

# Etude expérimentale et multiéchelle de la relation Procédé – Surface – Fonction (bruyance denture)

## 1. Introduction

Dans ce chapitre, nous proposons de mettre en évidence expérimentalement l'influence de la surface des dentures d'engrenage aux échelles micro-géométriques. Pour cela, des dentures issues de deux procédés de finition denture différents (rectification et powerhoning) ainsi que des dentures non finies seront considérées. Une caractérisation micro- et macro- géométrique complète et rigoureuse de ces dentures est préalablement réalisée. Ensuite, la bruyance de dentures issues de ces différents procédés sera analysée et comparée par des essais à différentes échelles :

- en premier lieu, à l'échelle de l'engrenage en étudiant la réponse vibratoire de la finition denture obtenue par différents procédés d'usinage à l'abrasif sur un banc vibratoire de faible puissance ;
- en second lieu, à l'échelle de la surface de contact, grâce à un moyen de mesure de bruit de frottement, pour comprendre les sources surfaciques inhérentes à la génération de ces vibrations.

Enfin, la corrélation entre l'entrée du système de transmission étudié i.e. l'état de surface de denture et la réponse vibratoire à différentes échelles permettra d'identifier les échelles déterminantes à l'optimisation de cette réponse vibratoire.

## 2. Caractérisation géométrique multiéchelle de dentures générées par différents procédés

Pour rappel, dans cette étude l'engrenage étudié est celui du réducteur électrique développé pour le groupe motopropulseur électrique (GMPé) RA0 développé par Renault, illustré en **Figure 3.1**. Il est constitué d'une roue de 23 dents, l'arbre primaire, engrenant avec une roue de 51 dents, le pignon de descente emmanché sur l'arbre secondaire.

Trois configurations dentures issues de trois procédés différents sont considérées à savoir : rectification, powerhoning et sans finition. Les flancs des pièces de la dernière configuration n'ont pas été finis après le grenailage et post-traitement thermo-chimique, alors que les deux autres ont subis soit une opération de rectification soit une opération de powerhoning. Les détails de l'enchaînement process de la production de denture ont été rappelés dans le chapitre précédent.

Ces dentures ont été produites de façon à ce qu'elles aient des caractéristiques géométriques les plus proches possibles entre elles afin de cerner leurs différences sur les échelles micro-géométriques de l'état de surface. Ceci a permis d'étudier l'impact exclusif des conditions d'engrènement et des surfaces de flanc sur les vibrations générées par l'engrenage.



**Figure 3.1.** Groupe motopropulseur électrique (GMPé) développé par Renault. La partie étudiée est la partie gauche de l’encadré rouge.

## 2.1. Caractérisation dimensionnelle des échantillons étudiés

Tous les échantillons étudiés ont été mesurés sur une machine de métrologie dimensionnelle de forme spécialisée pour les engrenages (Cf. Chapitre 2, paragraphe 3.1). Les pièces réalisées pour ces travaux respectent les tolérances dimensionnelles imposées par Renault sur ce produit.

## 2.2. Caractérisation topographique multiéchelle des échantillons étudiés

### 2.2.1. *Evolution des écarts géométriques de la surface des dentures tout au long de la gamme de production*

La génération de la surface des flancs de denture présente différentes étapes, chacun des procédés venant ajouter sa propre signature. Ainsi, afin de comprendre l’influence de chaque étape de la gamme sur la morphologie des surfaces étudiées, des empreintes et des mesures interférométriques ont été effectuées sur des échantillons prélevés après chaque procédé ; elles sont données en **Figure 3.2**. La **Figure 3.3** regroupe les paramètres de rugosité arithmétique  $S_a$  et fonctionnels  $S_k$ ,  $S_{pk}$  et  $S_{vk}$  de la norme ISO 25178.

Sur les pièces taillées (**Figure 3.2a**), on peut clairement observer les traces laissées par la fraise-mère. Elles sont d’ailleurs très visibles à l’œil nu. Cela donne une morphologie possédant des stries quelque peu quadrillées qui ressortent fortement, donnant un aspect facetté au flanc ; leur rugosité moyenne est d’environ  $1,1 \mu\text{m}$  (**Figure 3.3**). Les stries forment entre elles des espaces de faible rugosité, avec un  $S_a$  d’environ  $0,5 \mu\text{m}$ .

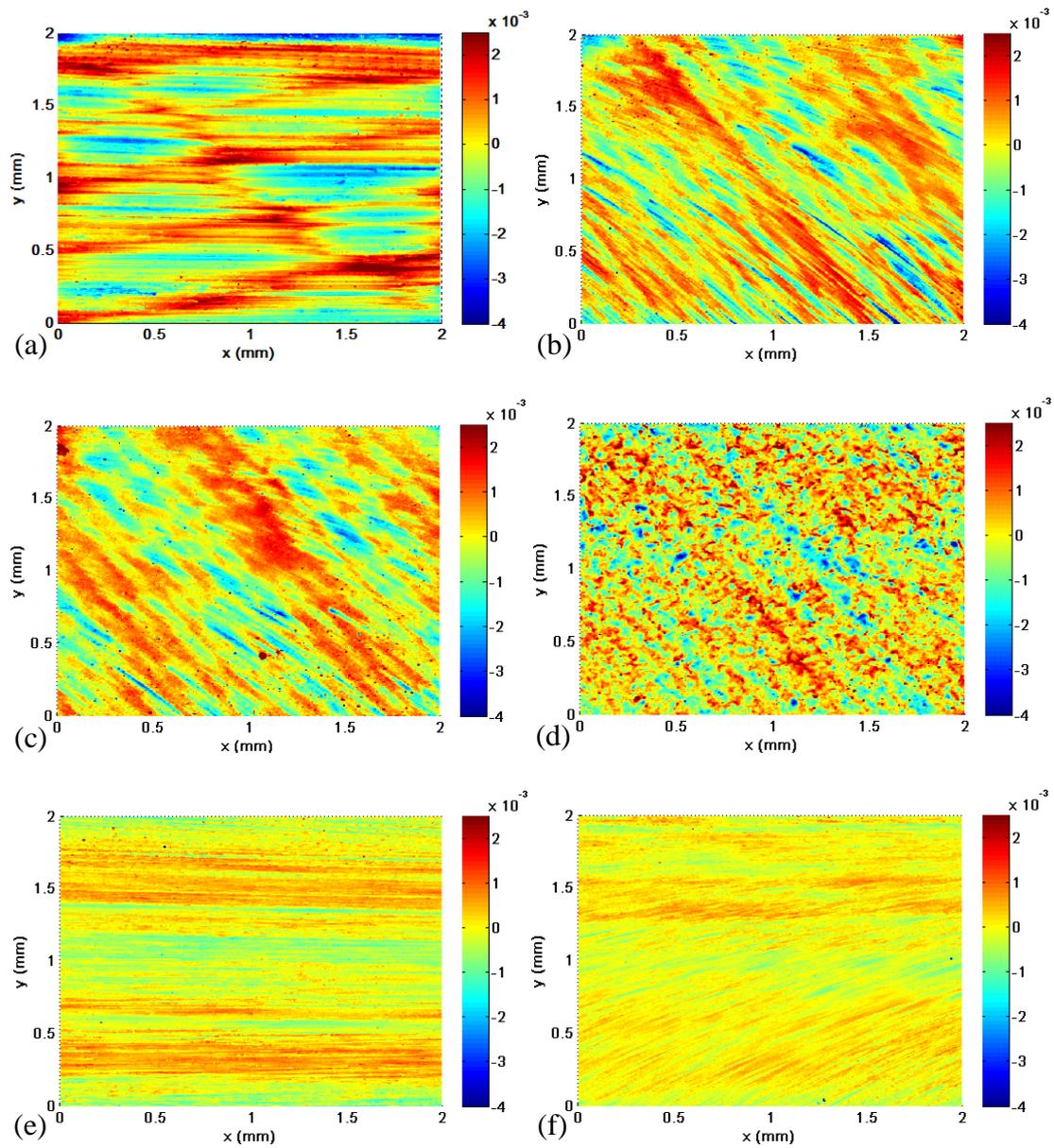
Ces traces sont cependant complètement effacées par l’opération de rasage. La **Figure 3.2b** montre une topographie typique d’une surface denture après l’opération de rasage. Ceci n’est pas surprenant dans la mesure où la surépaisseur enlevée par ce procédé est comprise entre 30 à 50  $\mu\text{m}$ , comme rappelé dans le premier chapitre de ce mémoire. La morphologie de cette nouvelle surface est striée. On peut noter deux types de stries : certaines très marquées et droites à  $45^\circ$  par rapport à la direction de profil et certaines plus fines et plus courbées avec un angle plus incliné.

L'opération de traitement thermochimique quant à elle, en **Figure 3.2c**, atténue quelque peu la striation de la surface. La morphologie du flanc n'est pas modifiée de manière importante mais on note toutefois que les stries plus fines tendent à disparaître. Le graphique en **Figure 3.3** indique que le paramètre  $S_{vk}$  est le seul à être modifié, avec une diminution non négligeable, venant supporter cette disparition.

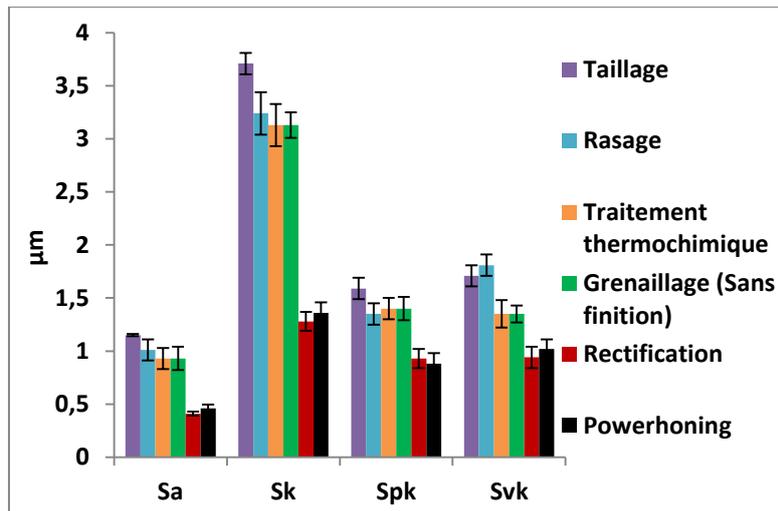
Les topographies associées aux trois configurations étudiées sont aussi sur la **Figure 3.2**, où l'on peut distinguer des morphologies et des rugosités différentes. Dans le cas où les flancs ne sont pas finis (**Figure 3.2d**), la surface générée est légèrement striée dans une direction à  $45^\circ$  par rapport au profil. Comme on a pu le voir précédemment, il s'agit des traces laissées par l'opération de rasage dont le but est de s'approcher de la forme finale des dents en anticipant les déformations liées au traitement thermochimique. Ces traces sont masquées par le grenailage effectué par la suite. Les paramètres de rugosité et fonctionnels de la norme ISO 25178 ne sont pas modifiés par cette opération. Cependant, la rugosité est nettement plus élevée que sur une pièce finie (**Figure 3.3**).

Les morphologies de surface issues des étapes de finition sont différentes et propres à chaque procédé. En effet, les surépaisseurs enlevées sont comprises entre 2 et 10  $\mu\text{m}$  supprimant ainsi toute trace des opérations antérieures en termes de morphologies. La rectification, en **Figure 3.2e**, vient générer des stries régulières dans le sens de l'hélice, sur toute la hauteur de dent, tandis que le powerhoning, en **Figure 3.2f**, induit des stries de plus en plus courbées en descendant sur le flanc. Ceci n'est pas sans rappeler les stries fines associées à l'opération de rasage (**Figure 3.2b**). La différence de striation est liée aux cinématiques spécifiques à chaque procédé (Cf. Chapitre 1, paragraphe 4.2).

On remarque sur la **Figure 3.3** que la surface sans finition est, logiquement, plus rugueuse que les surfaces finies. La rugosité arithmétique est en effet deux fois plus importante, de même que la rugosité de la zone fonctionnelle  $S_k$ . Les deux autres paramètres  $S_{pk}$  et  $S_{vk}$  sont aussi plus élevés, avec une tendance à avoir des pics plus hauts. Ceci est dû au grenailage, dont les traces ne sont alors pas gommées par l'application d'une opération de finition, qui vient former de nombreuses aspérités. La rugosité arithmétique surfacique ( $S_a$ ) obtenue après finition est très proche quel que soit le procédé utilisé, aux alentours de 0,4  $\mu\text{m}$ .



**Figure 3.2.** Micro-topographies 3D (2 mm x 2 mm) de flancs de denture générées respectivement (a) après taillage fraise-mère ; (b) après rasage ; (c) après traitement thermochimique; (d) après grenailage (sans finition) ; (e) par rectification avec une meule mère ; (f) par powerhoning avec un engrenage interne. L'échelle des couleurs est en millimètres et le sommet de la dent est vers le haut des topographies.



**Figure 3.3.** Paramètres ISO 25178 calculés après chaque étape de la gamme de fabrication.

Au final, nous avons pu noter que le taillage n'a que peu d'influence sur la topographie de surface obtenue si une opération de rasage ou de finition est appliquée. De même, les traces laissées par les procédés de rasage ainsi que de grenaillage sont effacées par la finition denture. Enfin, les paramètres d'état de surface 3D (ISO25178) ne sont pas suffisants pour discriminer les flancs finis d'un procédé à l'autre. Pour cette raison, une analyse plus fine basée sur une décomposition multiéchelle a été appliquée.

#### 2.2.2. *Caractérisation multiéchelle de la finition denture*

Suivant les paramètres standards d'état de surface décrits précédemment, les différences entre les surfaces dentures générées par le procédé de rectification et celui de powerhoning sont négligeables voire inexistantes en tenant compte des dispersions. Pour cette raison, une approche plus fine, utilisant une décomposition multiéchelle basée sur la transformée par ondelettes continues a été utilisée [86,87]. Son principe a été détaillé dans le chapitre 1. Le spectre multiéchelle SMA de rugosité arithmétique calculé à chaque échelle de la surface est donné pour chaque configuration en **Figure 3.4**.

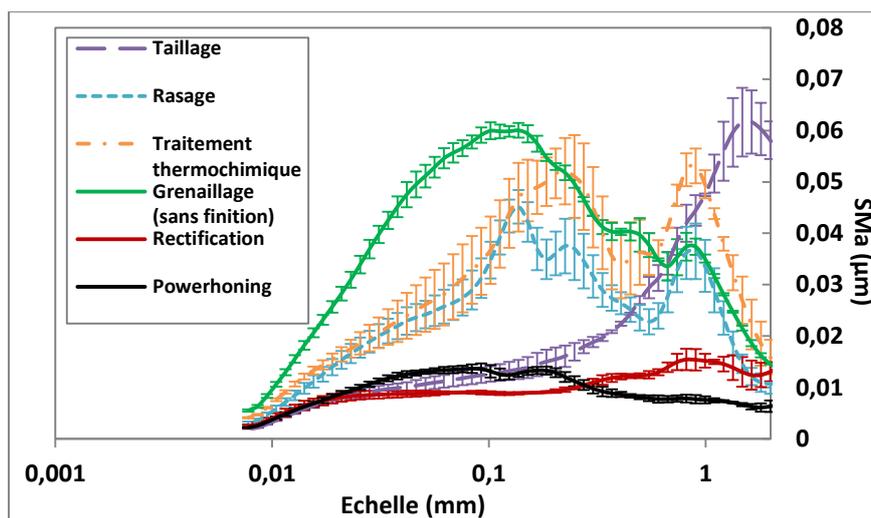
On remarque que la surface denture après taillage présente des ondulations de fortes amplitudes à des longueurs d'ondes  $\sim 1$  mm qui correspondent aux facettes observées. L'opération de rasage permet de réduire à la fois l'amplitude et la longueur d'onde de ces ondulations. On remarque en particulier deux échelles caractéristiques à  $\sim 0,14$  et  $1$  mm, qui correspondent aux deux types de stries observés sur les topographies (**Figure 3.2b**). L'opération de traitement thermochimique entraîne une « dilatation de la surface, » au sens où elle augmente l'amplitude des irrégularités de surface sur toutes les échelles au-dessus de  $0,14$  mm. On observe aussi plus de dérives, se traduisant par des écart-types plus importants. On retrouve ici la signature peu prédictive de ce procédé de traitement de surface.

Le grenaillage vient effacer toutes les traces du rasage en dessous de  $1$  mm d'échelle. Cette dernière échelle revient à un niveau inférieur à celui avant le traitement thermochimique (**Figure 3.2d**). Par ailleurs, on peut noter aussi une forte augmentation des échelles de microrugosité, due aux impacts des billes, tout comme

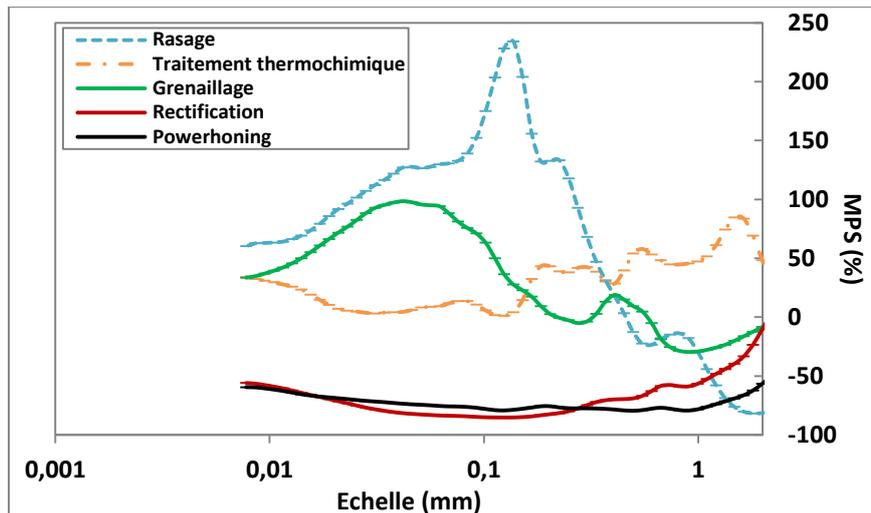
les paramètres de la norme ISO 25178 l'indiquait. De plus, il est nettement visible que la surface non finie est plus rugueuse que les surfaces finies, et ce, sur toutes les échelles. En effet, on peut prendre en exemple l'échelle caractéristique des surfaces non finies, 0,12 mm, qui possède une amplitude quatre à cinq fois supérieure à celles des surfaces finies. C'est un phénomène que l'on retrouve sur toute la bande d'échelles étudiée.

Enfin, les spectres multiéchelles de rugosité des surfaces dentures font apparaître des différences nettes entre les deux surfaces finies. Les deux opérations de finition effacent toute signature des opérations précédentes et lissent toutes les échelles de deux manières différentes (**Figure 3.2e** et **f**). Le powerhoning génère plus de microrugosité, en dessous de 0,3 mm, tandis que la rectification génère des ondulations plus importantes autour de 1mm.

Pour aller plus loin, les Signatures Process Multiéchelles (MPS) ont aussi été calculées pour chaque procédé (**Figure 3.5**) [80,83]. Ces dernières permettent de voir plus finement quelles échelles ont été impactées par le procédé. On peut noter une modification très importante effectuée par le rasage aux alentours de l'échelle 0,1 mm. Le traitement thermochimique quant à lui, et comme nous avons pu le voir précédemment, est relativement stable sur toutes les échelles et provoque bien un phénomène de « dilatation » de la surface. Le grenailage vient augmenter fortement la microrugosité, plus particulièrement autours de l'échelle située à 0,05 mm. Enfin, les deux procédés de finition possèdent des comportements très proches, la principale différence se situant au-dessus de l'échelle 0,5 mm, expliquant ainsi les différences d'ondulation de surface entre les deux.



**Figure 3.4.** Signature multiéchelle, SMA, des surfaces de flancs après chaque opération de la gamme.



**Figure 3.5.** Signature Process Multiéchelle (MPS) de chaque opération de la gamme de fabrication des dentures.

### 2.3. Conclusions

Les flancs ont donc été caractérisés topographiquement et ont pu être discriminés entre eux. Il est intéressant de voir que les pièces sans finition sont un produit des opérations de rasage et de grenailage tandis que les pièces finies sont caractérisées par le procédé de finition utilisé. A partir de ces informations, des essais vibratoires comprenant des pièces de chaque configuration ont été mis en place.

### 3. Influence de la finition denture sur les vibrations à l'échelle de l'engrenage

Nous nous intéressons ici à déterminer l'influence du procédé de finition denture, et donc de la morphologie de surface des flancs, sur la génération de vibrations lors de l'engrènement. Le lubrifiant étant une partie intégrale du contact entre les dentures, trois conditions de lubrification ont été étudiées pour quantifier l'effet de la viscosité de l'huile dans la génération de vibrations :

- **Régime sec** : c'est-à-dire avec un contact sec afin de voir plus précisément le bruit généré par le contact ;
- **Régime lubrifié utilisant deux lubrifiants différents** :
  - o **Huile 'A'** très fluide et utilisée dans le produit fini réducteur Renault ;
  - o **Huile 'B'** beaucoup plus visqueuse, utilisée plutôt pour les boîtes de vitesses de 4×4.

Les viscosités dynamiques des deux huiles en fonction de la température ont été données dans le chapitre 2. Nous rappelons aussi les conditions d'essai qui sont d'une vitesse de rotation d'entrée de  $1500 \text{ tr.min}^{-1}$  et d'un couple de charge de 8 Nm en sortie.

A partir des mesures vibratoires, les spectres de Fourier ont été calculés. Ensuite, la moyenne des trois premières harmoniques d'engrènement,  $L_e$ , a été calculée pour pouvoir déterminer l'influence globale des conditions d'engrènement et de finition denture sur les vibrations. Nous avons aussi étudié séparément l'amplitude de chaque harmonique pour permettre une comparaison plus fine des comportements observés.

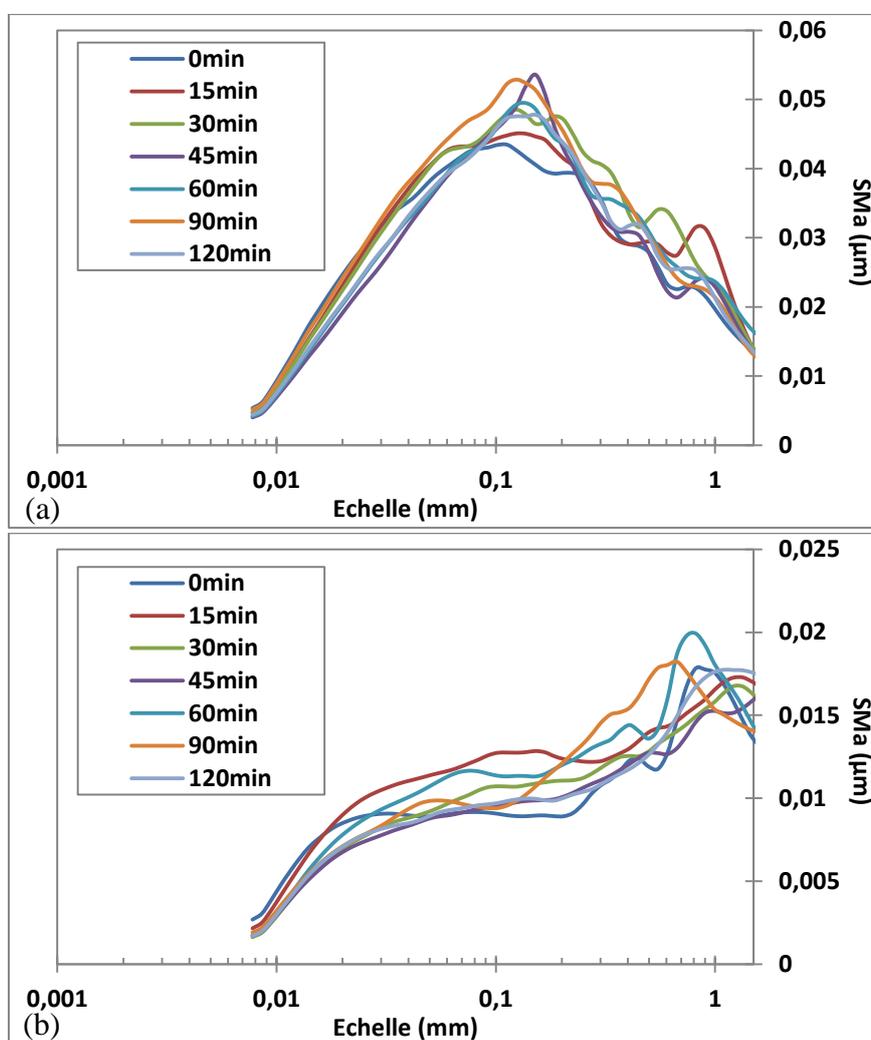
### 3.1. Régime sec

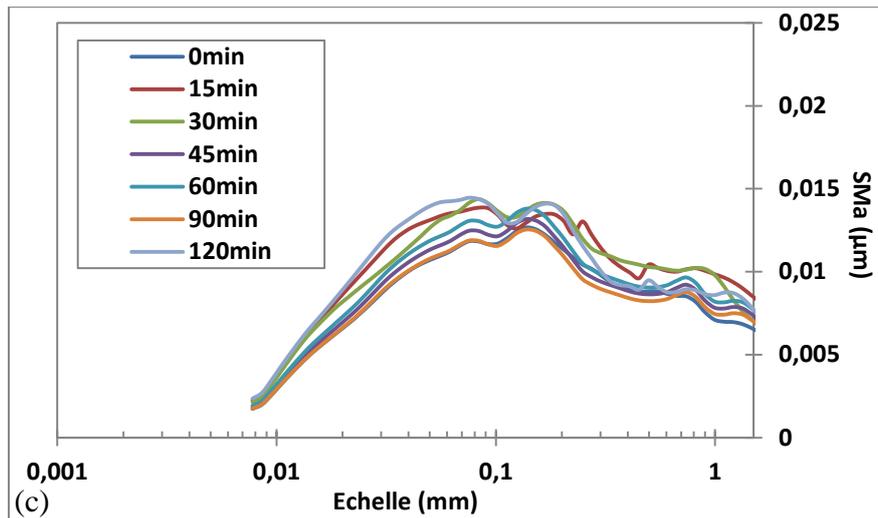
Tout d'abord, afin d'obtenir des informations pertinentes sur le contact entre les dentures, nous avons effectué des mesures lors d'un engrenement à sec.

#### 3.1.1. *Evolution de la surface des flancs au cours de l'engrènement*

Des prises d'empreintes toutes les quinze minutes ont permis d'étudier l'évolution de la surface des flancs de l'arbre primaire pendant les deux heures qu'ont duré les essais. Après décomposition multiéchelle, les spectres SMA ont été calculés. Ceux-ci sont donnés en **Figure 3.6**. Pour les trois procédés, les modifications sont assez faibles.

Toutefois, on peut remarquer sur la **Figure 3.6a** deux zones de modifications de la surface pour les pièces sans finition. La première, autour de 0,1 mm, indique une augmentation du SMA sur tous les pas de temps. La seconde est autour de 1 mm et met en relief une augmentation à 15 et 30 minutes. Cette tendance se retrouve aussi dans le cas des pièces finies par powerhoning (**Figure 3.6c**). Toutefois, la rugosité de celles-ci n'est pas modifiée. Enfin, pour les pièces rectifiées, **Figure 3.6b**, on remarque quelques modifications dans les échelles inférieures à 0,1 mm ainsi que dans l'ondulation, mais il n'existe pas de tendance claire.



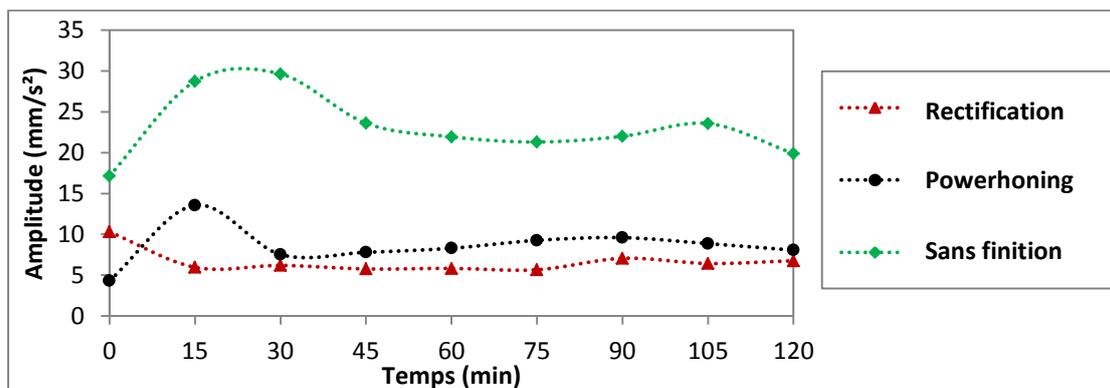


**Figure 3.6.** Evolution des SMA pendant les tests vibratoires à sec pour les pièces générées (a) sans finition ; (b) par rectification ; (c) par powerhoning.

### 3.1.2. *Evolution de la réponse vibratoire au cours de l'engrènement*

Il est intéressant de voir en régime sec et dès le premier abord que les différentes configurations de finition denture ont pu faire apparaître un comportement transitoire concernant l'amplitude moyenne des trois premières harmoniques d'engrènement. On pourra se référer à la **Figure 3.7**, où sont représentées les évolutions du paramètre  $L_e$  au cours du temps pour chaque type de finition étudiée. Il s'agit d'une augmentation temporaire du niveau vibratoire avant une stabilisation en régime permanent.

L'augmentation se situe entre les points de mesure à 0 et 45 minutes. Pour la rectification, il est intéressant de remarquer que l'augmentation se situe plus tôt, entre 0 et 15 minutes, et de manière plus rapide. Le comportement pour les pièces powerhonnées se rapproche plus des pièces sans finition. La valeur maximale de l'accélération est plus élevée pour les pièces non finies tandis les valeurs pour les pièces finies sont assez proches. Celles des pièces powerhonnées sont légèrement plus importantes. Il est intéressant de voir que cela corrèle bien avec le niveau de microrugosité mis en avant précédemment. En effet, bien que proche pour les pièces finies, celui des pièces powerhonnées est plus élevé. En régime stabilisé, les pièces finies offrent un niveau très semblable.



**Figure 3.7.** Paramètre  $L_e$  au cours du temps pour chaque type de pièces et pour les essais réalisés à sec.

### 3.1.3. Relation entre l'évolution des surfaces des flancs et la réponse vibratoire

En régime sec, **Figure 3.7**, les pièces sans finition ont des harmoniques d'engrènement qui ont un niveau beaucoup plus élevé que pour les pièces finies. Cela s'explique assez logiquement par le fait que les flancs sont beaucoup plus rugueux et l'absence d'un film d'huile permet une mise en contact directe des aspérités de surface, qui génèrent alors des excitations supplémentaires. On peut noter que les deux autres procédés ne montrent pas de différences et possèdent un niveau vibratoire très proche en régime permanent. On note que leur rugosité moyenne est deux fois plus faible que celle des pièces sans finition, comme l'indiquait la **Figure 3.3**, et que leur niveau vibratoire en régime stabilisé,  $L_e$ , est lui aussi deux fois plus faible que celui des pièces sans finition. Ainsi, nous avons pu en déduire que les défauts de rugosité et d'ondulation impactent la bruyance denture à sec.

## **3.2. Régime lubrifié**

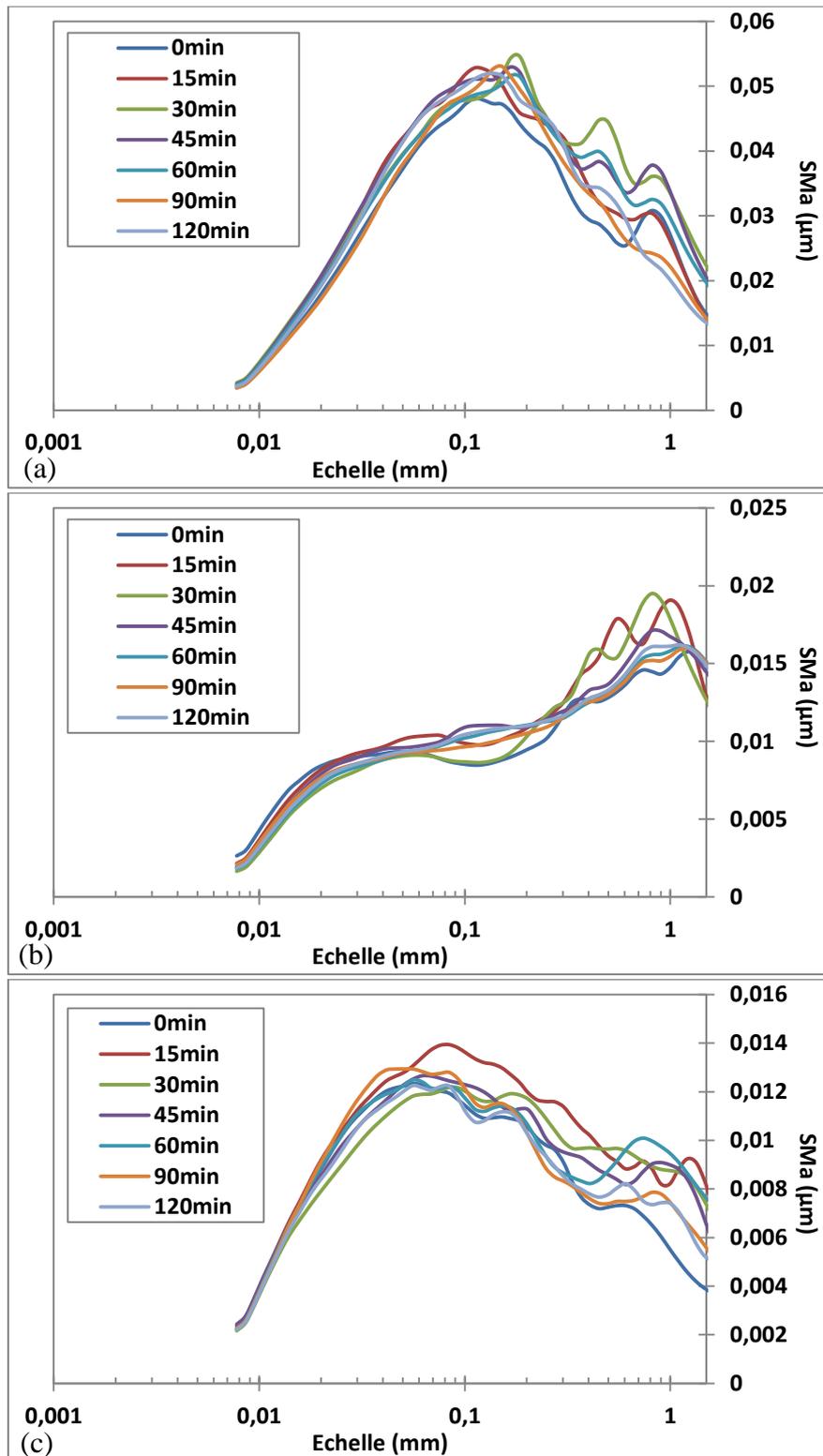
### 3.2.1. Evolution de la surface des flancs au cours de l'engrènement

Tout comme pour les essais effectués à sec, les topographies des flancs ont aussi été mesurées pour les essais en conditions lubrifiées. Pour ce faire, les pièces ont été nettoyées à l'acétone avant chaque prise d'empreinte. Les spectres SMA obtenus sont donnés en **Figure 3.8** pour les essais sous huile 'A' et **Figure 3.9** pour l'huile 'B'.

Pendant les essais avec l'huile 'A', nous avons pu noter peu de modifications dans les échelles de rugosité des pièces sans finition, **Figure 3.8a**. En revanche, dans les échelles plus élevées d'ondulation, on retrouve trois courbes qui se détachent du reste par une augmentation significative de l'amplitude. A 30 et 45 minutes notamment, deux pics apparaissent aux échelles 0,5 et 0,9 mm. A 60 minutes, ceux-ci commencent à disparaître.

En ce qui concerne les pièces finies, la tendance est très semblable. En effet, seules les échelles plus élevées, supérieures à 0,2 mm, sont affectées par l'engrènement. Les pièces rectifiées, **Figure 3.8b**, présentent deux pics très semblables à ceux des pièces non finies à 15 et 30 minutes. Les pièces powerhonnées, sur la **Figure 3.8c**, quant à elles présentent des tendances moins nettes. On peut toutefois noter qu'une certaine augmentation du SMA dans les échelles citées précédemment est présente entre 15 et 60 minutes.

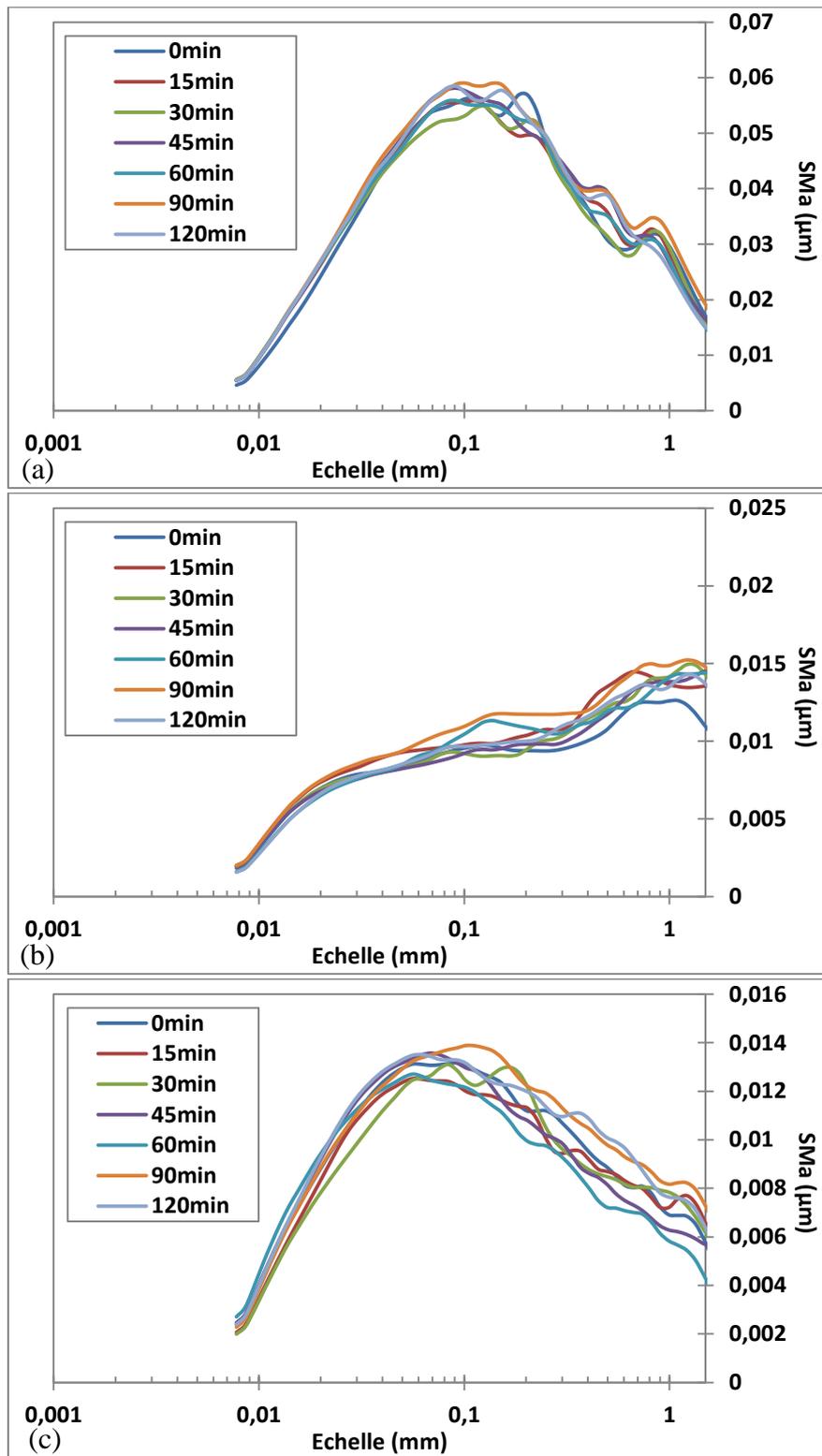
Ainsi, on peut en déduire que moins l'huile est visqueuse et plus les défauts de rugosité et d'ondulation évoluent dans le temps lors de l'engrènement. Les procédés de finition suppriment l'effet de rugosité et substituent un effet des échelles d'ondulation ( $> 0,2$  mm).



**Figure 3.8.** Evolution des SMA pendant les essais lubrifiés avec l'huile 'A' pour les dentures générées (a) sans finition ; (b) par rectification ; (c) par powerhoning.

Les essais avec l'huile plus visqueuse 'B' ont mis en avant moins de modifications que lors des essais avec l'huile 'A'. Ceci est particulièrement visible sur les pièces non finies, **Figure 3.9a**, où aucune différence nette n'apparaît au cours du temps. Quant aux pièces finies, **Figure 3.9b** et **c**, elles mettent en avant une très légère augmentation du SMA dans les échelles d'ondulation, mais qui reste relativement

négligeable. L'augmentation de la viscosité réduit la modification des défauts de rugosité et d'ondulation lors de l'engrènement sur la durée par l'interposition d'un film d'huile entre les dents en contact qui n'est pas brisé par les aspérités de surface.



**Figure 3.9.** Evolution des SMA pendant les essais lubrifiés avec l'huile 'B' pour les dentures générées (a) sans finition ; (b) par rectification ; (c) par powerhoning.

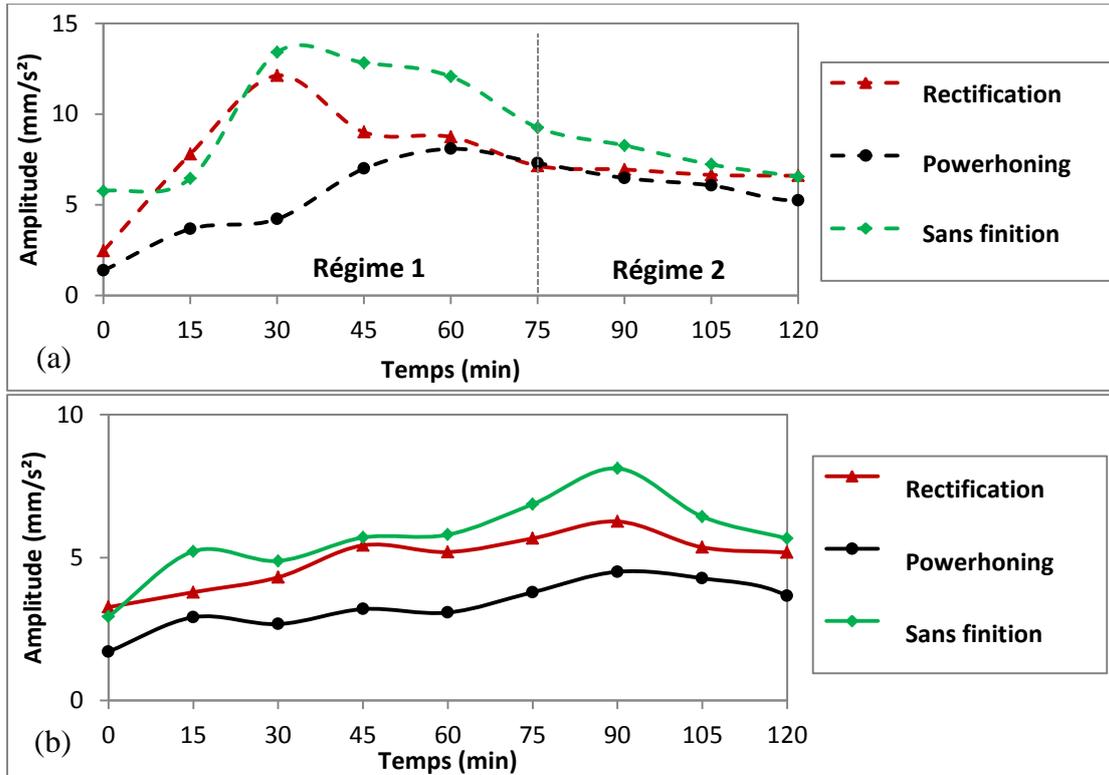
### 3.2.2. *Evolution de la réponse vibratoire au cours de l'engrènement*

Comme pour les essais à sec, la **Figure 3.10** donne les résultats pour les essais lubrifiés. Sur la **Figure 3.10a**, on retrouve le phénomène transitoire mis en avant précédemment, principalement lorsque l'huile est peu visqueuse (huile 'A'). Il est indiqué par la mention 'Régime 1' sur le graphique. Pour les pièces non finies, l'augmentation se situe entre les points de mesure 15 et 75 minutes, alors qu'elle est entre 0 et 60 pour la rectification et 30 et 75 pour le procédé de powerhoning. Il s'agit d'un phénomène d'accommodation des surfaces au contact des dentures. On remarque un comportement assez proche entre les pièces rectifiées et non finies, possiblement dû à la présence d'ondulations sur les deux types de surface.

On peut en outre ajouter que ce phénomène est très peu visible pour les essais utilisant une huile visqueuse (huile 'B'), donnés en **Figure 3.10b**. La viscosité de l'huile semble avoir un effet qui retarde ce phénomène et amoindrit son augmentation relative, comme l'indique le **Tableau 3.1** qui donne l'augmentation relative par rapport à la valeur moyenne du régime permanent. On notera par ailleurs un déplacement dans le temps de ce régime transitoire avec l'augmentation de la viscosité.

Il s'agit d'un phénomène non-négligeable en amplitude, cependant il est important de garder à l'esprit les conditions dans lesquelles les essais ont été effectués, c'est-à-dire à bas régime et faible couple résistant. Autrement dit, il s'agit possiblement d'un effet d'accommodation des surfaces de contact denture au cours de l'engrènement, mis en valeur seulement par les conditions de faible puissance utilisées.

La viscosité plus importante qui rend ce phénomène presque inexistant met alors en avant l'effet des échelles de rugosité et d'ondulation sur les niveaux des harmoniques d'engrènement et donc la bruyance de l'engrenage. En effet, les échelles de surfaces ont un rôle plus important lorsque le film d'huile est moins épais lors du contact. Toutefois, il est intéressant de noter que le classement des niveaux de bruyance est identique quel que soit la viscosité de l'huile utilisée. En effet, les niveaux vibratoires des pièces non finies sont toujours plus élevés tandis que ceux des pièces finies par powerhoning sont toujours les plus faibles, indiquant ainsi une contribution plus large des échelles d'ondulation.



**Figure 3.10.** Paramètre  $L_e$  au cours du temps pour chaque type de pièces et pour les essais lubrifiés réalisés (a) avec l'huile 'A' et (b) avec l'huile 'B'.

**Tableau 3.1.** Augmentation relative par rapport au niveau moyen du régime stabilisé pendant les deux heures d'essai.

	Sans finition	Rectification	Powerhoning
<b>Sec</b>	42 %	N/A	68 %
<b>Huile 'A'</b>	36 %	61 %	52 %
<b>Huile 'B'</b>	31 %	18 %	18 %

Enfin, ce comportement est visible sur les trois premières harmoniques dans la plupart des configurations, comme on peut le voir sur la **Figure 3.11**. Toutefois, pour les cas lubrifiés, l'harmonique H1 semble avoir une plus forte influence sur le paramètre  $L_e$ , et donc sur le comportement vibratoire global de l'engrenage. Pour les essais à sec, les trois harmoniques contribuent de la même manière, même si pour les pièces sans finition la troisième harmonique augmente le niveau global vibratoire, sans variation notable au cours du temps.

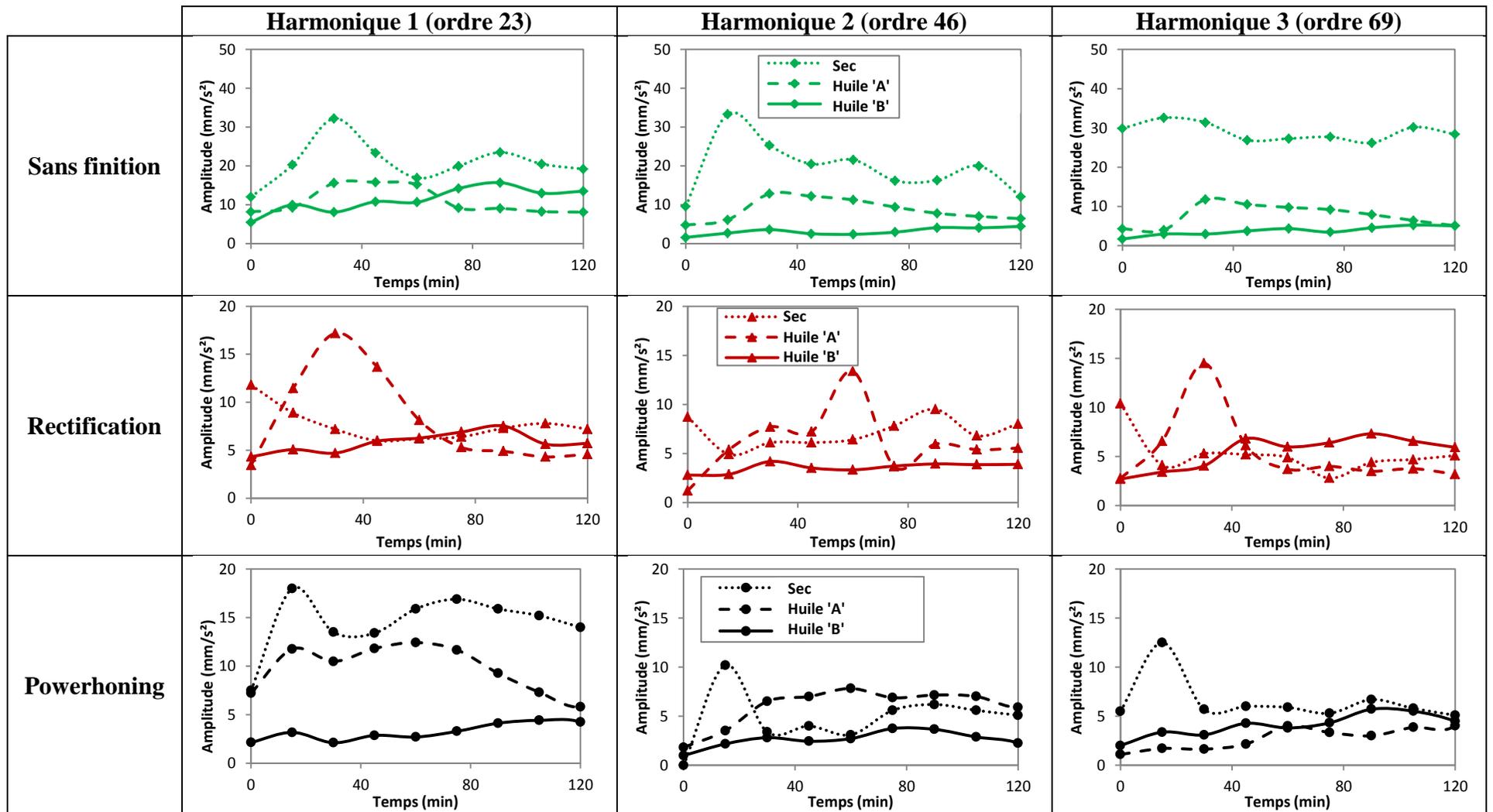


Figure 3.11. Evolution des amplitudes des trois premières harmoniques d'engrènement au cours du temps pour chaque configuration étudiée.

### 3.2.3. *Relation entre l'évolution des surfaces des flancs et la réponse vibratoire*

Si l'on compare les régimes transitoires présentés sur les **Figure 3.7** et **Figure 3.10**, il est intéressant de noter les évolutions de l'état de surface. En effet, comme indiqué précédemment, les augmentations se trouvent généralement entre 15 et 30 minutes. Or, les évolutions des SMA au cours des essais vibratoires donnés sur les **Figure 3.6**, **Figure 3.8** et **Figure 3.9** ont montré des augmentations non négligeables au niveau des échelles autour de 1 mm qui pourraient expliquer l'augmentation des amplitudes vibratoires. Elles sont présentes aux pas de temps et dans les conditions où cela arrive.

Par ailleurs, en comparant les régimes permanents pour les essais lubrifiés (huiles 'A' et 'B') sur la **Figure 3.10**, on peut distinguer deux tendances. La première regroupe les pièces sans finition et rectifiées tandis que la seconde est composée des pièces powerhonnées. Le premier groupe ne montre que très peu de différences au bout des deux heures d'essai en ce qui concerne les amplitudes moyennes des trois premières harmoniques d'engrènement. En effet, les deux se trouvent à un niveau très proche. Au contraire, le second groupe fait apparaître une différence entre les deux, l'huile plus visqueuse donnant des résultats plus faibles. De ceci, on peut conclure que les échelles de rugosité ont moins d'impact sur les harmoniques d'engrènement que les échelles de d'ondulation.

La viscosité joue un rôle sur le comportement vibratoire de l'engrenage, du moins sous ces conditions d'essai. L'existence d'un film d'huile sur les dentures au cours de l'engrènement amoindrit la contribution des échelles surfaciques les plus faibles, c'est-à-dire de la microrugosité, sur les excitations générées. De ce fait, il est probable que l'effet de l'huile sera moins important avec une augmentation de régime et de couple résistant, d'une part parce que l'augmentation de la température réduira les écarts de viscosité entre les huiles, et d'autre part par l'apparition de flexions de dent plus importantes qui vont réduire l'influence de la microrugosité, au profit de la forme et des grande échelles d'ondulations.

Afin de quantifier plus précisément les effets de chaque facteur (Lubrification, Procédé, Microrugosité, Ondulation, Temps) sur la moyenne du niveau vibratoire des trois premières harmoniques d'engrènement, une analyse de variance (ANOVA) a été utilisée. Une analyse par régression linéaire du paramètre "L<sub>e</sub>" a donc été considérée.

Une somme des carrés de Type III, a été utilisée afin de tester les effets principaux et les effets d'interaction dans l'ANOVA. Cela permet d'allouer la partie de la variance expliquée aux effets d'interaction et aux effets principaux tout en n'en négligeant aucun. La validité du modèle est évaluée par le calcul du coefficient de corrélation au carré R<sup>2</sup> [88]. R<sup>2</sup> est un nombre réel compris entre zéro et un. Une plus haute valeur de R<sup>2</sup> indique que le modèle est plus proche des données.

Enfin, le « Test de Fisher, » aussi appelé « test F, » a été utilisé pour quantifier la signifiante de chaque facteur  $\alpha$  par la formule suivante [89] :

$$F(\alpha) = \frac{MS_{reg}(\alpha)}{MS_r} \quad (\text{éq. 3.1})$$

Où  $MS_{reg}$  est la moyenne des carrés dus à la régression et  $MS_r$  la moyenne des carrés des résidus.

Pour quantifier la contribution  $C$  de chaque facteur au paramètre  $L_e$ , le quotient de contribution  $C$  de chaque facteur  $\alpha$  a été calculé avec le test de Fisher à une confiance  $R^2$  près [90]. Cela peut être défini par la formule suivante :

$$C(\alpha) = \frac{F(\alpha)}{\sum_{\alpha} F(\alpha)} \times R^2 \quad (\text{éq. 3.2})$$

Puis :

$$\sum_{\alpha} C(\alpha) = R^2 \quad (\text{éq. 3.3})$$

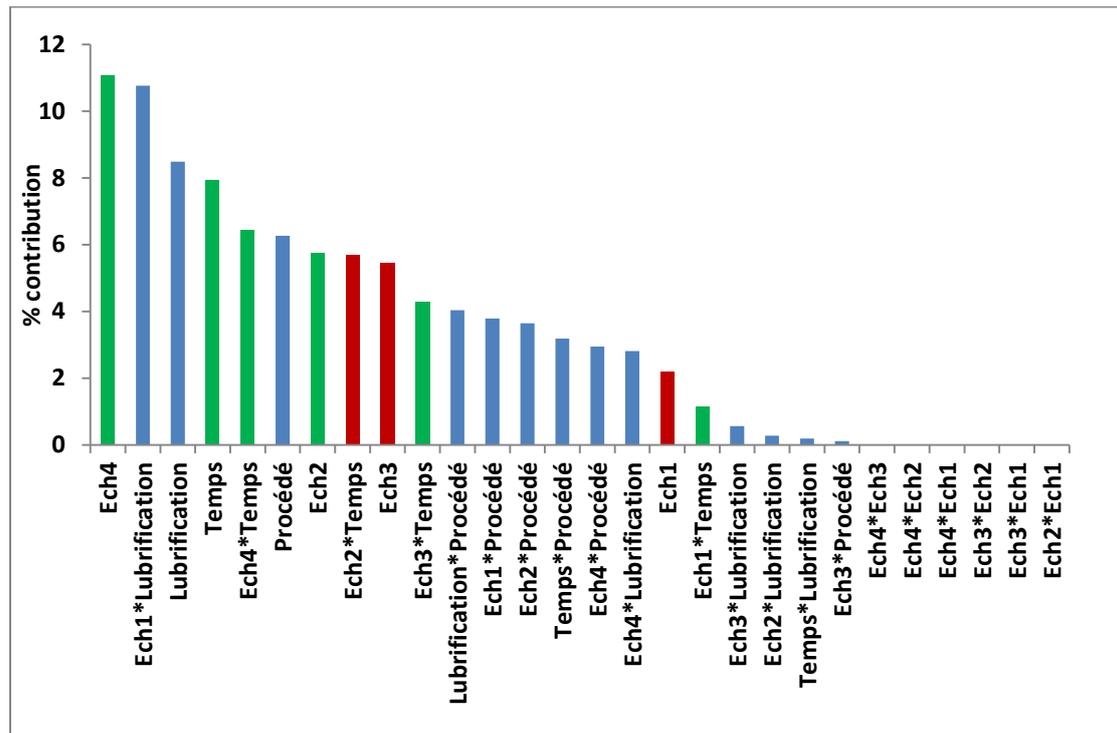
Cette analyse de variance à deux niveaux d'interaction a été réalisée avec le logiciel XLSTAT. En entrée de ce modèle de type III, les paramètres suivant ont été considérés :

- **Temps** : en minutes, il s'agit des instants auxquels ont été mesurés les vibrations et les topographies de surfaces ;
- **Lubrification** : les conditions de lubrification dans lesquelles se sont déroulés les essais ;
- **Procédé** : les procédés ayant généré la surface du flanc (sans finition, rectification, powerhoning) ;
- **Ech1** : la moyenne du SMA sur les échelles de 0 à 0,025 mm ;
- **Ech2** : la moyenne du SMA sur les échelles de 0,025 à 0,25 mm ;
- **Ech3** : la moyenne du SMA sur les échelles de 0,25 à 0,75 mm ;
- **Ech4** : la moyenne du SMA sur les échelles de 0,75 à 1,5 mm.

En sortie, le paramètre  $L_e$  a été considéré. Au final, le coefficient  $R^2$  de cette analyse a une valeur de 97,1 %. A partir de là, les pourcentages de contributions de chaque facteur et de ses interaction ont été calculés (**Figure 3.12**). Les échelles d'ondulation (**Ech4**), c'est-à-dire celles situées entre 0,75 et 1,5 mm, influencent beaucoup la réponse vibratoire comme nous avons pu le montrer précédemment. Ce facteur arrive en première position avec un pourcentage de contribution de 11,1 % qui est positif. Autrement dit, plus l'amplitude de ces échelles est importante et plus la réponse augmente. La lubrification ainsi que son interaction avec les échelles de microrugosité (Ech1) viennent en deuxième et troisième positions avec des pourcentages de contribution respectifs de 10,7 et 8,4 %. Le type de procédé utilisé n'intervient qu'en cinquième position avec 6,2 % de contribution. Enfin, les autres échelles de surface et leurs interactions avec les variables d'engrènement interviennent ensuite avec des pourcentages compris entre 4 et 6 %. Il est intéressant de noter que la rugosité seule a une contribution plus faible.

Cette analyse statistique a ainsi permis de conforter les résultats mentionnés précédemment et a remis en avant l'influence non négligeable des échelles d'ondulation et de leur évolution dans le temps sur la réponse vibratoire de l'engrènement, ainsi que des autres échelles surfaciques dans une importance moindre. Or, il est intéressant de noter qu'en production la qualification denture sur le plan du

bureau d'études ne prend pas en compte les défauts de rugosité et d'ondulation (cf. Chapitre 1, paragraphe 3).



**Figure 3.12.** Contribution des différents facteurs et leurs interactions sur la moyenne des amplitudes des trois premières harmoniques d'engrènement ( $L_e$ ). Les interactions sont notées avec un astérisque entre les deux facteurs interagissant. En vert, les contributions positives et en rouge les contributions négatives. Les contributions avec des facteurs qualitatifs sont en bleus.

### 3.3. Conclusions

Les mesures vibratoires d'engrènement à faible puissance ont permis de mettre en avant l'apparition d'un phénomène transitoire avant stabilisation de la moyenne d'amplitude des trois premières harmoniques d'engrènement. Nous avons pu corrélérer ce phénomène avec des augmentations significatives du spectre de rugosité SMA dans les échelles d'ondulation supérieures à 0,1 mm.

Le lubrifiant a aussi montré un certain impact notamment au niveau de sa viscosité. Cependant, il est important de rappeler les conditions de faible charge qui peuvent induire cet effet : ce phénomène n'est pas observé dans la littérature à des régimes plus élevés et à plus forte charge.

Au final l'étude des régimes permanents et des spectres SMA associés a permis de mettre en avant l'influence des échelles d'ondulation sur le comportement vibratoire de l'engrènement, notamment comparée avec la faible influence des échelles de micro-rugosité.

Au final, nous avons pu montrer et confirmer par une analyse de variance que la surface des flancs, et notamment les échelles d'ondulation, avait une influence non négligeable dans la génération du comportement vibratoire de l'engrènement. Ainsi, afin

de mieux appréhender le contact, des mesures de bruits de frottement ont été engagées.

#### **4. Influence de la finition denture sur les vibrations à l'échelle du contact**

Pour mieux comprendre l'impact de la surface dans le contact entre les dentures et dans la génération de vibrations, le bruit de frottement généré par les différentes finitions de surfaces a été étudié.

##### **4.1. Bruit de frottement après engrènement en régime sec**

###### **4.1.1. Influence de l'engrènement en régime sec sur l'état de surface**

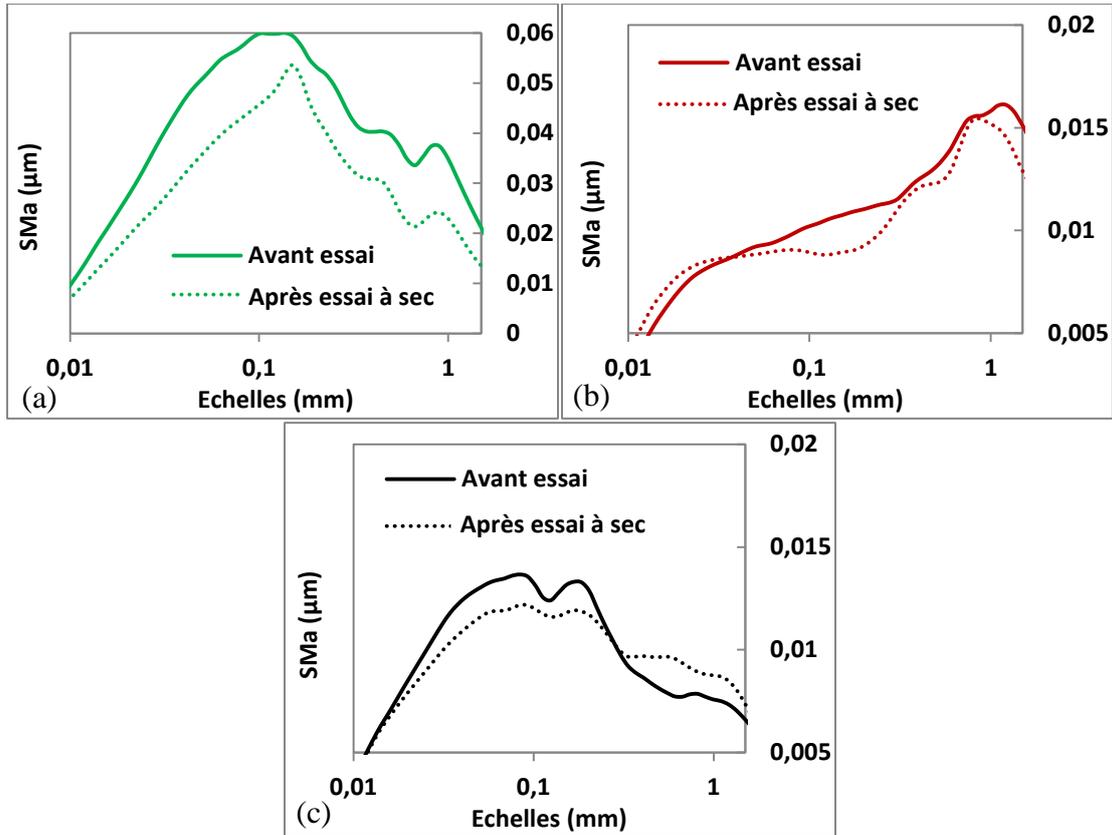
Les spectres de rugosité multiéchelles ont été calculés avant passage sur banc d'essai vibratoire et après les deux heures de test (**Figure 3.13**). A partir de ceux-ci, la Signature Multiéchelle de l'Engrènement (SME) a été déduite comme étant la différence relative entre le spectre SMA avant essai et celui après (**Figure 3.14**), définie par :

$$\text{SME}(\%) = \frac{\text{SMA}_i - \text{SMA}_f}{\text{SMA}_i} \times 100 \quad (\text{éq. 3.4})$$

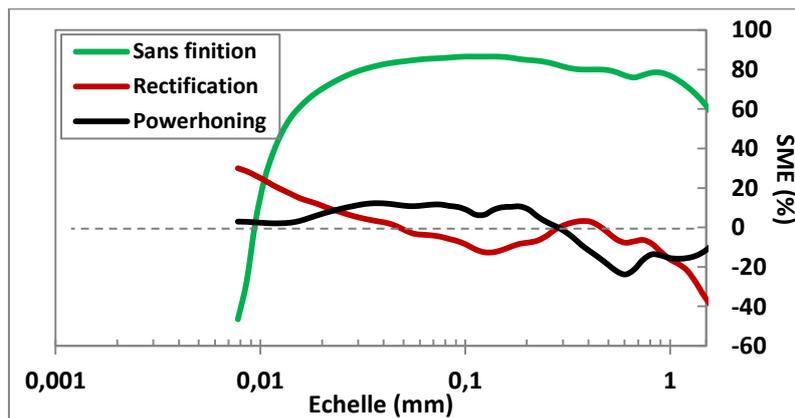
Avec « i » et « f » respectivement les indices pour « initial, » c'est-à-dire avant essai, et « final, » après essai.

Pour les pièces sans finition (**Figure 3.13a**), il est intéressant de noter une diminution du SMA presque identique sur toutes les échelles. Pour la rectification (**Figure 3.13b**), on peut noter deux comportements : le premier est une diminution du SMA sur la bande d'échelles allant de 0,05 à 0,3 mm et le second est une diminution au-dessus de 1 mm. Enfin pour le powerhoning (**Figure 3.13c**), on note l'augmentation du SMA sur la bande d'échelle au-dessus de 0,2 mm. Par ailleurs, le SMA diminue dans des échelles de micro-rugosité, inférieures à 0,2 mm.

La **Figure 3.14** montre la signature multiéchelle de l'engrènement pour les trois procédés. Il est intéressant de noter qu'après usure, le SMA des pièces sans finition diminue de près de 60 % sur toutes les échelles. Pour les pièces finies, nous pouvons identifier le phénomène d'accommodation des surfaces lors de l'engrènement par l'évolution de la SME. En effet, pour les échelles inférieures à 0,3 mm, les tendances pour chaque procédé sont inversées, montrant ainsi que leurs signatures surfaciques se rapprochent. En ce qui concerne les échelles plus élevées, on remarque une diminution après usure pour chaque type de finition.



**Figure 3.13.** Spectres de rugosité multiéchelles, SMA, des dentures générées (a) sans finition ; (b) par rectification ; (c) par powerhoning avant et après essai vibratoire à sec.



**Figure 3.14.** Signature multiéchelle de l'engrènement (SME) des dentures après essai vibratoire à sec.

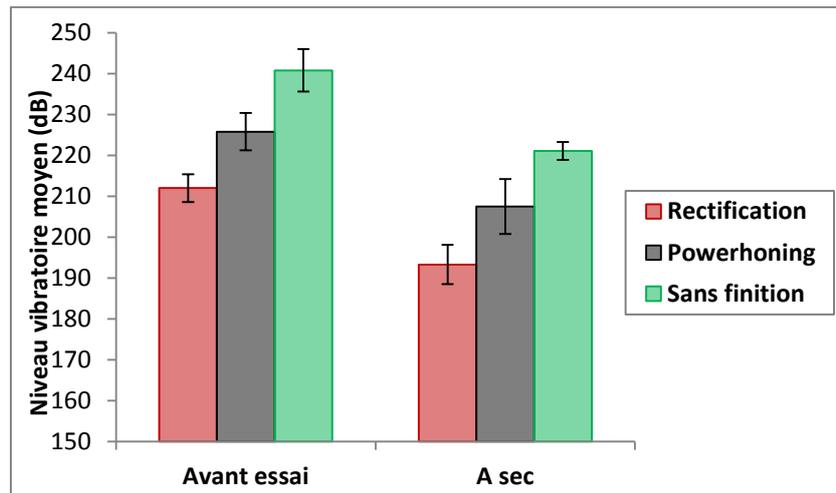
#### 4.1.2. *Influence de l'engrènement en régime sec sur le bruit de frottement*

##### 4.1.2.1. *Niveau vibratoire moyen*

Les mesures de bruit de frottement ont été effectuées sur les flancs de denture de l'arbre primaire RA0. Deux pièces d'une même configuration ont été mesurées sur six dents, avec trois mesures par dent. Les mesures de bruit de frottement ont été effectuées sur les flancs de pièces avant passage sur banc vibratoire, c'est-à-dire juste après avoir été fabriquées, ainsi qu'après usure. Les mesures ont été effectuées à une vitesse de  $10 \text{ mm.s}^{-1}$ . Les niveaux vibratoires moyens calculés par rapport à une référence de  $1.10^{-6} \text{ mm.s}^2$  sont donnés en **Figure 3.15** avant essai et après passage sur

banc vibratoire en l'absence de lubrification. Il est intéressant de voir que le procédé de rectification entraîne des niveaux moyens inférieurs aux autres procédés, et les flancs sans finition des valeurs nettement supérieures. Pour les trois procédés, l'usure entraîne une diminution du niveau de bruit de l'ordre de 8 %, comme indiqué dans le **Tableau 3.2**. Il s'agit ici encore d'un phénomène d'accommodation des surfaces de contact des dentures. En effet, la diminution des défauts de rugosité et d'ondulation entraîne une diminution de bruit de frottement à sec.

Les paramètres surfaciques ISO de rugosité calculés sur les pièces après fabrication, donnés en **Figure 3.3**, ne permettent pas d'expliquer la différence entre les pièces rectifiées et les pièces finies par powerhoning. Cependant, la différence des échelles surfaciques présentes, en **Figure 3.4**, indique que les échelles d'état de surface jouent un rôle prépondérant dans ces mesures. En effet, ce sont les aspérités de surface à ces échelles géométriques qui sont responsables de la génération du bruit de frottement.



**Figure 3.15.** Niveaux vibratoires moyens en Décibel pour les essais à sec, par rapport à une référence de  $1.10^{-6} \text{ mm.s}^2$ . Les mesures ont été réalisées à une vitesse de  $10 \text{ mm.s}^{-1}$ .

**Tableau 3.2.** Différences relatives en pourcentages entre les niveaux vibratoires moyens après passage sur banc d'essai vibratoire en régime sec et la référence avant passage sur banc.

	Rectification	Powerhoning	Sans finition
Sec	8,8 %	8,1 %	8,2 %

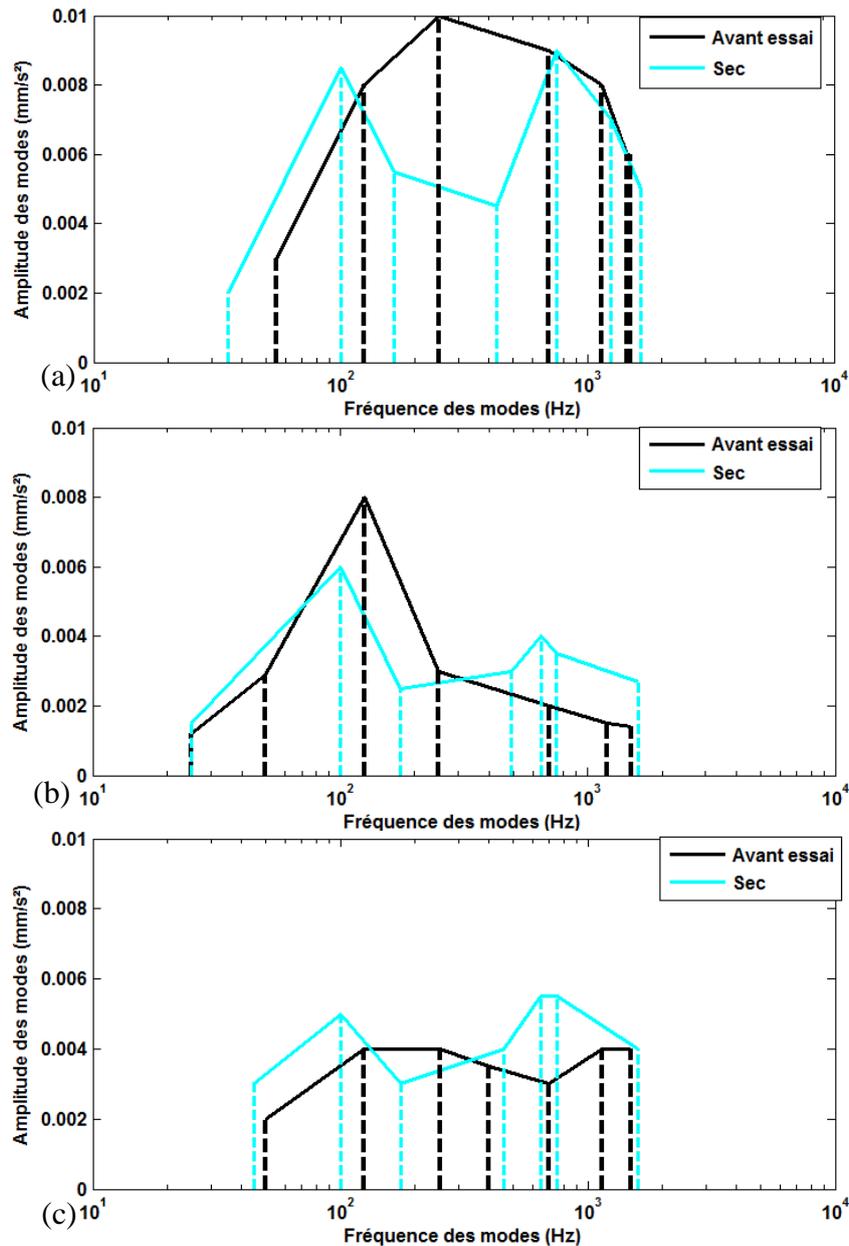
#### 4.1.2.2. Relation entre l'évolution des surfaces des flancs et la réponse en bruit de frottement

Pour aller plus loin, la décomposition modale empirique (EMD) a été utilisée. La fréquence centrale de chaque mode a été déterminée. Elle correspond à l'amplitude maximale du spectre relatif à chaque mode de la décomposition. Les résultats ont ensuite été regroupés pour tous les cas. Sur la **Figure 3.16** sont représentés les fréquences principales des modes de bruit de frottement et les amplitudes associées pour chaque procédé étudié. On peut noter que la bande de fréquences de bruit de frottement est aussi large avant qu'après engrènement. Cependant des différences apparaissent à l'intérieur de celle-ci. On s'intéressera par la suite à la bande de

fréquence supérieure à 100 Hz dans la mesure où les écart-types en dessous sont très importants.

La **Figure 3.16a** présente les résultats pour les pièces sans finition avant et après essai à sec. Les amplitudes des modes entre 100 et 800 Hz diminuent de plus de 20 % alors qu'à des fréquences supérieures, les modes sont inchangés. Même s'il existe une tendance générale à l'augmentation des amplitudes des modes des fréquences moins élevées, c'est-à-dire en dessous de 100 Hz, ces derniers doivent faire l'objet d'un regard critique car ils sont beaucoup plus difficiles à déterminer à partir des mesures : leurs écart-types sont plus importants que pour les autres fréquences, les rendant difficiles à interpréter.

En ce qui concerne la rectification et le powerhoning, leurs comportements respectifs, présentés respectivement sur les **Figure 3.16b** et **Figure 3.16c**, sont très semblables. On remarque tout d'abord une diminution dans la plage située entre 100 et 450 Hz. Elle est légèrement moins marquée dans le cas du powerhoning ; pour ce dernier, les amplitudes étant déjà plus faibles dans cette plage de fréquence. Il est intéressant toutefois de remarquer l'augmentation des modes à des fréquences plus élevées, au-dessus de 500 Hz, absentes sur les pièces non finies. Ainsi, en prenant en compte la diminution des amplitudes des harmoniques d'engrènement entre les premières et les dernières mesures des essais à sec, une hypothèse ici est de considérer que les harmoniques de bruit de frottement entre 100 et 450 Hz seraient les plus influentes dans la bruyance denture.



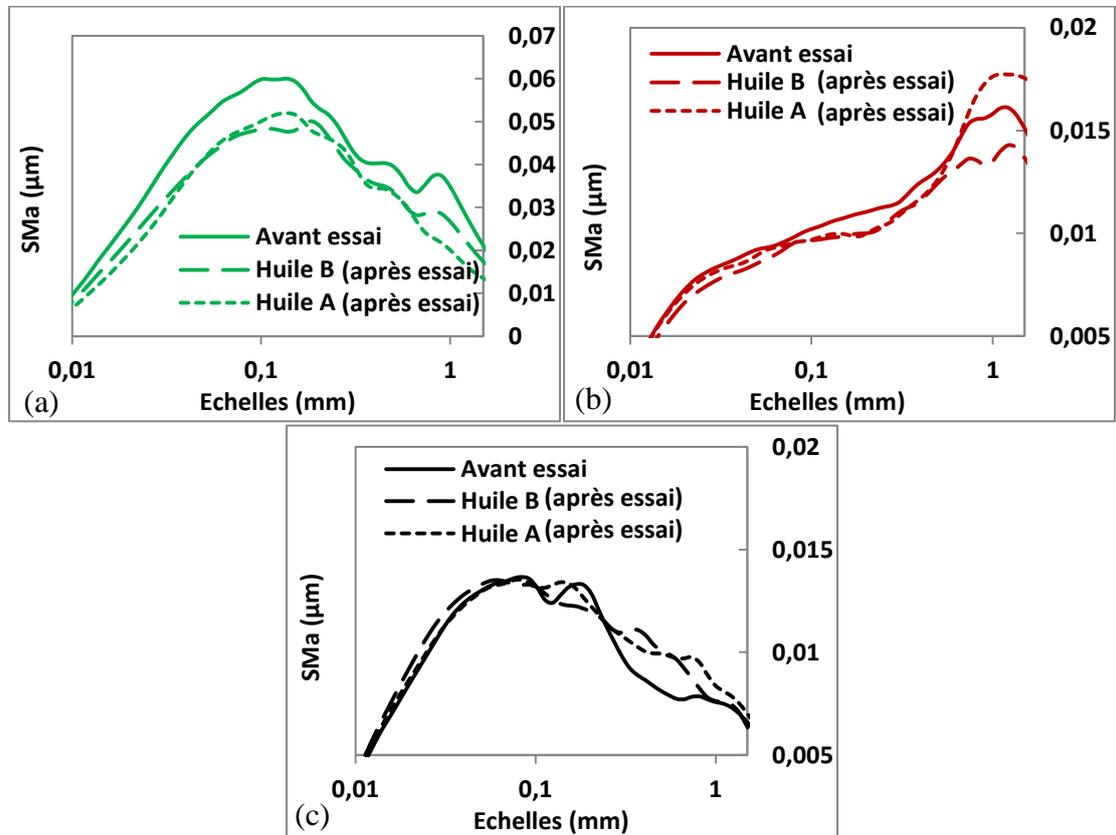
**Figure 3.16.** Fréquences principales des modes de bruit de frottement et les amplitudes associées pour les mesures effectuées à  $10 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$  dans des conditions d'essai à sec pour les pièces générées (a) sans finition ; (b) par rectification ; (c) par powerhoning.

## 4.2. Bruit de frottement après engrènement en régime lubrifié

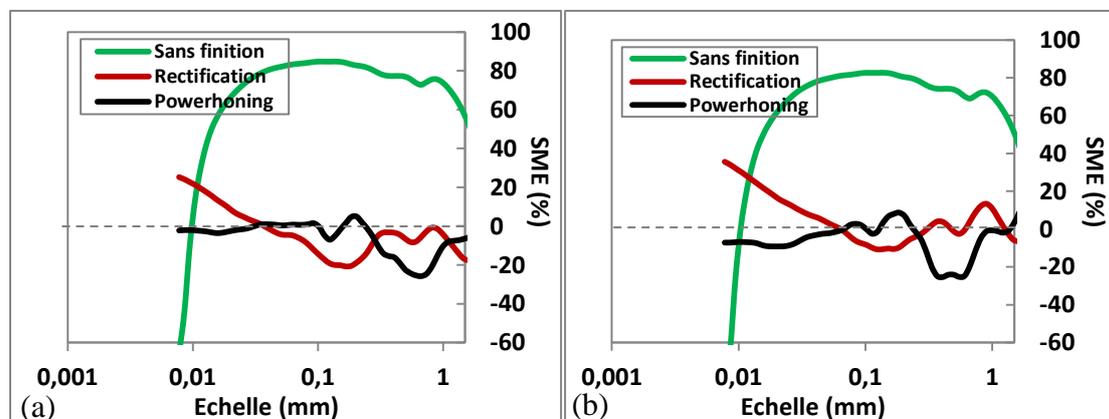
### 4.2.1. *Influence de l'engrènement en régime lubrifié sur l'état de surface*

Tout comme pour les essais à sec, les SMA des pièces passées sur banc d'essai vibratoire ont été calculés pour les conditions d'essai lubrifiées. Pour les pièces sans finition, en **Figure 3.17a**, on peut noter une diminution du SMA sur toutes les échelles après usure, avec une différence notable lorsque les pièces n'ont pas été lubrifiées. En ce qui concerne la rectification, en **Figure 3.17b**, on peut noter deux comportements : le premier est une diminution du SMA sur la bande d'échelles allant de 0,07 à 0,3 mm et le second est quelques modifications autour de 1 mm. Enfin pour le powerhoning, en **Figure 3.17c**, on ne remarque qu'une augmentation du SMA sur la bande d'échelle entre 0,2 et 0,8 mm.

Comme précédemment, les signatures multiéchelles de l'engrènement (SME) ont été calculées (**Figure 3.18**). Il est intéressant de voir que le comportement pour les pièces finies ne diffère pas suivant le type de lubrification. En effet, il est aussi très proche du cas en régime sec (**Figure 3.14**). Les pièces finies quant à elles indiquent aussi des comportements proches. Au final, on remarque qu'il n'y a pas d'effet d'échelle sur la modification de surface lorsque la viscosité du lubrifiant est changée.



**Figure 3.17.** Spectres de rugosité multiéchelles, SMA, des pièces générées (a) sans finition ; (b) par rectification ; (c) par powerhoning avant et après essai lubrifié.



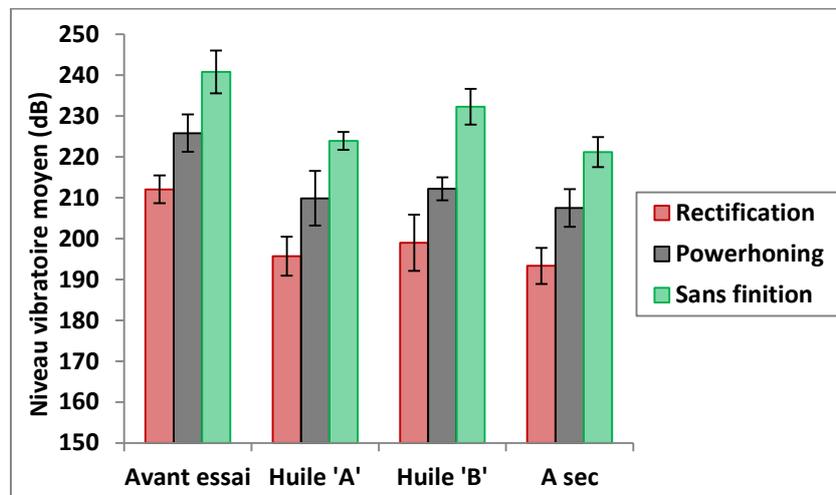
**Figure 3.18.** Signature multiéchelle de l'engrènement (SME) des dentures après essai vibratoire (a) en régime lubrifié avec l'huile 'A' et (b) avec l'huile 'B'.

#### 4.2.2. Influence de l'engrènement en régime lubrifié sur le bruit de frottement

##### 4.2.2.1. Niveau vibratoire moyen

La conversion en décibel des niveaux vibratoires moyens s'est faite par rapport à une référence de  $10^{-6}$  m.s<sup>-2</sup>. Les résultats sont donnés en **Figure 3.19** avant essai, et après passage sur banc vibratoire avec les deux types de lubrification. Une fois encore, on remarque que le procédé de rectification induit des niveaux vibratoires inférieurs à ceux du procédé powerhoning. Les pièces sans finition génèrent des niveaux vibratoires nettement supérieurs.

Dans tous les cas étudiés, on peut constater une diminution de la valeur moyenne du bruit de frottement après engrènement sur banc vibratoire. Les différences relatives sont données dans le **Tableau 3.3**. On peut remarquer sur les pièces finies, c'est-à-dire rectifiées et powerhonnées, que les différences augmentent avec la diminution de la viscosité de l'huile avec une valeur maximale pour le cas sans lubrification. Cette augmentation passant de 6 % à environ 8 %. Toutefois, en tenant compte des dispersions, ces différences ne sont pas très significatives. Ceci peut s'expliquer par l'augmentation de la viscosité qui réduit le nombre de ruptures du film d'huile.



**Figure 3.19.** Niveaux vibratoires moyens en dB, par rapport à une référence de  $1.10^{-6}$  mm.s<sup>2</sup>, pour des mesures réalisées à une vitesse de 10 mm.s<sup>-1</sup>.

**Tableau 3.3.** Différences relatives en pourcentages entre les niveaux vibratoires moyens après passage sur banc d'essai vibratoire et la référence avant passage sur banc.

	Rectification	Powerhoning	Sans finition
<b>Huile 'B'</b>	6,1 %	6,1 %	3,6 %
<b>Huile 'A'</b>	7,7 %	7,0 %	7,0 %
<b>Sec</b>	8,8 %	8,1 %	8,2 %

##### 4.2.2.2. Relation entre l'évolution des surfaces des flancs et la réponse en bruit de frottement

Les résultats analysés par décomposition modale empirique (EMD) sont donnés en **Figure 3.16** où sont représentées les fréquences principales des modes de bruit de frottement et les amplitudes associées pour chaque procédé étudié. Sur la **Figure 3.16a**, on peut remarquer que l'amplitude des modes entre 100 et 800 Hz diminue de plus de 20 % alors que les modes de fréquence supérieure restent inchangés. Par

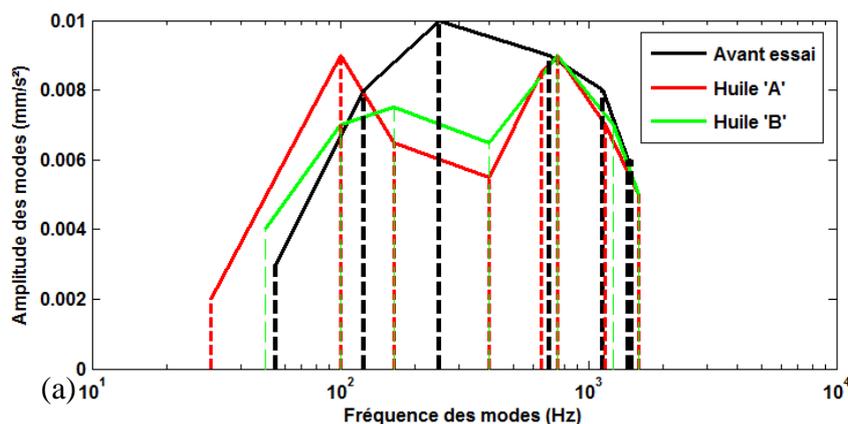
ailleurs, comme pour les essais à sec, on retrouve une tendance à l'augmentation sur les fréquences plus faibles, inférieures à 100 Hz, mais ces résultats possèdent un écart-type trop important pour en tirer des conclusions générales.

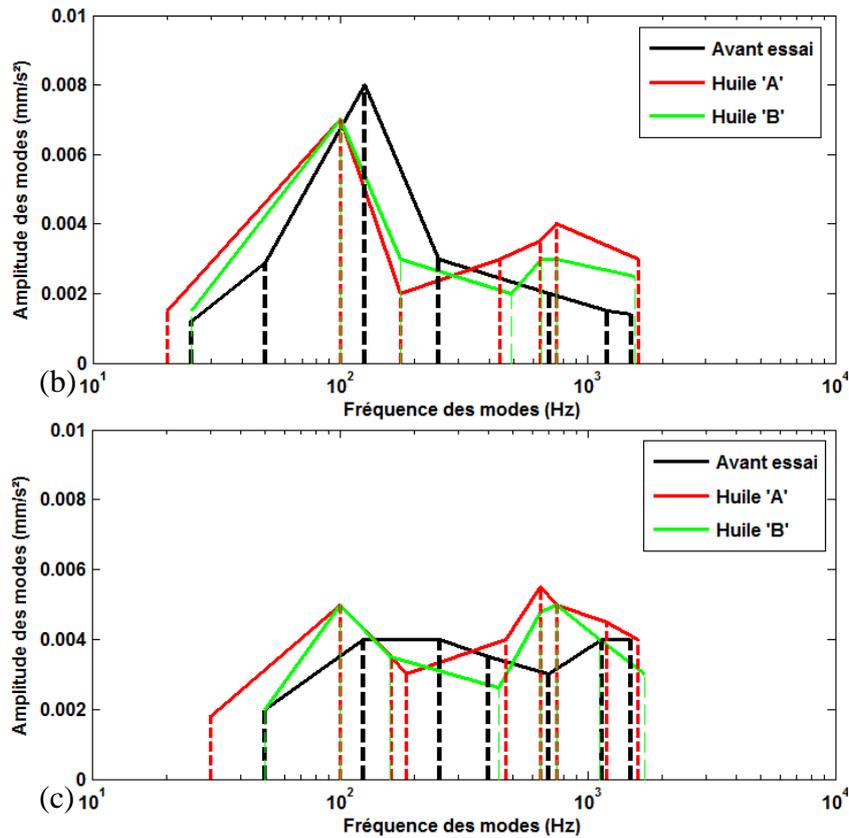
En ce qui concerne la rectification et le powerhoning, leurs comportements respectifs, présentés respectivement sur les **Figure 3.16b** et **Figure 3.16c**, sont très semblables. On remarque tout d'abord une diminution dans la plage située entre 100 et 450 Hz. Celle-ci n'est pas influencée par le (ou l'absence de) lubrifiant car elle est identique pour chaque condition d'essai. Il s'agit donc directement de l'effet de l'engrènement. Par ailleurs, il existe une augmentation des modes de fréquences plus élevées, au-dessus de 500 Hz, qui est absente sur les pièces non finies.

Il semblerait ainsi que la viscosité de l'huile utilisée influence principalement le bruit de frottement généré par les flancs de denture non-finis, plus particulièrement dans la plage de fréquences entre 150 et 450 Hz. L'engrènement engendre alors une diminution de ces modes lorsque la viscosité diminue, avec un maximum en absence d'huile. Lorsque les flancs sont finis, la viscosité de l'huile n'a qu'une faible influence sur cette plage de fréquence. Toutefois, lorsque la viscosité diminue jusqu'à l'absence de lubrification, nous pouvons noter une augmentation régulière des modes présents à des fréquences plus élevées sur les pièces finies.

Avant essai, les niveaux des modes pour la surface sans finition sont clairement plus élevés que pour les deux autres types de finition. Comme pour les spectres multiéchelles des topographies donnés en **Figure 3.4**, on peut noter une inversion des tendances entre la rectification et le powerhoning, à environ 240 Hz. En effet, la rectification donne des modes plus élevés dans les basses fréquences que le powerhoning, ce qui corrèle bien avec l'amplitude plus élevée sur des échelles plus hautes de sa topographie. Inversement, les amplitudes du SMA plus élevées pour le powerhoning concernent plutôt les échelles de rugosité de surface et génèrent des modes dans des fréquences plus élevées. Nous pouvons retrouver cette inversion des tendances entre la rectification et le powerhoning à environ 180 Hz, dans toutes les configurations.

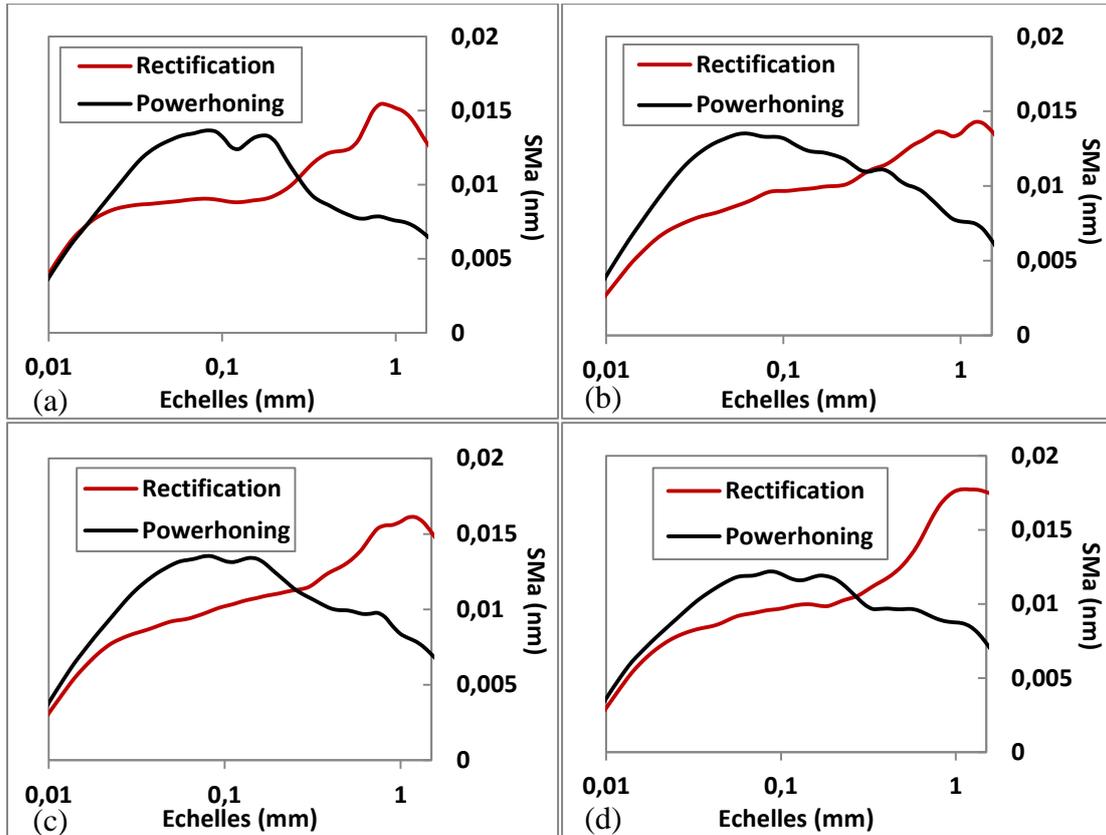
Par ailleurs, nous pouvons aussi remarquer le rapprochement des comportements des pièces rectifiées et powerhonées sur l'ensemble des modes lorsque la viscosité de l'huile diminue. Ceci est particulièrement visible sur le mode présent à 100 Hz et sur la plage de fréquences située au-dessus de 700 Hz.





**Figure 3.20.** Fréquences principales des modes de bruit de frottement et les amplitudes associées pour les mesures effectuées à  $10 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$  dans des conditions d'essai lubrifiées pour les pièces générées (a) sans finition ; (b) par rectification ; (c) par powerhoning.

Pour les pièces finies, les comparaisons des SMA suivant les différentes conditions de lubrification sont données en **Figure 3.21**. On peut noter que l'échelle d'inversion des tendances entre les pièces finies par les deux procédés n'est que très peu modifiée, avec une moyenne à  $0,28 \text{ mm}$  et un écart-type de  $0,04 \text{ mm}$ . La tendance générale avec l'usure et la diminution de la viscosité du lubrifiant est un rapprochement des SMA pour les deux procédés, en dessous de l'échelle  $0,2 \text{ mm}$ . Ce comportement vient corréler les observations effectuées précédemment sur les mesures de bruit de frottement et le comportement des modes à haute fréquence. Au-dessus de  $0,2 \text{ mm}$ , on remarque seulement des modifications mineures.

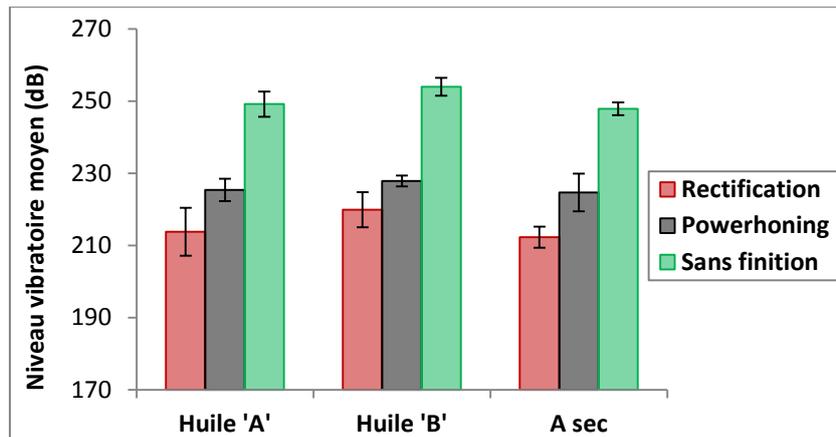


**Figure 3.21.** Spectres de rugosité multiéchelles, SMA, des pièces finies (a) avant essai vibratoire ; (b) après essais lubrifiés avec l’huile visqueuse ‘B’ ; (c) après essais lubrifiés avec l’huile fluide ‘A’ ; (d) après essais non-lubrifiés.

### 4.3. Fréquences de bruit de frottement et échelles de rugosité

Afin d’établir une relation entre l’échelle surfacique et les modes de bruit de frottement, une campagne de mesures de bruit de frottement à une vitesse plus élevée,  $20 \text{ mm.s}^{-1}$ , a été effectuée. Seuls les échantillons après passage sur banc d’essai ont été mesurés.

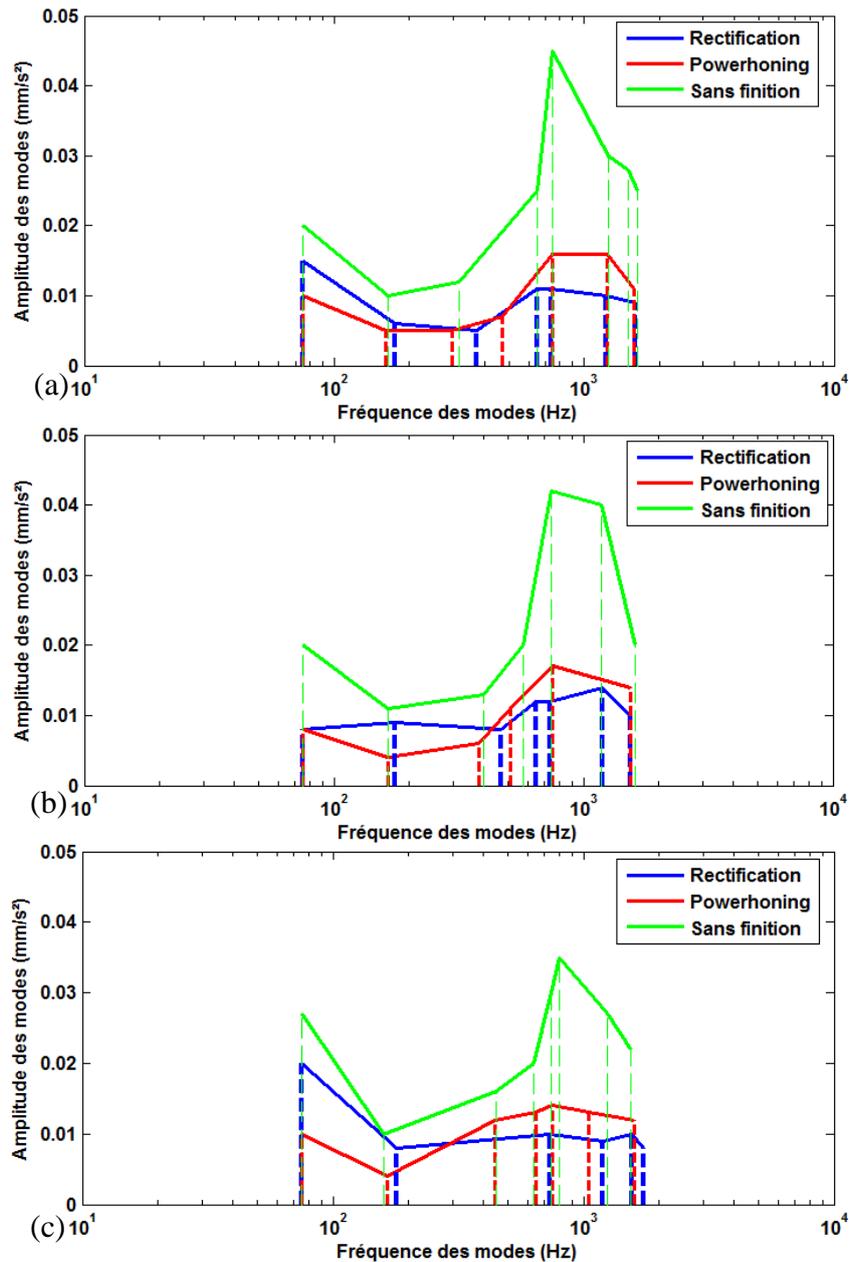
La **Figure 3.22** indique les résultats globaux pour ces mesures. On peut remarquer tout d’abord un niveau vibratoire moyen plus élevé que celui des mesures à plus faible vitesse de frottement (**Figure 3.19**). Ensuite, on retrouve la même tendance que pour les mesures à une vitesse de  $10 \text{ mm.s}^{-1}$ . En effet, il y a une diminution du niveau vibratoire moyen avec la diminution de la viscosité, les essais à sec induisant le plus faible niveau vibratoire.



**Figure 3.22.** Niveaux vibratoires moyens en dB, par rapport à une référence de  $1.10^{-6}$   $\text{mm.s}^{-2}$ , pour des mesures réalisées à une vitesse de  $20 \text{ mm.s}^{-1}$ .

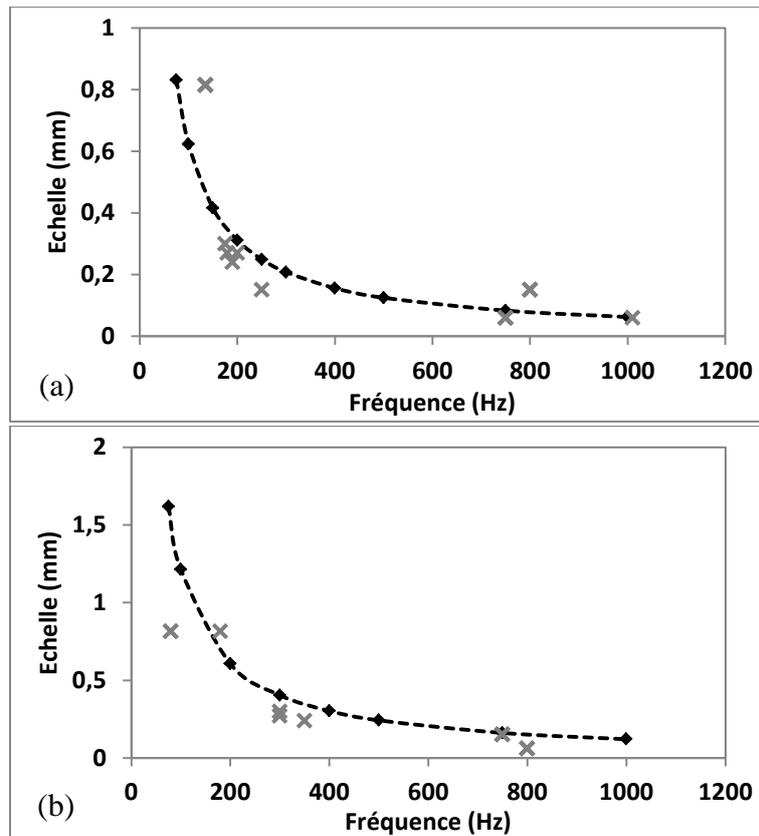
La **Figure 3.23** donne les amplitudes des modes principaux pour les pièces après passage sur banc vibratoire dans chaque condition d'essai. Il est intéressant de noter que lorsque l'huile est visqueuse (**Figure 3.23a**), les courbes pour la rectification et le powerhoning sont très proches l'une de l'autre dans les fréquences les plus hautes, en dessous de 700 Hz. Ceci est moins le cas dans les deux autres configurations (**Figure 3.23b** et c) où la rectification possède des amplitudes plus élevées. Dans le cas des hautes fréquences, les trois configurations sont très proches les unes des autres.

Au final, la qualité de la finition denture utilisée impose le choix du lubrifiant utilisé. Les vibrations issues du contact pour des dentures non finie seront moindres avec une huile visqueuse. En effet, la viscosité corrige l'effet de rugosité et d'ondulation. Pour une denture finie par abrasion, une plus faible viscosité sera plus appropriée.



**Figure 3.23.** Fréquences principales des modes de bruit de frottement et les amplitudes associées pour les mesures effectuées à  $20 \text{ mm.s}^{-1}$  pour chaque condition d'essai : (a) Après essai avec l'huile visqueuse 'B' ; (b) Après essai avec l'huile fluide 'A' ; (c) Après essai à sec.

Afin d'établir une relation entre le mode propre principal et l'échelle caractéristique de rugosité, nous avons déterminé les échelles caractéristiques, c'est-à-dire l'échelle du maximum du spectre SMA, de chaque configuration étudiée et les avons tracées en fonction de la fréquence du mode ayant l'amplitude maximale pour chaque configuration. Nous avons ainsi pu obtenir les deux graphiques en **Figure 3.24**.



**Figure 3.24.** Relation entre l'échelle caractéristique de rugosité et la fréquence du mode propre principal lors des mesures de bruit de frottement avec une vitesse de (a) 10 mm.s<sup>-1</sup> et (b) 20 mm.s<sup>-1</sup>. Les 'x' représentent les points provenant des mesures et les pointillés ceux du modèle.

Le modèle utilisé est un modèle inverse dont le coefficient  $\alpha$  a été déterminé par la méthode des moindres carrés. Les  $X^2$  obtenus sont respectivement de 1,15 et 5,1 % et le modèle est donné par l'équation suivante :

$$E = \alpha \cdot \frac{V}{F} \quad (\text{éq. 3. 5})$$

Avec  $E$  l'échelle surfacique en millimètres,  $V$  la vitesse de mesure en millimètres par seconde et  $F$  la fréquence modale du bruit de frottement en Hertz.  $\alpha$  est une constante sans dimension dépendant de la forme de la surface ainsi que du capteur utilisé. Dans notre cas, nous obtenons  $\alpha = 6,15 \pm 0,08$ .

A partir de là, nous pouvons extrapoler cette relation à des vitesses plus élevées, c'est-à-dire aux vitesses de frottement entre les dents lors de l'engrènement de deux dentures. A 1500 tours.min<sup>-1</sup> sur le couple étudié, nous atteignons des vitesses de frottement variant entre 0 et 900 mm.s<sup>-1</sup>. En appliquant le modèle présenté ci-dessus, ces conditions feront intervenir des échelles de l'ordre de quelques millimètres. Ceci corrèle ainsi bien avec les résultats de l'étude expérimentale à l'échelle de l'engrènement. En effet, nous avons montré que les échelles d'ondulation sont les plus influentes sur le comportement vibratoire de l'engrènement.

#### **4.4. Conclusions**

Nous avons mesuré et analysé le bruit de frottement généré par des flancs de denture, avant et après passage sur banc d'essai vibratoire. Nous avons pu noter une diminution du niveau de bruit de frottement moyen après le passage sur banc d'essai. Celui-ci est dû aux légères modifications d'accommodation de surface ayant eu lieu au cours de l'engrènement.

Nous avons montré par ces mesures que les amplitudes et fréquences des modes de bruit de frottement étaient fortement corrélées avec les signatures des procédés de finition exprimées par les échelles présentes sur la surface étudiée.

Enfin, nous avons mis en évidence, par des mesures à plus haute vitesse, un lien entre les échelles caractéristiques des surfaces étudiées et les fréquences des modes de bruit de frottement principaux.

#### **5. Conclusion**

L'approche méthodologique expérimentale développée dans ce chapitre ont permis de mettre en avant les phénomènes qui gouvernent la bruyance denture.

Nous avons pu montrer l'existence d'un phénomène de bruyance transitoire dans des conditions de faible régime et de faible charge. L'amplitude des harmoniques d'engrènement augmente pour diminuer ensuite. Ce phénomène est lié à une accommodation des surfaces en contact lors de l'engrènement. Ce régime transitoire est fortement influencé par le type de lubrifiant utilisé. L'augmentation de la viscosité et donc de l'épaisseur du film d'huile lors du contact réduit l'évolution des défauts de surface et réduit donc l'intensité de ce régime transitoire.

Les mesures à l'échelle de l'engrènement ont aussi permis de noter que les échelles d'ondulation des surfaces ont un impact sur la réponse vibratoire de l'engrenage, alors que les échelles de microrugosité ont une influence plus négligeable, excepté lors d'un contact sec. En effet, moins l'huile est visqueuse et plus les défauts d'ondulation et de rugosité évoluent avec l'engrènement. Nous avons par ailleurs pu montrer que la finition denture supprime en partie l'effet de la rugosité mais le remplace par un effet plus important des échelles d'ondulation. Ce dernier n'est pas négligeable et ces types de défauts d'ondulation et de rugosité ne sont pas qualifiés en production.

Enfin, les mesures de bruit de frottement à l'échelle du contact denture ont permis de mettre en exergue un lien entre les échelles surfaciques caractéristiques d'une des flancs de denture et les fréquences du mode vibratoire principal. Le modèle obtenu constitue un résultat majeur qui va permettre d'expliquer l'influence des échelles d'ondulation et de forme sur les engrenages de transmission automobile.