

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

جامعة أبي بكر بلقايد - تلمسان

Université Aboubekr Belkaïd - Tlemcen -

Faculté de Technologie



MEMOIRE

Présenté pour l'obtention du diplôme de MASTER

En Génie Mécanique

Spécialité : Maintenance industrielle

Par M.BENDEHINA Boudjema

Thème :

Etude de l'influence de défaillances des paliers centraux sur le comportement vibratoire des arbres de transmissions

Soutenu publiquement, le 15/09/2016, devant le jury composé de :

M.ZINALA	Président	MCB	Univ. Tlemcen
M. CHORFI S.M	Examineur	MCB	Univ. Tlemcen
M.HAMZA-CHERIF S.M	Examineur	MCB	Univ. Tlemcen
M. BELALIA. S.A	Encadreur	MCA	Univ. Tlemcen
M. BOUKHALFA .A	Co-Encadreur	MCA	Univ. Tlemcen

Année universitaire 2015 - 2016

Remerciements

En premier lieu, je tiens à remercier mon DIEU qui m'a donné le courage, la force et la volonté pour réaliser ce modeste travail, Je présente également à cette occasion mes chaleureux remerciements à mon encadreur Mr. Sid Ahmed BELALIA, mon Co-encadreur Mr. Abdelkrim BOUKHALFA pour l'aide honorable et infatigable qu'ils m'ont apporté en acceptant de superviser et de suivre mon travail, pour les conseils et les précieuses orientations. J'adresse mes profonds remerciements à Mr. ZINAI. A, Mr. HAMZA CHERIF, Mr. CHORFI maitre de conférences de l'université de Tlemcen, qui ont spontanément la volonté et l'honneur d'examiner mon travail. Leurs critiques et leurs remarques me permettent de clarifier plusieurs points importants dans ce mémoire. Je les exprime ma très vive reconnaissance.

BENDEHINA Boudjemaa.

Dédicace

Je tiens à rendre hommage à mon père, à maman pour son indéfectible assistance et son soutien tout le long de ma formation ; les mots ne peuvent pas exprimer mon entière gratitude et ma reconnaissance pour leurs sacrifices et à tout la famille.

Sans oublier mes amis *BENHAMIDA Mohamed Amine, NEMMICHE Nesreddine, GHARBI Youcef, KENADIL Abderrahman* , pour tous les efforts et l'aide par leurs présence et leurs soutien afin de réussir ce modeste travail.

Sans oublier tous mes collègues et tous mes amis sans exception.

Résumé

Ce projet est consacré pour l'étude de l'arbre de transmission constitué de deux cardans et un palier central.

Tout d'abord on a commencé par les définitions des termes qui ont relation avec l'étude de l'influence de défaillance des paliers centraux sur le comportement vibratoire des arbres de transmission, ensuite on a fait une petite recherche sur le palier central et une analyse des causes et des conséquences de la défaillance.

Le système étudié est modélisé en trois dimensions à l'aide de *solidworks* 2015 et simulé avec *solidworks simulation*, ce dernier est utilisé pour obtenir la concentration des contraintes, déplacement et déformation dans l'étude statique, et pour faire une étude fréquentielle.

Abstract

This project is devoted to the study of the transmission shaft consists of two universal joints and center bearing.

First we started with definitions of terms that have relation with the study of the influence of failure of central bearings on the vibration behavior of the transmission shafts, then we did a little research on the central bearing and analysis of the causes and consequences of failure.

The system studied is modeled in three dimensions using simulated solidworks 2015 and with solidworks simulation, it is used to get the concentration of stresses, displacement and deformation in the static study, and for a frequency study.

المخلص

خصص هذا المشروع لدراسة ناقل الحركة و الذي يحتوي على حامل مركزي.

أولا بدأنا مع تعريفات للمصطلحات التي لها علاقة مع موضوع أطروحتنا، ثم قمنا ببحث فيما يخص الحامل المركزي وتحليل أسباب وعواقب الفشل.

النظام درس في ثلاثة أبعاد باستخدام البرنامج Solidworks و مع محاكاة باستعمال البرنامج Solidworks للمحاكاة، هذا الأخير يتم استخدامه لاستخلاص تركيز الضغوط والانتقال والتشويه في الدراسة ثابتة، و من أجل دراسة التردد.

Sommaire

Introduction	1
Chapitre I : Généralités	
1. Les machines tournantes :.....	2
2. Définition de la transmission :.....	3
3. Mécanique et analyse vibratoire:.....	4
3.1. Vibrations:.....	4
3.2. Notions fondamentales :.....	5
3.2.1. Amplitude :.....	6
3.2.2. Fréquence :.....	6
3.2.3. Fréquence d'excitation et fréquence propre:.....	6
3.3. Types de vibrations :.....	6
3.3.1. Vibrations transversales :.....	7
3.3.2. Vibrations longitudinales :.....	7
3.3.3. Vibrations de torsion :.....	7
3.4. Problème de vibration des paliers :.....	7
4. Paliers:.....	8
4.1. Cas d'utilisation du palier central PC :.....	9
4.2. Types de support de l'arbre de transmission :.....	10
Chapitre II: Palier central et analyse vibratoire	
Introduction	13
1. Définition du palier centrale (PC) :.....	13
2. Rôle du palier support central :.....	15
2.1. Fonction du palier central	15
3. Défaillance du palier central :.....	16
3.1. Défaillance de roulement	16
3.2. Défaillance de support du palier central	16
3.3. Autres défaillance.....	17
3.3.1. Défaillance de caouatchouc.....	17
3.3.2. Défaillance de boulons	17
3.3.3. Défaillance de l'arbre de transmission à cause du palier central	17
4. Analyse de défaillance :.....	18

4.1. Documenter le problème	19
4.2. Enquete priliminaire	20
4.3 Causes de défaillance du palier centrale	20
5. Montage et démontage du palier central :.....	22
Conclusion	28

Chapitre III: Formulation tridimensionnelle de l'arbre

Introduction.....	29
1. Relations contraintes-déplacement	29
2. Energie de déformation	29
3. Energie cinétique.....	31
4. Détermination des équations du mouvement.....	32

Chapitre IV: Modalisation et simulation d'un arbre de transmission avec palier central

Introduction.....	33
1. Définition du logiciel Solidworks	33
2. Historique.....	33
3. Fonctionnement.....	33
4. Pièces.....	34
4.1.Conception de l'arbre de transmission avec palier central D4UN CAMION.....	35
5. Assemblages.....	39
6. Mise en plan.....	41
6.1. Étapes de création d'une mise en plan	41
7. Simulation de l'arbre de transmission avec palier central	42
7.1. Maillage du modèle.....	42
7.2. Résultats et interprétation.....	45
7.2.1. Simulation statique.....	47
7.2.2. Analyse fréquentiel.....	50

Conclusion.....56

Conclusion générale.....57

Bibliographie

Annexes

Liste des tableaux

Tableau II.1 : Différents types de palier central.....14

Tableau II.2 : causes et correction de défaillance du palier central.....21

Tableau IV.1 : Détails de maillage.....43

Tableau IV.2: propriétés de matériau AISI 304.....46

Tableau IV.3 : propriétés de caoutchouc naturel.....46

Tableau IV.4 : les valeurs des fréquences pour le cas encastré-libre.....50

Tableau IV.5 : les valeurs des fréquences pour le cas encastré-encastré.....53

Nomenclature

v	Déplacement suivant l'axe y
w	Déplacement suivant l'axe z
u	Rotation suivant l'axe x
L	Opérateur différentielle
A	Air de l'élément fini
ρ	Masse volumique
E	Module de Young
ε	Déformation
σ	Contrainte
E_c	Énergie cinétique
E_d	Énergie de déformation
ω	Pulsation propre
ν	Coefficient de Poisson
[M]	Matrice masse globale
[K]	Matrice de rigidité globale
x,y,z	Coordonnées cartésiennes
t	Temps

Liste des figures

Figure I.1: Arbre de transmission.....	2
Figure I.2 : Opération de maintenance sur une boîte de vitesse.....	2
Figure I.3 : Caractéristiques fondamentales des vibrations.....	5
Figure I.4 : Type de vibrations.....	7
Figure I.5 : Différents types de paliers.....	9
Figure I.6 : Deux pièces d'entraînement en ligne avec chanter de palierintermédiaire.....	9
Figure I.7 : Trois pièces d'entraînement en ligne avec deux paliers de support intermédiaires.....	10
Figure I.8 : Véhicule utilitaire double rangée support de palier auto alignement.....	11
Figure I.9 : Véhicule utilitaire simple rangée auto-alignement bague de roulement Extérieure.....	11
Figure I.10 : roulement caoutchouc bloc robuste.....	12
Figure II.1 : retraitage des écrous du support.....	12
Figure II.1. Composantes du mécanisme de transmission.....	13
Figure II.2 : usure complète des roulements.....	16
Figure II.3 : fissure dans la région de filet en état de marche.....	16
Figure II.4 : défaillance de roulement et de caoutchouc.....	17
Figure II.5: défaillance des boulons.....	17
Figure II.6 : défaillance de U-joint.....	18
Figure II.7 : rupture de l'arbre de transmission.....	18

Liste des figures

Figure II.8 : palier central déchiré.....	22
Figure II.9 : retraitage des deux boulons et rondelles.....	22
Figure II.10 : Enlèvement des boulons fixant le cardan au pont arrière.....	22
Figure II.11 : Retirage de l'écrou central et la demi mâchoire.....	23
Figure II.12 : Retirage des clips de maintient.....	23
Figure II.13 : enlèvement de roulement.....	24
Figure II.14 : Faire sortir le croisillon de la demi-mâchoire.....	24
Figure II.15 : Enlèvement du boulon central et la demi- mâchoire.....	25
Figure II.16 : Le repère pour positionner la demi-mâchoire.....	25
Figure II.17 : Enlèvement du palier central.....	25
Figure II.18 : La pose du palier central.....	26
Figure II.19 : La mise en place du palier central.....	26
Figure II.20 : La remettre de l'autre demi-cardan.....	26
Figure II.21 : Vérification de l'alignement de l'arbre de transmission.....	27
Figure II.22 : tête de pont avec empreinte.....	27
Figure II.23 : positionner le palier.....	27
Figure IV.1 : Les trois concepts de base (SOLIDWORKS)	34
Figure IV.2 : Arbre 1.....	35
Figure IV.3 : Croisillon.....	35
Figure IV.4 : U joint cardan.....	36
Figure IV.5 : arbre 2	36
Figure IV.6 : U joint de l'extrémité	37
Figure IV.7 : Goupille.....	37
Figure IV.8 : roulement du palier central.....	38
Figure IV.9 : caoutchouc de palier central.....	38
Figure IV.10 : support de palier central.....	39

Figure IV.11 : Assemblage de l'arbre de transmission avec palier central.....	40
Figure IV.12 : Assemblage de l'arbre de transmission au niveau palier central.....	40
Figure IV.13 : Élément volumique parabolique.....	42
Figure IV.14 : Élément volumique linéaire.....	42
Figure VI.15 : Maillage du modèle.....	43
Figure VI.16 : Maillage de palier central.....	44
Figure VI.17 : Maillage de joint cardon coté de pont arrière.....	44
Figure VI.18 : Joint cardon coté boîte de vitesse.....	45
Figure VI.19 : Répartition des contraintes dans les cas statique sur le modèle.....	47
Figure VI.20 : Analyse statique de déplacement du système.....	47
Figure VI.21 : Analyse statique de déformation du système.....	48
Figure VI.22 : Répartition de la contrainte dans d'application de couple	48
Figure VI.23 : Analyse Statique du déplacement d'un système en cas application du couple	49
Figure VI.24 : Analyse Statique du déplacement d'un système en cas application du couple	49
Figure VI.25 : Analyse Statique de la déformation d'un système en cas d'application du couple.....	50
Figure VI.26 : Analyse fréquentiel d'un arbre pour le mode 1.....	51
Figure VI.27 : Analyse fréquentiel d'un arbre pour le mode 2.....	51
Figure VI.28 : Analyse fréquentiel d'un arbre pour le mode 3	52
Figure VI.29 : Analyse fréquentiel d'un arbre pour le mode 4.....	52
Figure VI.30 : Analyse fréquentiel d'un arbre pour le mode 5.....	53
Figure VI.31 : Analyse fréquentiel de modèle pour le mode 1.....	54
Figure VI.32 : Analyse fréquentiel de modèle pour le mode 2.....	54
Figure VI.33 : Analyse fréquentiel de modèle pour le mode 3.....	55

Liste des figures

Figure VI.34 : Analyse fréquentiel de modèle pour le mode 4.....55

Figure VI.35 : Analyse fréquentiel de modèle pour le mode 5.....56

Introduction général

Durant notre recherche nous avons remarqué que la plupart des véhicules avec quatre roues motrices ou avec traction arrière souffrent de la défaillance des arbres de transmissions au niveau du palier central.

Suivant l'importance du palier central, il est indispensable d'étudier cet élément sur des bases scientifiques dans le cadre de notre projet de fin d'étude pour analyser les causes de défaillances et les problèmes au niveau des arbres de transmission.

Les objectifs de l'étude sont:

- découvrir les problèmes de défaillance de palier central.
- L'influence de défaillance de palier central sur le mécanisme.
- Réexaminer la distribution des contraintes, le déplacement et la déformation sur le long de l'arbre de transmission et au niveau de palier central.

Voici les démarches suivies dans notre travail:

- La conception de l'arbre de transmission et palier central en trois dimensions avec logiciel Solidworks.
- Simulation avec *Solidworks* 2015.
- Exécuter du modèle en utilisant *Solidworks*.

Le présent mémoire est organisé selon le plan suivant:

- Généralités sur termes liés à la transmission et l'analyse des vibrations et les paliers et les cas de leurs utilisations.
- En deuxième chapitre on décrira le palier central et son rôle, et on déduira les défaillances courantes et on analysera ces causes.
- Le troisième chapitre est consacré pour la formulation de théorème de Timoshenko.
- Dans le dernier chapitre nous rapportons les résultats des simulations à l'aide du logiciel utilisé et nous montrons comment les contraintes se répartissent et comment se produisent les déplacements et les déformations et qu'est-ce que l'analyse fréquentielle nous donnera.

Chapitre 1

Généralités

1. Les machines tournantes

Les machines tournantes sont devenues depuis de nombreuses années des éléments indispensables pour l'industrie moderne. Leurs applications industrielles sont très variées : transformation d'énergie, aéronautique, automobile, maritime, productique, etc. Les pompes, les compresseurs, boîtes de vitesse, turbines de bateaux ou de sous-marins, les machines électriques, les machines-outils et les arbres de transmission sont des exemples concrets de ces types de machines voir figures(I-1).



Figure I.1 :Arbre de transmission



Figure I.2 :Opération de maintenance sur une boîte de vitesse.

Les performances des machines tournantes sont en évolution rapide. Ces évolutions sont liées notamment aux progrès réalisés en matière de puissance, rendement, diminution de leur poids due à l'utilisation des matériaux composites et de leur bruit, vitesses de rotation très élevées (pouvant atteindre jusqu'à 60000 tr/mn en usinage à grande vitesse).

Cependant, les efforts générés deviennent de plus en plus importants, sollicitent fortement le comportement dynamique global de la machine et les amplitudes vibratoires deviennent souvent trop élevées pour que la structure puisse les supporter. Ces vibrations sont à l'origine d'un bruit trop important et peuvent même provoquer l'endommagement de la machine : rupture par fatigue, usure des paliers, frottement entre les éléments fixes et mobiles du système. Les détériorations de ces machines conduisent automatiquement à une indisponibilité d'où une perte de production, à un coût de maintenance important et à une nuisance de bruit et de vibrations insupportables.

De ce fait, le comportement vibratoire de ces machines doit être maîtrisé et ses fréquences de résonance connues afin d'éviter une trop grande vibration du système pendant les arrêts et pendant la mise en marche et d'éviter ainsi tout risque d'endommagement. La compréhension et le diagnostic des phénomènes vibratoires mis en jeu nécessitent ainsi une modélisation et des simulations de plus en plus fines de leur comportement. Beaucoup d'études se sont concentrées sur la modélisation des rotors.

2. Définition de la transmission

Une transmission est un ensemble d'organe qui permet de transmettre un mouvement. Ce mouvement est modifié de manière à être :

- ❖ A transformé un mouvement de rotation et mouvement de translation.
- ❖ A augmenté ou a réduire la vitesse de rotation de sortie par rapport à la vitesse d'entrée du mouvement de rotation.
- ❖ A augmenter ou réduire le couple de sortie par rapport au couple d'entrée du mouvement de rotation.

Il existe différents types de transmission suivant les besoins et les charges ou conditions de transmission :

- ❖ Transmission par engrenage.
- ❖ Transmission par chaîne.
- ❖ Transmission par engrenage conique.
- ❖ Transmission par vis sans fin.
- ❖ Transmission par courroie.

- ❖ Transmission par crémaillère.
- ❖ Transmission par cardan.

3. Mécanique et analyse vibratoire

Les vibrations ou les oscillations des systèmes mécaniques constituent l'un des plus importants champs d'études dans toute la mécanique. Théoriquement, tous les corps peuvent vibrer librement avec des manières différentes. On peut aller de l'aile d'une mouche jusqu'aux grandes vibrations de la terre lors d'un tremblement tout en passant par l'être humain qui est en soit un réservoir de vibrations. Pour les vibrations des systèmes mécaniques et structures elles sont d'une part une nuisance pour les utilisateurs et d'autre part une source d'informations sur les comportements. Par exemple pour les machines tournantes, elles sont redoutées car elles provoquent des dégradations et des cassures.

Pour cette raison leur étude est nécessaire. Le concepteur doit avant tout déterminer la réponse des machines ou structures aux sollicitations de nature dynamique qu'elles vont rencontrer au cours de leurs existences. On l'appelle l'analyse vibratoire. Celle-ci permet l'étude du comportement lors de la réalisation ou de la mise en service et ainsi s'assurer d'une sécurité suffisante pour remplir une fonction définie. Elle consiste à déterminer les déformations de la structure en fonction de la fréquence que l'on définit par l'analyse modale [1,2].

3.1. Vibrations

L'utilisation des vibrations pour surveiller les machines n'est pas nouvelle – puisque les mécaniciens posaient autrefois leur tournevis sur un moteur pour en « écouter les mouvements internes – mais ces techniques « sensibles » se sont aujourd'hui modernisées grâce à l'apparition de matériels nouveaux, au point de faire de l'étude des vibrations, un des outils les plus utiles à la maintenance moderne. Le principe de l'analyse des vibrations est basé sur l'idée que les structures de machines, excitées par des efforts dynamiques, donnent des signaux vibratoires dont la fréquence est identique à celle des efforts qui les ont provoqués ; et la mesure globale prise en un point est la somme des réponses vibratoires de la structure aux différents efforts excitateurs. On peut donc, grâce à des capteurs placés en des points particuliers, enregistrer les vibrations transmises par la structure de la machine et, grâce à leur analyse, identifier l'origine des efforts auxquels elle est soumise.

De plus, si l'on possède la « signature » vibratoire de la machine lorsqu'elle était neuve, ou réputée en bon état de fonctionnement, on pourra, par comparaison, apprécier l'évolution de son état ou déceler l'apparition d'efforts dynamiques nouveaux consécutifs à une dégradation en cours de développement.

3.2. Notions fondamentales

Prenons tout d'abord un objet dont l'une des extrémités est fixée à un support rigide et dont l'autre peut se déplacer dans un plan comme le montre la (Figure I.3). On pourrait par exemple considérer cet objet comme une représentation approximative d'une poutre encastree dans un mur, d'une lame de pompe centrifuge en porte-à-faux ou du bec de raccordement d'une machine de chargement du combustible [3].

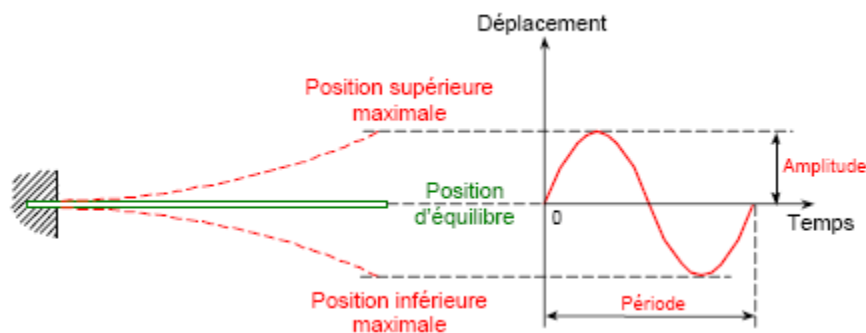


Figure I.3 : Caractéristiques fondamentales des vibrations

Imaginons qu'on fléchit l'objet jusqu'à ce que son extrémité atteigne une de ses positions maximales et qu'on le relâche. L'extrémité se déplace, passe par sa position d'équilibre, atteint la position maximale opposée, repasse par sa position d'équilibre, puis revient à la position maximale initiale et ainsi de suite. Le mouvement répété autour de la position d'équilibre est appelé vibration. Un cycle de vibration est complété lorsque l'objet passe deux fois consécutives par la position d'équilibre dans la même direction. La Figure I.3 illustre le déplacement d'un point fixe sur l'objet au cours d'un cycle, nous pouvons définir certaines caractéristiques fondamentales des vibrations.

a. Amplitude

L'amplitude (A) est le déplacement maximal par rapport à la position d'équilibre, ou encore la vitesse ou l'accélération maximale, selon le capteur de vibrations utilisé. Pour simplifier, nous ne tiendrons compte que du déplacement. Dans ce cas, l'unité utilisée habituellement pour mesurer l'amplitude des vibrations est le micromètre ($1\mu\text{m}$)². Il s'agit d'une petite fraction d'un mètre.

b. Fréquence

La fréquence (f) est le nombre de cycles de vibration par unité de temps. L'unité de fréquence est le Hertz (Hz), soit un cycle par seconde. Comme la vitesse de rotation des machines tournantes est exprimée en tours par minute (T/M), la fréquence des vibrations auxquelles celles-ci sont soumises est communément exprimée en cycles par minute (C/M). Comme une minute compte 60 secondes, $1 \text{ Hz} = 60 \text{ C/M}$.

c. Fréquence d'excitation et fréquence propre

La fréquence d'excitation est la fréquence à laquelle vibre un objet sous l'effet d'une force répétée. Une force d'excitation répétée appliquée sur un objet produit des vibrations ayant la même fréquence que cette force répétée. Les vibrations de ce type sont appelées vibrations forcées.

La fréquence propre est la fréquence à laquelle vibre un objet lorsque l'impulsion initiale est supprimée et qu'il peut osciller librement. Les vibrations de ce type sont appelées vibrations libres ou naturelles. En pratique, compte tenu du frottement et du transfert d'énergie aux objets avoisinants, l'amplitude des vibrations libres décroît progressivement jusqu'à ce que l'objet s'immobilise.

3.3. Types de vibrations

On distingue trois types de vibrations selon la direction du mouvement et les déformations que subit l'objet vibrant :

- Vibrations transversales
- Vibrations longitudinales;
- Vibrations de torsion (Figure I.4)

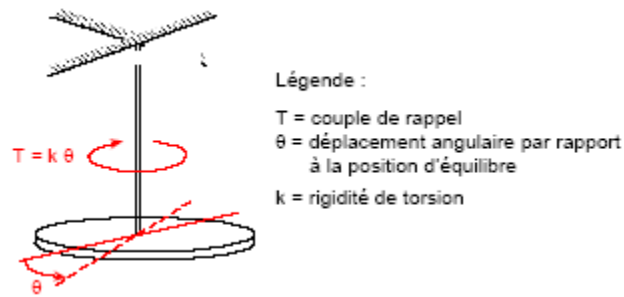


Figure I.4 :Type de vibrations

3.3.1 Vibrations transversales

Les vibrations transversales sont les plus communes. Elles se produisent lorsqu'un objet est fléchi dans une direction perpendiculaire à son axe longitudinal. Un objet peut vibrer transversalement sans plier lorsqu'il n'est pas fixé à des supports rigides (cas b). Par exemple, les arbres des machines tournantes, les tuyaux et les tubes des échangeurs de chaleur peuvent être animés de vibrations transversales.

3.3.2 Vibrations longitudinales

Des vibrations longitudinales se produisent lorsqu'un objet est sollicité par des forces longitudinales périodiques. Ces vibrations peuvent par exemple se produire dans les arbres des machines tournantes, les tuyaux et les grappes de combustible d'un réacteur.

3.3.3 Vibrations de torsion

Des vibrations de torsion se produisent lorsqu'un objet est soumis à un mouvement angulaire périodique autour d'un axe de référence, généralement l'axe longitudinal de l'objet. Les arbres des machines tournantes et les lames des turbines et des compresseurs sont généralement animés de vibrations de torsion. Un objet n'est presque jamais animé d'un seul type de vibrations périodiques qui s'exercent simultanément. Certaines de ces forces produisent des vibrations transversales, tandis que d'autres produisent des vibrations longitudinales ou de torsion[4].

3.4. Problème de vibration des paliers

Pour l'analyse vibratoire des paliers, il est nécessaire d'étudier la trajectoire du centre de l'arbre lorsque la sollicitation du contact augmente. Pour une charge faible, le palier est dit centré car l'excentricité est faible et donc l'arbre est centré dans l'alésage. Quand la charge augmente, le centre de l'arbre se déplace surtout radicalement ce qui conduit à des angles de

calage voisin de 90° . Ce n'est que pour des charges intermédiaires que l'arbre « descend » dans l'alésage. Enfin, pour les charges très importantes, on obtient des angles de calage voisin de 0. Tout calcul fait, on constate que la trajectoire du centre de l'arbre par rapport au centre de l'alésage décrit un cercle avec l'augmentation de la charge [5].

4. Paliers

Les paliers sont les composantes mécaniques conçus pour soutenir les arbres. Le mot *palier* est un nom générique qui désigne un montage mécanique destiné à accommoder le mouvement relatif entre une pièce en mouvement et un bâti ou un châssis de machine immobile. Le rôle des paliers est d'assurer le positionnement dans l'espace et de permettre le mouvement libre des arbres et des essieux en rotation ou en translation. En même temps, les paliers reprennent les charges du système et les transmettent à la partie fixe de la machine. Les paliers sont généralement utilisés pour monter des pièces rotatives sur des essieux fixes, comme par exemple les poulies, roues, engrenages, etc. La transmission des charges à la partie fixe de la machine se réalise par l'intermédiaire des surfaces en contact : la surface extérieure de l'axe supporté et la surface intérieure de l'alésage du palier utilisé. Les différents types de mouvement relatif des paliers sont illustrés à la (Figure I.5) Ces mouvements peuvent être du type suivant [6]:

- Translation (palier linéaire communément appelé glissières);
- Rotation (palier rotatif);
- Translation et rotation (palier mixte).

Dans la figure I.5 : (a) palier de translation lisse; (b) palier de translation et de rotation lisse; (c) palier de translation et de rotation à roulement; (d) Palier de rotation à roulement.

Tout mouvement relatif entre deux corps implique nécessairement la création de frottement.

Pour les trois types de paliers présentés sur la page suivante, le frottement peut être :

De glissement dans les paliers lisses, De roulement dans les paliers à roulement.

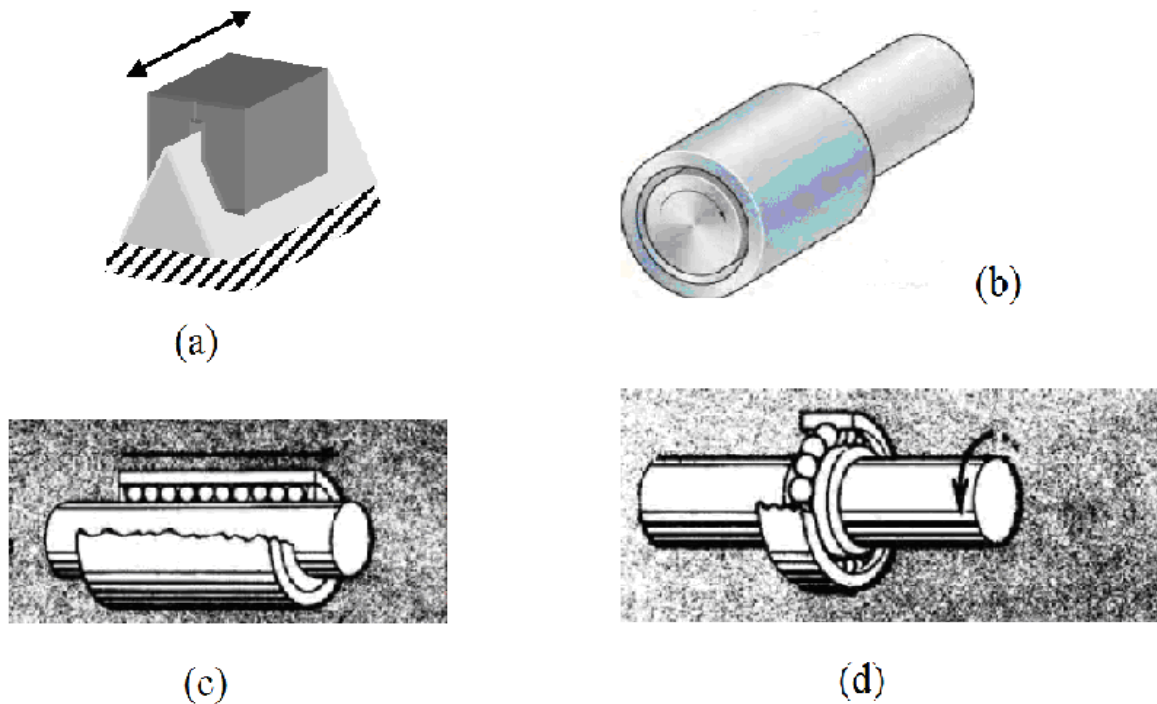


Figure I.5 : Différents types de paliers

4.1. Cas d'utilisation du palier central :

Deux pièces drive-lignes, avec deux arbres et un palier de support intermédiaire sont généralement utilisées sur des camions avec des bases de roue de 3,4 à 4,8 m de périmètre, mais il y a un certain chevauchement, selon le rôle de travail du véhicule.

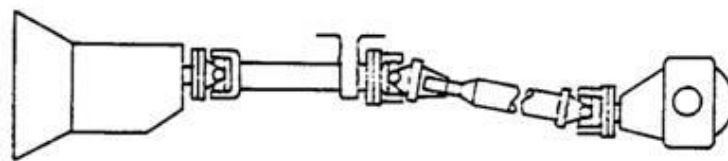


Figure I.6 : Arbre de transmission avec deux cardans et un palier central.

Les deux pièces arbre de transmission a trois joints universels, et l'arbre de transmission primaire est du type joints fixes et tube-ensemble, mais l'arbre de transmission secondaire a un joint coulissant à l'extrémité support portant pour accueillir tout allongement en raison du mouvement de suspension. Habituellement, l'arbre primaire est en ligne avec l'axe de la boîte de vitesses de l'arbre principal, mais l'arbre de transmission secondaire est légèrement incliné de sorte qu'il coupe l'entraînement final arbre de pignon de l'essieu arrière.

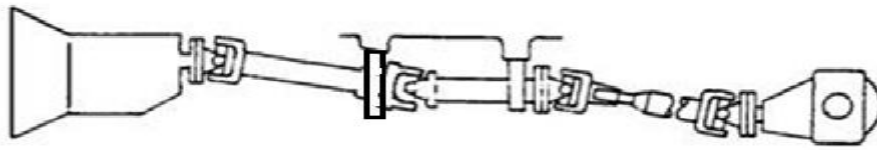


Figure I.7 : Arbre de transmission composé de trois cardans et deux paliers centraux.

Pour les véhicules avec empattements plus de 4,8 m, un trois-pièces drive-line avec deux paliers de support intermédiaires peut être nécessaire. Il existe quatre articulations universelles, et on peut voir que l'arbre intermédiaire est parallèle à l'arbre de sortie de la boîte de vitesses. Encore une fois que l'arbre de transmission arrière incorpore un joint coulissant pour compenser le changement de longueur de l'arbre.

4.2. Types de support de l'arbre de transmission

Intermédiaire arbre de transmission et le palier de montage-ensembles sont prévus pour positionner et soutenir les arbres d'hélices divisées ou divisées. Les ensembles support portant sont de deux types de base:

- auto-alignement supports de paliers (palier central),
- roulement souple monté soutient.

Auto-alignement des supports intermédiaires portant ont surtout été utilisé sur les camions lourds. Un type d'auto-alignement support de palier est une double rangée de roulements à billes avec une bague intérieure profonde rainurée et une course extérieure interne semi-circulaire (a). Avec cette disposition, toute déviation de l'arbre est logé par la bague intérieure et des billes de basculement sur le siège sphérique extérieure course fixe.

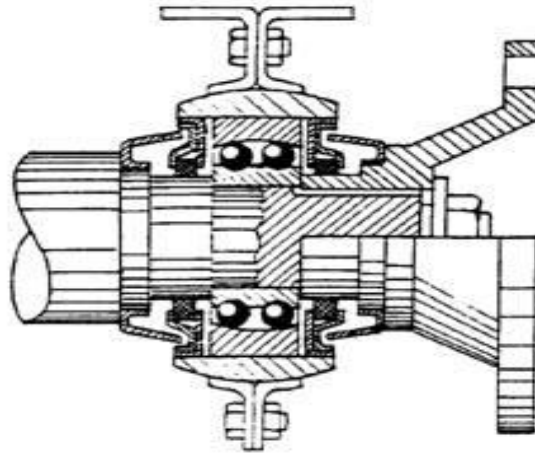


Figure I.8 : roulement a double rangée de palier central.

Un second procédé de fourniture d'auto-alignement des arbres fendus est atteint par un roulement à billes profonde rainuré simple rangée avec un profil sphérique sur la périphérie des bagues extérieures. La course de la balle est alors reçue dans un anneau de support en acier qui a un profil interne pour correspondre à l'extérieur du palier-Fig. (1.9). En cas de défaut d'alignement dans le service, le mouvement relatif du palier et la bague peut avoir lieu sans imposer des pressions sur l'ensemble de palier. Les deux dispositions examinées doivent être lubrifiées périodiquement et huile-joints sont prévus pour retenir la graisse et garder la saleté sur les pistes de roulement.

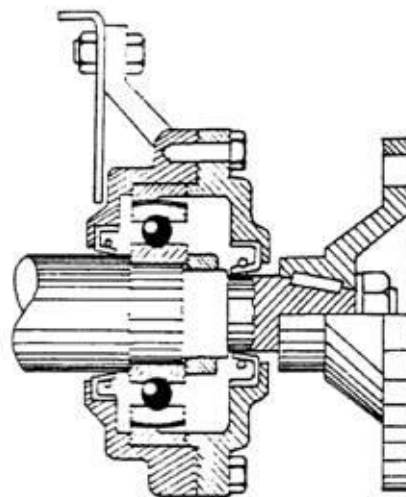


Figure I.9 : roulement a simple rangée de palier central.

Intermédiaire portant flexible monté sur supports pour arbres fractionnés peuvent être utilisés tant pour les véhicules légers et lourds. Tous ces types ont tendance à avoir une seule rangée de roulements à billes profonde rainurée qui se monte directement sur l'un des arbres divisés et autour de ce palier est un élément en caoutchouc qui est enfermé dans un châssis en acier. Les arbres intermédiaires sont ensuite donnés support par boulonnage cette assemblée à la coque du châssis ou la carrosserie. Ce montage en caoutchouc fournit un support flexible pour le palier de sorte qu'une légère inclinaison de l'arbre peut être logé. En outre, le caoutchouc flexible agit comme un amortisseur de vibrations et isole les vibrations arbre porte-hélice à partir des éléments de corps.

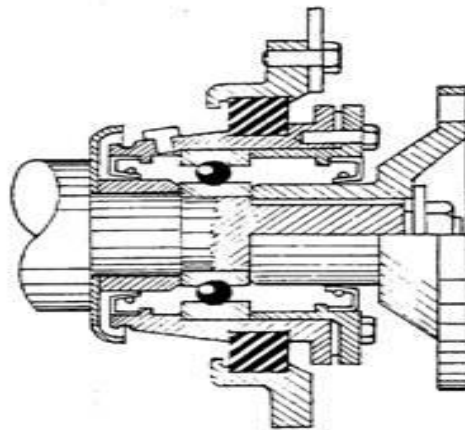


Figure I.10 : Montage roulement en bloc de caoutchouc.

Pour service extra-lourd, montage sur un moyeu de palier d'un solide bloc de bague en caoutchouc, peut être utilisé-Figure (I.10). On peut voir que la bague de roulement intérieure est maintenue en position par la bride de cardan et que la bague extérieure de roulement est située par une douille calée. Une lubrification régulière est nécessaire avec cette assemblée. La plupart des ensembles intermédiaires porteurs de lumière et lourds utilisent maintenant graissé et étanche pour la vie des roulements à gorge profonde.

Chapitre 2

Palier central et analyse de défaillance

Introduction

L'arbre de transmission est l'un des éléments les plus importants dans la transmission de puissance à partir de la boîte vitesse à l'essieu arrière. Les véhicules lourds comme les autobus, camions ont leur arbre de transmission supporté par le palier central fixé au châssis (Figure II.1). Dans ce chapitre on va étudier la défaillance du palier central et son influence sur les composants du mécanisme de la transmission. Il ya deux question qu'on doit les répondre :

- 1 - quelle est le rôle de ce palier central ?
- 2 - Comment ils fonctionnent dans un véhicule ?

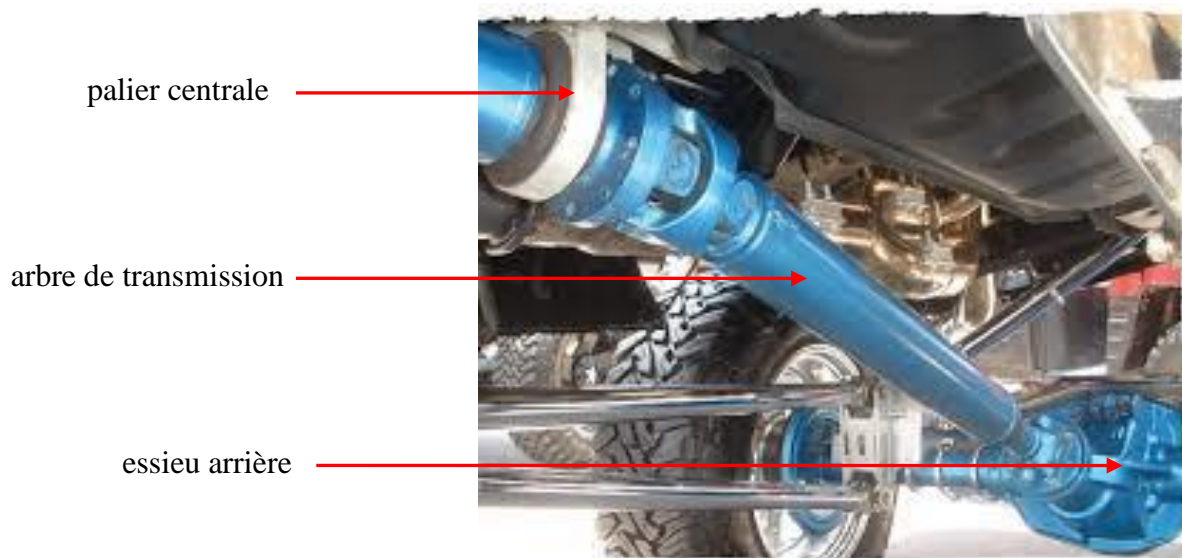


Figure II.1. Composantes du mécanisme de transmission

1. Définition du palier centrale

Palier de support central trouve une utilisation lorsque l'arbre d'entraînement d'un véhicule se divise en deux sections.

Trouvé sur les véhicules de taille moyenne et les poids lourds, le palier centrale sert de point de jonction entre la transmission et le différentiel (fig. II.1.). L'arbre d'entraînement se trouve dans le palier de support central, permettant à l'arbre d'entraînement de fléchir, aidant ensuite à soulager le stress sur les composants de la ligne d'entraînement., roulement, et de rembourrage en caoutchouc aident à absorber les chocs et les vibrations de la conduite.

Tableau II.1 :Différents types de palier central

		
 <p>GENÉRIQUE</p>		
		
		

2. Rôle du palier support central

Le palier support central est fixé sur le châssis pour supporter le roulement à billes de l'arbre transmission. Afin de réduire les charges de choc sur le support central en raison des conditions de fonctionnement du lit maltraitées en caoutchouc est prévu entre le roulement à billes et la console centrale. Que le lit de caoutchouc très élastique est de nature à chaque fois que la charge est abusé sur le support, il les déforme, vient à nouveau à son état initial de sorte que le lit de caoutchouc réduit la charge sur le roulement à billes et le support. La gravité des charges violentées ne sont pas amorti par le caoutchouc lit complètement là par les plus de contraintes se produisent sur le support du joint central.

2.1 Fonctionnement de palier central

Le palier de support central est normalement pré lubrifié et scellé à l'usine. Cependant, certains paliers de support ont graisseurs et nécessitent une lubrification à intervalles réguliers. La lubrification prolonge la durée de vie utile du palier. La première indication de défaillance du palier de support est châssis excessive, vibrations à basse vitesse. Ceci est provoqué par le palier tournant avec l'arbre d'entraînement dans le support en caoutchouc. Quand un roulement défectueux est suspecté, il doit être inspecté pour l'usure et les dommages. Le temps où le support en caoutchouc ne montre aucun signe de durcissement, la fissuration ou déchirure, il devrait être remplacé. Par contre, lorsque le palier de support est défectueux, les procédures de remplacement sont généralement limitées à séparer les arbres d'entraînement, le support portant déboulonnage du châssis ou traverse, et en faisant glisser le palier et le bloc de support de l'arbre. Lorsque seulement le palier est disponible dans le stock :

- Démonter l'appareil en douceur inquisiteurs le roulement du support en caoutchouc.
- Retirez le bouclier de la poussière du palier.
- Nettoyer toutes les pièces qui doivent être réutilisées. Lorsque le roulement est remplacé, certains fabricants recommandent que la graisse imperméable placée sur les deux côtés de la portant, non pas pour un lubrifiant, mais d'exclure l'eau et la poussière du roulement.
- Installez la protection anti-poussière et appuyez sur le nouveau roulement dans le support.
- Avant de fixer le support de palier au châssis ou traverse, vérifier le service manuel pour déterminer si les cales sont nécessaires à des fins d'alignement.

-Lors du remontage paliers de support, il faut faire preuve de prudence pour veiller à ce que le bon alignement de l'entraînement la ligne est maintenu. Cela permettra d'éviter une usure anormale des joints universels.

3. Défaillance du palier central

3.1 Défaillance de roulement

L'usure peut être causée par différents facteurs, comme la présence de corps étrangers, une lubrification insuffisante, une corrosion par l'eau de condensation. Les facteurs influençant l'usure sont les conditions de fonctionnement, l'ambiance et l'efficacité des dispositifs d'étanchéité et de graissage. Les conséquences de l'usure sont une augmentation de la rugosité à l'intérieur du roulement, une augmentation du jeu interne, une augmentation du bruit de fonctionnement, une baisse de la précision du guidage en rotation. Il peut en résulter des engrenements défectueux, des balourds et une surcharge du palier[8].



Figure II.2 : usure complète des roulements.

3.2 Défaillance de support du palier central



Figure II.3: fissure dans la région de filet en état de marche.

Dans les figures précédentes du support de palier central a échoué à la jonction du support bout plat et fin semi-circulaire. Cela signifie que la concentration des contraintes est plus au rayon de congé [9].

3.3. Autres défaillances

3.3.1. Défaillance de caoutchouc

Cette figure montre la défaillance de roulement et de caoutchouc



Figure II.4 :défaillance de roulement et de caoutchouc.

3.3.2. Défaillance de boulons

Cette figure représente la défaillance de boulons



Figure II.5: défaillance des boulons.

3.3.3. Défaillance de l'arbre de transmission à cause du palier central

Il faut toujours inspecter le palier central à des intervalles de service normal. Ne devriez pas voir toute la « poussière » noir autour du palier ou sur le support de palier. Si une poussière noire est présente, enavoir un problème d'angle de fonctionnement et en doit utiliser un rapporteur pour mesurer et calculer la taille de l'angle de fonctionnement U-joint à l'extrémité

avant de l'arbre d'accouplement. Il devrait être faible, moins d'un an et un degré et demi. Donc il peut provoquer la rupture de U-jointet par conséquent la défaillance de l'arbre de transmission et des problèmes au niveau de différentiels et le roulement de la sortie de la boîte vitesse.



Figure II.6 : Défaillance de U-joint.

Figure II.7 : Rupture de l'arbre de transmission.

4. Analyse de défaillance

Analyse de défaillance est le processus de détermination de la cause originelle de défaillance d'un composant afin de l'empêcher de se reproduire.

Stop souvent, quand un composant défectueux est remplacé sans déterminer sa cause, il y aura un échec récurrent. Si un boîtier de support est ouvert, révélant une couronne avec une dent cassée, il ne suffit pas à régler sur la dent cassée comme la cause de la défaillance du transporteur.

D'autres parties du véhicule doivent être examinées. Pour une compréhension approfondie de l'échec et possible un aperçu des problèmes liés, le technicien doit respecter l'état général du véhicule.

Personne ne profite quand un composant défectueux va sur le tas d'ordure avec la cause inconnue. Rien de plus inquiétant à un client qu'un échec de répétition. Analyser systématiquement un échec pour empêcher une récurrence assure un service de qualité en évitant inutilement des temps d'arrêt et des dépenses supplémentaires pour le client.

La véritable cause de l'échec peut être mieux déterminée en sachant ce qu'il faut chercher, déterminer comment un morceau de l'équipement était en cours d'exécution, et l'apprentissage de problèmes antérieurs. Dans certains cas, la partie elle-même est en faute. Dans le cas d'un essieu arrière reconstruit, des paires d'engrenages peuvent avoir été installés.

Les magasins les plus efficaces de prévenir les pannes de matériel de répétition en développant de bonnes pratiques d'analyse de défaillance. Savoir diagnostiquer la cause d'une défaillance prématurée est une des conditions préalables d'un bon technicien d'équipement lourd.

Les quatre étapes suivantes sont une approche efficace pour de bons diagnostics de défaillance :

- Documenter le problème.
- Faire une enquête préliminaire.
- Trouvez la cause de l'échec.
- Corrigez la cause du problème.

4.1 Documenter le problème

Voici quelques lignes directrices pour commencer à en apprendre davantage sur un échec, y compris les questions à poser :

- Parlez-en à l'opérateur du véhicule.
- Regardez les états de service.
- Renseignez-vous lorsque le véhicule dernier entretien.
- Demandez : Dans ce type de service est le véhicule utilisé ?
- Demandez : Est-ce que cet échec particulier eu lieu avant ?
- Demandez : Comment le véhicule travaillait avant l'échec ?

Vous devez être un bon auditeur. Parfois, les symptômes insignifiants ou indépendants peuvent pointer vers la cause de l'échec.

- Demandez : le véhicule a été exploité à des températures normales ?
- Demandez : Étiez les jauges montrant les plages normales de fonctionnement ?
- Demandez : Y avait-il du bruit ou des vibrations inhabituelles ?

4.2 Enquête préliminaire :

- Rechercher des fissures dans les arbres de transmission, l'essieu arrière, palier central (plus difficile à voir, mais parfois visible).
- Est-ce que l'état mécanique général du véhicule indiquent un bon entretien ou y a-t-il des signes de négligence ?
- Les pneus sont en bon état et ne les tailles correspondent ?
- Symptômes des défaillances du PC :

Un véhicule qui tremble lors de l'accélération à partir d'une butée doit habituellement le palier de support central remplacé. Un autre symptôme courant d'un mauvais palier de support central comprend un bruit intermittent, en particulier lorsque le ralentissement.

Un son geindre de l'arbre d'entraînement est parfois causé par un centre usé sepalier de support. Depuis ce roulement fait des révolutions complètes, il fera un son différent qu'un mauvais joint universel. Un haut perché, gémissement plus constant.

Viendra généralement à partir d'un palier de support central défectueux[10].

4.3 Causes de défaillance du palier central :


Analyse de défaillance est le processus de collecte et d'analyse des données pour déterminer la cause de l'échec et comment l'empêcher de se reproduire. Analyse des défaillances et la prévention sont des fonctions importantes à toutes les disciplines d'ingénierie. Un composant ou produit ne parvient pas en service, il faut déterminer la cause de l'échec ou empêcher une nouvelle apparition, et / ou d'améliorer la performance du dispositif, composant ou structure. Il est possible de fracture soit un résultat de multiples mécanismes de défaillance ou les causes profondes.

Les causes courantes de défaillance du service sont:

1. Une mauvaise utilisation ou un abus
2. Condition route
3. état de l'environnement
4. Un entretien inadéquat
5. Un matériau inadéquat
6. Mauvais état de stockage

L'ampleur des volumes de production a toujours placé les exigences sévères sur la robustesse des procédés utilisés dans la fabrication. Le fort accent sur le coût a demandé aux fabricants de composants pour améliorer la performance de leurs matériaux et de trouver les méthodes pour livrer ces matériaux à un coût réduit. Les caractéristiques de conduite et le bruit d'un véhicule sont sensiblement affectés par les vibrations transférées au corps à travers les points de montage du moteur et de la suspension. Le système moteur-châssis-carrosserie automobile peut subir des vibrations indésirables dus à des perturbations de la route et le moteur Afin de contrôler le tremblement de repos et les vibrations induites par la route, le roulement Support Centre devrait être raide et très amorti. Evaluation de la défaillance de l'équerre centrale de roulement et l'examen de la conception peut conduire à une utilisation optimale des matériaux sans compromettre la sécurité [11].

Tableau II.2 : causes et correction de défaillance du palier central[11].

Condition	Cause	Correction
le soutien de l'arbre l'usure des roulements	ligne trop longue pour des vitesses de fonctionnement du variateur	Installer une ligne de transmission en deux parties avec un palier de support d'arbre.
	Lubrification incorrecte des roulements	Remplacer le palier central.
Le soutien de l'arbre isolant en caoutchouc porter 	Pliage fatigue due à deux secondaires Charges	Réduire l'angle universel de fonctionnement continu en commun.
	Charge de couple excessive pour universelle taille du joint et de la ligne d'entraînement	Remplacer par une plus grande capacité commune et universelle transmission
	le soutien de l'arbre portant désaligné ; interfère avec le déflecteur	Réaligner le support de montage à trame traverse pour éliminer interférence avec le déflecteur..
Tube cercle soudure Fracture	Solde poids situé dans le sommet de la soudure joug zone de patte	Remplacez le tuyau et rééquilibrer.
	Poids de la balance trop près de cercle soudure	Replace the tubing and rebalance.
	Mauvaise cerclesoudure	Replace the tubing and rebalance.
Arbre cassé en Courbure	ligne trop longue pour des vitesses de fonctionnement du variateur	Installer une ligne de transmission en deux parties avec un palier de support d'arbre.
	Pliage fatigue due à deux secondaires Charges	Réduire l'angle universel de fonctionnement continu en commun.

5 Montage et démontage du palier central

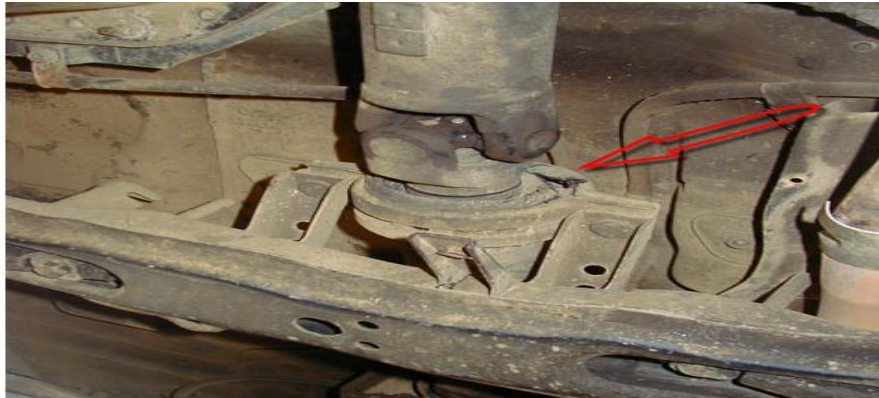


Figure II.8 : palier central déchiré.

Voici (en rouge) le palier central qui est déchiré, et que nous allons remplacer



Figure II.9 : retraitage des deux boulons et rondelles.

Commençons par retirer (en rouge) les deux écrous et rondelles, fixant le palier à la traverse arrière (clé de 14).



Figure II.10 : Enlèvement des boulons fixant le cardan au pont arrière.

Ensuite, (en rouge) les quatre boulons fixant le cardan au pont arrière.(Clé de 12 pour le boulon et de 14 pour l'écrou) il es conseillé de faire (en bleu) un repère à la craie (ou autre moyen),sur le cardan et sur le pont, afin de remettre, le cardan dans la position initiale,et ainsi éviter le risque de vibration de roulage après remontage.

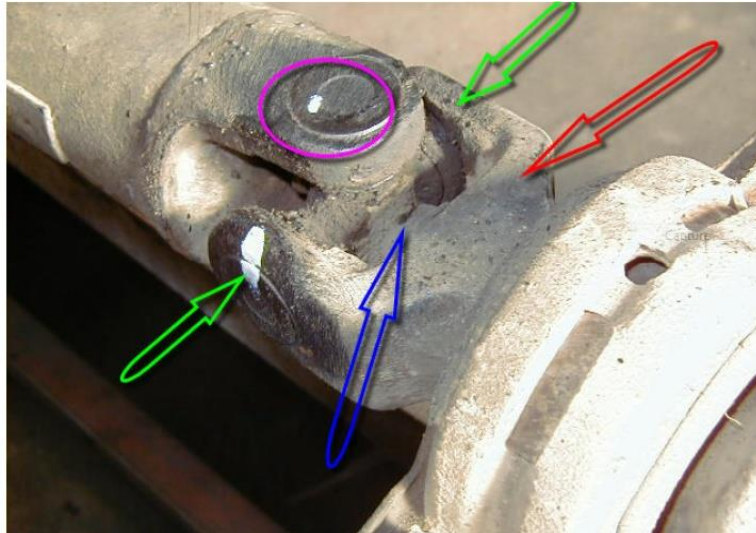


Figure II.11 : Retirage de l'écrou central et la demi mâchoire.

Nous devons donc retirer (en bleu) l'écrou central ainsi que (en rouge) la demi-mâchoire pour arriver au palier central.Pour cela il nous faut démonter le croisillon. On fait (en vert) un repère sur un des deux roulements de croisillon que je vais retirer, afin de le remettre à la même position. Et également un autre repère sur le roulement ce trouvant en haut.

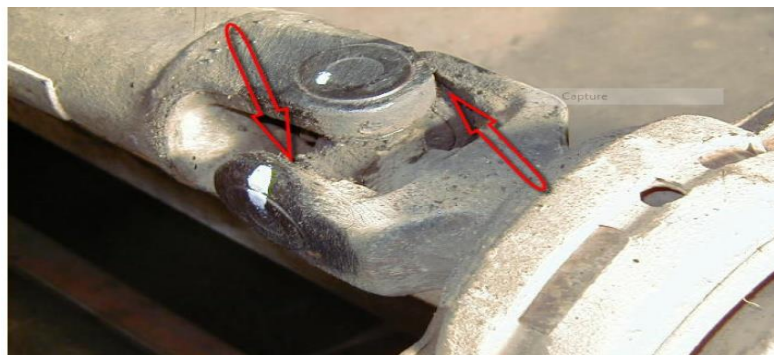


Figure II.12 : Retirage des clips de maintien.

Pour retirer les deux roulements du croisillon, retirer (en rouge) les deux clips de maintien.Ici, deux clips intérieur, ce retirant avec un petit tournevis et un marteau. (Attention que de pas les perdre, ça peu sauter loin un clip,...)

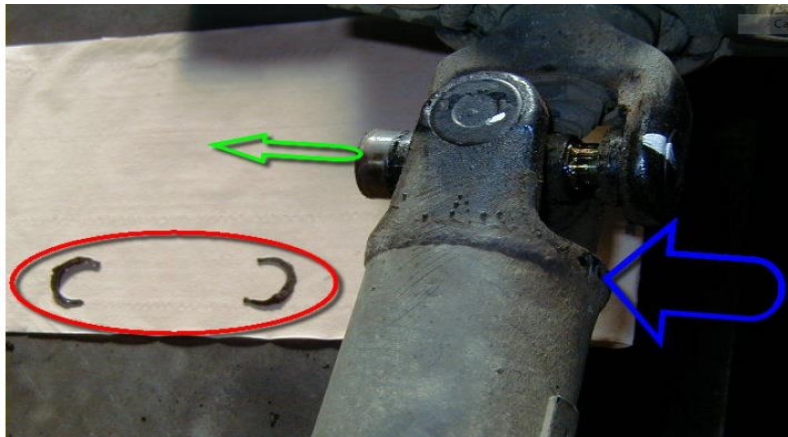


Figure II.13 : enlèvement de roulement.

On peut percevoir (en rouge) les deux clips. (En vert) pour faire sortir le roulement dans le sens de la flèche verte, je donne un bon coup de marteau comme l'indique la flèche bleue. Idem dans l'autre sens pour l'autre roulement.

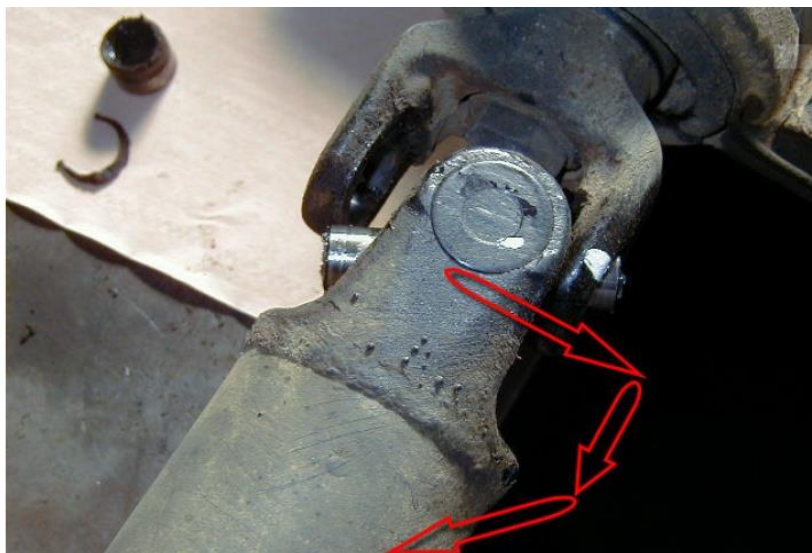


Figure II.14 : Faire sortir le croisillon de la demi-mâchoire.

Une fois les deux roulements sortis, (et poser pour ne pas les mélanger) il faut sortir le croisillon de la demi-mâchoire. Pour cela, (en rouge) faire suivre le mouvement indiqué par les flèches,

- 1- déplacer le cardan vers la droite.
- 2- le reculer pour sortir un côté, (position de la photo)
- 3- le reculer en oblique vers la droite.

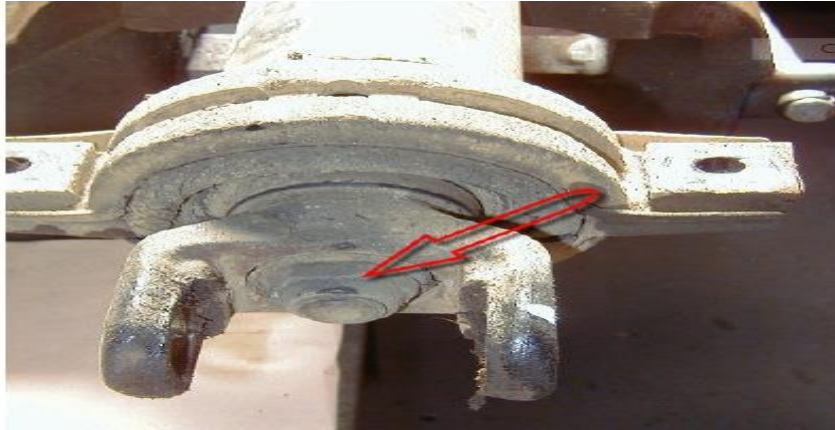


Figure II.15 : Enlèvement du boulon central et la demi- mâchoire.

Nous pouvons maintenant retirer (en rouge) le boulon central et retirer la demi-mâchoire.

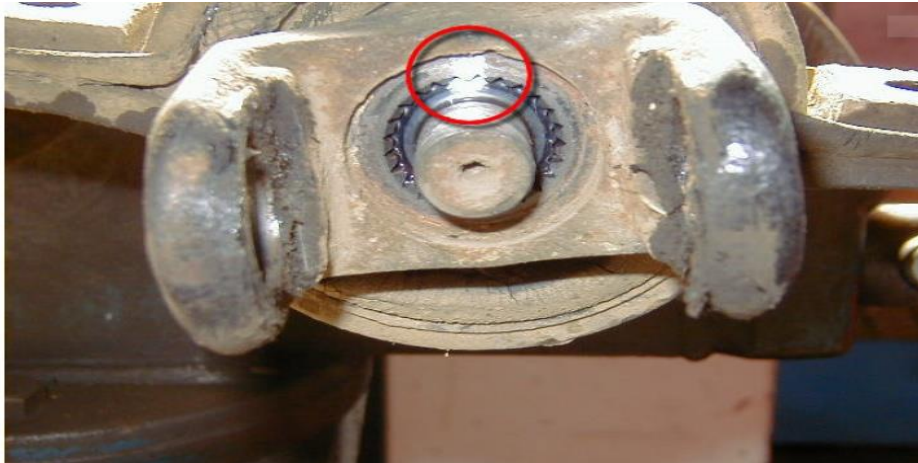


Figure II.16: Le repère pour positionner la demi-mâchoire.

Ici aussi, (en rouge) on fait un repère, afin de repositionner la demi-mâchoire dans la même position. Ensuite je peu retirer la demi-mâchoire.



Figure II.17 : Enlèvement du palier central.

On retire ensuite le palier central. (en rouge) En tirant un coup sec à l'aide des deux fixations. (dans certains cas, il faut un arrache pignon pour le sortir)



Figure II.18 : La pose du palier central.

Pose du nouveau palier central. Attention au sens, le côté avec (en rouge) le bourrage vas du côté Boite de Transfert. (Côté petit cardan) Le pousser a la main sans forcer (ni abimer le bourrage).

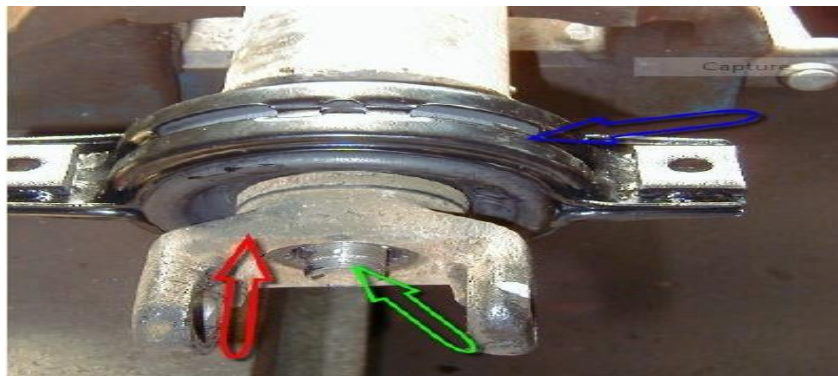


Figure II.19 : La mise en place du palier central.

Pour mettre (en bleu) le palier central en place, on se sert de (en rouge) la demi-mâchoire que on met en place en serrant (en vert) l'écrou central. Et ainsi tout ce met en place sans effort. (Attention de remonter la demi-mâchoire face à son repère)

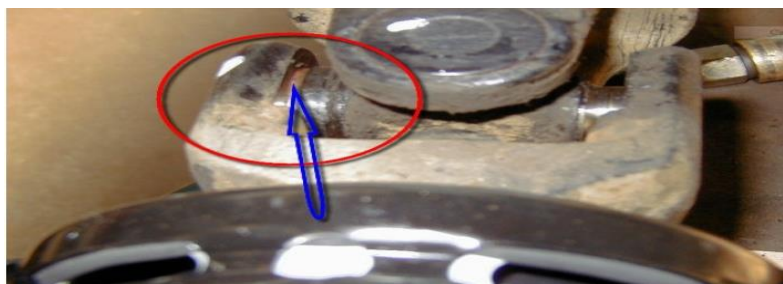


Figure II.20 : La remette de l'autre demi-cardan.

Remettre l'autre demi-cardan en faisant les manœuvres inverse du démontage. Poser ensuite les roulements à leurs place (Attention encore une fois au repères) et remettre (en bleu) les clips en place dans leur gorges.

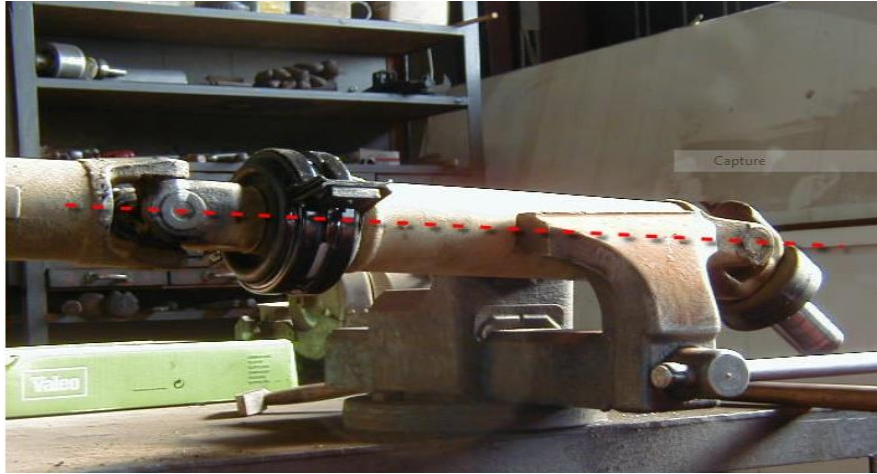


Figure II.21 : Vérification de l'alignement de l'arbre de transmission.

Ici on peut contrôler que le cardan est bien remonté, on vérifie (en rouge) l'alignement des cardans sur une même ligne droite. (Le troisième croisillon hors photo, ce trouvant également dans cet alignement.)



Figure II.22 : tête de pont avec empreinte.

L'empreinte sur la tête de pont aide à repositionner le cardan à la bonne place. (Ainsi que le repère fait avant de démonter)



Figure II.23 : positionner le palier.

Attention de bien positionner le palier, les deux (en bleu) renforts de fixation vers le bas, et (en rouge) le trou d'évacuation vers le bas [12].

Conclusion

Ce chapitre est constitué des rappels et de définitions de notions liées aux paliers centraux, dans le but de donner une vision assez large sur les travaux effectués dans le cadre des paliers et les défaillances, causes et conséquences de la défaillance de palier central et le montage et le démontage de l'arbre de transmission pour changer le palier central.

Chapitre 3

Formulation

tridimensionnelle de

l'arbre

1. Introduction

Dans ce chapitre on a fait des formulations d'un arbre en trois dimensions en donnant la relation de déformation et des contraintes et on a obtenu l'énergie cinétique et l'énergie de déformation puis on a déterminé les équations du mouvement.

2. Relation contrainte-déplacement :

Relation déformation-déplacements linéaires dans le cas de l'élasticité tridimensionnelle :

$$\varepsilon_{xx} = \frac{\partial U}{\partial x}; \varepsilon_{yy} = \frac{\partial V}{\partial y}; \varepsilon_{zz} = \frac{\partial W}{\partial z}; \gamma_{xy} = \frac{\partial U}{\partial y} + \frac{\partial V}{\partial x}; \gamma_{yz} = \frac{\partial W}{\partial y} + \frac{\partial V}{\partial z}$$

$$\gamma_{xz} = \frac{\partial U}{\partial z} + \frac{\partial W}{\partial x}$$

Relations de contraintes déformations dans le cas de l'élasticité tridimensionnelle :

$$\left. \begin{aligned} \sigma_{11} &= \lambda (\varepsilon_{11} + \varepsilon_{22} + \varepsilon_{33}) + 2 \cdot \mu \cdot \varepsilon_{11} \\ \sigma_{22} &= \lambda (\varepsilon_{11} + \varepsilon_{22} + \varepsilon_{33}) + 2 \cdot \mu \cdot \varepsilon_{22} \\ \sigma_{33} &= \lambda (\varepsilon_{11} + \varepsilon_{22} + \varepsilon_{33}) + 2 \cdot \mu \cdot \varepsilon_{33} \\ \sigma_{23} &= 2 \cdot \mu \cdot \varepsilon_{23} \\ \sigma_{13} &= 2 \cdot \mu \cdot \varepsilon_{13} \\ \sigma_{12} &= 2 \cdot \mu \cdot \varepsilon_{12} \end{aligned} \right\} \quad (1.1)$$

la dernière équation (1.1) peut être exprimé en fonction de la déformation angulaire γ_{ij}

ce qui donne en utilisant la notation X,Y,Z :

$$\left. \begin{aligned} \sigma_{xx} &= \lambda (\varepsilon_{xx} + \varepsilon_{yy} + \varepsilon_{zz}) + 2 \cdot \mu \cdot \varepsilon_{xx} \\ \sigma_{yy} &= \lambda (\varepsilon_{xx} + \varepsilon_{yy} + \varepsilon_{zz}) + 2 \cdot \mu \cdot \varepsilon_{yy} \\ \sigma_{zz} &= \lambda (\varepsilon_{xx} + \varepsilon_{yy} + \varepsilon_{zz}) + 2 \cdot \mu \cdot \varepsilon_{zz} \\ \sigma_{yz} &= \mu \cdot \gamma_{yz} \\ \sigma_{xz} &= \mu \cdot \gamma_{xz} \\ \sigma_{xy} &= \mu \cdot \gamma_{xy} \end{aligned} \right\} \quad (1.2)$$

3. Énergie de déformation :

L'énergie de déformation est donnée par la relation :

$$E_d = \frac{1}{2} \int_V \sigma^{ij} \varepsilon_{ij} dV \quad (1.3)$$

Sous forme matricielle, devient :

$$E_d = \frac{1}{2} \int_v \sigma^T \varepsilon dV \quad (1.4)$$

Pour un matériau isotrope et dans le repère Cartésien l'équation devient :

$$\sigma = D. \varepsilon \quad (1.5)$$

Où D est la matrice d'élasticité donnée par :

$$D = \frac{E}{(1+\nu)(1-2\nu)} \begin{vmatrix} 1-\nu & \nu & \nu & 0 & 0 & 0 \\ & 1-\nu & \nu & 0 & 0 & 0 \\ & & 1-\nu & 0 & 0 & 0 \\ & & & \frac{1-2\nu}{2} & 0 & 0 \\ & \text{sym} & & & \frac{1-2\nu}{2} & 0 \\ & & & & & \frac{1-2\nu}{2} \end{vmatrix} \quad (1.6)$$

$$\varepsilon = C. \sigma \quad (1.7)$$

Où C la matrice de la souplesse donnée par :

$$C = \frac{1}{E} \begin{vmatrix} 1 & -\nu & -\nu & 0 & 0 & 0 \\ -\nu & 1 & -\nu & 0 & 0 & 0 \\ -\nu & -\nu & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & d & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & d & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & d \end{vmatrix} \quad (1.8)$$

Avec $d = 2(1 + \nu)$

La substitution de (1.5) dans (1.4) donne l'équation de l'énergie de déformation en fonction de la matrice d'élasticité et du vecteur de déformation :

$$E_d = \frac{1}{2} \int_v \varepsilon^T . C. \varepsilon dV \quad (1.9)$$

Le vecteur de déformation peut être écrit sous forme d'un produit d'une matrice différentielle et du vecteur de déplacement :

$$\varepsilon = \begin{Bmatrix} \varepsilon_{xx} \\ \varepsilon_{yy} \\ \varepsilon_{zz} \\ \gamma_{xy} \\ \gamma_{xz} \\ \gamma_{yz} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \frac{\partial u}{\partial y} \\ \frac{\partial v}{\partial y} \\ \frac{\partial w}{\partial z} \\ \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \\ \frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} \\ \frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y} \end{Bmatrix} = L \cdot U \quad (1.10)$$

Où L est un opérateur différentielle et U est le vecteur déplacement donnés par :

$$L = \begin{vmatrix} \frac{\partial}{\partial x} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{\partial}{\partial y} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{\partial}{\partial z} \\ \frac{\partial}{\partial y} & \frac{\partial u}{\partial x} & 0 \\ \frac{\partial}{\partial z} & 0 & \frac{\partial u}{\partial x} \\ 0 & \frac{\partial}{\partial z} & \frac{\partial}{\partial y} \end{vmatrix} \quad (1.11)$$

$$U = \begin{Bmatrix} u \\ v \\ w \end{Bmatrix} \quad (1.12)$$

Le remplacement de l'équation (1.10) dans l'équation (1.9) donne l'expression de l'énergie de déformation en fonction du champ de déplacement :

$$E_d = \frac{1}{2} \int_v U^T L^T C L U dV \quad (1.13)$$

4. Énergie cinétique :

L'expression de l'énergie cinétique se présente sous la forme :

$$E_c = \frac{1}{2} \rho \int_v (\dot{u}^2 + \dot{v}^2 + \dot{w}^2) dV \quad (1.14)$$

Cette expression sous forme matricielle est donnée par :

$$E_c = \frac{1}{2} \rho \int_v \dot{U}^T \cdot \dot{U} dV \quad (1.15)$$

Où \dot{U} est le vecteur des vitesses et ρ est la masse volumique du matériau.

5. Détermination des équations du mouvement :

Soit L_g la fonction de Lagrange définie à partir de l'énergie cinétique E_c (1.15) et de l'énergie de déformation E_d (1.13), alors :

$$L_g = E_c - E_d \quad (1.16)$$

Cette fonction permet d'obtenir les équations du mouvement de l'arbre de transmission par la formule suivante (appelée formule de Lagrange) :

$$\frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{\partial E_c}{\partial \dot{q}} \right) + \frac{\partial E_d}{\partial q} = 0 \quad (1.17)$$

Où \mathbf{q} est le vecteur des coordonnées généralisées et $\dot{\mathbf{q}}$ est le vecteur des vitesses généralisées :

Pour les petits mouvements des corps élastiques les énergies cinétique et de déformation s'expriment, respectivement, comme forme quadratique des vitesses et des déplacements par :

$$E_c = \frac{1}{2} \dot{\mathbf{q}}^T \mathbf{M} \dot{\mathbf{q}} \quad (1.18)$$

$$E_d = \frac{1}{2} \mathbf{q}^T \mathbf{K} \mathbf{q} \quad (1.19)$$

Où \mathbf{M} est la matrice masse ; et \mathbf{K} est la matrice de rigidité.

Les équations du mouvement libres s'écrivent en fonction de déplacement et d'accélération généralisées :

$$\mathbf{M} \ddot{\mathbf{q}} + \mathbf{K} \mathbf{q} = 0 \quad (1.20)$$

Dont la solution est une fonction sinusoïdale du type $\mathbf{q} = \mathbf{A} \cos \omega t$ ce qui permet

$$\text{d'écrire : } [\mathbf{K} - \omega^2 \cdot \mathbf{M}] \mathbf{A} = 0 \quad (1.21)$$

Où ω est la pulsation propre du système vibratoire.

Chapitre 4

Modélisation et simulation d'un arbre de transmission avec palier central

Introduction

Dans ce chapitre nous allons réaliser une pièce sur le logiciel SOLIDWORKS pour résoudre le problème. La conception du support a été réalisée par une conception CAO sous le logiciel Solidworks version 2015. Par conséquent, ce chapitre a été introduit par une première partie qui traite la méthode de la conception en 3D du support en donnant quelques détails de la conception et une deuxième partie qui traite l'étude de simulation.

1. Définition du logiciel Solidworks :

L'utilisation du logiciel solidworks a été choisi vu que je le maîtrise et du fait qu'il est capable de réaliser les différents formes de notre support ; de plus il nous permet d'enregistrer le dessin sous les différents formats (DXF, STL, STEEP, etc...). Solidworks est un outil de conception de modélisation volumique paramétrée basée sur des fonctions, associatif. Modèle géométrique le plus complet utilisé dans les systèmes de CAO, utilisant les informations qui relient les géométries du modèle entre elles (exemple : telle surface se rencontre avec telle arête). Paramétrique, les cotes et les relations utilisées pour créer une fonction sont saisies et stockées dans le modèle ; ce qui permet de les changer rapidement et sans difficulté, (Changement de la cote 76 en 116 par exemple) basée sur des fonctions, en effet un modèle SolidWorks est formé d'éléments individuels appelés fonctions. Ce sont des fonctions géométriques telles que les bossages, les enlèvements de matière, les perçages, les congés, les chanfreins [17].

2. Historique

Créé en 1993 par l'éditeur américain éponyme, SolidWorks a été acheté le 24 juin 1997 par la société Dassault Systèmes. Parmi les plus grandes organisations utilisant SolidWorks, on peut citer Michelin, AREVA, PatekPhilippe, MegaBloks, Axiome, ME2C, SACMO, Le Boulch, Robert Renaud et le Ministère de l'Éducation nationale français [18].

3. Fonctionnement :

Solidworks est un modéleur 3D utilisant la conception paramétrique. Il génère 3 types de fichiers relatifs à trois concepts de base : la pièce, l'assemblage et la mise en plan. Ces fichiers sont en relation. Toute modification à quelque niveau que ce soit est répercutée vers tous les fichiers concernés.

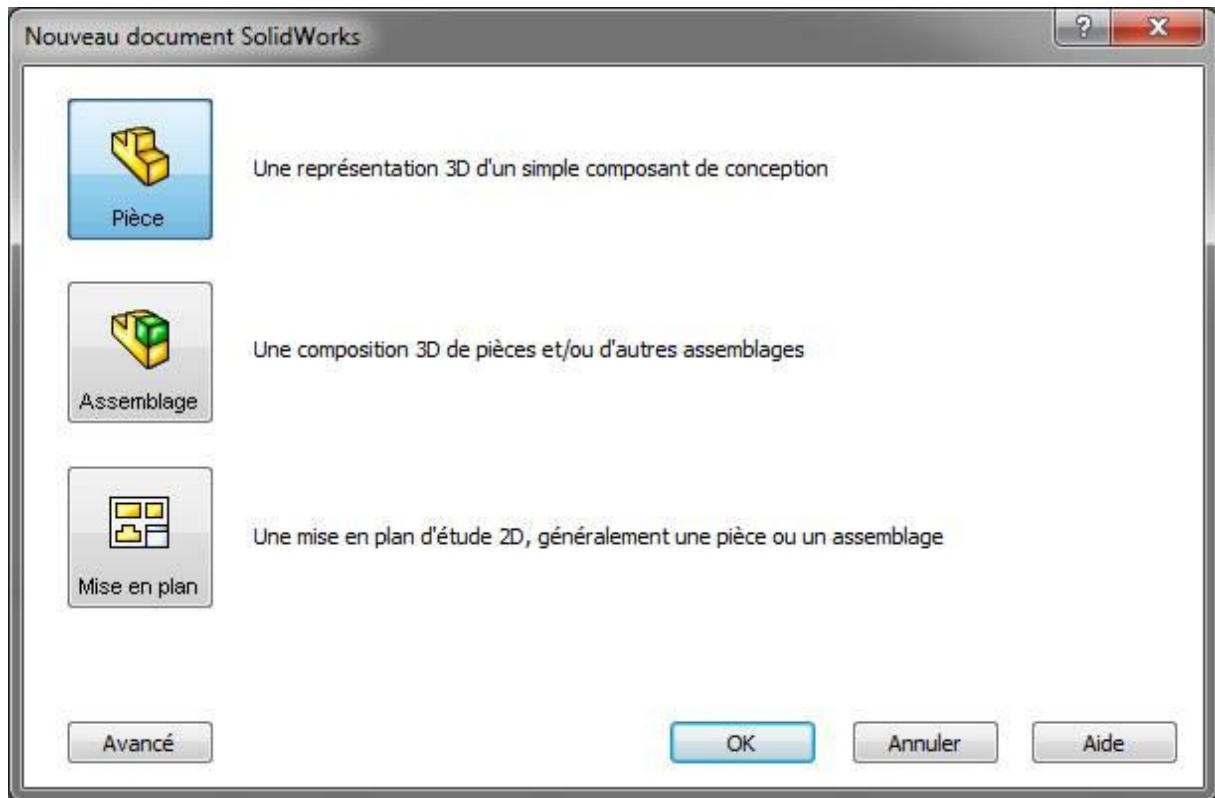


Figure IV.1 : Les trois concepts de base (SOLIDWORKS).

Un dossier complet contenant l'ensemble des relatifs à un même système constitue une maquette numérique. De nombreux logiciels viennent compléter l'éditeur Solidworks. Des utilitaires orientés métiers (tôlerie, bois, BTP...), mais aussi des applications de simulation mécanique ou d'image de synthèse travaillent à partir des éléments de la maquette virtuelle [19].

4. Pièces

La pièce est l'objet 3D monobloc. La modélisation d'une telle entité dépendra de la culture de l'utilisateur. Comme de nombreux logiciels conviviaux, SolidWorks permet d'aboutir à un même résultat apparent par des voies souvent différentes. C'est lors de la retouche de ces fichiers ou de leur exploitation qu'on appréciera la bonne méthode. Une pièce est la réunion d'un ensemble de fonctions volumiques avec des relations d'antériorité, des géométriques, des relations booléennes (ajout retrait)... Cette organisation est rappelée sur l'arbre de construction. Chaque ligne est associée à une fonction qu'on peut renommer à sa guise [18].

4.1. Conception de l'arbre de transmission avec palier central d'un camion

- La première pièce : conception de l'arbre 1

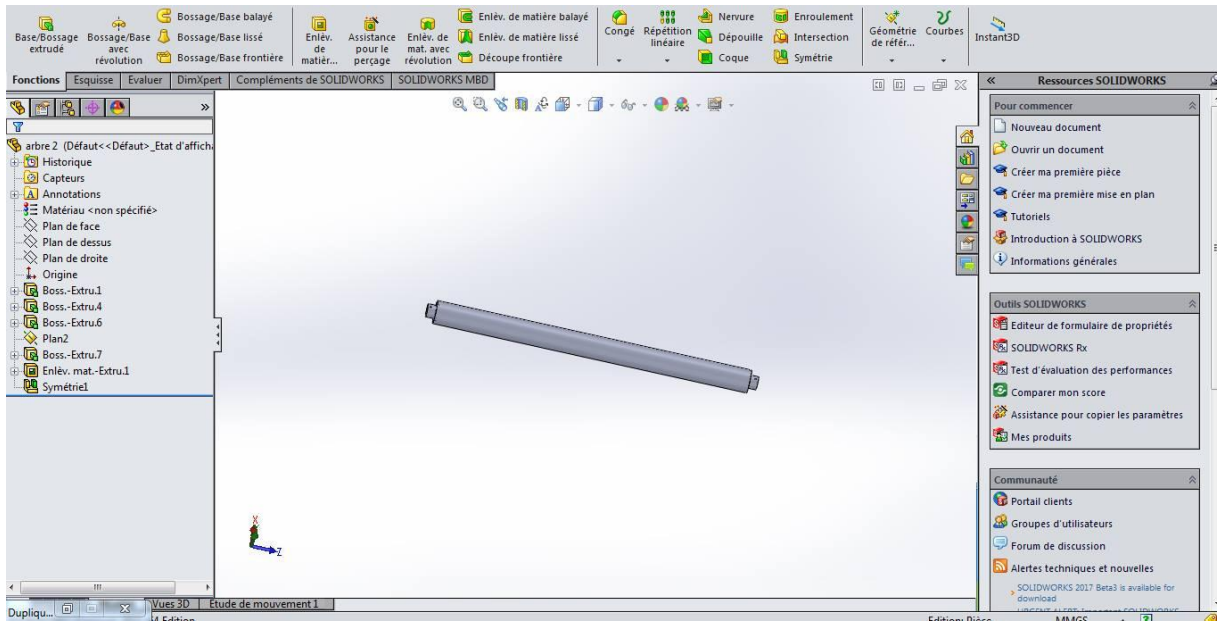


Figure IV.2 : Arbre 1

- La deuxième pièce : conception de croisaiant

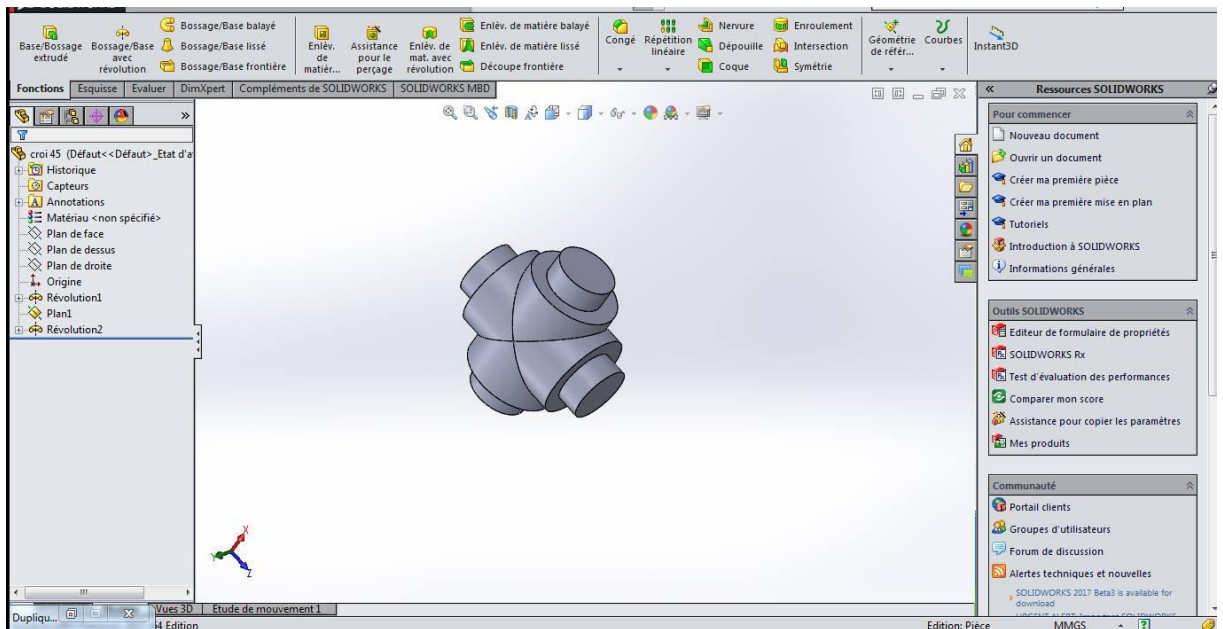


Figure IV.3 : Crosillon.

-La troisième pièce : conception de U joint

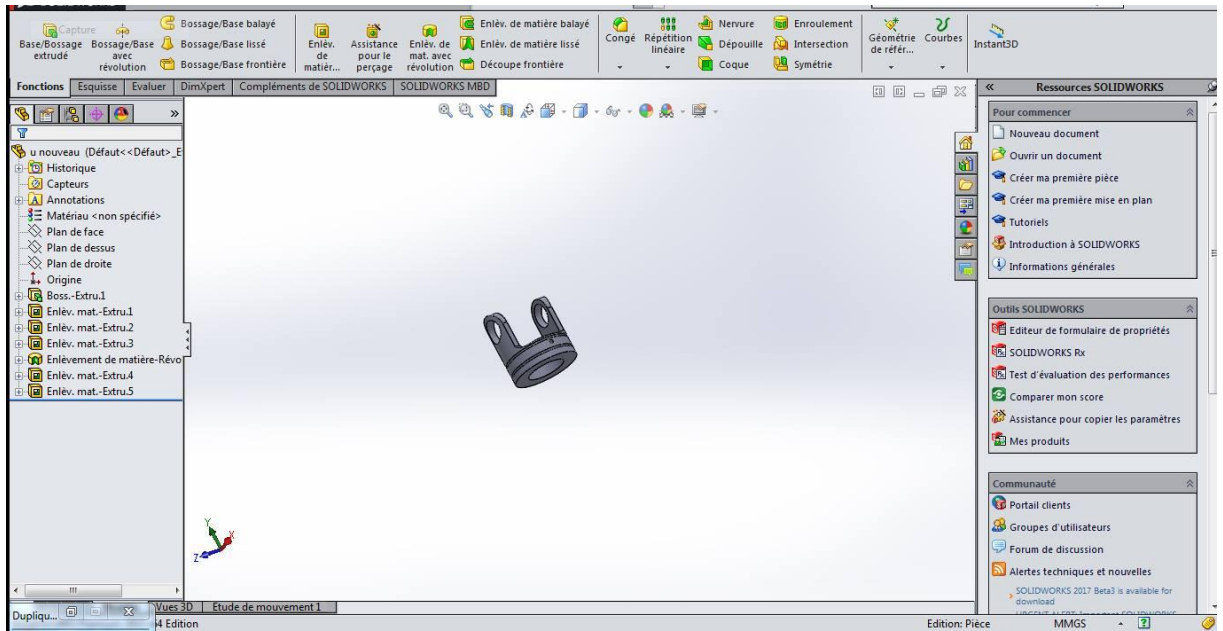


Figure IV.4 : U joint cardan.

-La quatrième pièce : Conception de l'arbre 2

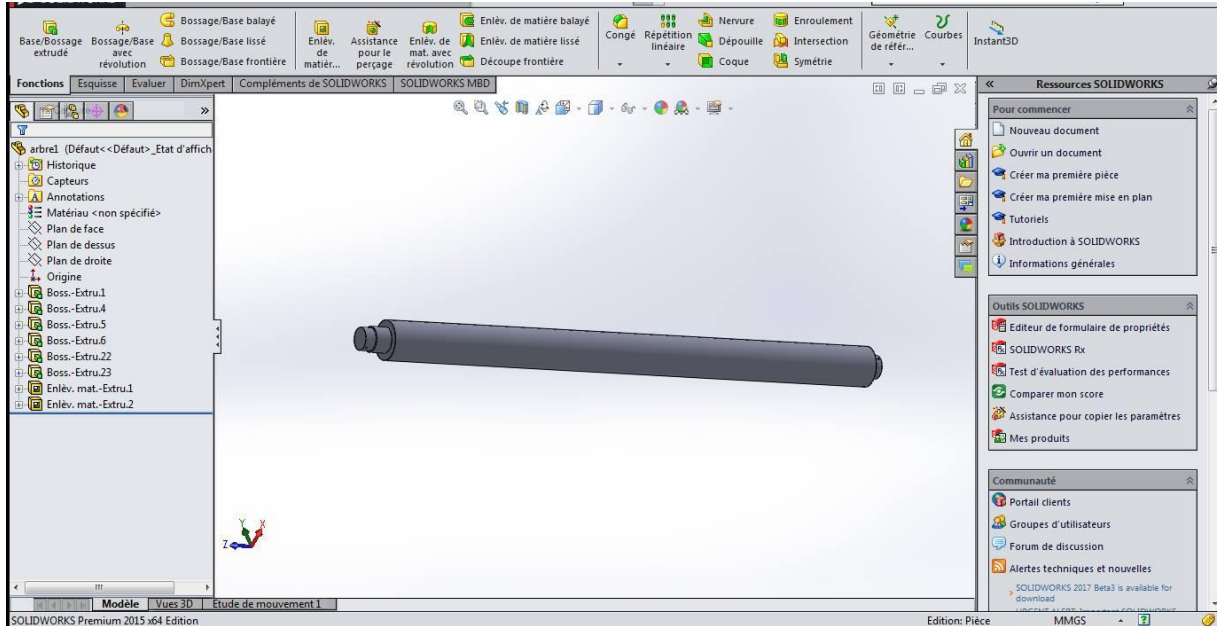


Figure IV.5 : arbre 2

-La quinzième pièce : Conception de U joint de l'extrémité

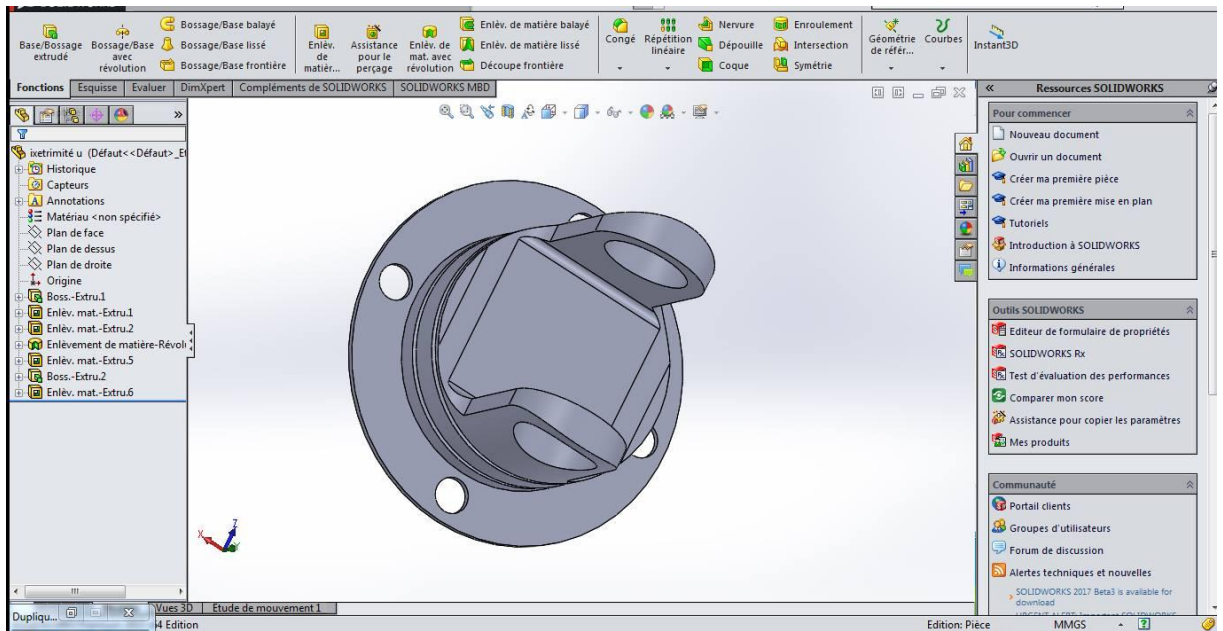


Figure IV.6 : U joint de l'extrémité

-La sixième pièce : conception de la goupille

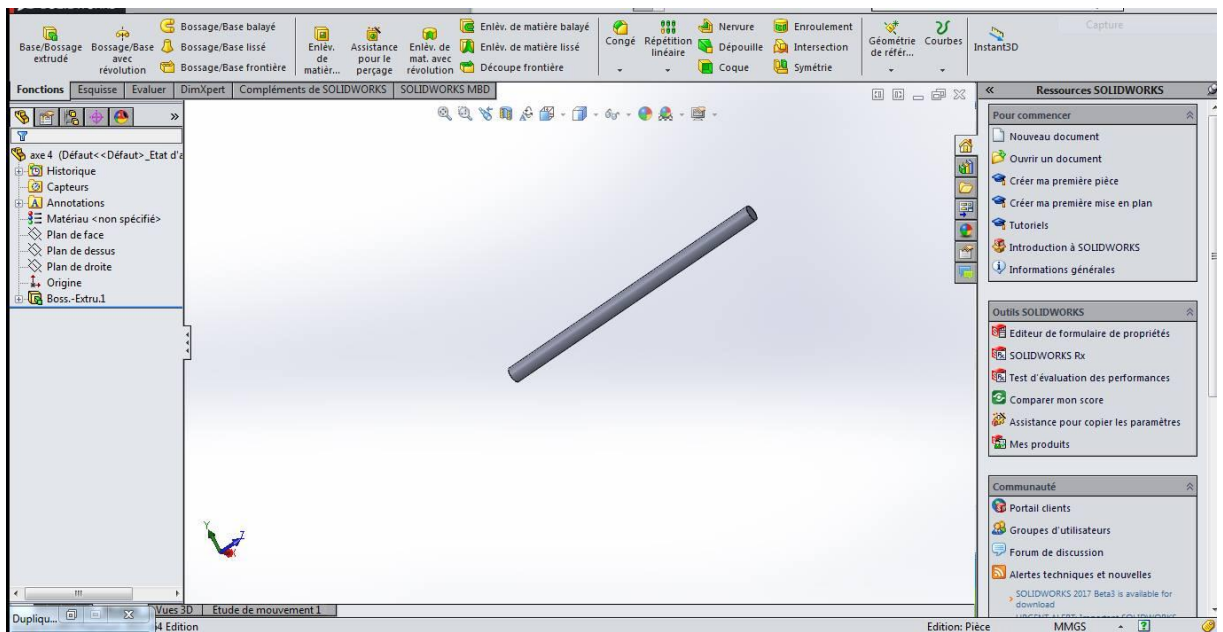


Figure IV.7 : Goupille

- La septième pièce : roulement de palier central.

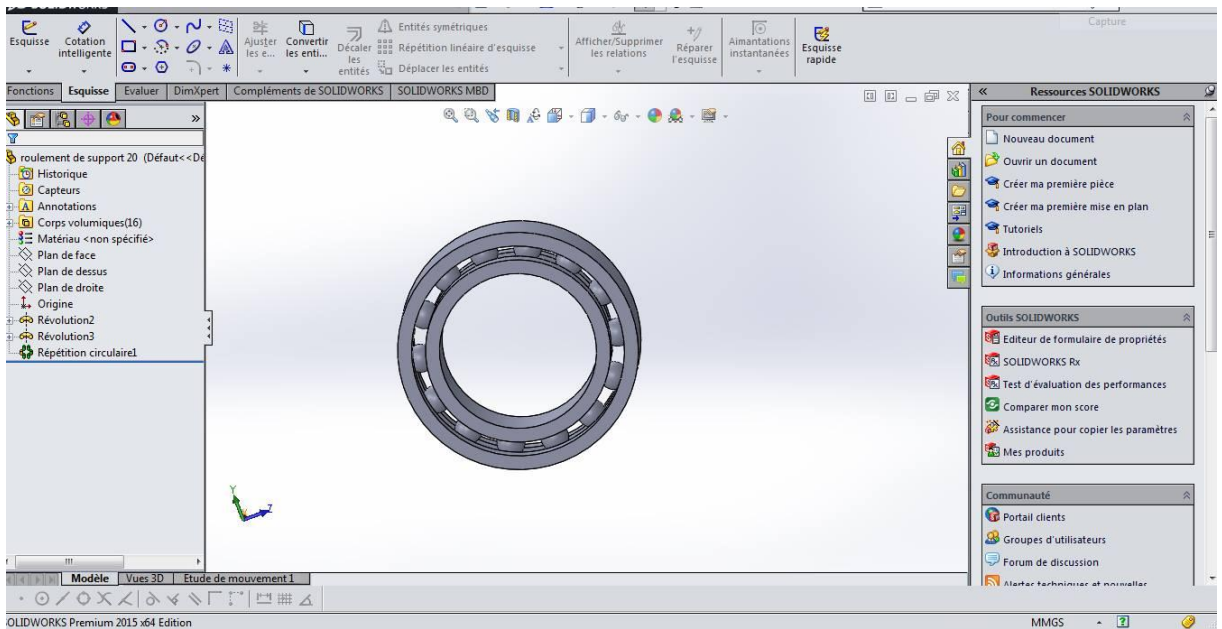


Figure IV.8 : roulement du palier central.

- La huitième pièce : caoutchouc de palier central.

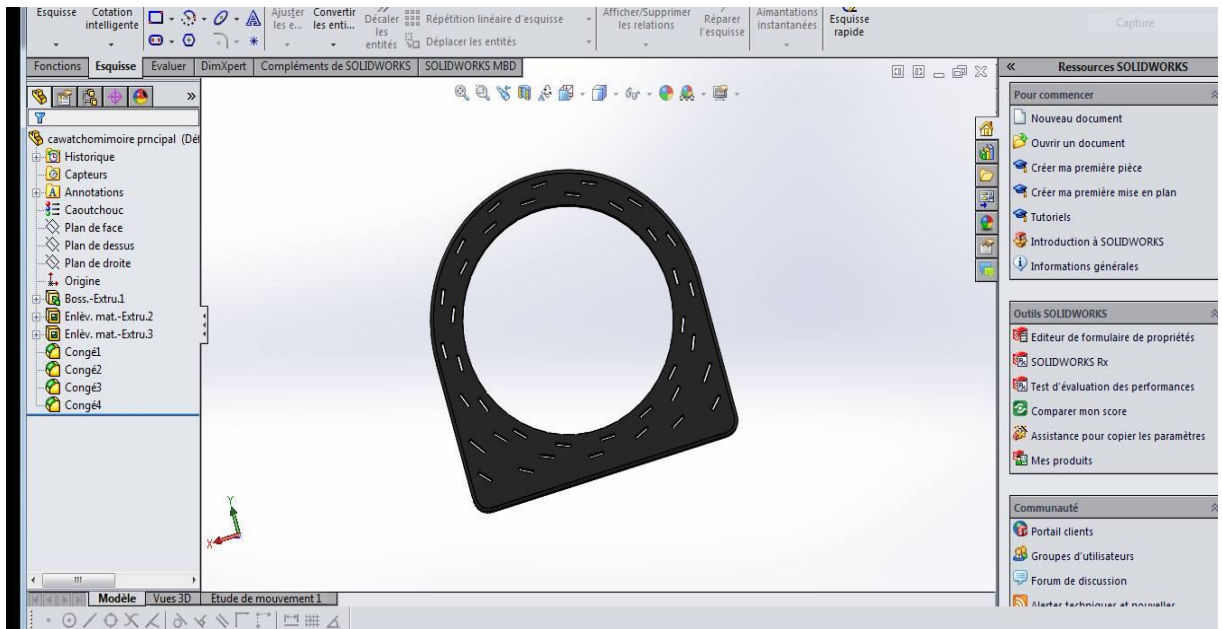


Figure IV.9 : caoutchouc de palier central.

- La neuvième pièce :le support de palier central.

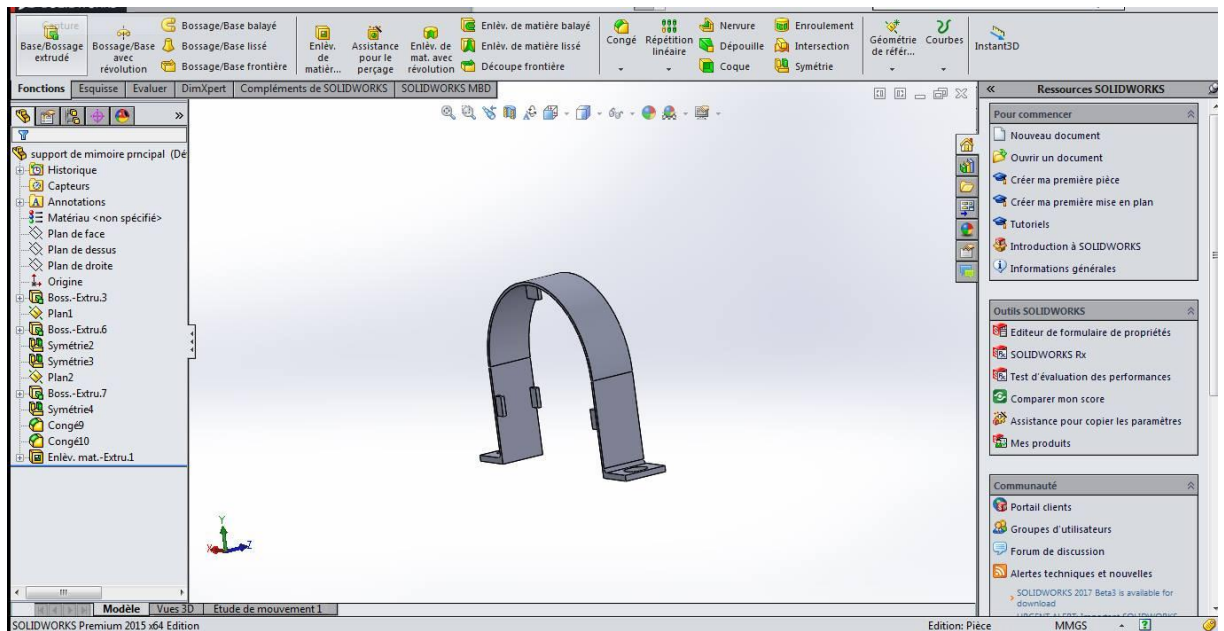


Figure IV.10 : support de palier central.

5. Assemblages

Les assemblages sont obtenus par la juxtaposition de pièces. La mise en position de pièces est définie par un ensemble des contraintes d'assemblage associant, deux entités respectives par une relation géométrique (coïncidence, tangence, coaxialité...). Dans une certaine mesure, ces associations de contraintes s'apparentent aux liaisons mécaniques entre les pièces.

Le mécanisme monté, s'il possède encore des mobilités, peut être manipulé virtuellement. On peut alors aisément procéder à des réglages à l'aide des différents outils disponibles (déplacement composants, détection de collision ou d'interférence, mesure des jeux, etc.) [18].

Étapes de l'assemblage :

- a. Ajouter des pièces dans un assemblage
- b. Déplacer et faire pivoter des composants dans un assemblage
- c. On peut positionner et orienter les composants à l'aide de contraintes qui créent des relations entre les composants[19].

On obtient l'assemblage suivant :

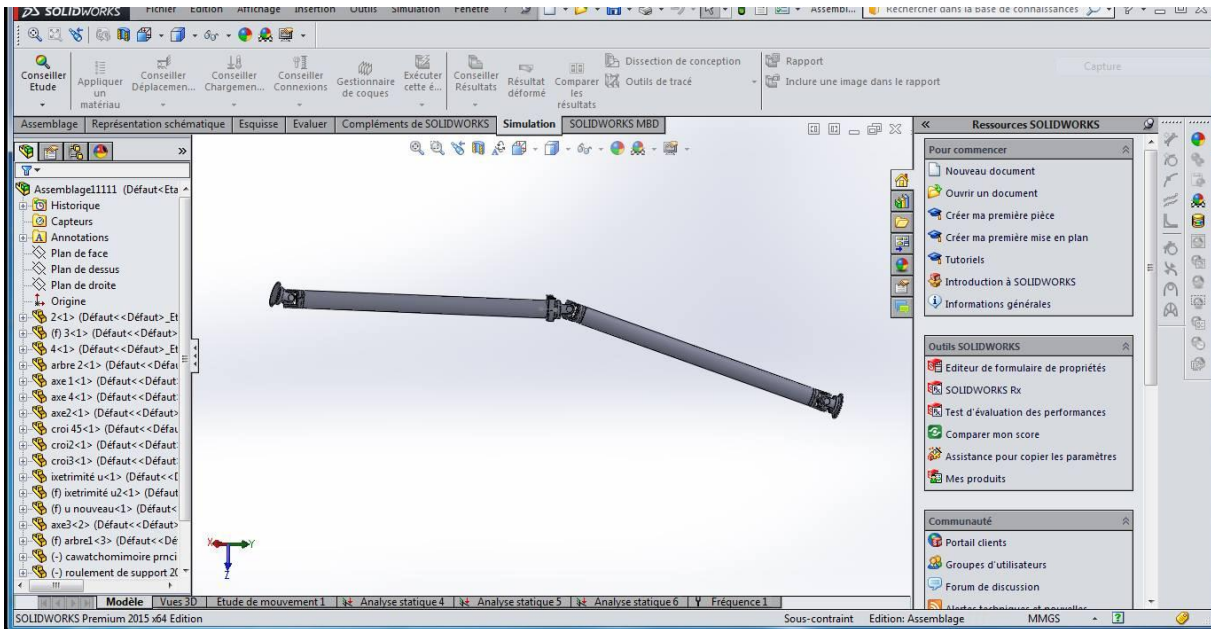


Figure IV.11 : Assemblage de l'arbre de transmission avec palier central

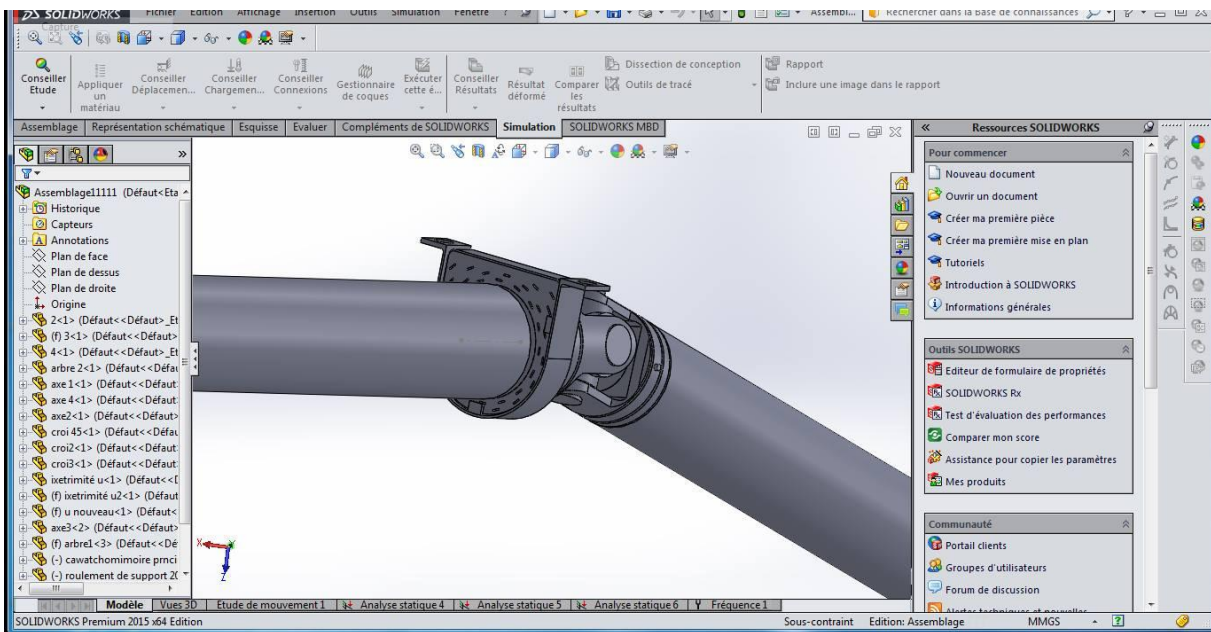


Figure IV.12 : Assemblage de l'arbre de transmission au niveau palier central

6. Mise en plan

Une fois les pièces ou assemblages créés, il est possible de générer automatiquement les mises en plan (représentation 2D) avec insertion automatique des côtes et liaisons entre les vues 2D et le modèle 3D.

De plus, des fonctions d'habillage (texte, hachure, cotation,...) permettent à l'utilisateur d'annoter rapidement un plan.

Pour faire des mises en plan, il est tout d'abord nécessaire d'avoir des fonds de plan pour y projeter les dessins. Ces fonds de plans ont un format (A4, A3,...), une orientation (portrait ou paysage) et contiennent éventuellement un cartouche.

Un certain nombre de fonds de plan de base sont proposés à l'origine, mais il est préférable, avant de commencer, de personnaliser les fonds en plan que l'on utilisera par la suite[18].

6.1. Étapes de création d'une mise en plan

- a. Ouvrir un modèle de mise en plan et éditer un fond de plan
- b. Insérer des vues standard d'un modèle de pièce
- c. Ajouter des annotations de modèle et de référence
- d. Ajouter une autre feuille de mise en plan
- e. Insérer une vue nommée f. Imprimer la mise en plan [17].

7. Simulation de l'arbre de transmission avec palier central

7.1 Maillage du modèle

Lors du maillage d'une pièce ou d'un assemblage à l'aide d'éléments volumiques, le logiciel génère l'un des types suivants d'éléments, selon les options de maillage actives pour l'étude :

Maillage qualité moyenne : Le mailleur automatique génère des éléments tétraédriques linéaires volumiques.

Maillage haute qualité : Le mailleur automatique génère des éléments tétraédriques paraboliques volumiques. Les éléments linéaires sont aussi appelés éléments du premier ordre ou d'ordre inférieur. Les éléments paraboliques sont aussi appelés éléments du second ordre ou d'ordre supérieur.

Un élément tétraédrique linéaire est défini par 4 nœuds aux sommets et 6 arêtes droites qui les connectent. Un élément tétraédrique parabolique est défini par 4 nœuds aux sommets, 6 nœuds médians et 6 arêtes. Une représentation schématisée des éléments volumiques tétraédriques linéaires et paraboliques est donnée dans les figures suivantes :

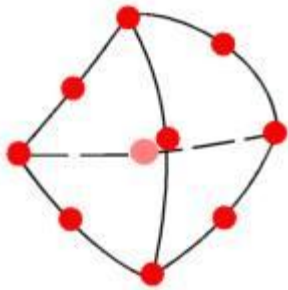


Figure IV.13 : Élément volumique parabolique.

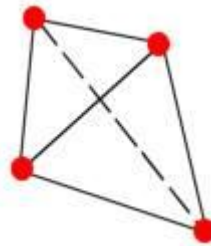


Figure IV.14 : Élément volumique linéaire.

Dans cette simulation on utilise le maillage haute qualité donc élément volumique parabolique.

Tableau IV.1 : Détails de maillage.

Type de maillage	Maillage volumique
Mailleur utilisé	Maillage standard
Transition automatique	Désactivé
Boucles automatiques de maillage	Désactivé
Point de jacobien	4 points
Taille d'élément	7.39581 mm
Tolérance	0.36979 mm
Qualité de maillage	Haute
Nombre totale de nœuds	49501
Nombre total d'éléments	25231
Aspect ratio maximum	7.2962
Pourcentage d'élément ayant aspect ratio < 3	11
Pourcentage d'élément ayant aspect ratio > 10	0
Pourcentage distordus (jacobienne)	0
Durée de création de maillage (hh :mm :ss)	00 :02 :01
Nom d'ordinateur	ASUS

Le maillage de modèle traité est représenté dans les figures suivantes :

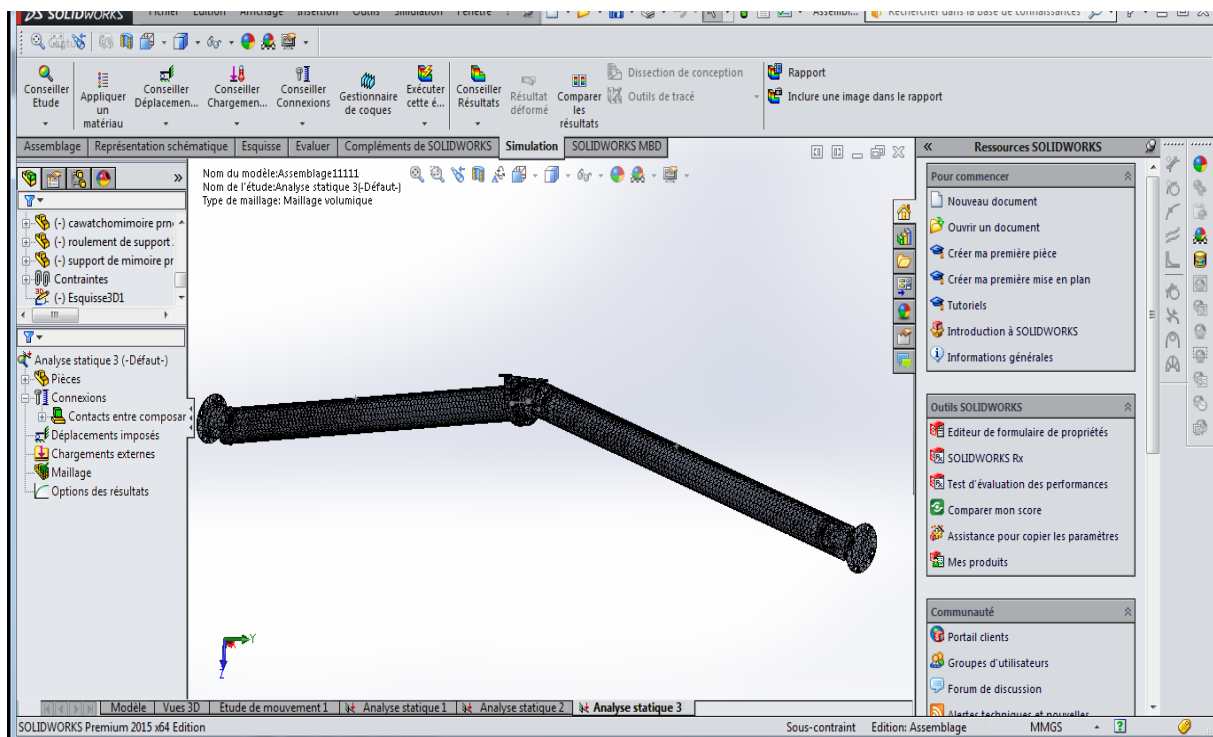


Figure VI.15: Maillage du modèle

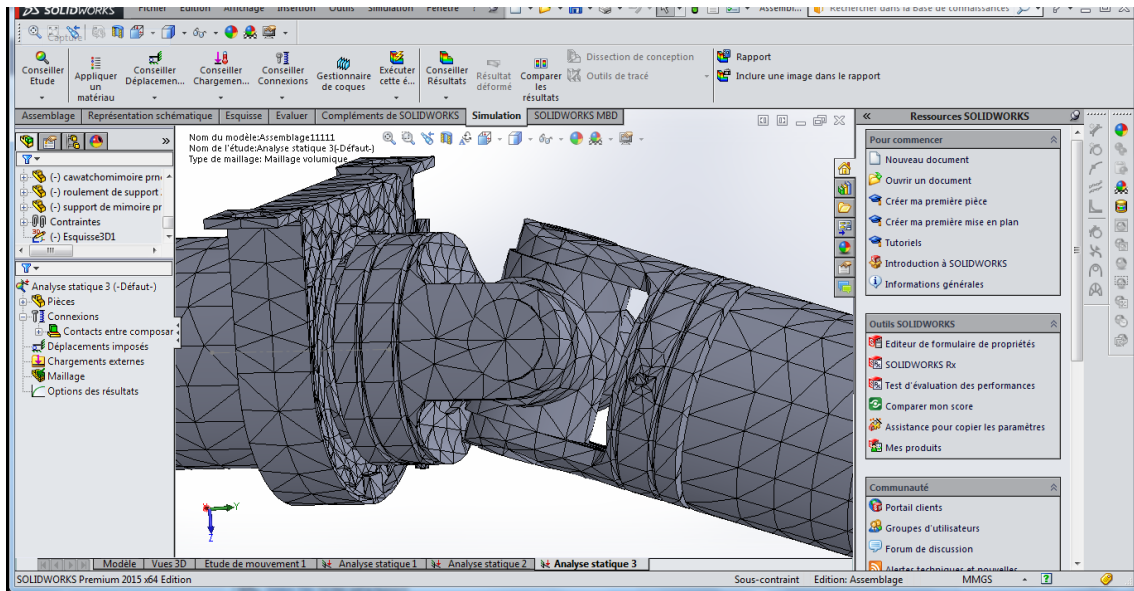


Figure VI.16 : Maillage de palier central

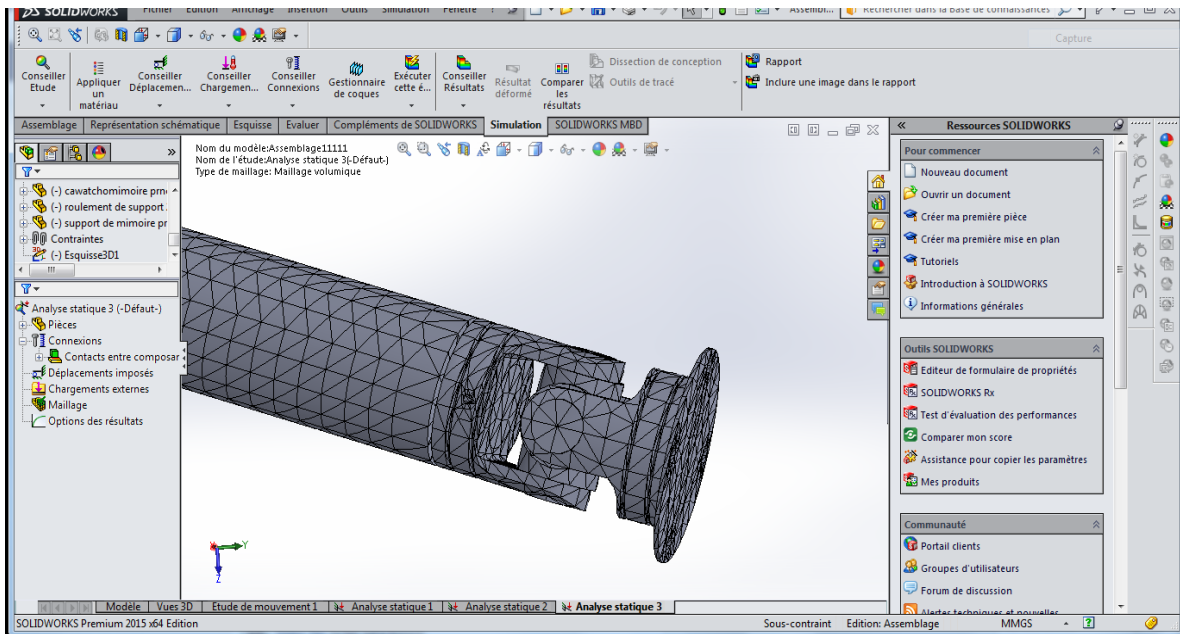


Figure VI.17 : Maillage de joint cardan coté de pont arrière

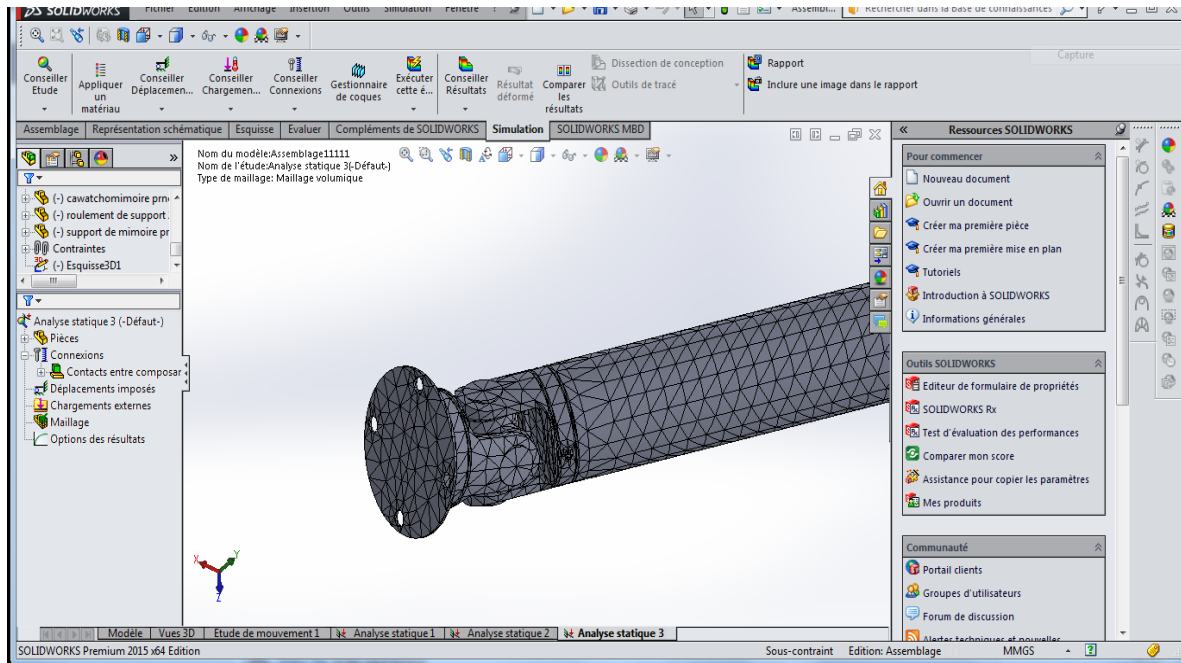


Figure VI.18 : Joint cardon coté boîte de vitesse

7.2 Résultats et interprétation

Les résultats obtenus après la simulation statique et fréquentiel du modèle représentent la distribution de la contrainte déplacement et déformation sur l'arbre de transmission et le palier centrale.

On a utilisé le matériau AISI 304 qui a les caractéristiques décrit dans le tableau suivant :

Tableau IV.2: propriétés de matériau AISI 304.

Propriétés	Valeur	Unités
Module d'élasticité	1.9 e + 011	N / m ²
Coefficient de poisson	0.29	S.O.
Module de cisaillement	7.5 e + 010	N / m ²
Limite de traction	517017000	N / m ²
Limite de compression		N / m ²
Limite d'élasticité	206807000	N / m ²
Coefficient de dilatation thermique	1.8 e – 005	/ K
Conductivité thermique	16	W/ (m.k)
Chaleur spécifique	500	J/ (kg.K)
Rapport d'amortissement du matériau		S.O.
Masse volumique	8000	Kg /m ³

Le tableau suivant représente les caractéristiques du caoutchouc du palier central :

Tableau IV.3 : propriétés de caoutchouc naturel.

Propriétés	Valeur	Unités
Module d'élasticité	10000	N / m ²
Coefficient de poisson	0.45	S.O.
Module de cisaillement		N / m ²
Limite de traction	20000000	N / m ²
Limite de compression		N / m ²
Limite d'élasticité		N / m ²
Coefficient de dilatation thermique		/ K
Conductivité thermique		W/ (m.k)
Chaleur spécifique		J/ (kg.K)
Rapport d'amortissement du matériau		S.O.
Masse volumique	960	Kg /m ³

7.2.1 Simulation statique

En applique deux forces égales $F_1, F_2 = 1000\text{N}$ sur les deux arbres 1 et 2.

On prend comme conditions aux limites l'arbre de transmission encastré- encastré et encastré sur le support de palier central.

La répartition des contraintes dans le cas statique est montrée sur la figure suivant :

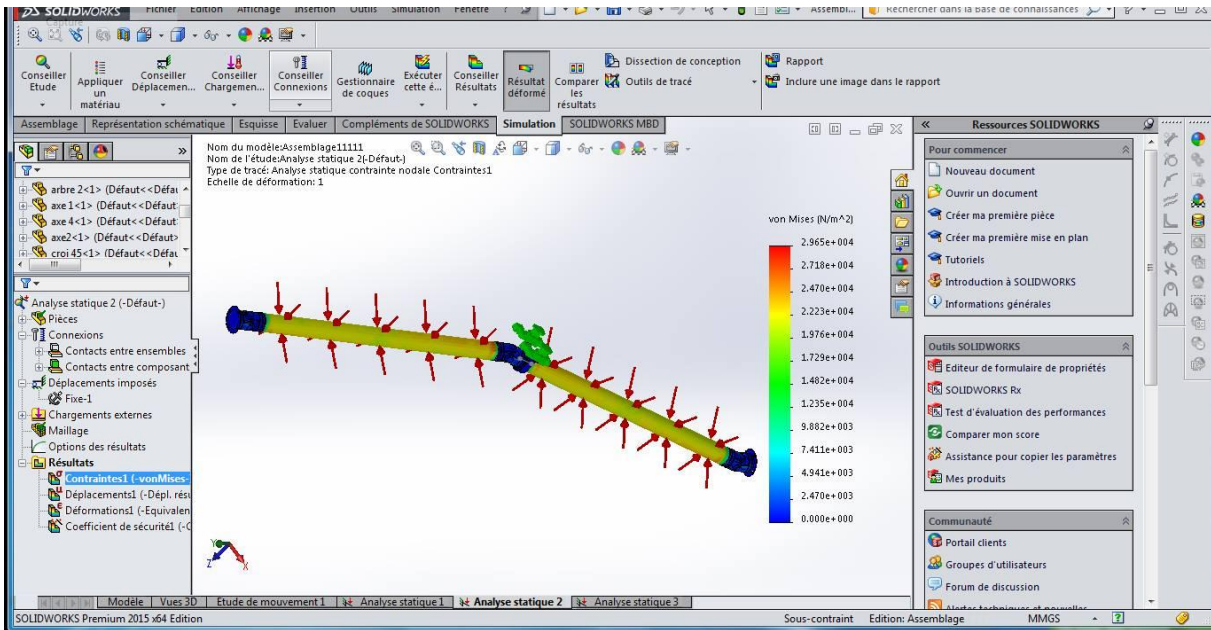


Figure VI.19 : Répartition des contraintes dans les cas statique sur le modèle

Le déplacement montré sur la figure suivant :

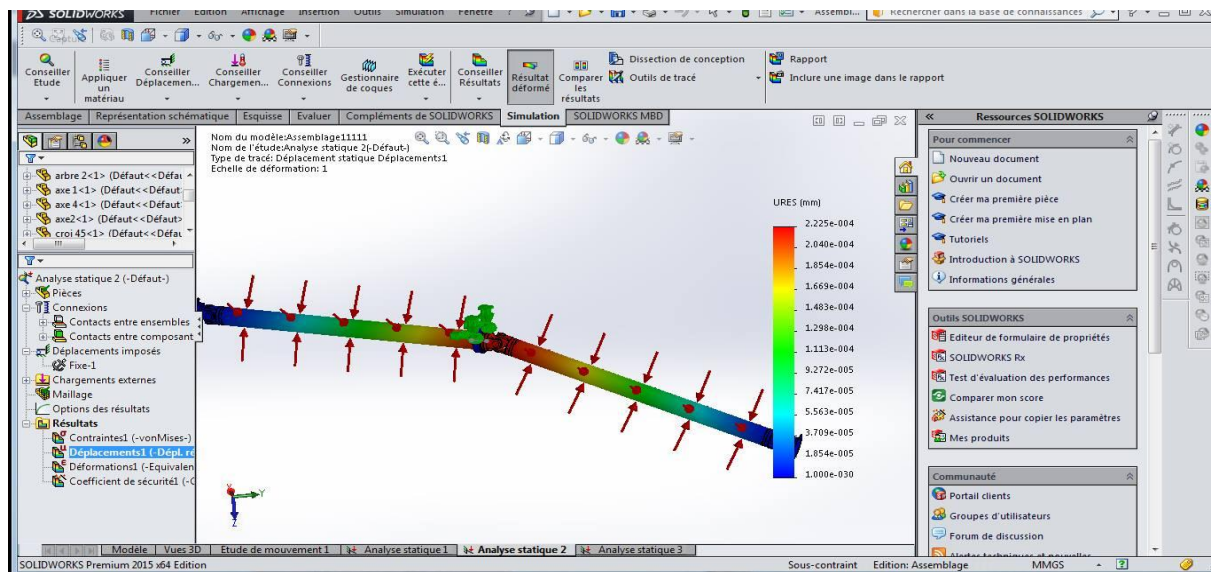


Figure VI.20 : Analyse statique de déplacement du système

La déformation représente sur la figure suivante :

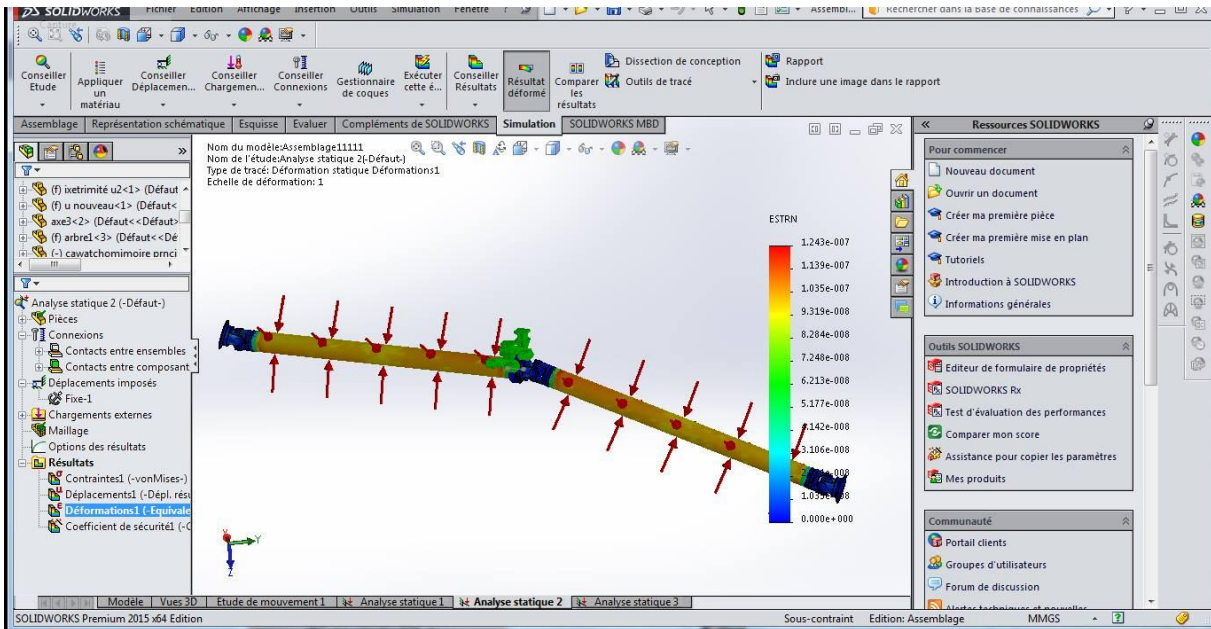


Figure VI.21 : Analyse statique de déformation du système

En a appliqué deux couples inverse le premier 1000 N.m et la deuxième 50 N.

La figure ci-contre montre les contraintes :

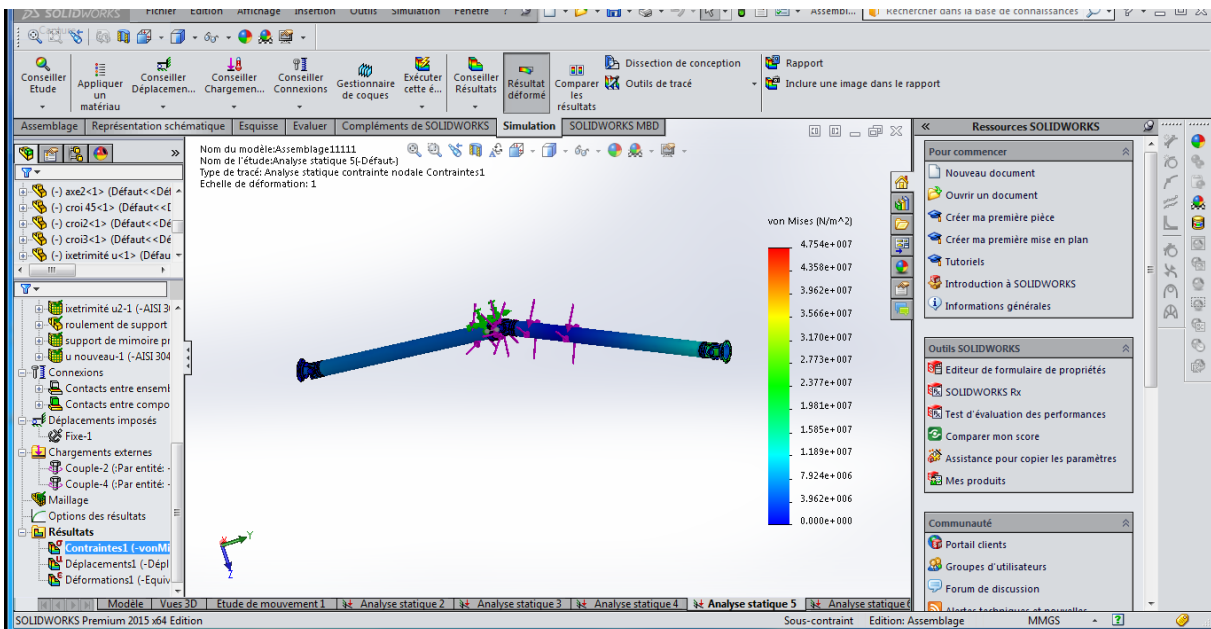


Figure VI.22 : Répartition de la contrainte dans d'application de couple

La figure suivante représente le déplacement :

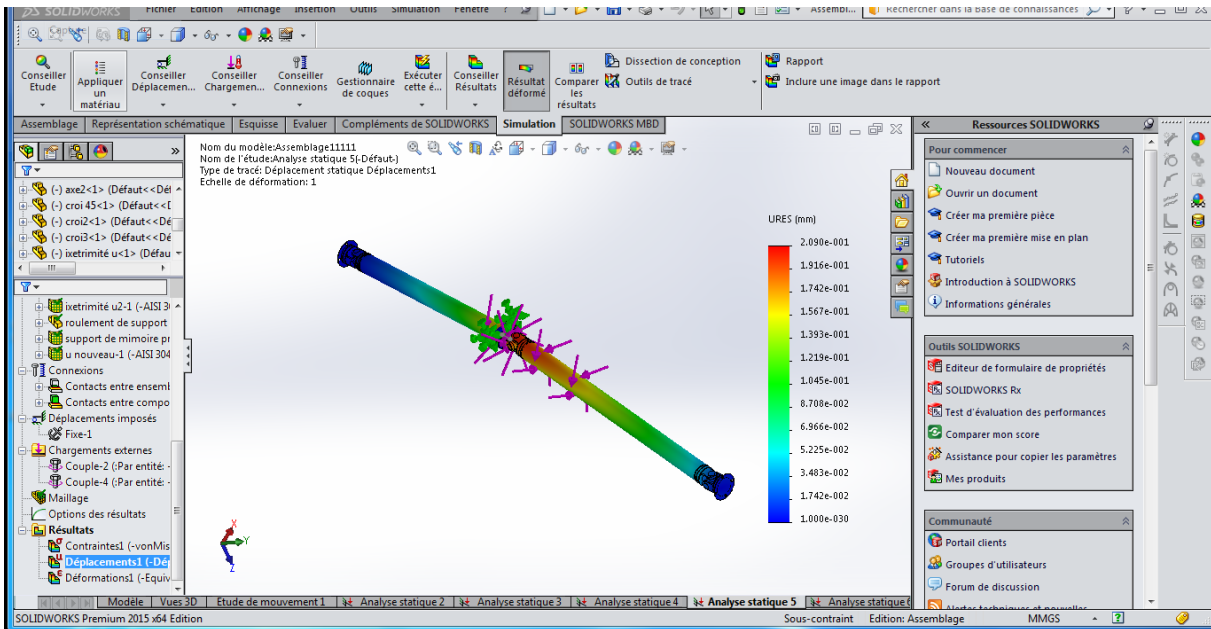


Figure VI.23 : Analyse Statique du déplacement d'un système en cas application du couple

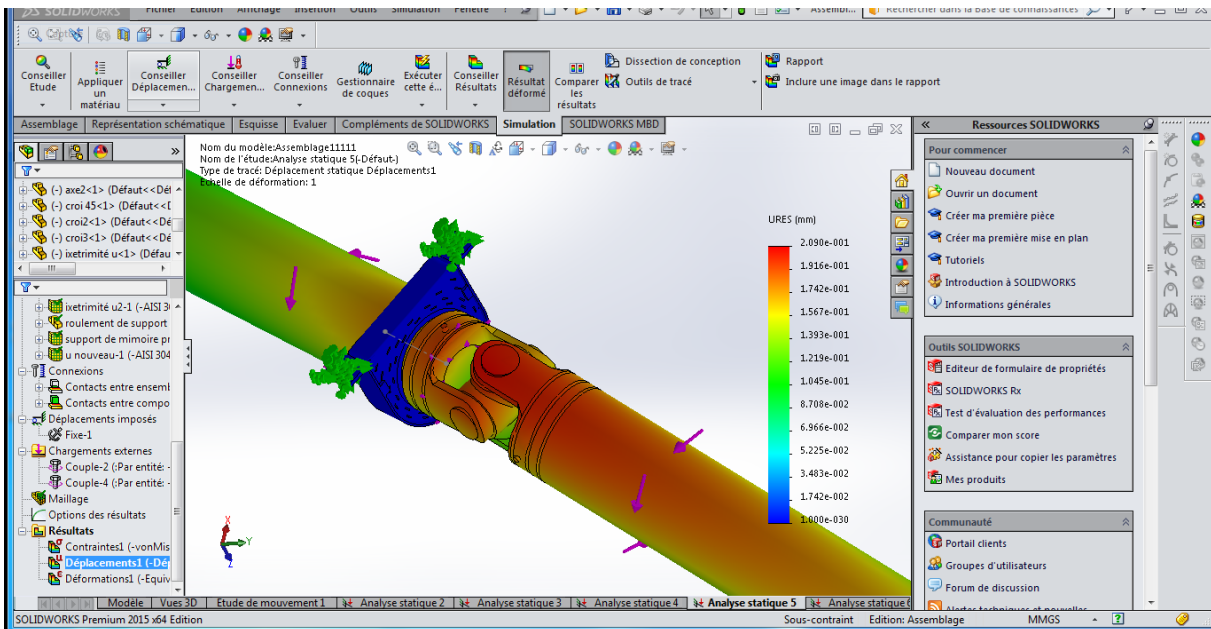


Figure VI.24 : Analyse Statique du déplacement d'un système en cas application du couple

La figure ci-dessous représente de déformation :

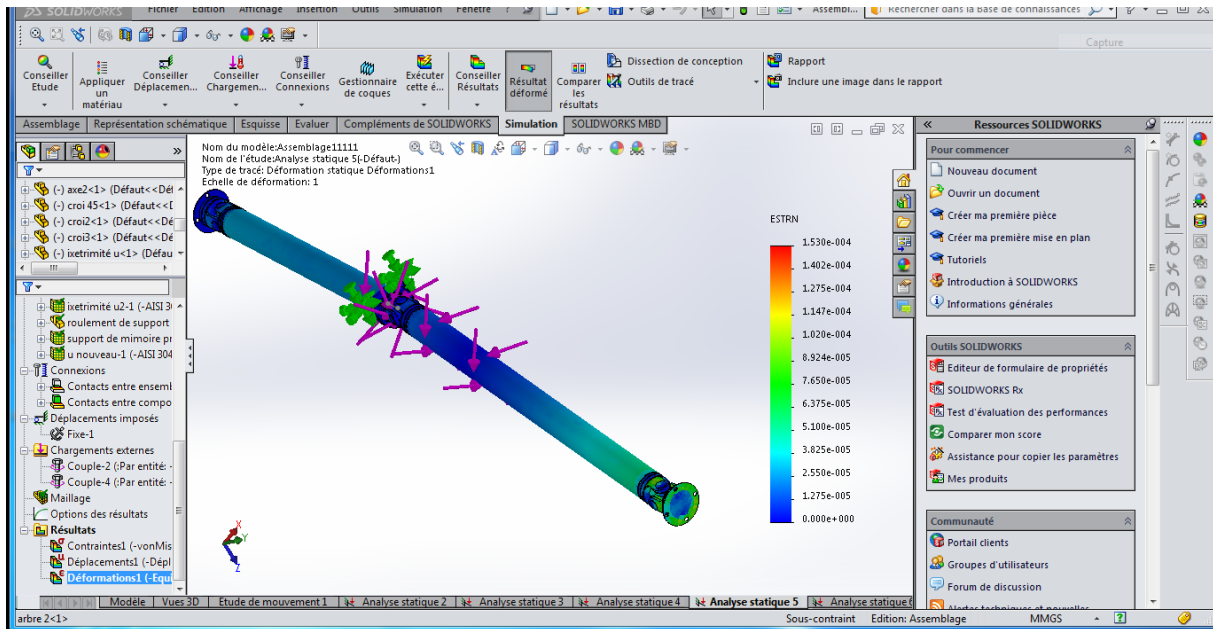


Figure VI.25 : Analyse Statique de la déformation d'un système en cas d'application du couple

7.2.2 Analyse fréquentiel

Dans les figures qui viennent par la suite nous montrent les modes de l'arbre1 pour le cas encastré-libre.

Tableau IV.4 : les valeurs des fréquences pour le cas encastré-libre.

Mode	Fréquence (Hz)
1	37,282
2	38,092
3	290,94
4	292 ;52
5	723 ;47

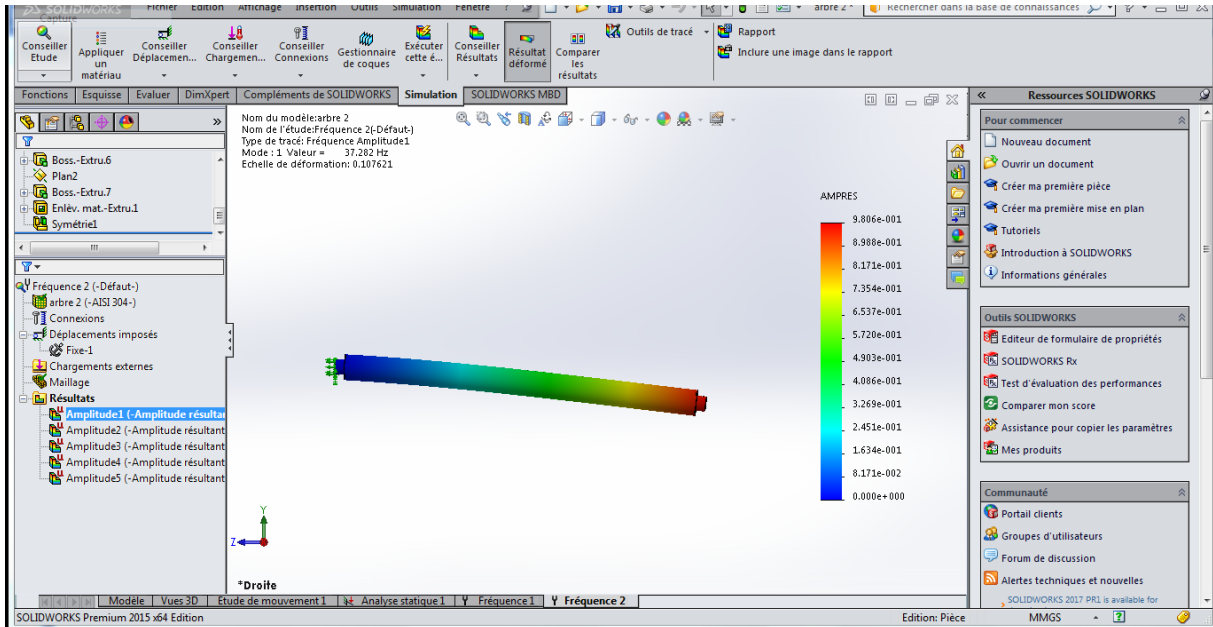


Figure VI.26 : Analyse fréquentiel d'un arbre pour le mode 1

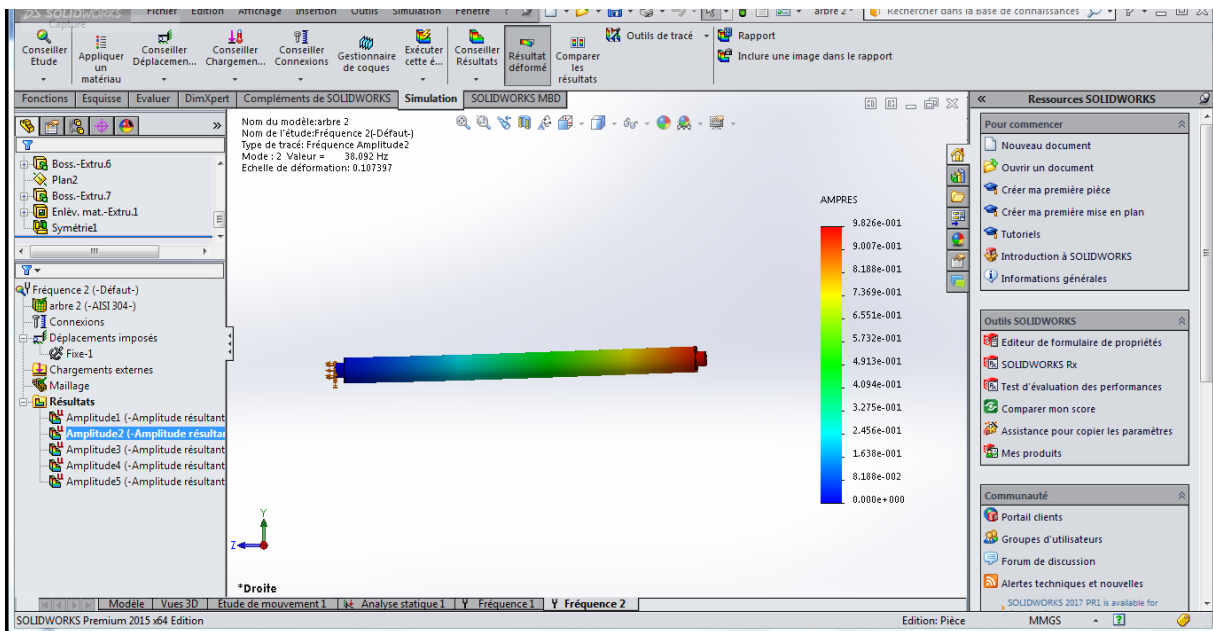


Figure VI.27 : Analyse fréquentiel d'un arbre pour le mode 2

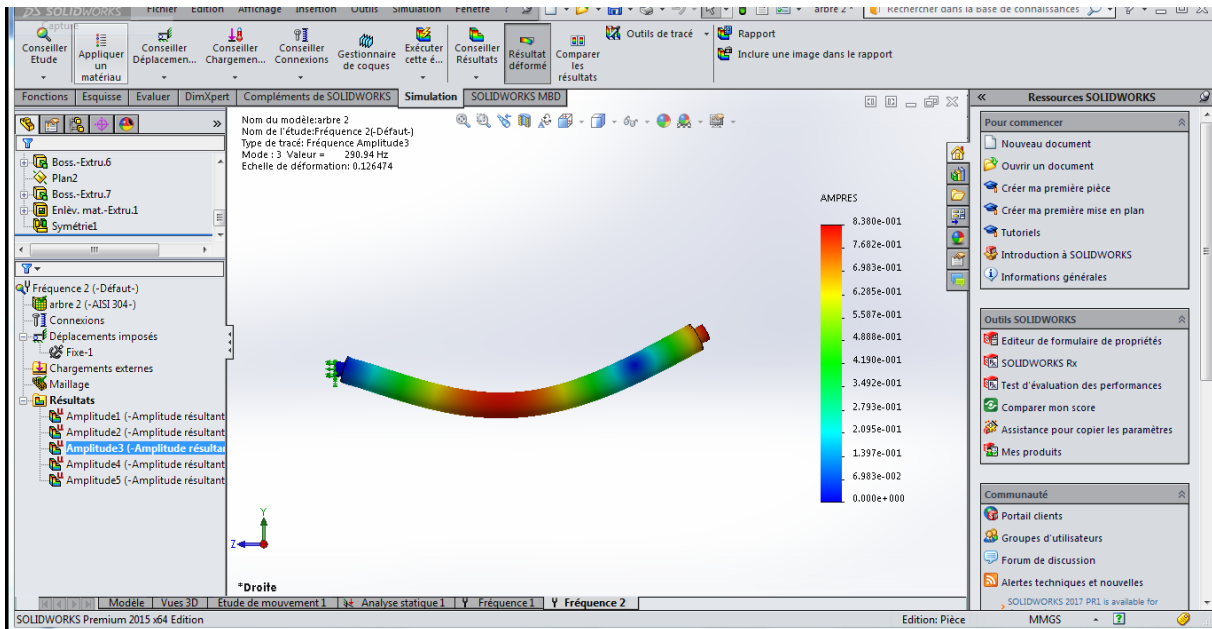


Figure VI.28 : Analyse fréquentiel d'un arbre pour le mode 3

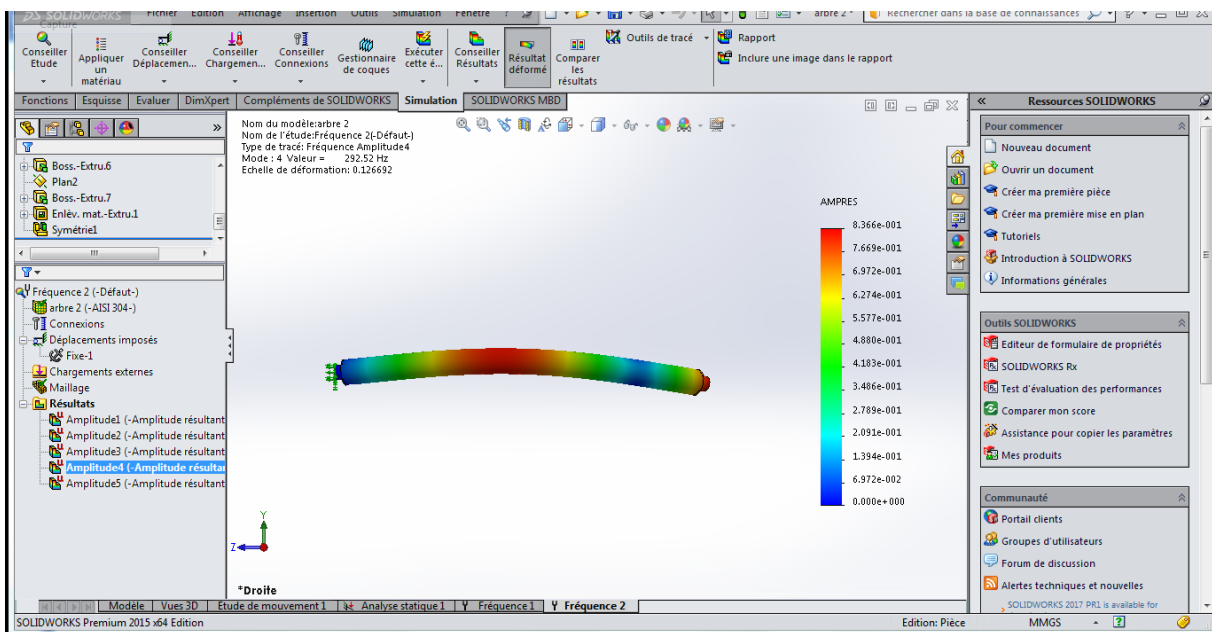


Figure VI.29 : Analyse fréquentiel d'un arbre pour le mode 4

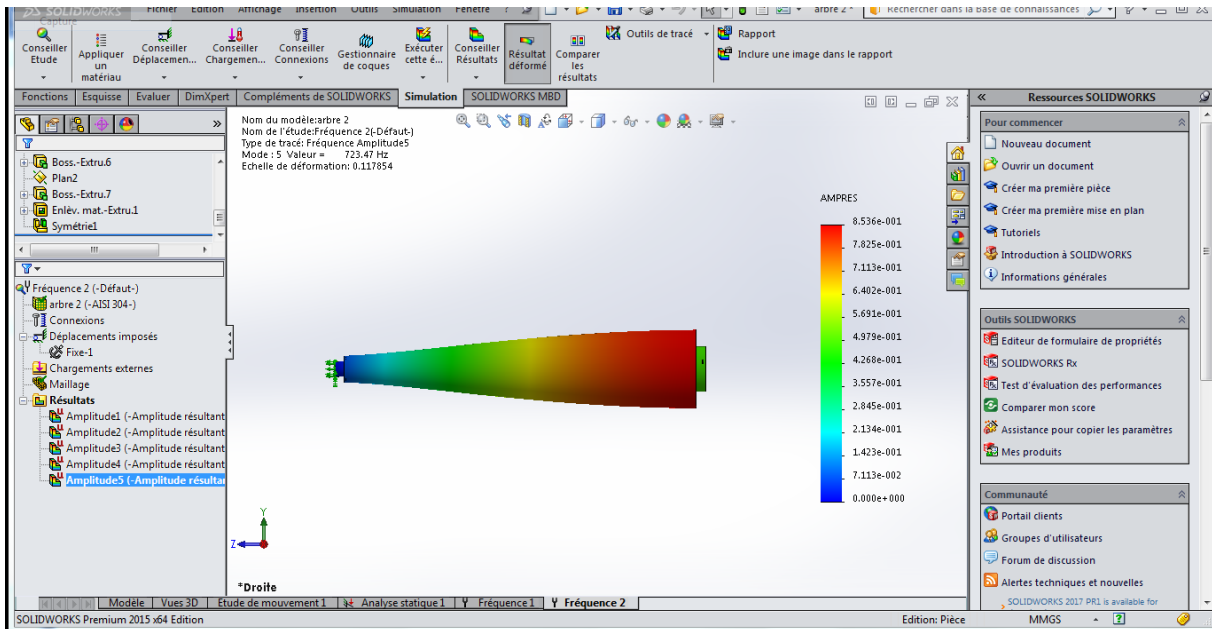


Figure VI.30 : Analyse fréquentiel d'un arbre pour le mode 5

De même les figures suivantes montrent les modes de l'arbre 1 pour le cas encasté-encasté.

Tableau IV.5 : les valeurs des fréquences pour le cas encasté-encasté.

Modes	Fréquences
1	273
2	274,58
3	826,1
4	827,11
5	1403,3

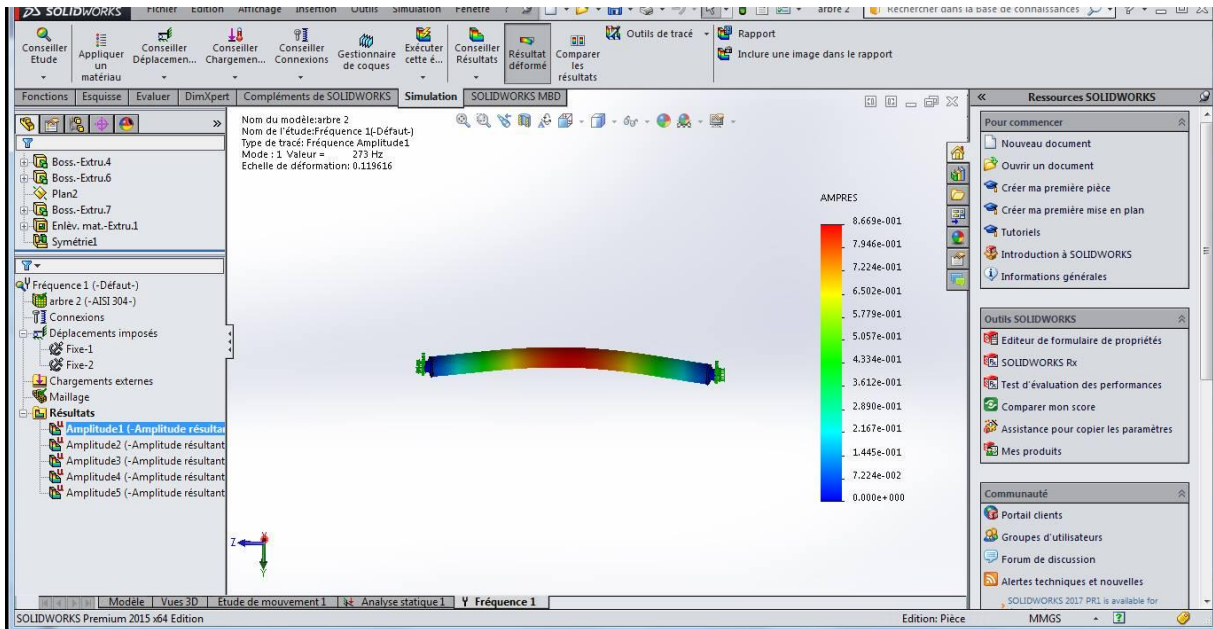


Figure VI.31 : Analyse fréquentiel de modèle pour le mode 1

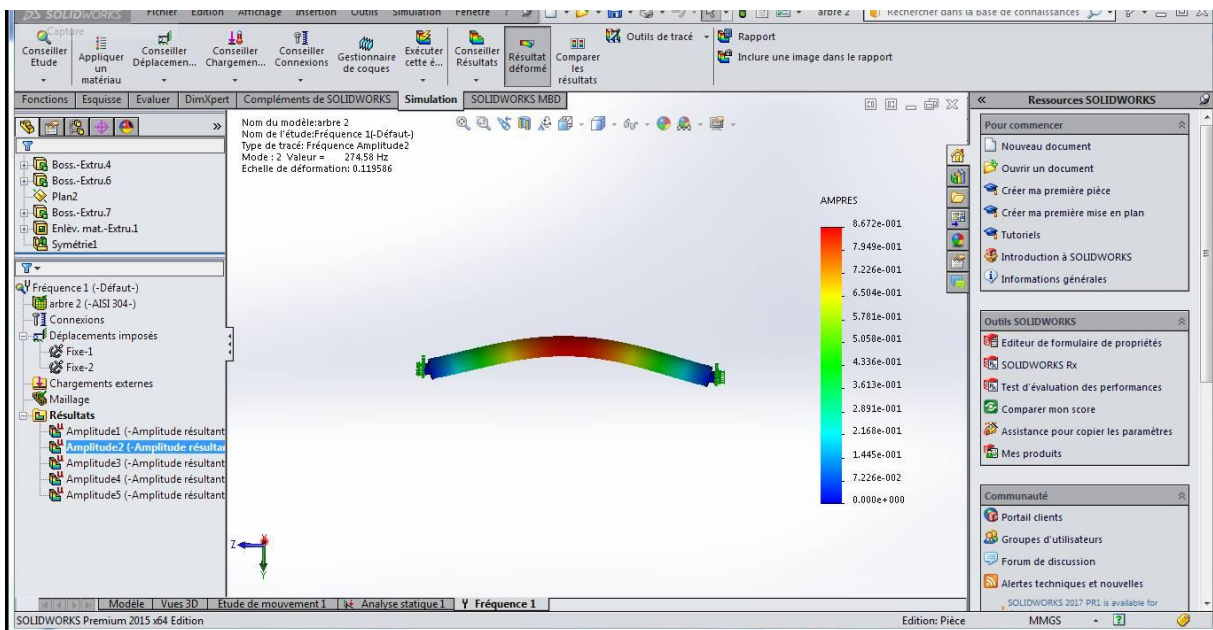


Figure VI.32 : Analyse fréquentiel de modèle pour le mode 2

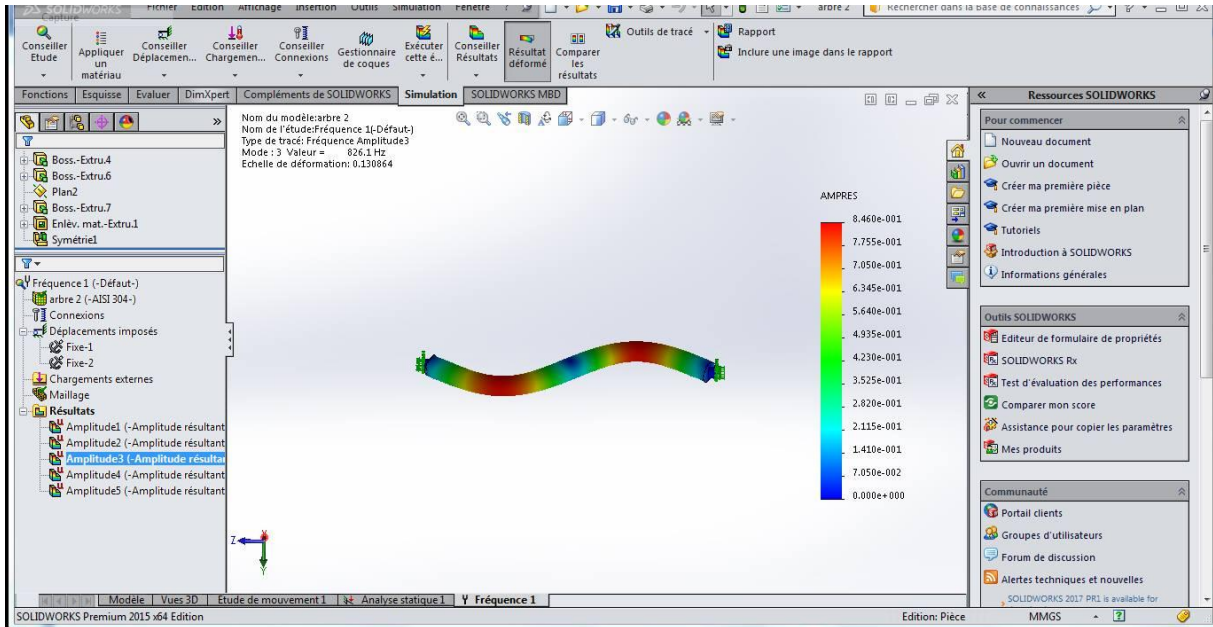


Figure VI.33 : Analyse fréquentiel de modèle pour le mode 3

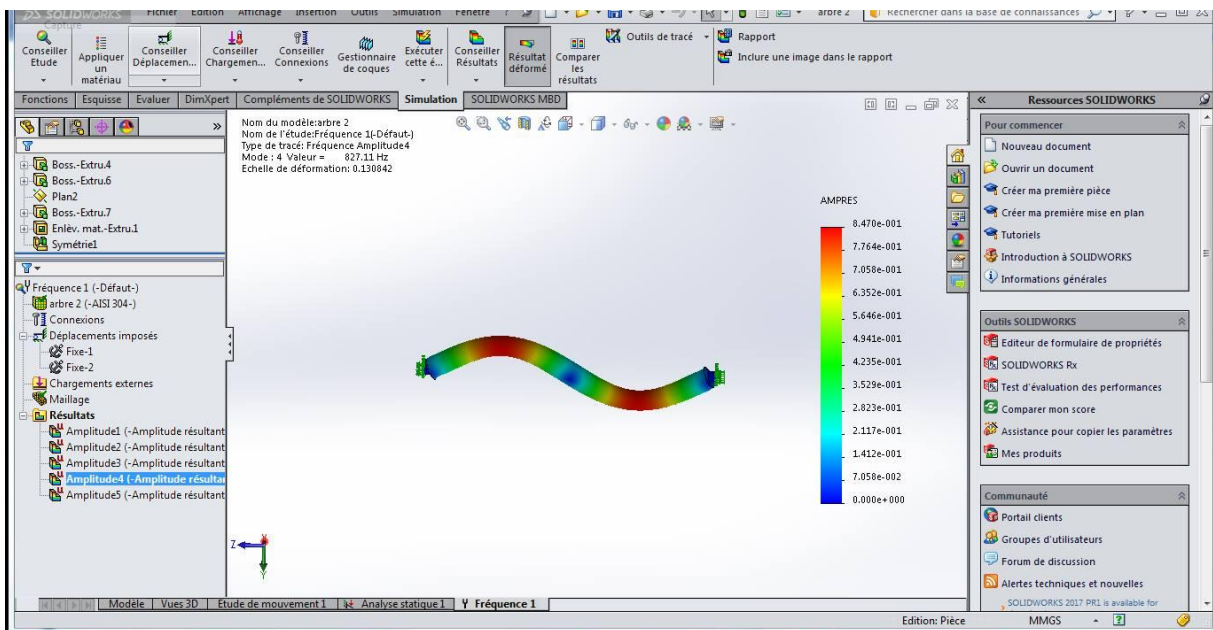


Figure VI.34 : Analyse fréquentiel de modèle pour le mode 4

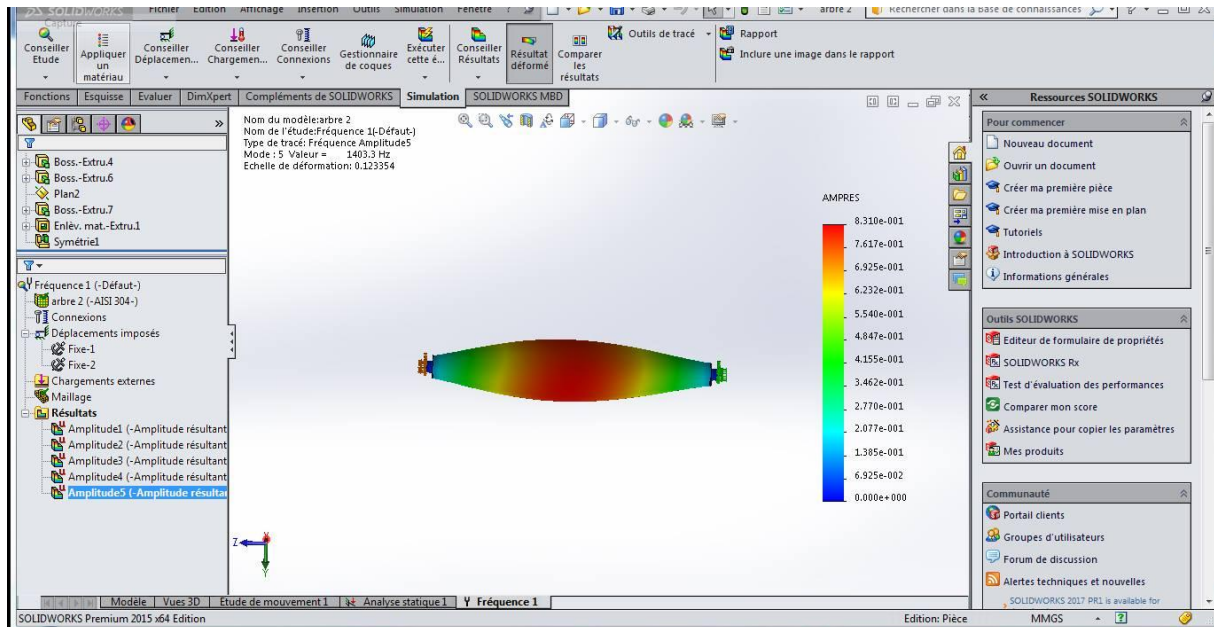


Figure VI.35 : Analyse fréquentiel de modèle pour le mode 5

Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons donné une définition de logiciel SolidWorks qui est réservé à la conception 3D et la simulation des structures mécaniques. A l'aide de ce logiciel nous avons pu simuler l'arbre de transmission avec un palier central en faisant une étude statique et une étude fréquentiel. Par conséquent les figures indiquées dans ce chapitre représentent la démarche de la simulation et montrent les zones critiques de ce système.

Conclusion perspective

Dans ce projet de fin d'étude, nous avons donné une idée sur les machines tournantes, les ensembles de transmission et les paliers qui sont des composantes mécanique conçus pour soutenir les arbres aux mouvements rotatifs. Toutes ces pièces mécaniques sont subies par des vibrations, des forces extérieures et des contraintes relatives aux types de matières, défauts de montage, fabrication et conception. Pour faire face à ces problèmes, nous avons fait une étude de l'influence de défaillance des paliers centraux sur le comportement vibratoires des arbres de transmission.

Tout d'abord, nous avons donné les cas d'utilisation du palier centraux et les types des supports d'arbres de transmission avec leur montage et démontage. Ensuite, on a cité quelques défaillances provoquant ces mécanismes afin de faire une analyse permettant de concrétiser les causes et les origines de ces défaillances pour arriver à les éliminer ou les éviter.

Par la suite, nous avons mis en côté une partie de notre mémoire pour illustrer notre travail avec quelque formules en trois dimensions des arbres.

Finalement, nous avons réalisé un arbre de transmission d'un camion avec son palier central sur le logiciel SolidWorks pour résoudre le problème, nous avons simulé et modélisé le système afin de tirer les défauts et les zones critiques.

A partir de notre travail nous pouvons conclure que la zone contenant Le palier central et le joint cardon (croisaient) est une zone critique subie par des contraintes et des déformations qui peuvent reviennent aux causes suivant :

- L'inclinaison de l'arbre de transmission coté pont arrière par rapport à l'arbre de transmission coté boîte vitesse.
- les forces et les couples inversés appliqué sur les deux arbres aux bornes du joint de cardon produisant le phénomène de torsion.

REFERENCE BIBLIOGRAPHIE

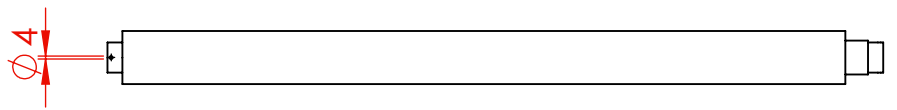
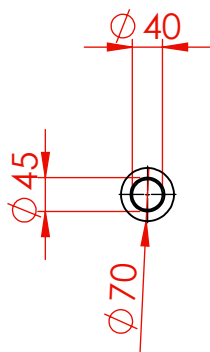
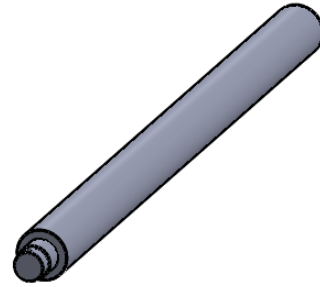
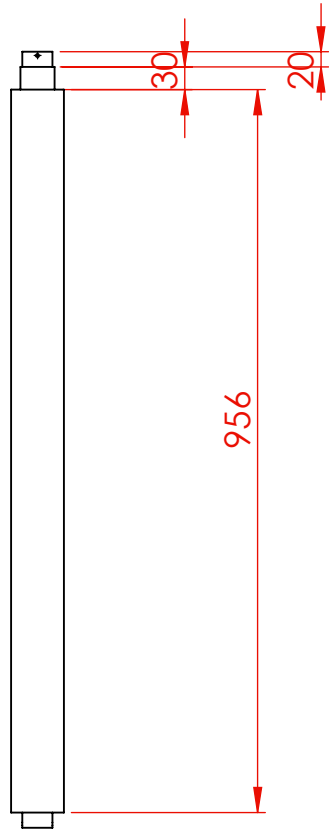
- [1] Thompson, W.T. and Dillon, M., " Theory of Vibrations with Applications " , Prentice Hall, New Jersey, 1998.
- [2] Timoshenko, S. " Vibration Problems in Engineering " , 4th Edition, John Wiley & Sons, 1974.
- [3] Théorie du réacteur et notions scientifiques fondamentales – Équipement mécanique Groupe de formation technique 2003.
- [4] Meramria Wafa, Mémoire de Magistère, Etude de L'Effet Dynamique d'un Palier Lisse par Analyse Vibratoire, 2009.
- [5] J. FRENE, Revue des Techniques de l'Ingénieur, traité Génie mécanique, "Butées et Paliers hydrodynamiques", référence B5 320, pp.1 à 33.
- [6] H.YELLE, Cours3, Tribologie Transmission de puissance École Polytechnique de Montréal.2005.
- [7] Spicer® Driveshafts, Service Manual, September 2007, www.dana.com
- [8] J.F. Debongnie, Conception et calcul des éléments de machines, 2013.
- [9] M. Jeevan Prasad†*, G. Guru Mahesh† and D. Krishna Mohan Raju, International Journal of Current Engineering and Technology, Failure Analysis of a Center Bearing Bracket Mount of a Propeller Shaft in BS-II Buses, avril 2015.
- [10] Chris Johanson, James Duffy, Manual Drive Trains and Axles, The Goodheart-Wilcox Company, 2004.
- [11] M. Jeevan Prasad†*, G. Guru Mahesh† and D. Krishna Mohan Raju, International Journal of Current Engineering and Technology, Failure Analysis of a Center Bearing Bracket Mount of a Propeller Shaft in BS-II Buses, avril 2015.
- [12] Av. João Batista, R. Ester Rombenso, maintenance manual Drivelines MM-0998 Edition October 2011.
- [13] www.chez-galium.com, Remplacement du palier central d'un arbre de transmission arrière de L200.
- [14] BELALIA Sid Ahmed, Mémoire de Magister, Analyse tridimensionnelle des vibrations des plaques par la version h-p de la méthode des éléments finis, Juin2014.
- [15] J.K. Zhou, Differential Transformation and its Application for Electric Circuits, Huazhong University Press, Wuhan, P. R. China, (1986) (in Chinese).

[16] C.W. Bert, H. Zen, Analysis of axial vibration of compound bars by differential transformation method, J. of Sound and Vibration, Vol. 275(2004) 641-7.

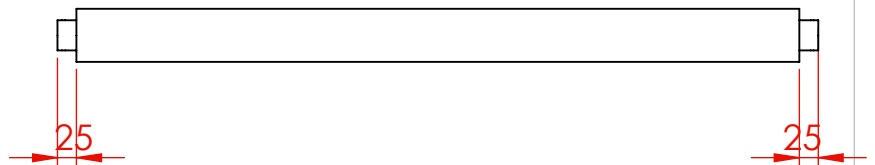
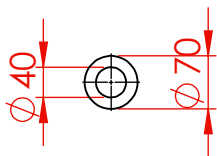
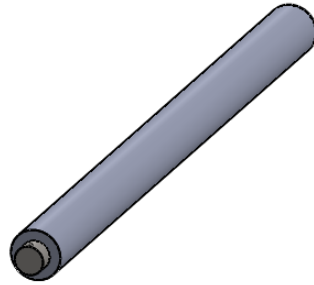
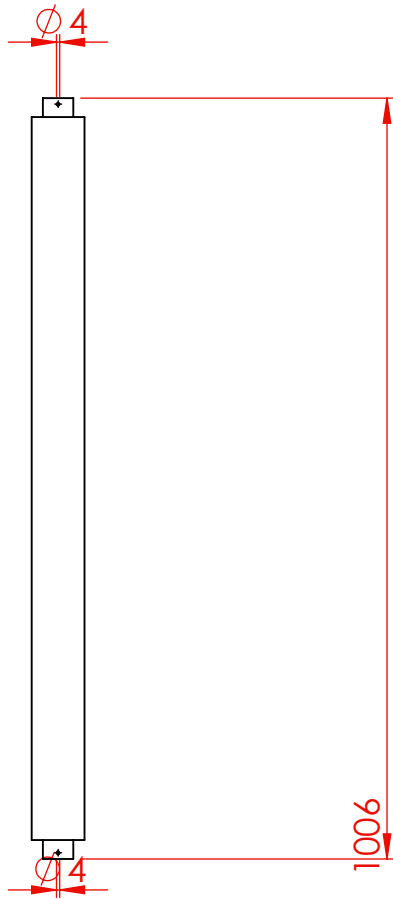
[17] Prise en main de SolidWorks PDF (Académie d'Orléans-Tours).


[18] solidworks.fr Profil de la société Purdue Université Purdue Research and Education Centre for Information Systems en génie 1997.

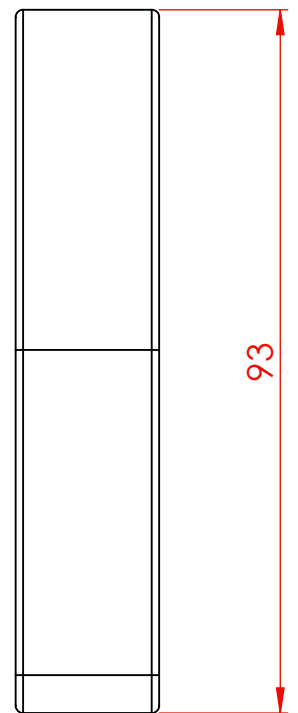
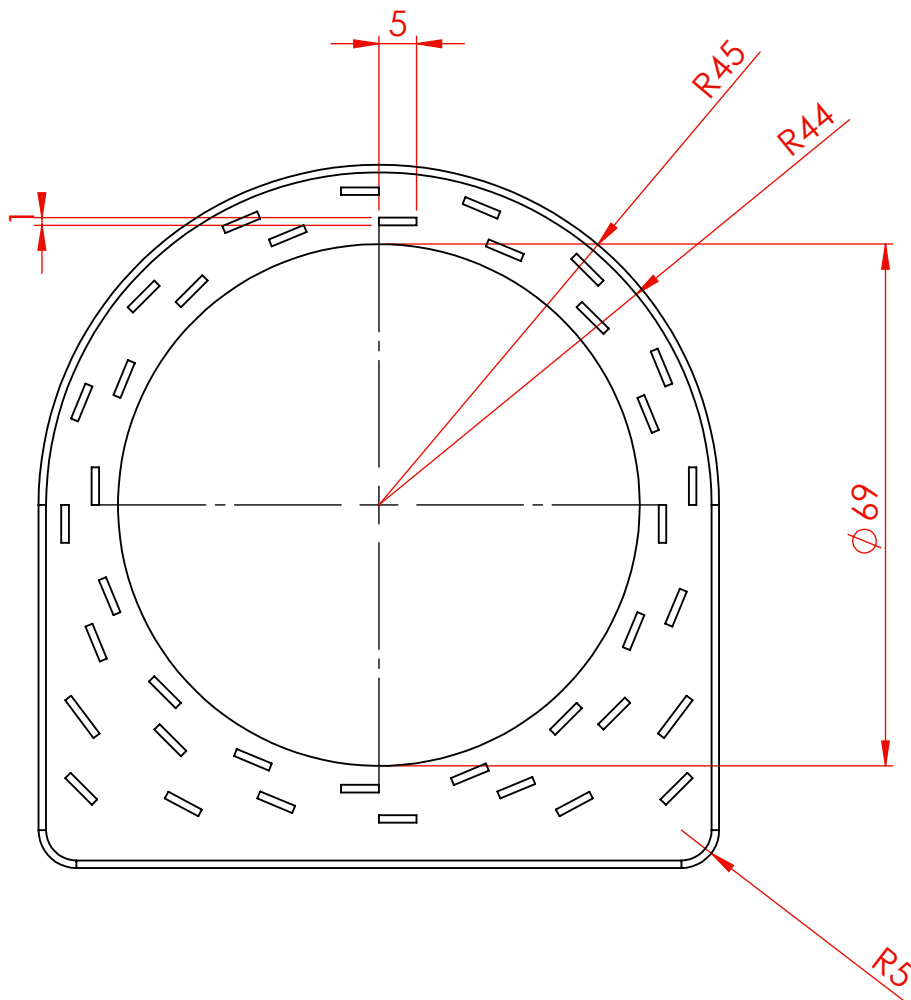
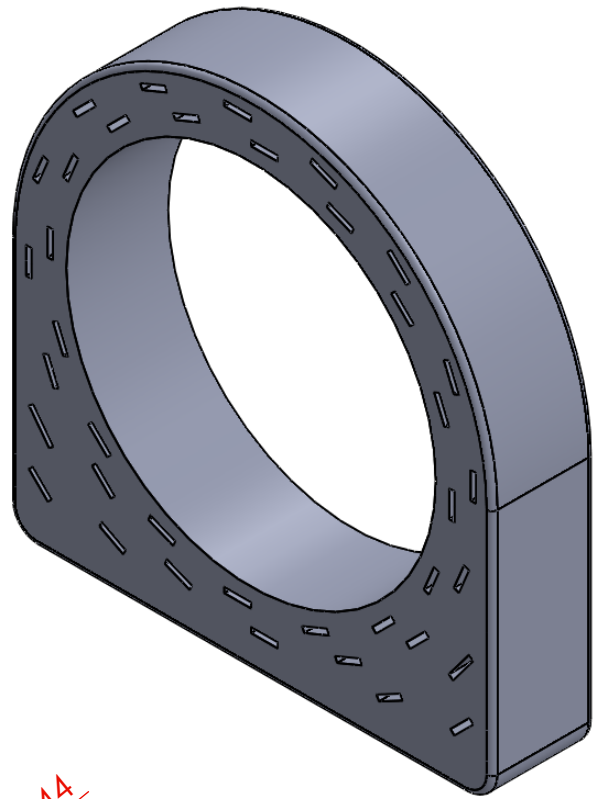
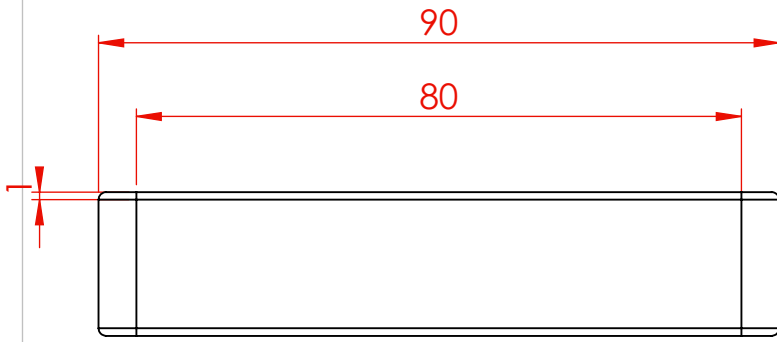
[19] tutorial solidworks 2007.




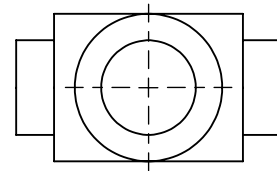
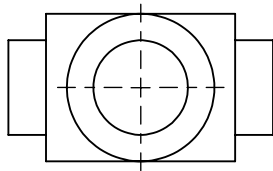
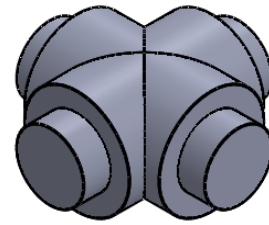
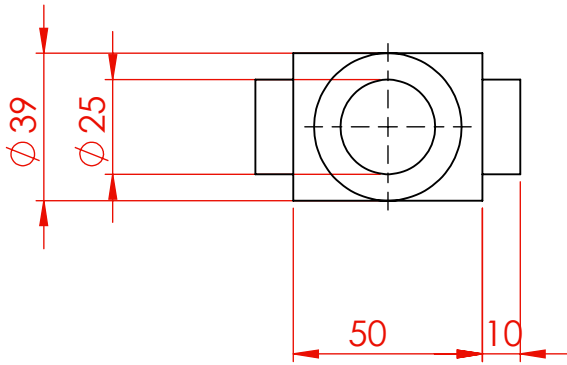
N° Pièce : 01	Université Abou Bekr Belkaid- Tlemcen	BENDEHINA Boudjemaâ
Echelle 1:1	Arbre 01	GM MI
		2015/2016




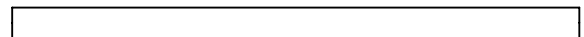
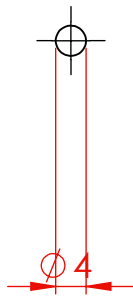
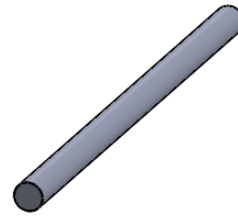
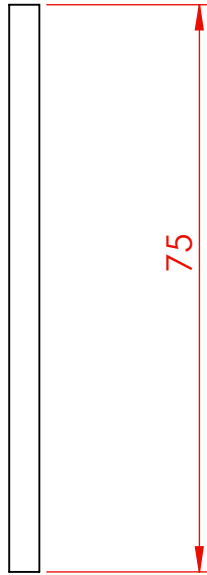
N° Pièce : 02	Université Abou Bekr Belkaid- Tlemcen	BENDEHINA Boudjemaâ
Echelle 1:10	Arbre 02	GM MI
		2015/2016



N° Pièce : 17	Université Abou Bekr Belkaid- Tlemcen	BENDEHINA Boudjemaâ
Echelle 1:1	caoutchouc de palier	GM MI
		2015/2016



N° Pièce : 06, 07, 08	Université Abou Bekr Belkaid- Tlemcen	BENDEHINA Boudjemaâ
Echelle 1:1	Croisillon	GM MI
		2015/2016



N° Pièce: 03, 04, 05, 06

Université Abou Bekr Belkaid- Tlemcen

BENDEHINA Boudjemaâ

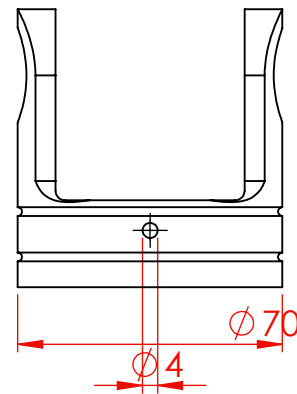
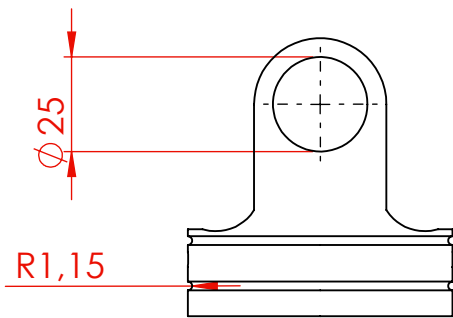
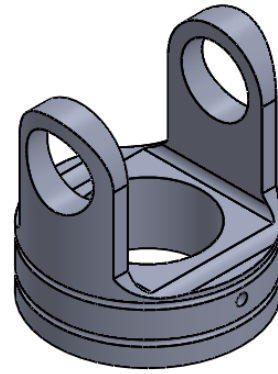
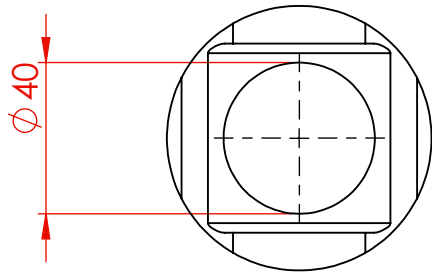
Echelle 1:1

Goupilles

GM MI

2015/2016





N° Pièce :11,12,13,14

Université Abou Bekr Belkaid- Tlemcen

BENDEHINA Boudjemaâ

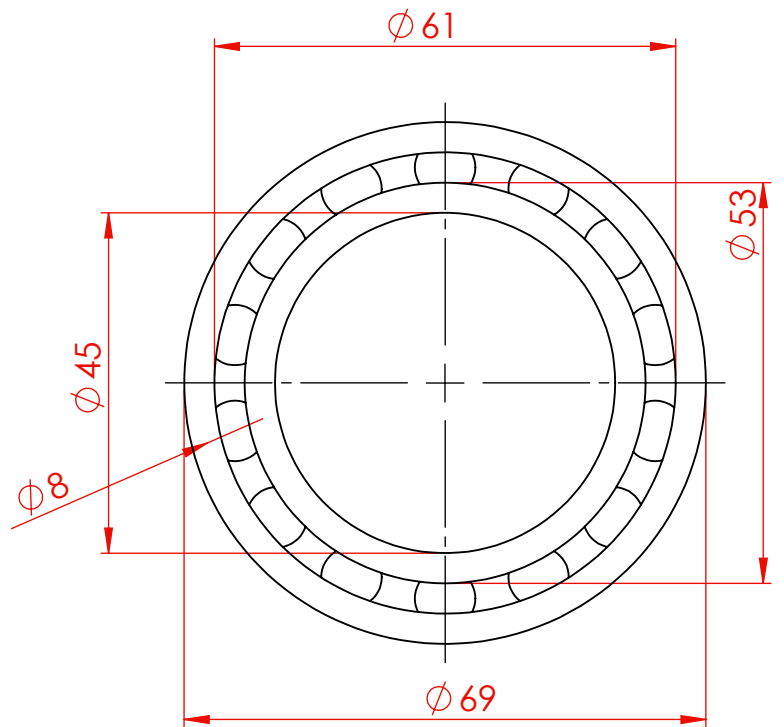
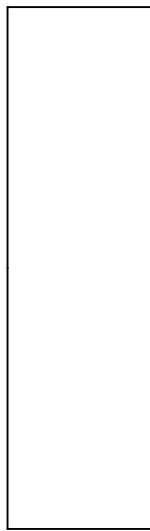
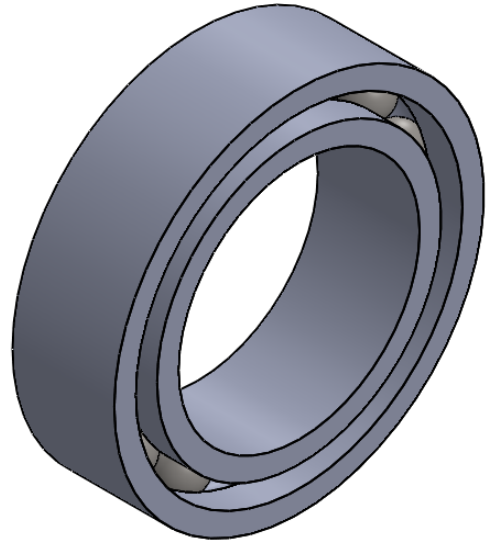
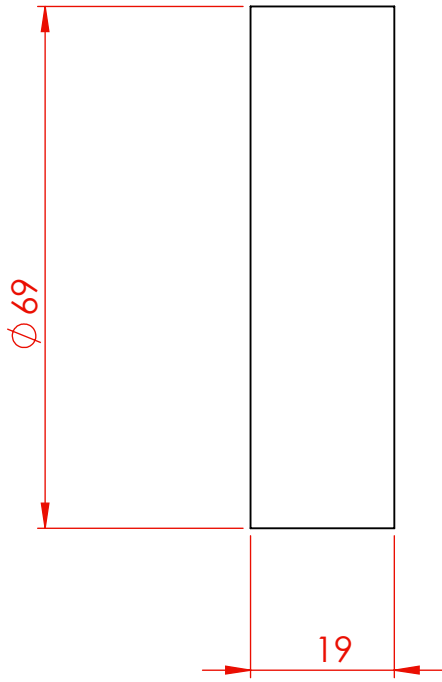
Echelle 1:1


Joint U

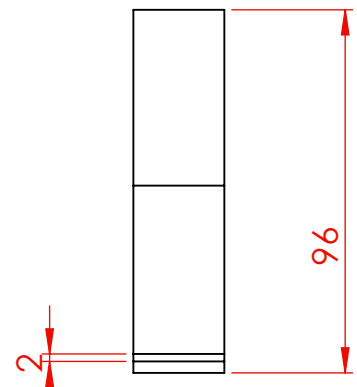
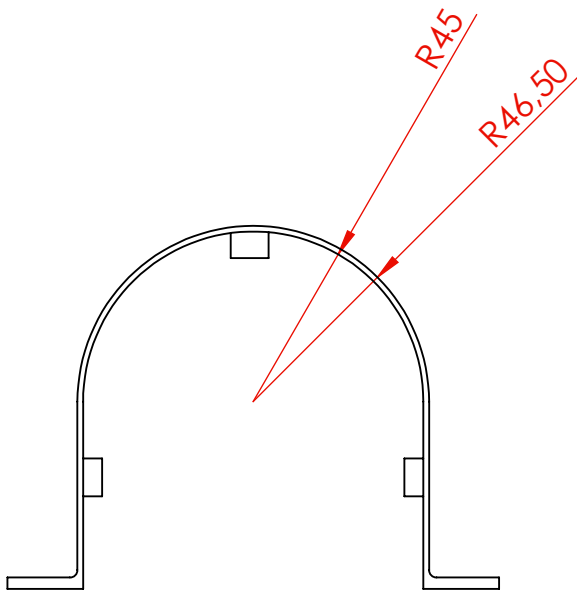
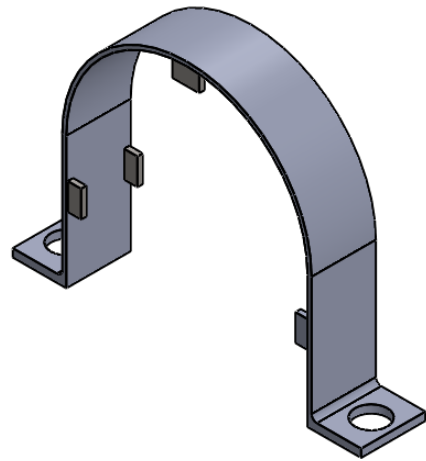
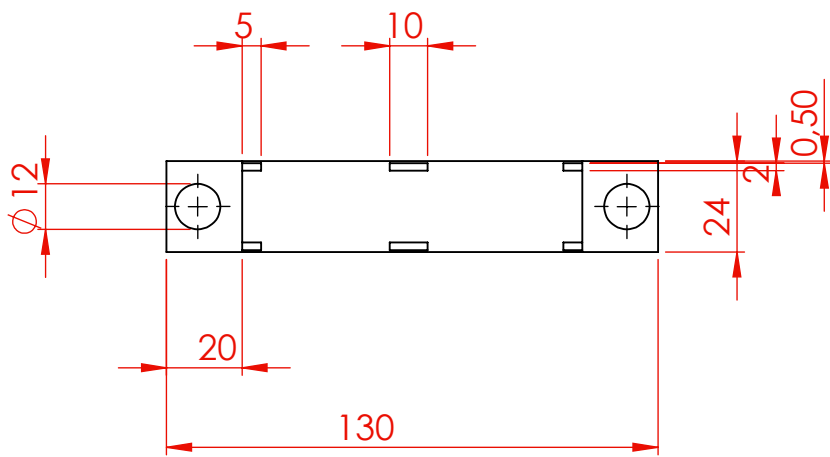
GM MI


2015/2016





N° Pièce : 15	Université Abou Bekr Belkaid- Tlemcen	BENDEHINA Boudjemaâ
Echelle 1:1	Roullement de palier	GM MI
		2015/2016



N° Pièce : 16	Université Abou Bekr Belkaid- Tlemcen	BENDEHINA Boudjemaâ
Echelle 1:1	Support de palier	GM MI
		2015/2016