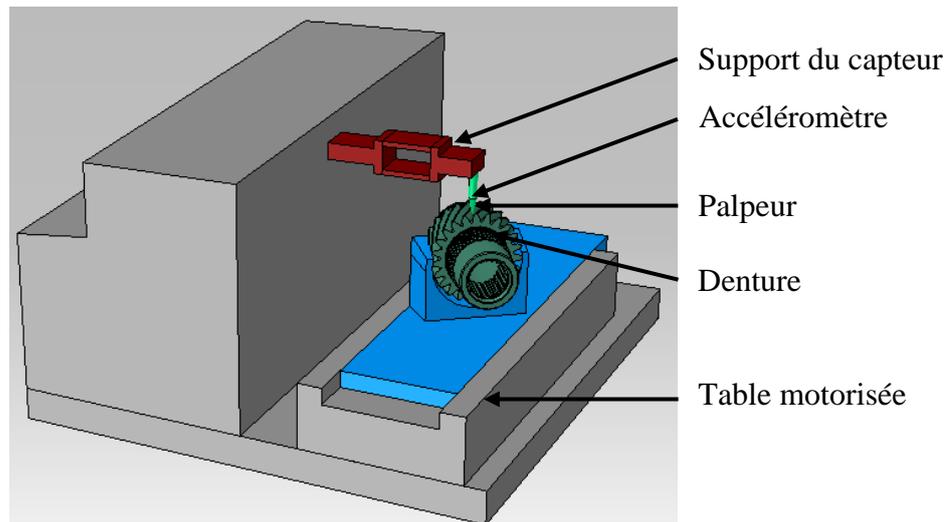


Figure 2.21. Schéma du dispositif de mesure de bruit de frottement pour les flancs de denture. La partie mouvante est en bleu.

4.2.2. *Validation de la mesure*

La validation des mesures sur le dispositif s'est effectuée dans les conditions indiquées ci-dessous :

- 6 dents par pièce sont mesurées (3 dents successives puis 3 autres dents placées à 180° des premières) ;
- 5 mesures par dent sont réalisées. Le premier aller-retour de la première mesure n'est pas pris en compte car il n'est pas tout à fait identique aux autres. En effet, il y a la mise en place de l'équilibre du chargement mécanique ;
- La course du mouvement horizontal est d'une longueur de 3 mm. La géométrie de la dent et plus particulièrement le bombé ne permettent pas de maintenir un effort normal constant sur une course plus longue ;
- L'effort normal est de 0,23 N ;
- La vitesse horizontale est de 10 mm.s^{-1} ;
- Une seconde d'attente est appliquée entre chaque déplacement.

Un exemple de signal obtenu est illustré en **Figure 2.22**. On peut noter l'alternance des allers et retours. Pour notre étude, nous n'avons considéré que les allers, qui ont ensuite été mis bout à bout pour être traités (**Figure 2.23**).

Les signaux sont échantillonnés à 20 kHz et sont filtrés ainsi :

- Efforts : filtrage passe-bas avec une fréquence de coupure à 5 Hz ;
- Accélération : filtrage passe-haut avec une fréquence de coupure à 50 Hz.

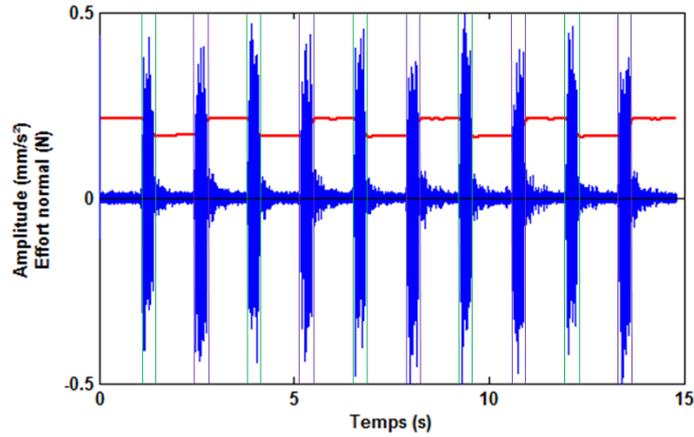


Figure 2.22. Signal brut d'une mesure sur un échantillon rectifié. L'amplitude vibratoire est en bleu et l'effort normal en rouge.

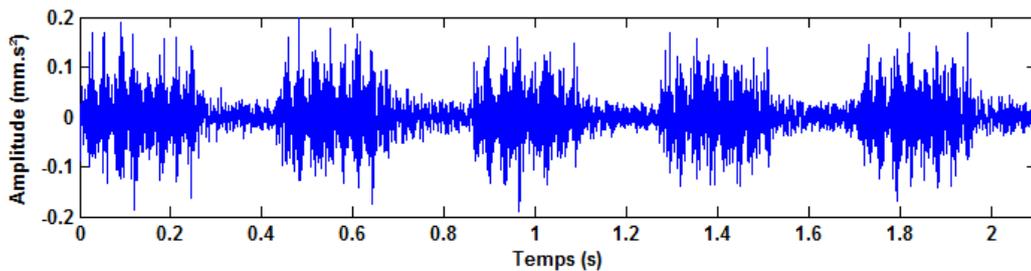


Figure 2.23. Signal regroupant les allers d'une mesure sur une pièce rectifiée.

La répétabilité des mesures par dent et par pièce a été vérifiée par le calcul du niveau vibratoire moyen, L_a , pour chacune des dents d'une pièce. La conversion en décibel s'est faite par rapport à une référence de 10^{-6} m.s^{-2} . Les résultats qui ont été obtenus sont en **Figure 2.24**. On peut noter dans ces résultats que les écart-types sont inférieurs à 5 % quel que soit le procédé. Le bruit de frottement permet ainsi de bien discriminer les dentures issues de différents procédés de finition.

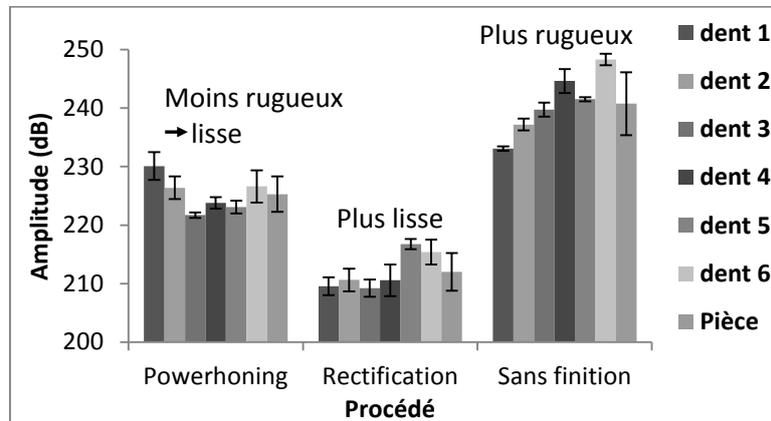


Figure 2.24. Niveaux vibratoires moyens calculés sur chaque dent sur une pièce de chaque lot afin de vérifier la répétabilité de la mesure sur une pièce.

4.3. Banc d'essai vibratoire instrumenté

4.3.1. Caractéristiques du banc

4.3.1.1. Description du banc d'essai instrumenté

Un banc d'essai vibratoire instrumenté a été conçu et réalisé au laboratoire MSMP afin d'étudier les vibrations générées par un engrenage simple étage (**Figure 2.25**). Ce moyen expérimental permet de tester des roues dentées provenant du réducteur électrique Renault RA0, pour lequel l'arbre primaire de 23 dents engrène avec le pignon de descente de 51 dents emmanché sur l'arbre secondaire.



Figure 2.25. Banc d'essai instrumenté de faible puissance pour mesurer les vibrations d'un engrenage simple étage développé au laboratoire MSMP.

L'arbre primaire est entraîné par un moteur électrique asynchrone d'une puissance de 2,4 kW, branché à un variateur de fréquence. En sortie, une machine à courant continue de 2,25 kW liée à un rhéostat de charge de 4 kW permet d'appliquer une charge résistive à l'ensemble, simulant la charge remontant du train avant. Cette machine est aussi alimentée par un courant de 110 V augmentant son énergie et sa capacité à générer un couple. En effet, le rapport de réduction de l'engrenage, d'une valeur d'environ 0,45, ne permet pas à la machine à courant continu de fonctionner à son régime nominal.

Les moteurs d'entrée et de sortie sont montés sur silentblocs afin de diminuer au maximum les vibrations générées et transmises par ceux-ci au reste du montage. La liaison avec l'engrenage s'effectue au moyen de deux accouplements élastiques dont le but est double : dissocier les machines tournantes de l'engrenage et corriger les éventuels désalignements des axes restant malgré les réglages. Le lien entre l'accouplement élastique et les arbres se fait par un raccordement emmanché en force à l'intérieur de l'alésage et repris par tournage pour garantir le centrage.

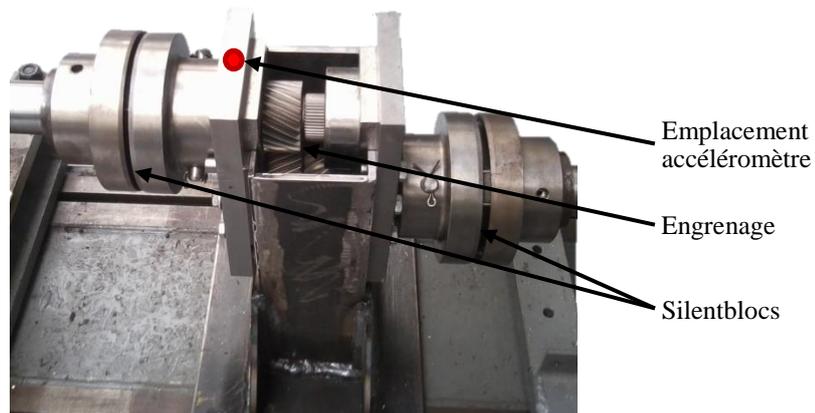


Figure 2.26. Zoom sur le montage contenant l'engrenage étudié.

Le montage en lui-même est réalisé en acier mécano-soudé et est vissé au bâti en fonte par quatre écrous. Deux supports en acier sont vissés latéralement sur le montage et contiennent les vasques des roulements (**Figure 2.26**). L'arbre primaire possède un roulement à bille et un à rouleaux tandis que le secondaire possède deux roulements coniques (**Figure 2.27a**). Ils sont calés par l'effort exercé sur les vasques. Ce calage a été jugé suffisant pour les conditions des essais réalisés, à puissance faible, indiquées dans le paragraphe 5.2. L'arrêt en translation se fait par l'insertion de la bague de roulement à billes dans la vasque. Les forces d'adhésion exercées sont alors suffisantes pour maintenir l'arbre au cours de l'essai. Les échantillons montés sur le banc sont illustrés en **Figure 2.27b**.

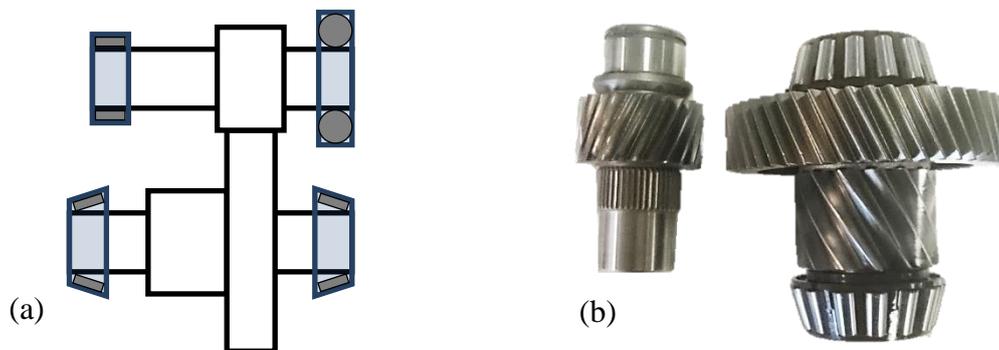


Figure 2.27. (a) Schéma des types de roulements utilisés ; (b) Photo des échantillons, avec à gauche un arbre primaire et à droite un arbre secondaire.

4.3.1.2. Mesure des vibrations

Les vibrations ont été mesurées grâce à un accéléromètre piézoélectrique CCLD (*Constant Current Line Drive*) (Brüel&Kjaer, 4533-B) placé au sommet du montage, comme illustré sur la **Figure 2.26**, afin de récupérer les excitations radiales de l'engrenage. L'accéléromètre a été vissé sur une embase collée avec de la cyanoacrylate : les conditions de température des essais, abordées dans le paragraphe suivant, conviennent bien à ce type de montage. Le signal a été conditionné avant enregistrement (Brüel&Kjaer, conditionneur de signal 1704-A-002). Les acquisitions ont été moyennées sur 128 signaux et échantillonnées à 5120 Hertz. Leur durée est de 1,6 secondes, ce qui correspond à 40 tours d'arbre primaire à une vitesse de rotation de 1500 tr.min^{-1} .

4.3.2. Validation des mesures

4.3.2.1. Conditions du plan d'essai réalisé

Les conditions de test ont été de 1500 tr.min^{-1} en entrée et un chargement en sortie de 8 Nm, limité par la machine à courant continu et le rapport de l'engrenage d'environ 0,45. En effet, la faible vitesse de sortie est la moitié de la vitesse nominale de cette machine.

La lubrification s'effectue par le barbotage du pignon de descente dans le montage. Les essais réalisés sont d'une durée de deux heures, soit 120 minutes. La température de l'huile varie de 20 à 33°C en moyenne au cours des essais. En **Figure 2.28** sont présentées les viscosités dynamiques des deux lubrifiants utilisés en fonction de la température mesurée avec un viscosimètre de Couette. Durant le passage des pignons sur le banc vibratoire, la viscosité dynamique de l'huile 'A' a donc varié de 40 à 70 centiPoises alors que l'huile 'B' a varié de 250 à 500 centiPoises.

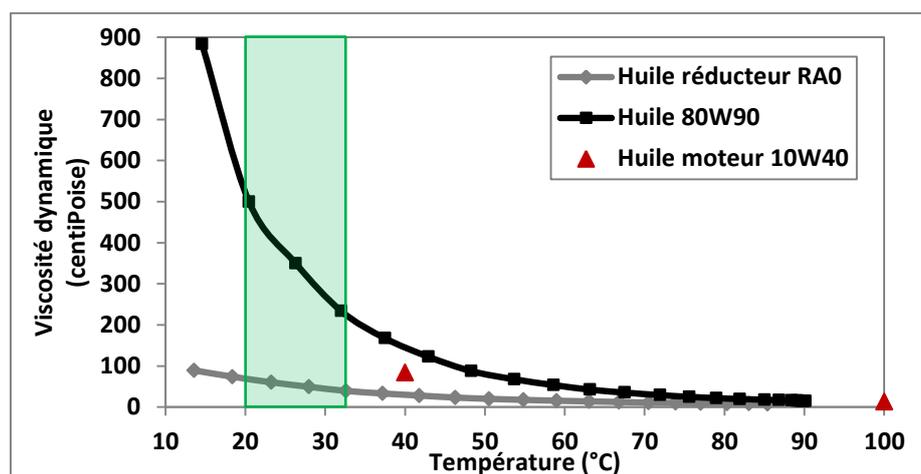


Figure 2.28. Viscosité dynamique des lubrifiants utilisés lors des essais. Le rectangle vert indique la plage de température de l'huile lors des essais.

Les mesures du plan d'essai ont été effectuées comme indiqué sur la **Figure 2.29**. Toutes les 15 minutes, une acquisition vibratoire puis une prise d'empreinte ont été réalisées jusqu'à 60 minutes où nous avons augmenté à 30 minutes la durée entre les mesures.

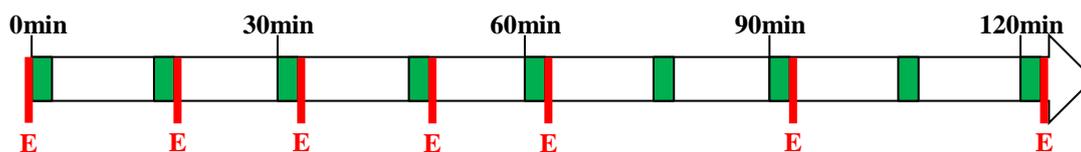


Figure 2.29. Déroulement des essais. 'E' indique une prise d'empreinte et les zones vertes une acquisition vibratoire.

4.3.2.2. Répétabilité

La répétabilité des mesures vis-à-vis du changement des échantillons a été vérifiée par des mesures vibratoires avant démontage et après remontage des échantillons. Plus particulièrement, un échantillon rectifié a été démonté et remonté deux fois et une mesure a été réalisée avant et après chaque remontage (**Figure 2.30**).



Figure 2.30. Procédure d'essais pour vérifier la répétabilité des mesures vibratoires.

On peut voir sur la **Figure 2.31** que les trois spectres vibratoires sont très proches l'un de l'autre. Pour mieux les comparer, les différences relatives entre les spectres, c'est-à-dire au niveau des amplitudes à chaque fréquence, ont été calculées, la mesure du premier spectre servant de référence. Ces différences ont un maximum de 16,9 et 9,3 % pour les deux mesures suivantes, avec des moyennes de 10,1 et 7,4 %. Cependant, pour notre étude, nous nous sommes plus particulièrement intéressés aux harmoniques d'engrènement, dont les différences relatives sont données dans le **Tableau 2.2**.

On peut noter que les différences sont relativement faibles. En effet, pour la première harmonique, elles s'étendent entre 2 et 9 % environ tandis que pour la seconde elles tournent autour de 7 %. Pour la troisième harmonique, elle est légèrement plus importante, avec des résultats à un peu plus de 10 %. Cependant, cette dernière harmonique possède une amplitude bien plus faible que les deux autres (**Figure 2.31**) : cela ne devrait donc pas marquer nos mesures lors de notre campagne d'essai. Au final, nous avons pu conclure que nos mesures étaient répétables vis-à-vis de la procédure de montage et de démontage de notre support d'essai.

Tableau 2.2. Différences relatives de l'amplitude des trois premières harmoniques d'engrènement des mesures 2 et 3 par rapport à la première servant de référence.

	Mesure 2	Mesure 3
H1	8,8 %	2,2 %
H2	7,1 %	7,1 %
H3	11,1 %	11,2 %

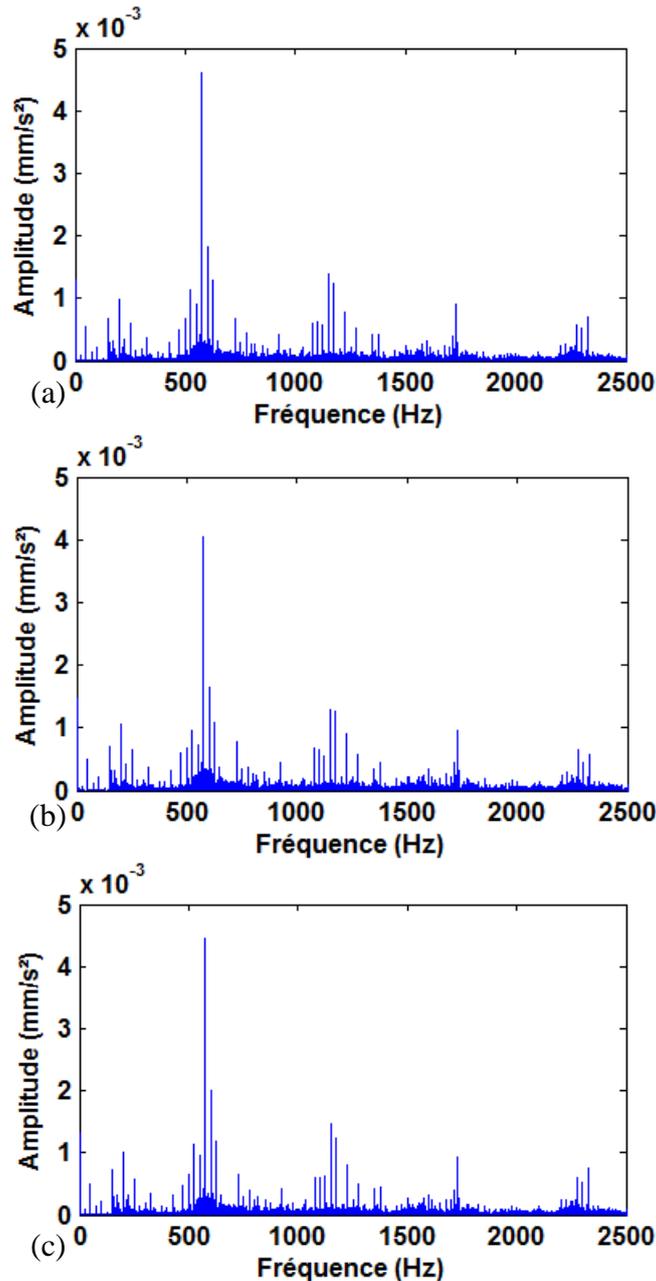


Figure 2.31. Les trois spectres vibratoires d'une pièce rectifiée pour la vérification de la répétabilité : (a) premier essai ; (b) après un premier démontage/remontage ; (c) après un second démontage/remontage.

4.3.2.3. Modes vibratoires du banc d'essai

Nous avons aussi déterminé les modes liés au montage pour ainsi les différencier de ceux liés à l'engrènement par des mesures réalisées à des vitesses de rotation différentes. En effet, les modes dont les amplitudes ne sont pas modifiées par la modification de vitesse correspondent aux fréquences liées montage. Pour ce faire, des mesures ont été effectuées à deux vitesses, 1260 et 1500 tours par minute, sur une pièce rectifiée. Les mesures ont été effectuées à vide, c'est-à-dire sans chargement.

La **Figure 2.32** donne les spectres de Fourier calculés à partir des mesures à chaque vitesse. On peut noter que la fréquence 225 Hz est indépendante de la vitesse. Les fréquences d'engrènement se situant respectivement à 483,7 et 575 Hz, et leurs

harmoniques étant des multiples de ces fréquences, nous pouvons en déduire que le montage ne modifiera pas les mesures du comportement de l'engrenage que nous étudierons.

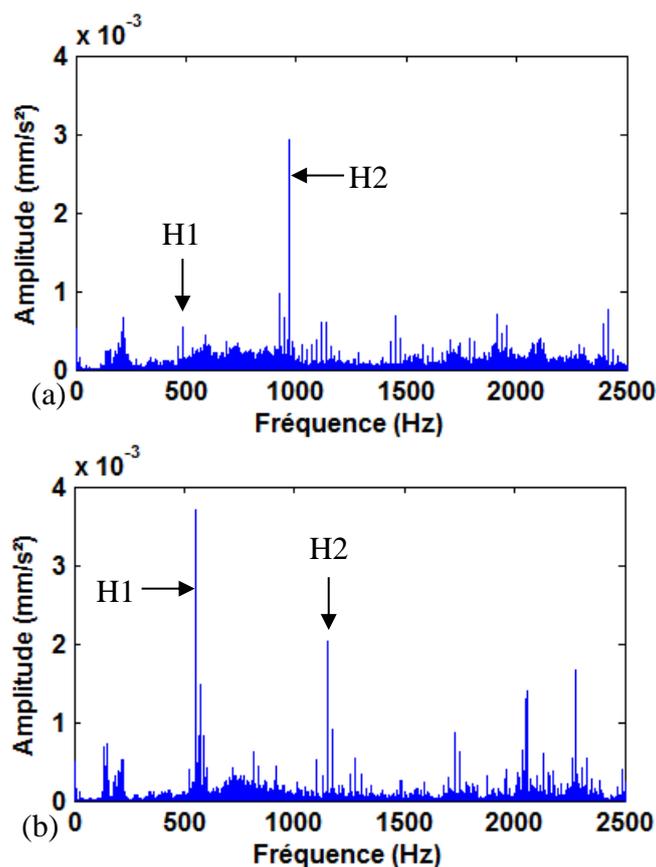


Figure 2.32. Spectres vibratoires des mesures sur une pièce rectifiée sans chargement effectuées à (a) 1260 et (b) 1500 tours par minute. H1 et H2 sont les deux premières harmoniques d'engrènement respectivement à 483,7 et 575 Hz.

4.3.2.4. Effet de l'environnement : comparaison avec un banc d'essai industriel

L'effet de l'environnement du banc d'essai a été déterminé par comparaison d'un essai sur le dispositif à faible puissance développé au laboratoire MSMP et un sur le banc de mesures vibratoires (BMV) de l'usine Renault de Cléon. Ce dernier s'effectue avec le réducteur complet assemblé. Pour ce faire, nous avons procédé à un essai croisé, c'est-à-dire que deux pièces sont passées chacune sur les deux moyens avec pour différence l'ordre dans lequel ces deux pièces passent sur un moyen. Cet essai servira de début de boucle de validation industrielle.

La **Figure 2.33** donne les spectres vibratoires pour les deux essais effectués. Qualitativement, on peut noter que les deux premières harmoniques d'engrènement mesurées sur le banc d'essai de faible puissance semblent bien être en accord avec celles mesurées sur un dispositif industriel. En effet, on retrouve une seconde harmonique très énergétique tandis que la première l'est moitié moins. On remarque cependant que l'harmonique trois possède une amplitude beaucoup plus faible sur la mesure industrielle. Ceci est négligeable devant l'amplitude des deux premières qui sont les plus énergétiques. Enfin, la différence d'ordre de grandeur d'amplitude, d'un facteur 100, est vraisemblablement due à l'environnement très différent des deux dispositifs.

Au final, notre moyen d'essai semble donner une bonne idée du comportement vibratoire de l'engrenage étudié, au moins qualitativement, par rapport à un moyen industriel beaucoup plus imposant.

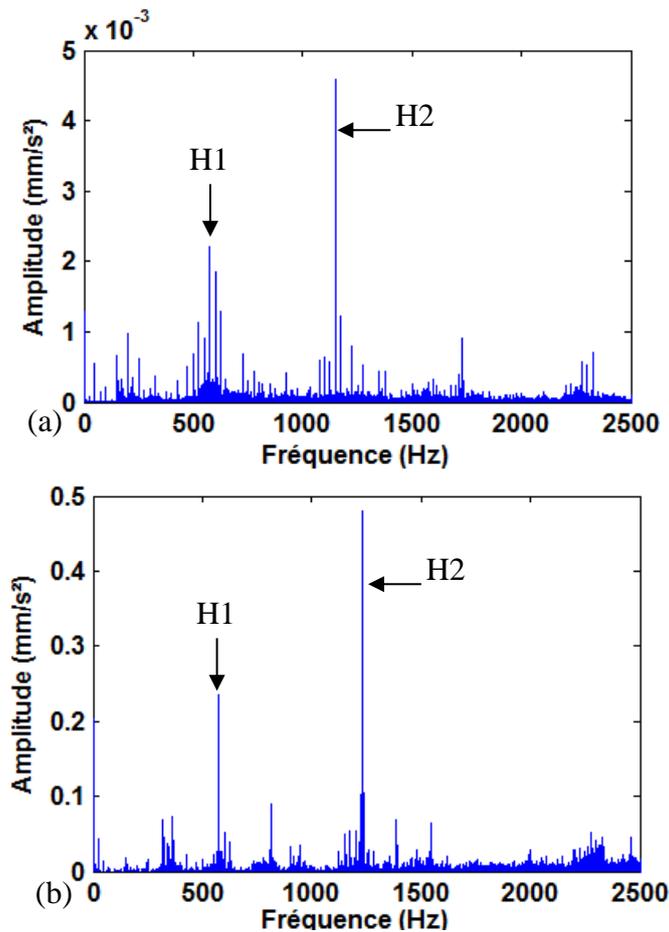


Figure 2.33. Spectres vibratoire obtenus (a) sur le banc d'essai du laboratoire MSMP et (b) sur le banc industriel Renault. H1 et H2 sont les deux premières harmoniques d'engrènement respectivement à 483,7 et 575 Hz.

4.4. Conclusions

Nous avons décrit dans cette partie deux moyens expérimentaux pour effectuer nos mesures de signatures vibratoires de finition denture, et ce, à deux échelles différentes : à l'échelle du contact et à l'échelle de l'engrenage. Ces deux moyens ont été validés et possèdent une répétabilité robuste avec une faible variabilité ainsi qu'une représentabilité significative avec le support de validation physique sur boîte de vitesse.

5. Conclusion

L'étude des procédés de finition denture et leurs influences sur le fonctionnel bruyance denture de l'engrenage a été réalisée expérimentalement à plusieurs échelles par l'utilisation de deux moyens :

- Un dispositif de mesure du bruit de frottement ;

- Un banc d'essai vibratoire de faible puissance pour l'étude d'un engrenage simple étage.

Au travers de cela, une méthodologie expérimentale rigoureuse a été mise en place pour établir le lien de la signature process de la finition denture avec les variables process et la bruyance denture.

