

Etude numérique multiéchelle de la réponse vibratoire d'un engrenage

1. Introduction

Dans ce chapitre, nous proposons de mettre en évidence l'influence des irrégularités micro-géométriques de surfaces sur les vibrations inhérentes au contact denture et plus particulièrement l'erreur de transmission générée par un engrenage simple étage. En effet, l'apport d'une telle simulation numérique est de pouvoir, à l'avenir, réduire le nombre d'essais nécessaire à la sélection et à l'optimisation d'un procédé de finition denture et ainsi réduire les coûts de fabrication. Dans un premier temps l'influence de l'amplitude et de l'échelle des irrégularités de surface sur les vibrations générées par friction est étudiée. Dans un second temps, des topographies réelles de flancs de denture issues de différents procédés de finition seront intégrées dans un modèle éléments finis 3D d'un engrenage hélicoïdale simple étage, celui étudié expérimentalement. Les simulations numériques ont été réalisées sur le calculateur de Champagne-Ardenne « ROMEO » situé à l'université de Reims (151ème supercalculateur du monde en terme de puissance) sur le logiciel commercial Abaqus (Dassault Systèmes). L'originalité de ces travaux se base sur la réalisation d'un modèle complet à grande résolution dans le but de tenir compte de la microrugosité. Tous les calculs décrits dans ce chapitre ont été effectués en régime sec. Les vibrations générées seront analysées à différentes échelles :

- en premier lieu, à l'échelle locale du contact entre aspérités de surface, en étudiant les vibrations générées par le contact entre deux surfaces 3D rugueuses ;
- en second lieu, à l'échelle globale de l'engrenage et de l'interface entre deux dents en contact en calculant l'erreur de transmission.

Enfin, la corrélation entre les variables d'entrée du système, c'est-à-dire les caractéristiques micro-géométriques des surfaces de denture, et les vibrations du contact et de l'engrenage pourra permettre d'identifier les caractéristiques les plus influentes ainsi que le procédé de finition le plus approprié.

2. Simulation à l'échelle du contact 3D entre deux surfaces rugueuses

Le modèle numérique à l'échelle locale permet de calculer les vibrations générées dans la direction normale au contact par le déplacement d'un pion rugueux en contact avec une surface, elle aussi, rugueuse. Nous allons tout d'abord décrire le modèle puis introduire les caractéristiques d'entrée étudiées.

2.1. Description du modèle

Les paramètres du modèle numérique développé reproduisent les conditions d'engrènement de deux dentures. Les conditions de chargement et de déplacement ont été définies par rapport aux mécanismes de l'engrènement, rappelés en **Figure 4.1a**. En effet, les deux dents viennent en contact avant d'effectuer un mouvement de glissement relatif l'une par rapport à l'autre. Au point primitif, la vitesse de frottement relative est nulle et le sens de frottement est ensuite inversé. Lors de ce mouvement,

les pressions de contact augmentent jusqu'à être maximales au point primitif puis diminuent à nouveau.

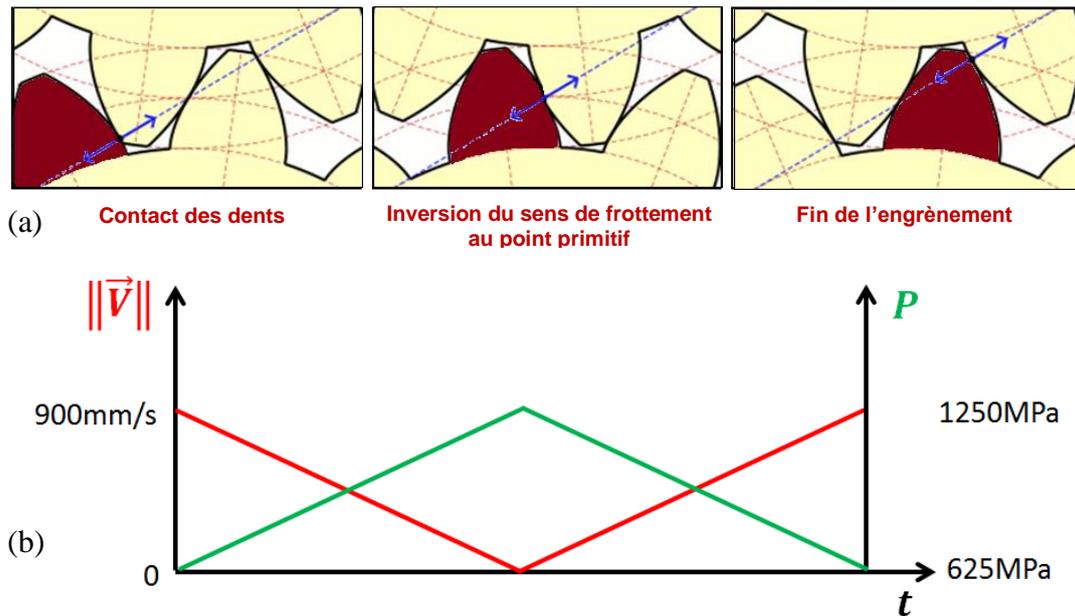


Figure 4.1. (a) Mise en évidence des trois phases de l'engrènement de deux dents. La ligne bleue représente la ligne de contact, tangente aux deux cercles primitifs ; (b) Conditions de vitesse et de pression au cours du déplacement du pion.

Dans notre modèle, le contact frottant sous charge s'effectue entre un pion mobile rugueux et un support immobile encasté. Les valeurs numériques des conditions de vitesse et de charge au cours de la simulation sont données en **Figure 4.1b**. La vitesse a été calculée sur la base de l'engrènement des deux pièces étudiées, arbre primaire et pignon de descente du réducteur RA0, à un régime de 1500 tours par minute. Pour ce qui est du chargement, il a été calculé sur le même engrenage avec les mêmes conditions de vitesse et un couple résistant de 10 Nm (**Figure 4.2**). Les dimensions et paramètres matériaux sont donnés dans le **Tableau 4.1**.

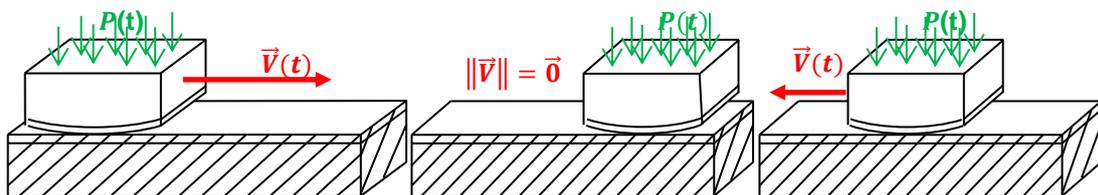


Figure 4.2. Conditions limites du modèle numérique du contact Cylindre / Plan.

Tableau 4.1. Paramètres géométriques et des matériaux utilisés dans le modèle numérique.

Paramètres géométriques	Valeur	Paramètres matériaux	Valeur
Longueur du pion	1 mm	Matériau	Acier doux
Hauteur du pion	0,3 mm	Module de Young	210 GPa
Largeur du contact	0,5 mm	Coefficient de Poisson	0,3
Longueur du support	2 mm	Masse volumique	7800 kg.m ⁻³
Hauteur du support	0,5 mm		
Hauteur de la couche mince	10 μm		

Ainsi, un maillage adaptatif a été adopté pour combiner un temps de calcul raisonnable et une résolution micrométrique. Les surfaces en contact ont été maillées en utilisant des éléments hexaédriques quadratiques (C3D8R) d'une taille 50 par 50 par 50 μm (**Figure 4.3**). Une couche d'éléments plus fins d'une taille de 3 μm par 3 μm sur une hauteur de 10 μm est placée sur le pion et sur le support avec une contrainte de collage (*tie constraint*). Ceci permet d'avoir un maillage plus fin au niveau du contact (**Figure 4.3**).

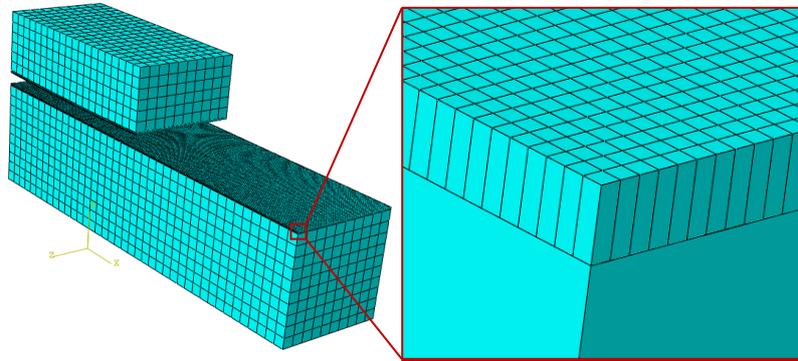


Figure 4.3. Maillage global du pion et du support et agrandissement de la zone du maillage de la couche surfacique du support.

2.2. Variables d'entrée du modèle de contact

2.2.1. Variables macro-géométriques

Etant donné que la géométrie de contact entre deux dents est linéique et que le rayon de courbure est un paramètre macro-géométrique très influant, nous avons considéré trois rayons de courbure (C) différents (éq. 4.1) :

$$\begin{cases} C = 10 \text{ cm} \\ C = 20 \text{ cm} \\ C = \infty \end{cases} \quad (\text{éq. 4.1})$$

Le rayon de courbure infini correspond au cas extrême d'un contact Plan / Plan schématisé en **Figure 4.4**.

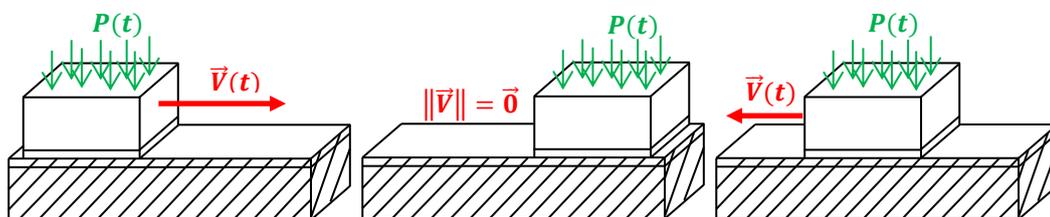


Figure 4.4. Conditions limites du modèle numérique du contact Plan / Plan.

2.2.2. Variables micro-géométriques

Des topographies de surfaces générées numériquement et possédant des caractéristiques différentes ont été introduites directement dans le modèle numérique. Cette intégration s'est effectuée en deux étapes. Tout d'abord, les topographies ont été extrapolées de façon à ce que leur résolution en x et y soit égale à la valeur de la taille du maillage, c'est-à-dire 3 μm . Enfin, l'introduction dans la simulation a été effectuée en déplaçant les nœuds du maillage dans la zone de contact selon la normale à la surface [91]. Les topographies générées ont été caractérisées par :

- **l'amplitude de la rugosité** : elle est représentée par la moyenne quadratique de la rugosité (S_q). Sa définition a été rappelée dans le chapitre 1. Les valeurs considérées de ce paramètre sont respectivement 0,2 ; 0,5 et 0,8 μm . Notant que les surfaces de denture après finition ont un S_q d'environ 0,4 μm ;
- **l'échelle de la rugosité** : elle est représentée par la longueur d'autocorrélation (S_{al}) prenant les valeurs 10 ; 50 et 90 μm . Ce paramètre est calculé à partir de la transformée de Fourier inverse du spectre de puissance de la surface considérée. Il représente la taille moyenne des motifs de la surface dans la direction considérée. Les surfaces de denture après finition sont caractérisées par un S_{al} variant de ~ 20 à 50 μm dans la direction de profil et de ~ 20 à 120 μm dans la direction de l'hélice.
- **la distribution des irrégularités de la surface** : deux distributions ont été considérées dans cette étude à savoir les distributions gaussiennes, telles celles obtenues par abrasion (rectification, toilage, rodage,...), et exponentielles.

La **Figure 4.5** montre des exemples de surfaces étudiées de distribution gaussienne.

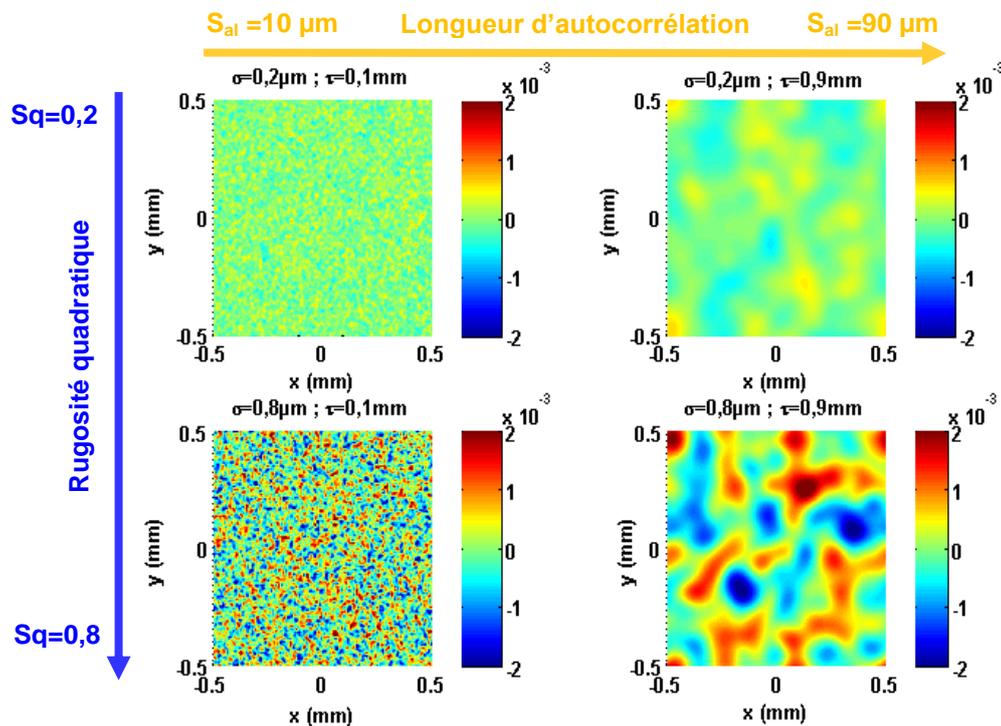


Figure 4.5. Exemples de topographies de surface intégrées dans les simulations. Il s'agit ici des distributions gaussiennes.

2.3. Impact des caractéristiques surfaciques sur les vibrations du pion

En sortie du modèle, nous avons récupéré l'accélération du pion en déplacement calculée dans la direction perpendiculaire à sa surface antagoniste. Ce signal a ensuite été analysé par transformée de Fourier afin de déduire les composantes fréquentielles de celui-ci. C'est ce spectre vibratoire qui a été étudié.

2.3.1. *Impact de la macro-géométrie sur les vibrations du pion*

Dans un premier temps, nous avons étudié l'impact d'un facteur de forme, c'est-à-dire du rayon de courbure du pion mobile. Trois exemples de spectres vibratoires obtenus et montrant l'influence du rayon de courbure sont donnés en **Figure 4.6**. On peut noter en premier lieu l'augmentation très nette des amplitudes vibratoires lors d'un contact Plan / Plan (rayon de courbure infini). Ceci peut s'expliquer par l'augmentation de l'aire de contact entre les deux surfaces. En second lieu, par la comparaison des spectres lors d'un contact Cylindre / Plan, on peut noter une tendance similaire avec une diminution de l'amplitude de quelques harmoniques avec la diminution de la courbure.

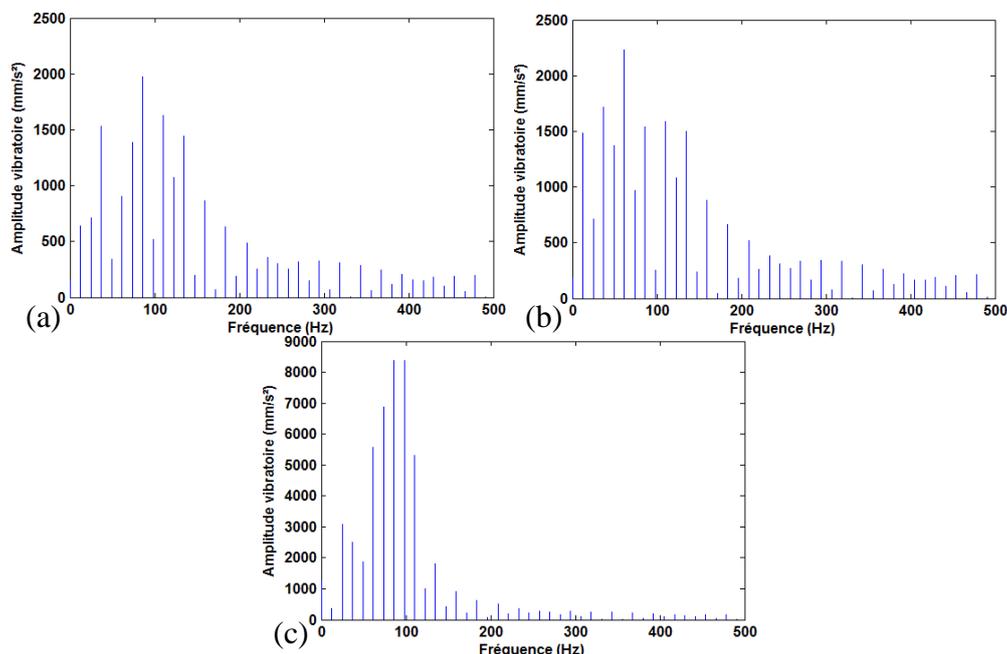


Figure 4.6. Spectres vibratoires obtenus pour une surface de distribution gaussienne, avec pour caractéristiques $S_q = 0,9 \mu\text{m}$, $S_{al} = 50 \mu\text{m}$ et un rayon de courbure de (a) $C = 10 \text{ cm}$; (b) $C = 20 \text{ cm}$ et (c) $C = \infty$.

Toutefois, si l'on étudie les spectres vibratoires obtenus dans les mêmes conditions mais avec des amplitudes de rugosité différentes, les tendances ne sont pas identiques. En effet, on peut remarquer une légère diminution des amplitudes avec l'augmentation du rayon de courbure (**Figure 4.7**) lors d'un contact Cylindre/Plan. Autrement dit, il ne semble pas possible de déterminer l'influence du rayon de courbure uniquement, sans chercher à prendre en compte ses interactions avec les autres paramètres.

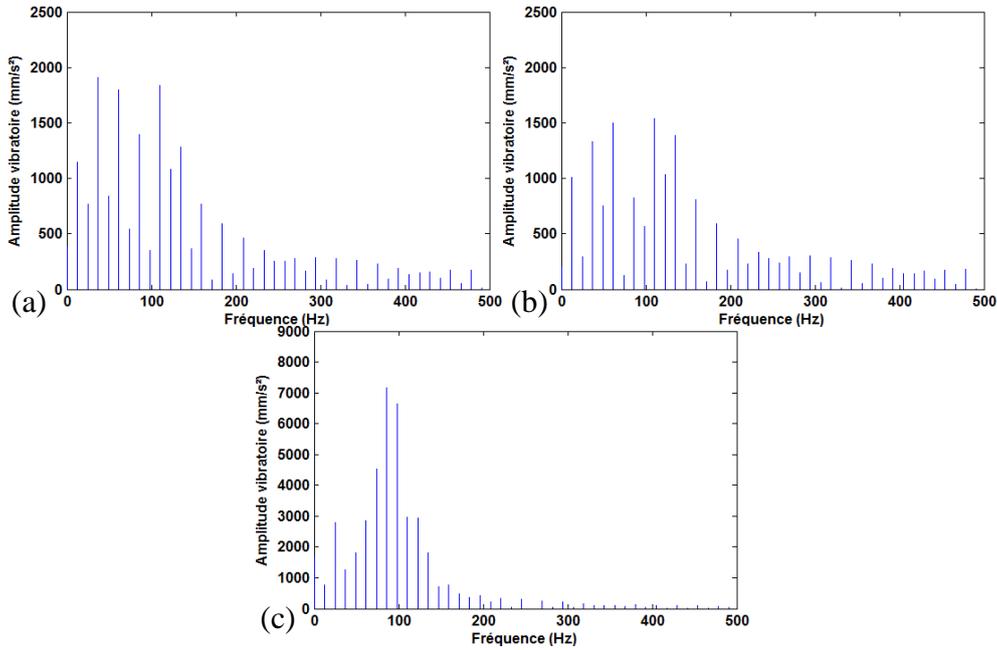


Figure 4.7. Spectres vibratoires obtenus pour une surface de distribution gaussienne, avec pour caractéristiques $S_q = 0,5 \mu\text{m}$, $S_{al} = 50 \mu\text{m}$ et un rayon de courbure de (a) $C = 10 \text{ cm}$; (b) $C = 20 \text{ cm}$ et (c) $C = \infty$.

2.3.2. *Impact de la distribution de surface sur les vibrations du pion*

Dans un second temps, l'effet de la distribution a été investigué. Les résultats pour le contact Plan / Plan ($C = \infty$) montrent que l'effet de la distribution semble négligeable (**Figure 4.8**). En effet, la majeure différence est un shift du mode principal vers une fréquence plus élevée. Additionné à cela, on peut noter une augmentation de l'amplitude vibratoire aux plus basses fréquences.

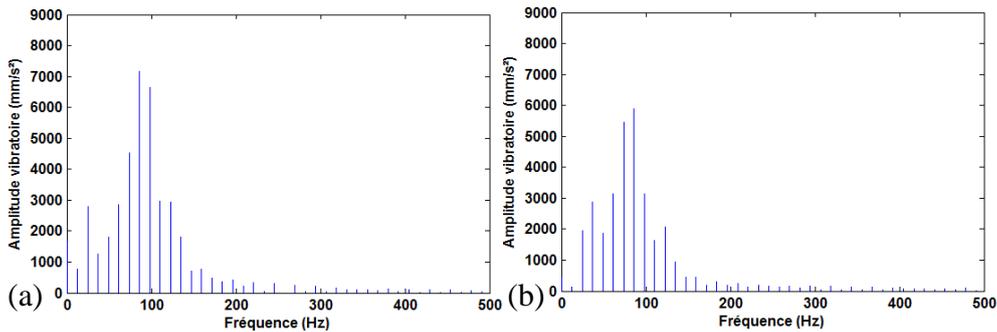


Figure 4.8. Spectres vibratoires obtenus pour une surface avec pour caractéristiques $C = \infty$, $S_q = 0,5 \mu\text{m}$, $S_{al} = 50 \mu\text{m}$ (a) avec une distribution gaussienne et (b) une distribution exponentielle.

Sur la **Figure 4.9** sont donnés les résultats pour une rugosité plus élevée, $0,8 \mu\text{m}$. Contrairement au cas précédent, on remarque une nette diminution de l'amplitude de l'ensemble des harmoniques sur toutes les fréquences, distincte du phénomène mentionné précédemment. Autrement dit, cela montre là aussi que les paramètres d'entrée de notre modèle sont liés dans leur influence sur la réponse vibratoire.

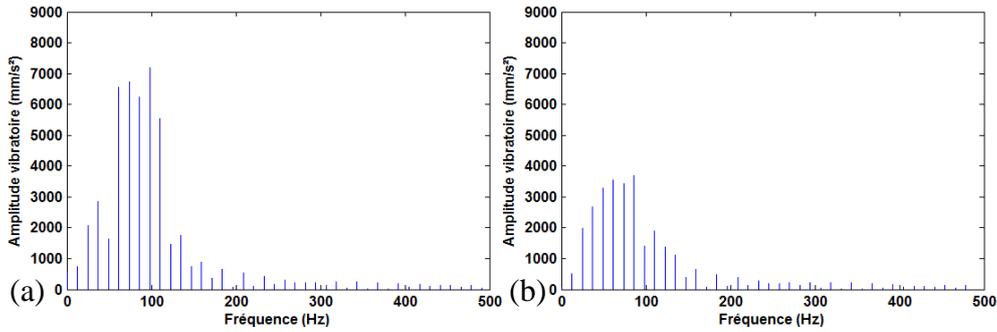


Figure 4.9. Spectres vibratoires obtenus pour une surface avec pour caractéristiques $C = \infty$, $S_q = 0,8 \mu\text{m}$, $S_{al} = 90 \mu\text{m}$ (a) avec une distribution gaussienne et (b) une distribution exponentielle.

2.3.3. *Impact de l'amplitude de rugosité sur les vibrations du pion*

Les spectres de la **Figure 4.10** montrent l'influence de l'amplitude de rugosité pour le cas d'une courbure de 10 cm de rayon. L'augmentation de l'amplitude de rugosité de 0,2 à 0,8 μm semble engendrer une augmentation de l'amplitude des harmoniques.

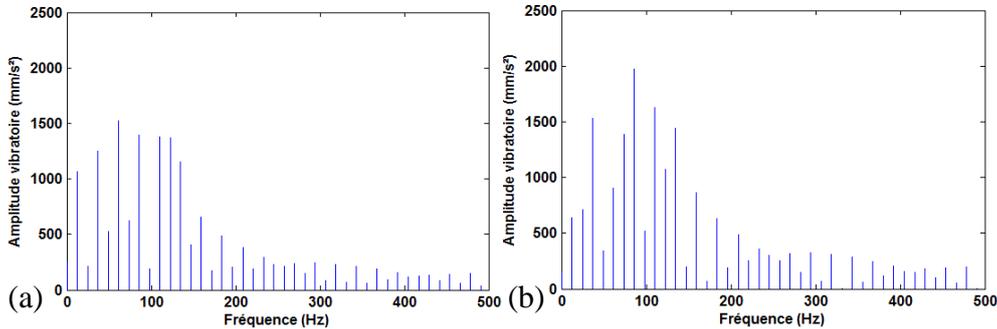


Figure 4.10. Spectres vibratoires obtenus pour une surface de distribution gaussienne, avec pour caractéristiques $C = 10 \text{ cm}$, $S_{al} = 50 \mu\text{m}$ (a) $S_q = 0,2 \mu\text{m}$ et (b) $S_q = 0,8 \mu\text{m}$.

Lorsque la longueur d'autocorrélation est plus élevée, l'amplitude vibratoire augmente aussi avec l'augmentation de la rugosité quadratique (**Figure 4.10**). Toutefois, on peut remarquer un léger shift en fréquence des harmoniques les plus énergétiques.

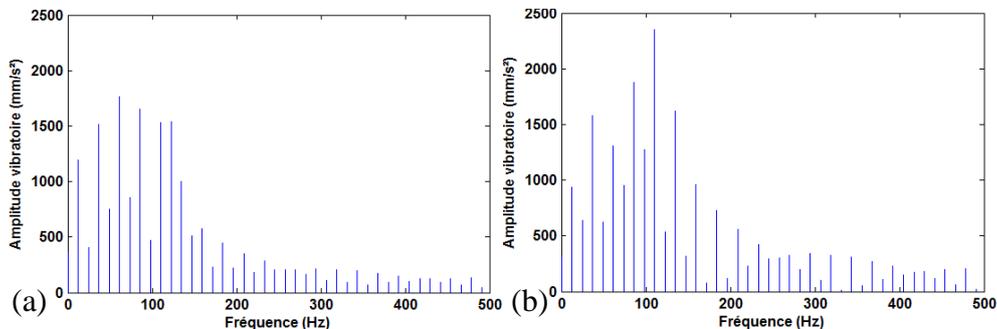


Figure 4.11. Spectres vibratoires obtenus pour une surface de distribution gaussienne, avec pour caractéristiques $C = 10 \text{ cm}$, $S_{al} = 90 \mu\text{m}$ (a) $S_q = 0,2 \mu\text{m}$ et (b) $S_q = 0,8 \mu\text{m}$.

2.3.4. *Impact de la longueur d'autocorrélation sur les vibrations du pion*

La **Figure 4.12** montre en exemple deux spectres mettant en avant l'influence de la longueur d'autocorrélation qui caractérise en particulier la taille moyenne des motifs de la surface. Il ne semble pas y avoir d'effet important vis-à-vis de

l'augmentation de la longueur d'autocorrélation, hormis une diminution des amplitudes autour de 100 Hz.

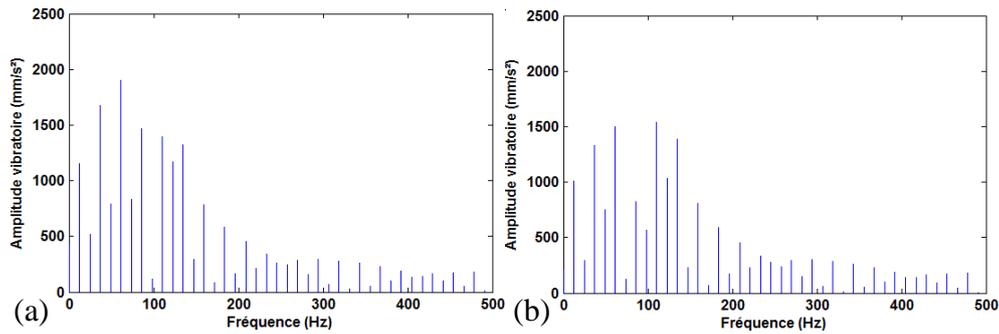


Figure 4.12. Spectres vibratoires obtenus pour une surface de distribution gaussienne, avec pour caractéristiques $C = 10$ cm, $S_q = 50$ μm (a) $S_{al} = 10$ μm et (b) $S_{al} = 90$ μm .

Cependant, avec une rugosité quadratique plus importante (**Figure 4.13**), on peut noter une augmentation assez nette de l'amplitude de l'ensemble des harmoniques avec l'augmentation de la longueur d'autocorrélation. Ceci peut s'expliquer par une distribution plus isolée des irrégularités et donc des aspérités de surface, permettant ainsi plus de mises en contact lors du mouvement du pion. On peut conclure alors que l'impact de la longueur d'autocorrélation est lié à celui de la rugosité.

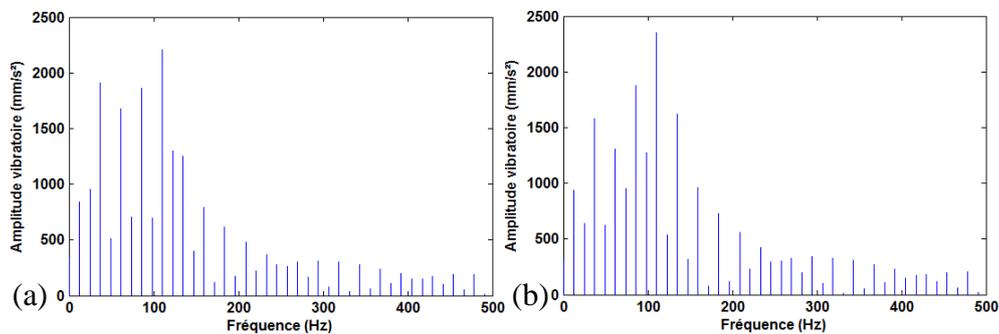


Figure 4.13. Spectres vibratoires obtenus pour une surface de distribution gaussienne, avec pour caractéristiques $C = 10$ cm, $S_q = 80$ μm (a) $S_{al} = 10$ μm et (b) $S_{al} = 90$ μm .

2.3.5. *Analyse de la variance du comportement vibratoire du pion*

L'influence de chaque paramètre pris indépendamment ne semble ainsi pas assez nette et pour cette raison nous avons réalisé une analyse de variance (ANOVA) sur toutes les simulations effectuées afin de séparer plus clairement les contributions de chaque facteur et de leurs interactions de niveau deux. Une analyse de type III a été réalisée. Ce type d'ANOVA est le plus valide lorsque, comme dans notre cas, les interactions entre les facteurs sont significatives pour l'explication des paramètres de sortie. Nous avons placé en entrée du modèle :

- la rugosité quadratique de la surface S_q (20 ; 50 ; 80 μm) ;
- la longueur d'autocorrélation S_{al} (10 ; 50 ; 90 μm) ;
- la distribution (gaussienne, exponentielle) ;
- le rayon de courbure C (10 cm ; 20 cm ; infini).

En sortie de ce modèle, deux paramètres, calculés sur les spectres de Fourier, ont été évalués :

- le **niveau vibratoire moyen**, c'est-à-dire la moyenne des amplitudes. Celui-ci a été utilisé afin d'obtenir des informations sur le niveau des harmoniques de manière générale ;
- le **Kurtosis**, c'est-à-dire le facteur d'aplatissement du spectre vibratoire. Celui-ci permet de décrire la forme du spectre. Sa définition est rappelée dans le chapitre 1 de ce mémoire.

Les pourcentages de contributions au niveau vibratoire, calculés à partir des tests de Fisher comme rappelé dans le chapitre 3, sont donnés sur la **Figure 4.14**. On remarque que l'interaction de la rugosité quadratique avec le rayon de courbure est le facteur le plus influent dans l'amplitude de la réponse vibratoire, avec plus de 40 % de contribution. La rugosité quadratique seule vient ensuite. Sa contribution est telle qu'elle apparaît presque au niveau du premier facteur. Cela ne fait que renforcer l'idée que l'amplitude de la rugosité, par son interaction avec le rayon de courbure et donc la forme du contact mais aussi par elle-même, contribue à la grande majorité de la variation en amplitude de la réponse vibratoire. Le troisième facteur quant à lui est l'interaction de la rugosité avec la longueur d'autocorrélation, avec une contribution à hauteur de 4 %. Les autres facteurs sont en comparaison très négligeables.

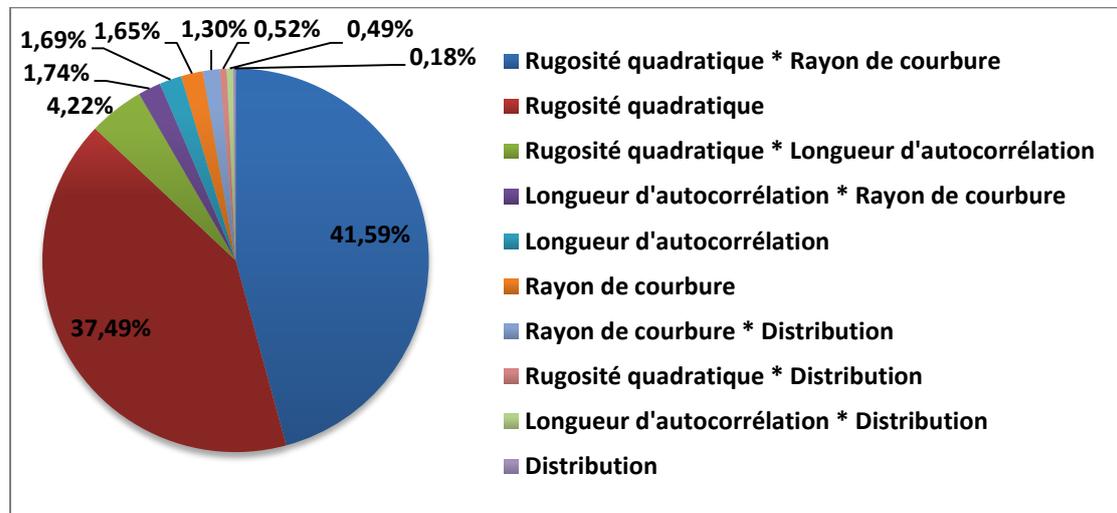


Figure 4.14. Contributions en pourcentage de chaque facteur sur le niveau vibratoire moyen. Les interactions sont indiquées avec un astérisque entre les deux facteurs interagissant.

En ce qui concerne les contributions au Kurtosis, c'est-à-dire à la forme de l'enveloppe des spectres vibratoires, elles sont données sur la **Figure 4.15**. Le rayon de courbure est ici la contribution majeure, avec plus de 44 %. Autrement dit, la forme du spectre est très liée aux échelles macro-géométriques. Il est intéressant de noter que la seconde contribution est la longueur d'autocorrélation caractérisant la largeur moyenne des motifs de surface. Viennent ensuite deux interactions, qui sont celles de la rugosité quadratique avec longueur d'autocorrélation et le type de distribution. En additionnant l'ensemble des contributions de la longueur d'autocorrélation (20,9 %) et du rayon de courbure (51,6 %), on peut alors indiquer que l'échelle macro-géométrique est environ deux fois plus influente que l'échelle micro-géométrique sur la forme du spectre des vibrations.

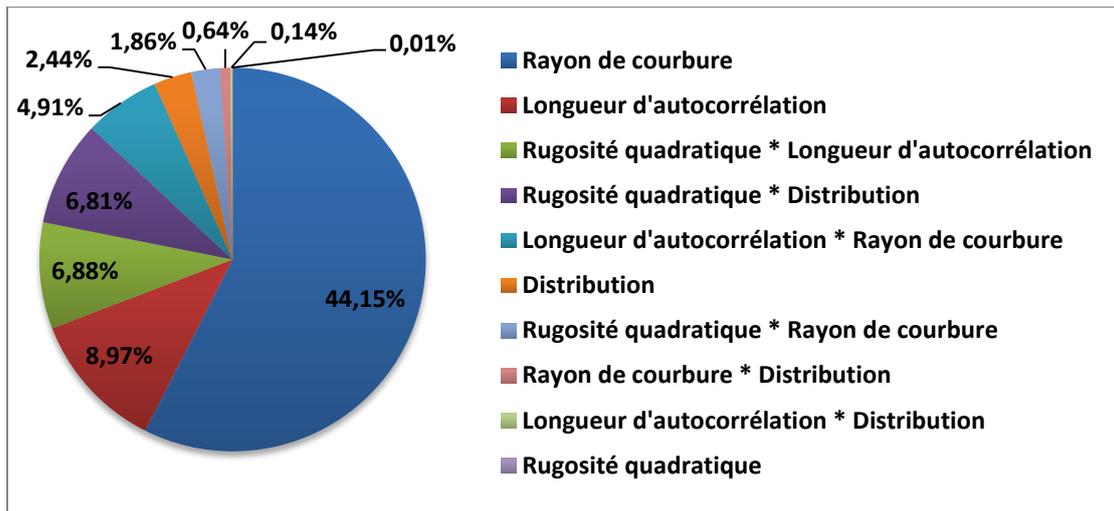


Figure 4.15. Contributions en pourcentage de chaque facteur sur le Kurtosis. Les interactions sont notées avec un astérisque entre les facteurs.

2.4. Conclusions

Nous avons pu mettre en avant l'impact important de la micro-géométrie sur la génération de vibrations lors d'un contact sec et dans des conditions de charge et de déplacement reproduisant celles entre deux dentures. Plus particulièrement, il a été montré que l'amplitude des micro-irrégularités a un effet aussi important que la macro-géométrie des surfaces sur l'amplitude des vibrations générées lors d'un contact sec. Concernant la répartition des harmoniques mises en jeu, même si la macro-géométrie des surfaces est le paramètre d'ordre 1, l'échelle des irrégularités micro-géométriques de la surface est un paramètre très influent.

3. Simulation à l'échelle d'un engrenage hélicoïdal et calcul de l'erreur de transmission

Après avoir mis en avant l'influence de la micro-géométrie sur la génération de vibrations à l'échelle locale d'un contact, nous avons étudié la réponse vibratoire à l'échelle de l'engrenage. Un modèle éléments finis de calcul de l'erreur de transmission a été développé. Le but de celui-ci a été de déterminer l'influence de certaines caractéristiques de surface, plus particulièrement l'amplitude et l'échelle de la rugosité, sur les vibrations générées par l'engrenage. Il est important de rappeler que le spectre vibratoire d'un engrenage et celui de l'erreur de transmission sont étroitement liés.

3.1. Description du modèle

Les deux pièces utilisées dans ce modèle éléments finis sont l'arbre primaire et le pignon de descente du réducteur RA0, précédemment étudiés expérimentalement. Ces derniers ont été directement importés à partir des modèles numériques dessinés par Renault. Afin de réduire le nombre d'éléments du maillage, les pièces ont vu leur géométrie simplifiée, avec notamment un certain nombre de dents enlevées (**Figure 4.16a et b**).

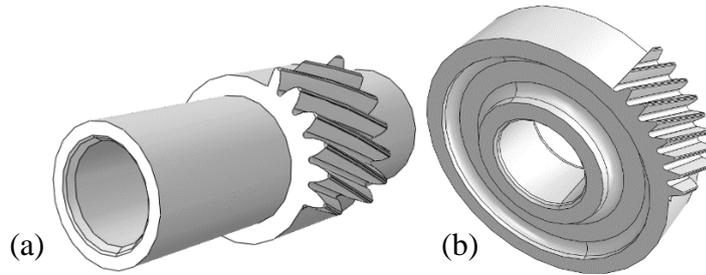


Figure 4.16. Images (a) de l'arbre primaire et (b) du pignon de descente.

Les éléments utilisés dans le maillage sont des éléments tétraédriques quadratiques (C3D10). Le maillage des pièces elles-mêmes est assez grossier sur les arbres mais est plus fin sur les dents afin de pouvoir approcher au mieux leur forme réelle (**Figure 4.17**). Tout comme dans la simulation à l'échelle du contact, une couche d'éléments plus fins hexaédriques quadratiques (C3D8R) de $10\ \mu\text{m}$ d'épaisseur a été mise en place sur les surfaces des flancs engrenant, c'est à dire le couple de dents central étudié. Il est d'une taille de $30 \times 30\ \mu\text{m}$ en surface (**Figure 4.18**) et est plus grossier sur les dents avoisinantes.

Une vitesse de 1500 tours par minutes, soit environ $157\ \text{rad.s}^{-1}$, a été donnée à l'arbre primaire et un couple résistant de 8 Nm a été appliqué au pignon de descente afin de se rapprocher au plus des conditions expérimentales. Les deux arbres ont été arrêtés en translations selon leur axe de rotation.

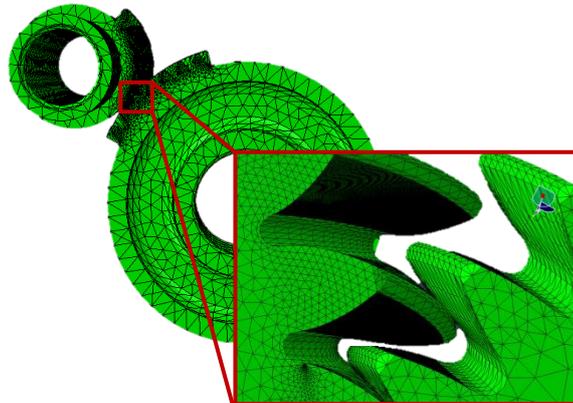


Figure 4.17. Vue d'ensemble du maillage des pièces avec zoom sur les dentures.

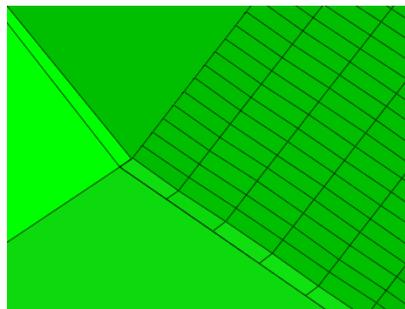


Figure 4.18. Couche d'éléments raffinés sur le flanc de l'arbre primaire (haut de dent du pignon de descente).

Les topographies ont été intégrées de manière similaire au modèle décrit précédemment, la différence étant dans la taille du maillage des surfaces qui est de $30\ \mu\text{m}$ par $30\ \mu\text{m}$. En effet en utilisant la plateforme de calcul ROMEO nous avons pu atteindre une résolution qui nous permet d'étudier l'influence de la microrugosité des

surfaces dentures. Des essais ont été effectués pour utiliser un maillage plus fin, mais les contraintes de puissance informatique l'ont limité à la taille indiquée ci-dessus. Les paramètres matériaux utilisés sont donnés dans le **Tableau 4.2**.

Tableau 4.2. Paramètres matériaux utilisés.

Matériau	Acier doux
Module de Young	210 GPa
Coefficient de Poisson	0,3
Masse volumique	7800 kg.m ⁻³

3.2. Paramètres d'entrée du modèle numérique

Deux types de surfaces ont été intégrés dans le modèle. Dans un premier temps, des surfaces générées numériquement ont été utilisées afin d'étudier les paramètres d'amplitude et d'échelle de rugosité et leur impact sur l'erreur de transmission. Les paramètres du plan de simulation sont donnés dans le **Tableau 4.3**. Les simulations 1 à 6 servent à identifier l'influence de l'échelle. Les simulations 7 et 8 sont là pour étudier l'effet de l'amplitude de rugosité. Enfin, les simulations 9 à 12 ont été utilisées afin de déterminer l'importance de l'échelle de rugosité seulement dans la direction de profil.

Tableau 4.3. Variabilité des paramètres surfaciques étudiés.

Numéro de la simulation	Rugosité quadratique S_q (μm)	Longueur d'autocorrélation S_{al} (μm) dans les directions	
		De profil	D'hélice
1	0,5	30	
2		50	
3		70	
4		90	
5		120	
6		150	
7	0,2	50	
8	0,8		
9	0,5	60	50
10		90	
11		120	
12		150	

Dans un second temps, des topographies mesurées par interférométrie optique ont été intégrées (**Figure 4.19**). Il s'agit des surfaces des pièces utilisées pour les essais expérimentaux en régime sec.

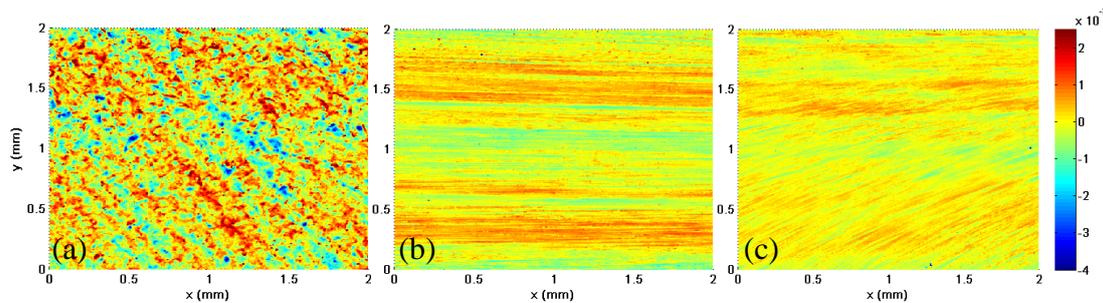


Figure 4.19. Trois topographies mesurées directement sur les pièces utilisées expérimentalement pour les essais vibratoires à sec. Les flancs sont (a) sans finition ; (b) rectifiés ; (c) powerhonnés.

Elles possèdent une rugosité quadratique S_q de $0,5 \mu\text{m}$ pour les pièces finies et $1,2 \mu\text{m}$ pour les pièces sans finition. Leurs longueurs d'autocorrélation dans les directions de profil et d'hélice sont données dans le **Tableau 4.4**. On peut noter que les surfaces sans finition et powerhonnées sont relativement proches, avec pour différence une inversion de direction en ce qui concerne la largeur moyenne de motifs. En ce qui concerne la rectification, les largeurs sont plus importantes, notamment dans la direction d'hélice.

Tableau 4.4. Calcul des longueurs d'autocorrélation dans les directions de profil et d'hélice pour les trois configurations étudiées.

	S_{al} dans la direction de profil (μm)	S_{al} dans la direction d'hélice (μm)
Rectification	48,5	122,3
Powerhoning	17,5	25,2
Sans finition	21,4	17,5

3.3. Résultats

L'erreur de transmission a été calculée à partir des coordonnées temporelles de 10 points situés sur le cylindre interne de chaque pièce. Les angles de rotation de chaque arbre ont ainsi pu être calculés et nous avons ainsi pu arriver à l'erreur de transmission, qui est la différence de rotation entre le menant et le mené. Le signal a été calculé sur toute la durée de la simulation (**Figure 4.20a**). Le signal de l'erreur de transmission a ainsi été reconstitué sur une rotation complète de l'arbre par concaténation de ce signal élémentaire (**Figure 4.20b**). La transformée de Fourier a ensuite été utilisée afin d'obtenir les composantes fréquentielles de ce signal, notamment les amplitudes des harmoniques d'engrènement (**Figure 4.21**).

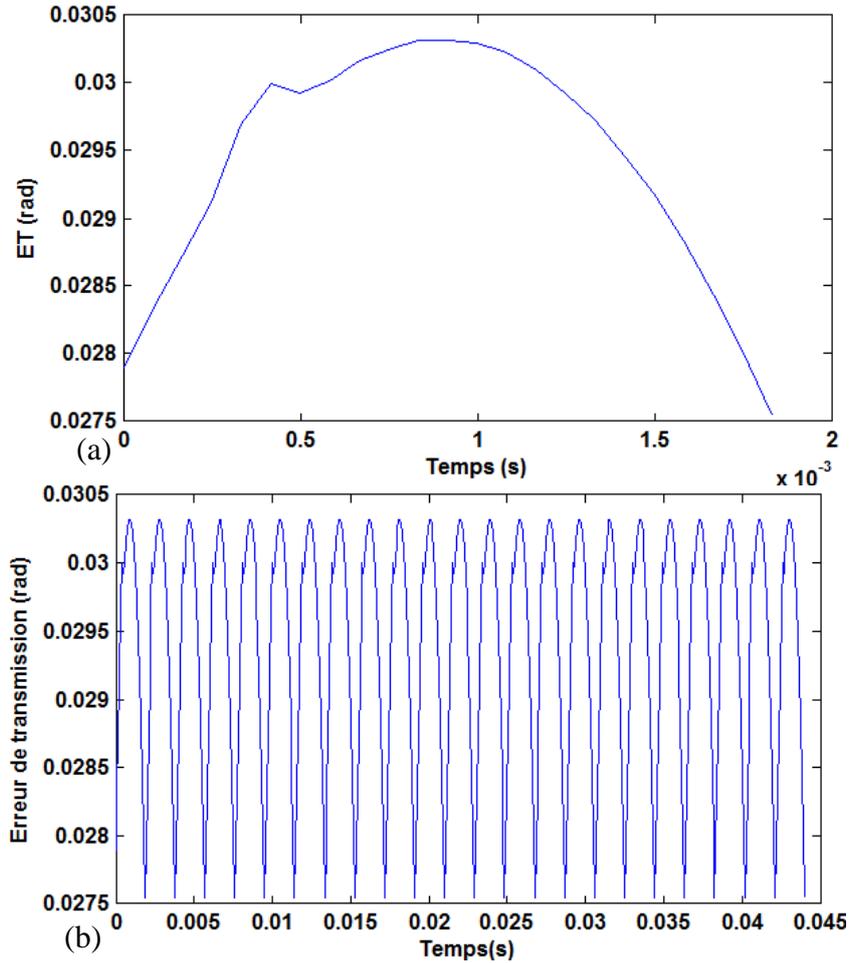


Figure 4.20. (a) Calcul de l'erreur de transmission (ET) pour la simulation d'un flanc rectifié ; (b) signal de l'ET reconstitué sur une rotation d'arbre primaire.

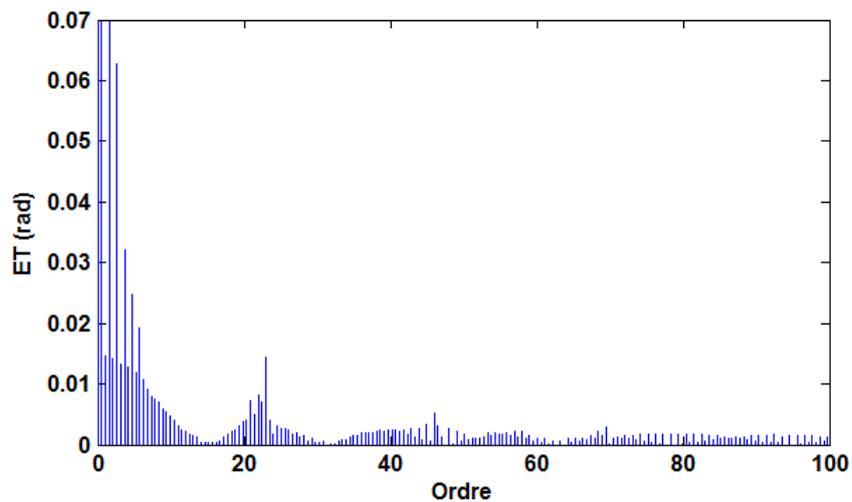


Figure 4.21. Spectre de Fourier du signal de la figure précédente.

3.3.1. Influence de l'amplitude de rugosité S_q

L'influence de la rugosité quadratique S_q a été investiguée à partir de trois surfaces générées numériquement. Une distribution gaussienne a été choisie dans la mesure où il s'agit de la distribution usuellement obtenue après usinage. En ce qui concerne la longueur d'autocorrélation, elle a été fixée à $50 \mu\text{m}$. Enfin, pour la rugosité ont été pris les valeurs $0,2$, $0,5$ et $0,8 \mu\text{m}$. Les spectres de l'erreur de

transmission calculés à partir des résultats des simulations sont donnés sur la **Figure 4.22**. Nous pouvons remarquer une contribution non négligeable de l'amplitude des irrégularités de surface sur celle des harmoniques d'engrènement.

Pour aller plus loin, comme pour la partie expérimentale, la moyenne des trois premières harmoniques d'engrènement a été calculée (**Figure 4.23**). On peut clairement observer une augmentation linéaire de l'amplitude des harmoniques d'engrènement avec l'augmentation de l'amplitude de rugosité.

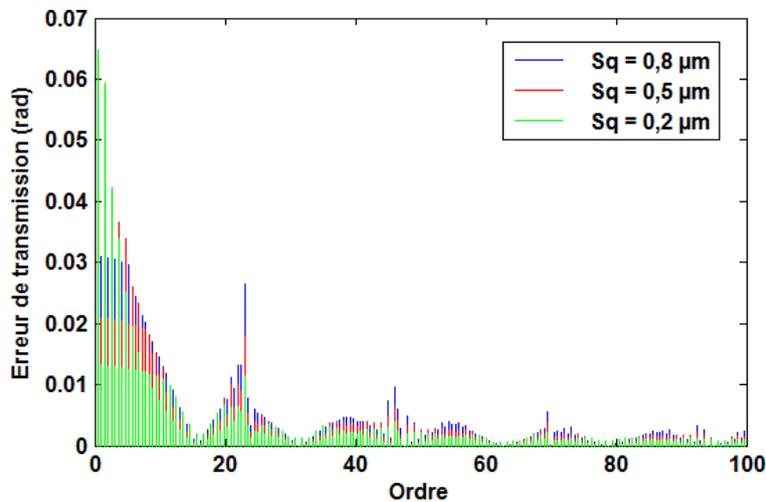


Figure 4.22. Spectres de l'erreur de transmission pour des surfaces ayant une même longueur d'autocorrélation S_{al} de $50 \mu\text{m}$ et des rugosités quadratiques S_q de $0,2$, $0,5$ et $0,9 \mu\text{m}$.

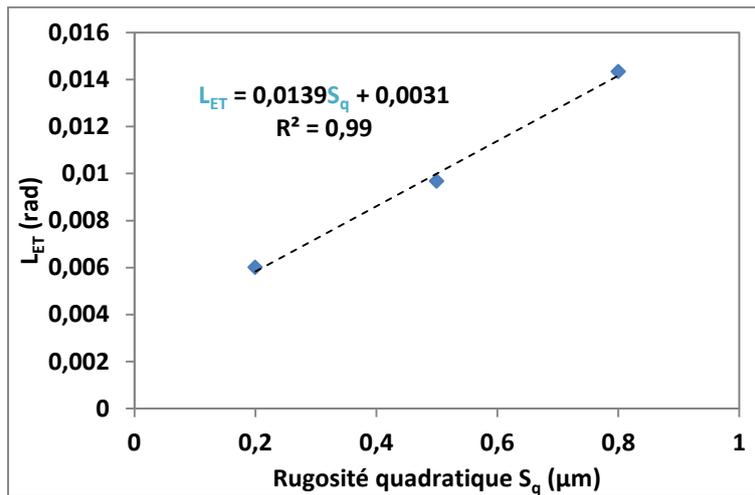


Figure 4.23. Comparaison des niveaux moyens de l'erreur de transmission pour une longueur d'autocorrélation $S_{al} = 50 \mu\text{m}$ et pour trois rugosités quadratiques (S_q).

3.3.2. *Influence de la longueur d'autocorrélation S_{al}*

Pour étudier l'effet de la taille des motifs de surfaces, plusieurs longueurs d'autocorrélation, S_{al} , ont été utilisées : 30 , 60 , 90 , 120 et $150 \mu\text{m}$. La distribution surfacique est gaussienne et la rugosité quadratique S_q quant à elle a été fixée à $0,5 \mu\text{m}$. En effet, il s'agit de celle la plus proche des surfaces expérimentales finies par rectification ou powerhoning. Les spectres de l'erreur de transmission calculés à partir des résultats des simulations sont donnés sur la **Figure 4.24**. Les résultats montrent peu de différences entre les harmoniques calculées.

La moyenne des trois premières harmoniques d'engrènement a été calculée pour chaque spectre (**Figure 4.25**). L'effet de l'échelle de rugosité est moins important que celui observé précédemment pour l'amplitude de rugosité. On peut noter une diminution de l'erreur de transmission avec l'augmentation de la longueur d'autocorrélation.

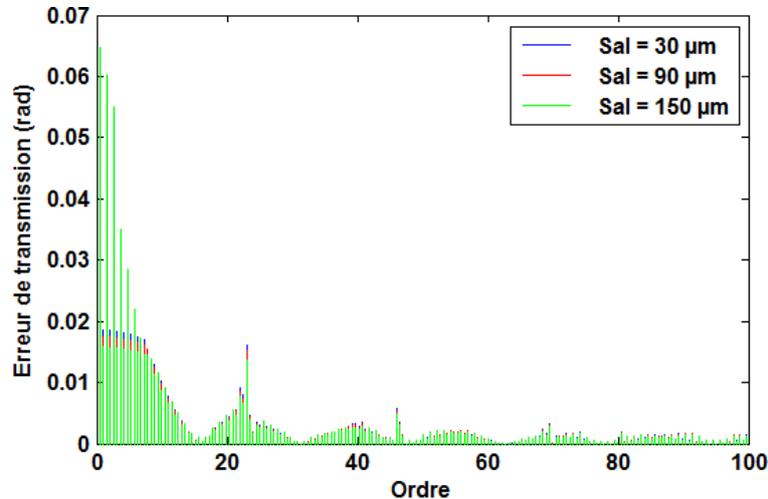


Figure 4.24. Spectres de l'erreur de transmission pour des surfaces ayant une même amplitude de rugosité ($S_q = 0,5 \mu\text{m}$) et des longueurs d'autocorrélation de 30, 90 et 150 μm .

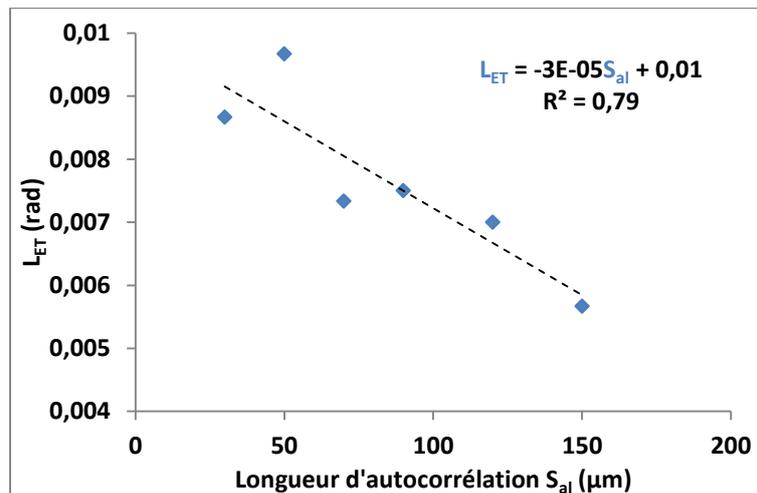


Figure 4.25. Comparaison des moyennes des trois premières harmoniques d'engrènement de l'erreur de transmission pour six longueurs d'autocorrélation.

3.3.3. *Influence de l'anisotropie des flancs en termes de longueur d'autocorrélation*

Afin d'étudier l'effet de l'anisotropie de la taille des motifs de surfaces, plusieurs longueurs d'autocorrélation, S_{al} , ont été utilisées dans la direction de profil : 30, 60, 90, 120 et 150 μm . En ce qui concerne la direction de l'hélice, une longueur d'autocorrélation commune de 50 μm a été introduite. La distribution surfacique est toujours gaussienne et la rugosité quadratique S_q est maintenue à 0,5 μm . Trois exemples de spectres d'erreur de transmission calculés sont donnés sur la **Figure 4.26**. Comme dans le cas précédent, les résultats ne montrent pas de modifications majeures entre les différents cas. Toutefois, il est intéressant de noter une diminution similaire de l'amplitude globale avec l'augmentation de la longueur d'autocorrélation.

Cette diminution est mise en avant sur la **Figure 4.27** où sont données les moyennes des trois premières harmoniques d’engrènement des spectres calculés.

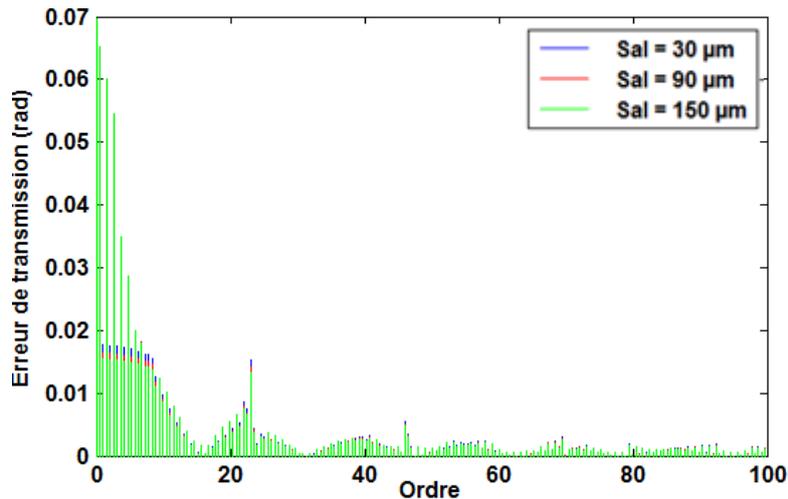


Figure 4.26. Spectres de l’erreur de transmission pour des surfaces ayant une même amplitude de rugosité et des longueurs d’autocorrélation de 50 µm dans la direction d’hélice et de 30, 90 et 150 µm dans la direction de profil.

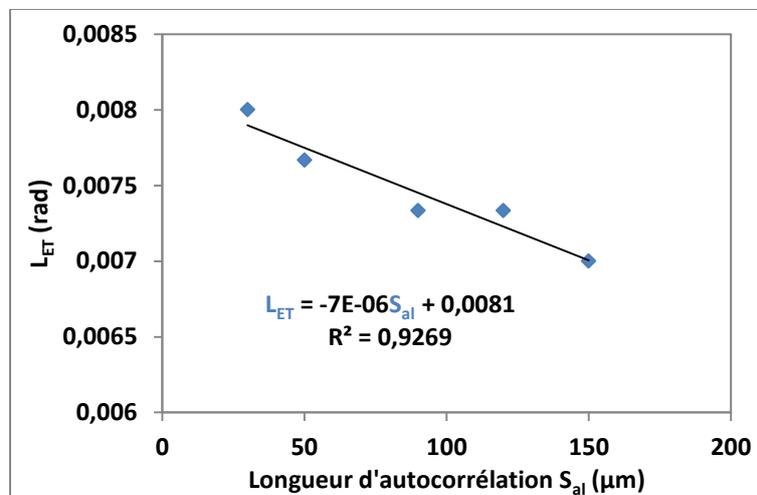


Figure 4.27. Comparaison des moyennes des trois premières harmoniques d’engrènement de l’erreur de transmission pour les cas d’anisotropie.

3.4. Comparaison des simulations avec les essais expérimentaux

Les surfaces introduites sont tirées des mesures effectuées sur les flancs de dentures des pièces, juste après fabrication, qui ont été utilisées pour les essais expérimentaux. Les résultats des essais sont ceux obtenus dès la première acquisition vibratoire.

Le maillage surfacique de 30 par 30 µm ne permet pas de faire la différence entre les surfaces finies, rectifiées et powerhonnées, introduites. Toutefois, comme on peut le voir sur la **Figure 4.28**, notre simulation permet de discriminer les pièces finies de la pièce non finie. En effet, la différence entre les deux spectres est principalement sur son amplitude. Par exemple, la première harmonique d’engrènement possède une amplitude deux fois plus élevée pour la simulation avec un flanc non finie.

Nous avons calculé la moyenne des trois premières harmoniques d'engrènement, paramètre miroir du paramètre L_e calculé sur les essais expérimentaux. Les résultats ont été rassemblés dans le **Tableau 4.5**. Une large augmentation de l'amplitude des harmoniques d'engrènement de l'erreur de transmission est observée lors de la simulation d'une surface non finie. Cette différence en termes d'amplitude des irrégularités des surfaces est en mesure d'expliquer les fortes différences entre la surface non finie et les autres. Toutefois, il est intéressant de noter que les différences en amplitudes sont moindres que pour les essais expérimentaux. Il y a un facteur 5 de différence.

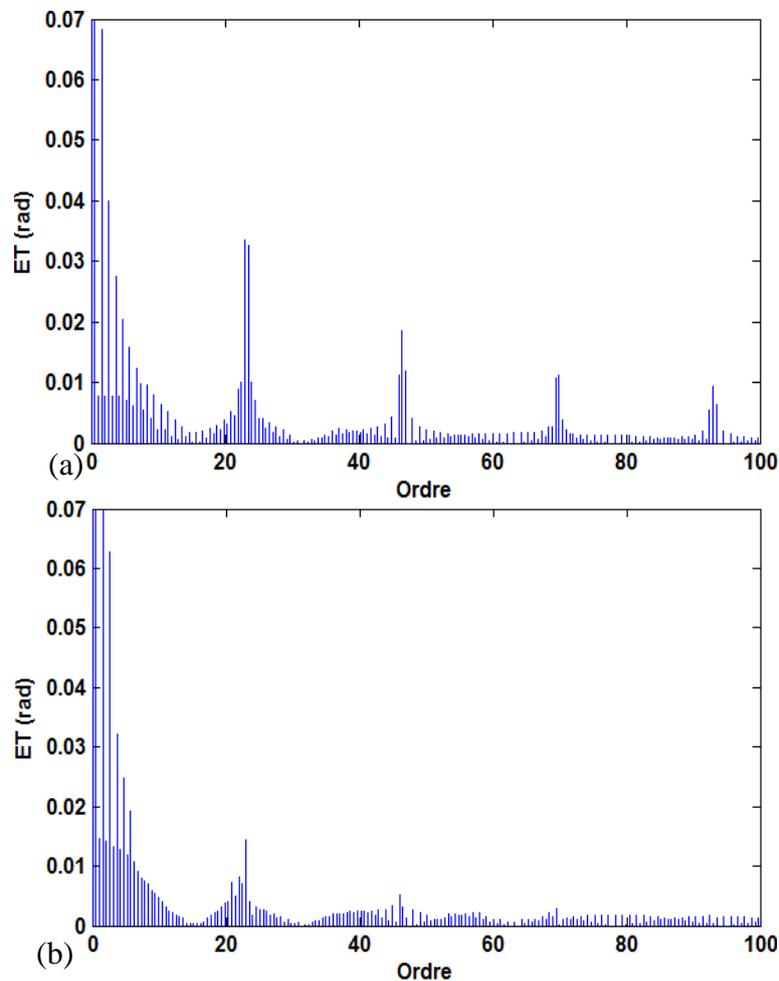


Figure 4.28. Spectres des simulations avec les surface introduites mesurées sur des flancs générés (a) Sans finition ; (b) avec finition (rectification ou powerhoning).

Tableau 4.5. Comparaison des résultats expérimentaux obtenus au tout début des essais et des simulations numériques.

	Expérimental L_e (mm.s⁻²)	Simulation L_{ET} (rad)
Sans finition	17,1	0,062
Rectification	10,1	0,006
Powerhoning	4,9	

Pour plus de clarté, nous avons tracé la comparaison entre les résultats expérimentaux et ceux obtenus par simulation numérique pour chaque harmonique (**Figure 4.29**). Il est intéressant de noter que dans le cas de la rectification, la

corrélation est très bonne, tandis qu'elle est biaisée pour le powerhoning. Ceci peut s'expliquer par le fait que les échelles principales des surfaces powerhonnées se situent plus dans les échelles micro qui ne sont ici pas prises en compte aussi finement que possible. Pour les surfaces non finies, seule une harmonique (H2) est en bonne corrélation. Au final, il est nécessaire de raffiner d'avantage le maillage en surface pour pouvoir prendre mieux en compte la micro-géométrie de surface.

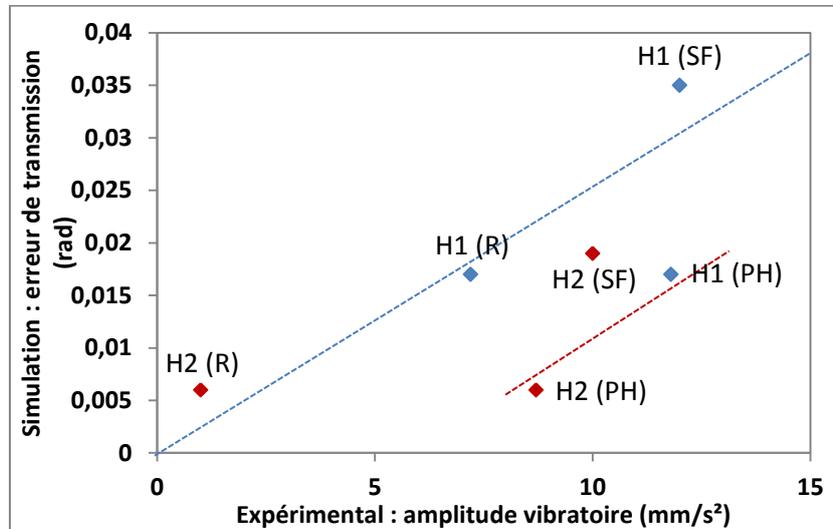


Figure 4.29. Comparaison des résultats expérimentaux et numériques. H1 et H2 renvoient respectivement aux harmoniques 1 et 2 des spectres. R : Rectification ; PH : Powerhoning et SF : Sans finition.

3.5. Conclusions

Les simulations numériques d'un engrenement ont pu montrer que l'amplitude des irrégularités des surfaces à l'échelle micro-géométrique était une contribution majeure lors d'un contact sec entre dentures sur le comportement vibratoire de l'engrenage. Ensuite, le modèle numérique est en concordance avec les essais expérimentaux mais nécessite une résolution encore plus fine pour discriminer les surfaces de denture finie.

4. Conclusion

Nous avons développé une simulation élément finie à l'échelle d'un contact sec dans des conditions de charge et de vitesse reproduisant celles entre deux dentures. Elle permet de calculer les vibrations générées par le déplacement d'un pion rugueux sur une surface elle-même rugueuse. Nous avons montré que l'amplitude des irrégularités contribue au même niveau que la macro-géométrie à l'amplitude des vibrations générées. L'échelle des irrégularités quant à elle impacte plutôt la répartition des harmoniques vibratoires mises en jeu.

Nous avons en parallèle développé une simulation à l'échelle de l'engrenage. Celle-ci permet de calculer l'erreur de transmission. A travers ces calculs, nous avons montré que l'amplitude des irrégularités de surface avait une influence majeure sur le comportement vibratoire, ce qui peut s'expliquer par le fait qu'il s'agisse d'un contact sec. Il est certain que cette influence sera moindre lors d'un contact lubrifié, comme nous avons pu le montrer expérimentalement. La comparaison des résultats des simulations avec ceux obtenus à partir des essais est prometteuse mais demande

d'autres cas de figures. Il sera intéressant d'effectuer un affinement du maillage afin de permettre la discrimination des procédés de finition entre eux, mais aussi d'introduire la lubrification. En effet, cela pourrait permettre de trouver des paramètres de surface optimisés pour le comportement vibratoire de l'engrenage.