

CENTRALE LYON
ENISE

ÉCOLE CENTRALE LYON ENISE

ENISE-5GM

RAPPORT

CALCULS DES STRUCTURES

Elèves :

Vicent LUCIE

Kevin TONGUE

BIAOU ADEBAYO LANDRY

Gaston KAMDEM

TCHOMTHOUA

Enseignant :

BONNAVAND FRÉDÉRICK

Table des matières

1	Introduction	2
1.1	Contexte	2
1.2	Objectifs du projet	2
2	Présentation du système existant	2
2.1	Description du tracteur et de l'axe	2
2.2	Configuration des liaisons	3
3	Méthodologie d'analyse	3
3.1	Identification des causes de rupture	3
3.2	Approche par éléments finis	5
3.3	Données d'entrée	5
3.4	Schéma des efforts, moments et liaisons appliqués à l'axe arrière	5
3.5	Critères d'évaluation	6
4	Simulation du système actuel	6
4.0.1	Modélisation	6
4.1	Analyse par éléments finis	6
4.1.1	Conditions aux limites et chargements	6
4.1.2	Maillage	7
4.2	Résultats des simulations du système existant	7
4.2.1	Interpretations du Resultat	7
4.3	Analyse des faiblesses	9
5	Proposition de solutions d'amélioration	9
6	Simulation des solutions proposées & Observation	9
6.1	Renfort local	10
6.1.1	Nervures et goussets	10
6.1.2	Rainures	10
6.2	Amélioration des fixations	11
6.2.1	Goupilles	11
6.2.2	Vis de pression	11

6.2.3	Collage	13
6.3	Optimisation de la géométrie de la clavette	14
6.4	Matrice de Choix des solutions proposées	14
6.5	Solution retenue	15
7	Conclusion	15

CALCULS DES STRUCTURES CALCULS DES STRUCTURES

Vicent LUCIE

Kevin TONGUE

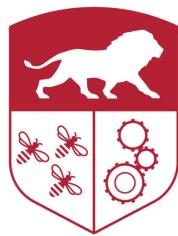
BIAOU ADEBAYO LANDRY

Gaston KAMDEM TCHOMTHOUA Kevin TONGUE

BIAOU ADEBAYO LANDRY

Gaston KAMDEM TCHOMTHOUA ENISE-5GMENISE-5GM

ENISE-5GMENISE-4GM



CENTRALE LYON
ENISE

ÉCOLE CENTRALE LYON ENISE

ENISE-5GM

RAPPORT

CALCULS DES STRUCTURES

Elèves :

Vicent LUCIE

Kevin TONGUE

BIAOU ADEBAYO LANDRY

Gaston KAMDEM

TCHOMTHOUA

Enseignant :

BONNAVAND FRÉDÉRICK



Table des matières

1 Introduction

1.1 Contexte

Un industriel fabriquant des tracteurs pour enfants a constaté des ruptures répétées de l'axe de la roue motrice lors de l'utilisation du produit. Cette défaillance entraîne un dysfonctionnement du tracteur et peut poser des problèmes de sécurité pour l'utilisateur. Face à cette situation, l'industriel a sollicité une analyse afin de comprendre les causes de la rupture et de proposer des solutions techniques permettant de corriger ce problème.

1.2 Objectifs du projet

Le présent rapport porte sur l'analyse par éléments finis de l'axe de roue motrice d'un tracteur pour enfant. L'objectif principal est d'identifier les causes mécaniques de la rupture observée en service, puis de proposer des solutions permettant d'améliorer la fiabilité du système.

Les objectifs spécifiques du projet sont les suivants :

- Identifier les causes de la rupture de l'axe de roue motrice.
- Proposer des modifications de conception afin d'éviter ces ruptures.
- Valider les solutions proposées à l'aide de simulations numériques.

La démarche adoptée consiste à modéliser et simuler le système existant afin de mettre en évidence les zones de fortes contraintes. À partir des résultats obtenus, plusieurs modifications sont étudiées et testées par simulation dans le but d'aboutir à une solution optimale, à la fois efficace sur le plan mécanique et compatible avec les contraintes de coût et de fabrication du produit.

2 Présentation du système existant

2.1 Description du tracteur et de l'axe

Les figures ci-dessous présentent un exemple du tracteur étudié ainsi qu'une vue de dessous permettant d'observer la configuration du système.

Le tracteur pour enfant étudié possède une masse totale (enfant + tracteur) de 50 kg, correspondant à un poids d'environ 500 N. L'axe de roue motrice est en acier C9D, de diamètre 10 mm et de longueur 480 mm. Il transmet le couple moteur à la roue motrice par un méplat.

$$K = \begin{bmatrix} 0.2000 & -0.4000 & 0 & 0 & -0.2000 & 0.4000 \\ -0.4000 & 0.8000 & 0 & 0 & 0.4000 & -0.8000 \\ 0 & 0 & 0.2000 & 0.4000 & -0.2000 & -0.4000 \\ 0 & 0 & 0.4000 & 0.8000 & -0.4000 & -0.8000 \\ -0.2000 & 0.4000 & -0.2000 & -0.4000 & 0.4000 & 0 \\ 0.4000 & -0.8000 & -0.4000 & -0.8000 & 0 & 1.6000 \end{bmatrix}$$

FIGURE 1 – Exemple du tracteur étudié

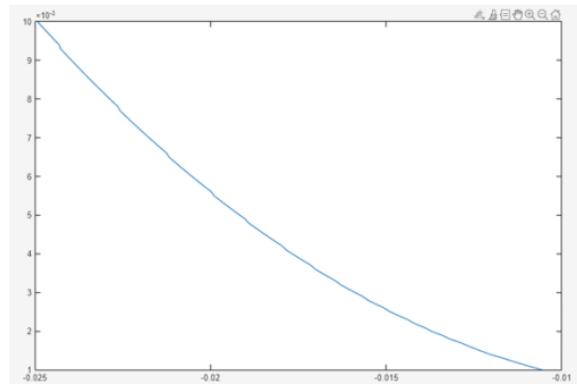


FIGURE 2 – Vue de dessous du tracteur

La roue arrière libre est montée sur un guidage en polyéthylène. La transmission du mouvement est assurée par une chaîne dont la tension est estimée à 200 N.

2.2 Configuration des liaisons

Les figures ci-après présentent le schéma des liaisons de l'axe arrière du tracteur. L'ensemble est constitué des éléments suivants :

- **Une roue motrice** reliée à l'axe par un **méplat de liaison**.
- **Une roue libre** associée à une **liaison pivot**.
- Un **second méplat** destiné à la fixation du **pignon d'entraînement**.

Dans le cadre de cette étude, **les charges et les efforts** seront appliqués sur l'axe arrière du tracteur, conformément aux conditions réelles d'utilisation.

Les résultats seront particulièrement analysés au niveau de la zone de **rupture** observée sur le bord du méplat de liaison axe/pignon (voir Figure ??).

3 Méthodologie d'analyse

3.1 Identification des causes de rupture

Pour mieux cerner le problème, il est essentiel d'identifier les causes de rupture afin de déterminer les actions correctives appropriées.

L'analyse de l'axe arrière et de son système de liaison met en évidence plusieurs causes potentielles de rupture, que l'on peut classer selon leur nature : statique, fatigue, processus de fabrication et qualité du matériau.

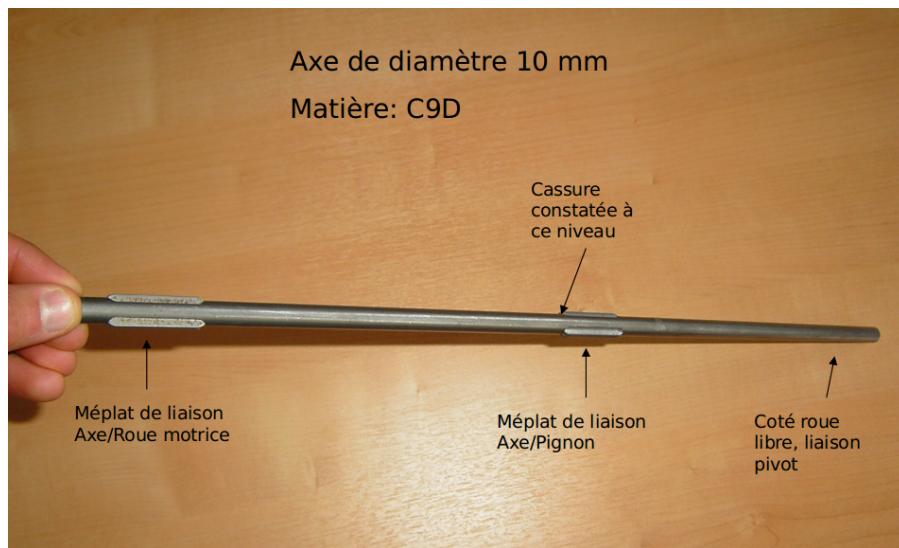


FIGURE 3 – Schéma des liaisons de l'axe arrière du tracteur.



FIGURE 4 – Le pignon

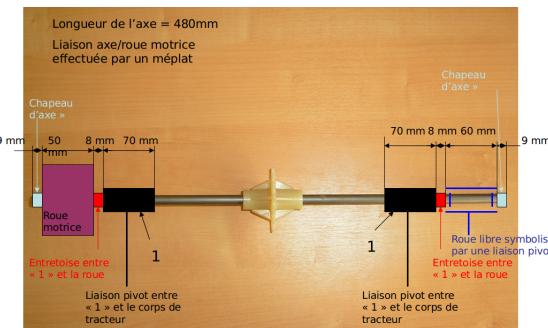


FIGURE 5 – Schéma des liaisons de l'axe arrière avec la fixation du pignon

- **Rupture statique** : La concentration des contraintes au niveau de la zone critique (zone de rupture) peut entraîner une rupture immédiate lorsque l'axe est soumis à des charges exceptionnelles ou à des efforts ponctuels importants.
- **Rupture par fatigue** : Sous l'effet de charges cycliques répétées lors de l'utilisation normale du tracteur, des concentrations de contraintes au niveau de la zone de rupture peuvent provoquer des fissures progressives, menant à une rupture par fatigue.
- **Effets liés au processus de fabrication** : Les opérations de formage, d'usinage ou d'assemblage peuvent générer des contraintes résiduelles et des déformations permanentes, favorisant l'apparition de fissures et réduisant la durabilité de l'axe.
- **Qualité du matériau** : Les imperfections dans le matériau, telles que les inclusions ou les hétérogénéités, peuvent créer des points faibles qui facilitent l'apparition de fissures et augmentent le risque de rupture de l'axe.

3.2 Approche par éléments finis

3.3 Données d'entrée

- Charges appliquées :

 - Poids total de l'ensemble : 500 N.
 - Tension de la chaîne : 200 N.

- Caractéristiques des matériaux :

 - Acier C9D :
 - Module d'Young : 210 GPa.
 - Coefficient de Poisson : 0.3.
 - Limite élastique : 300 MPa.
 - Nylon :
 - Module d'Young : 3 GPa.
 - Coefficient de Poisson : 0.4.
 - Polyéthylène :
 - Module d'Young : 1 GPa.
 - Coefficient de Poisson : 0.45.

3.4 Schéma des efforts, moments et liaisons appliqués à l'axe arrière

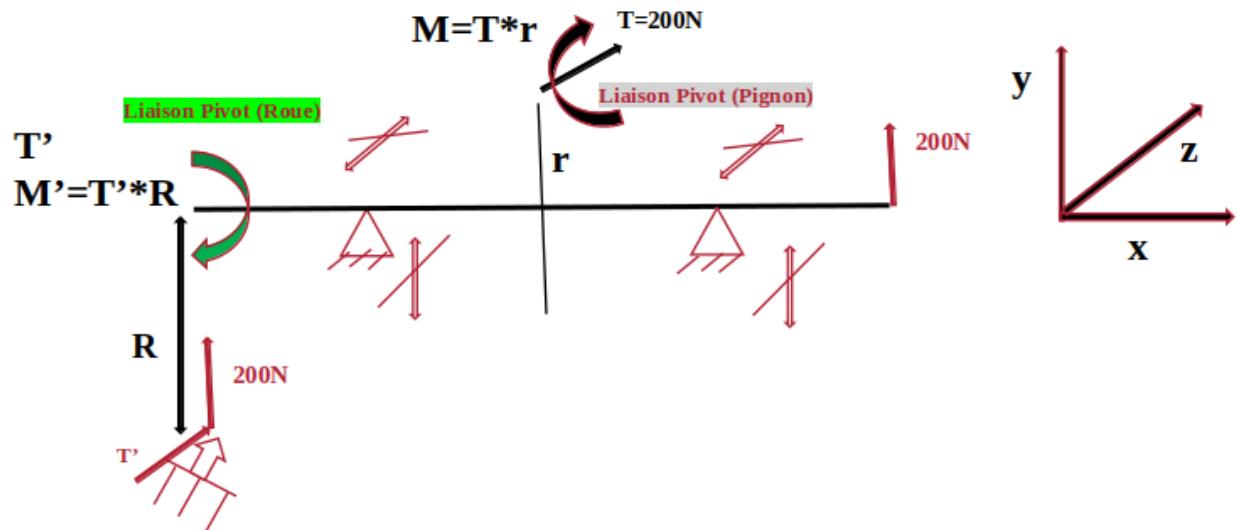


FIGURE 6

3.5 Critères d'évaluation

Les critères d'évaluation retenus sont :

- La contrainte de Von Mises maximale.
- Le coefficient de sécurité basé sur la limite élastique de l'acier C9D.
- Les déformations maximales.

4 Simulation du système actuel

4.0.1 Modélisation

Cette partie est consacrée à la modélisation du système existant, en particulier de l'axe arrière. Elle comprend la représentation des différentes liaisons mécaniques, l'application des efforts et des chargements agissant sur l'axe, ainsi que le choix des matériaux pour chaque composant du système, notamment le pignon et l'axe arrière.

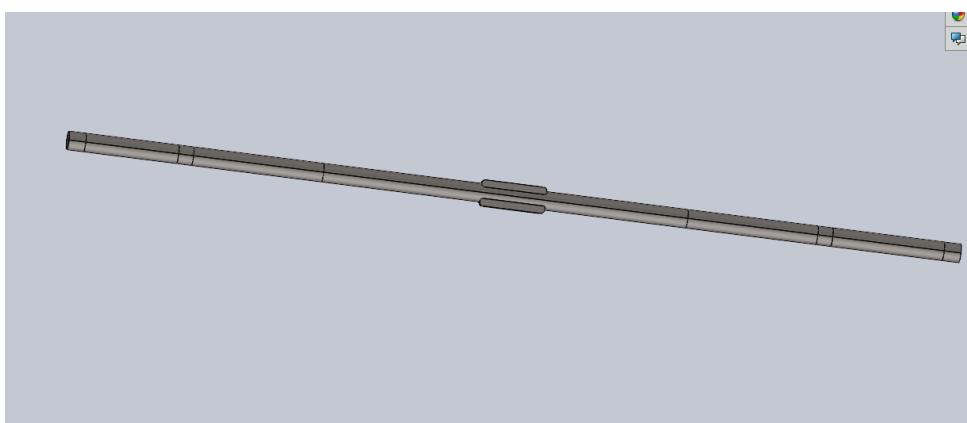


FIGURE 7 – Modélisation de l'axe arrière et répartition des liaisons

4.1 Analyse par éléments finis

L'analyse a été réalisée par la méthode des éléments finis à l'aide du logiciel *SolidWorks Simulation*.

4.1.1 Conditions aux limites et chargements

Dans le cadre de la simulation numérique, un chargement de type masse à distance a été appliqué sur chaque partie du l'axe afin de représenter les efforts dus au poids du tracteur et

de l'utilisateur. Des déplacements imposés ont également été appliqués au niveau des zones de liaison afin de représenter les conditions d'appui et de guidage de l'axe arrière.

Les translations seront bloquées dans les directions correspondantes afin de reproduire correctement le comportement statique de l'axe arrière.

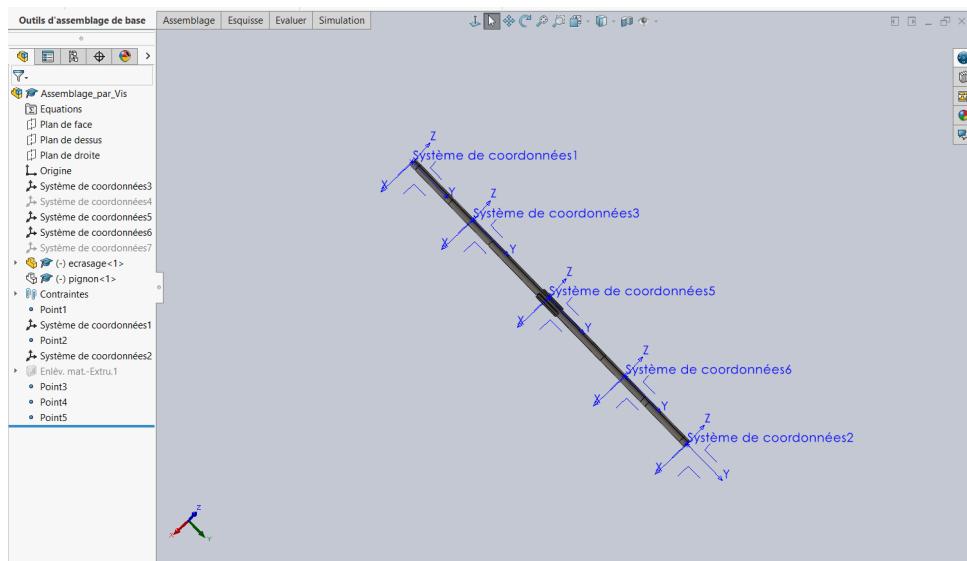


FIGURE 8 – Système de coordonné pour l'application de masse a distance

4.1.2 Maillage

Concernant le maillage, un maillage par défaut a été retenu pour l'ensemble des simulations. Ce choix est justifié par le caractère comparatif de l'étude, l'objectif étant d'analyser l'évolution relative des contraintes et des déplacements afin d'identifier la solution optimale.

4.2 Résultats des simulations du système existant

Les figures ci-dessous présentent les principaux résultats obtenus à l'issue des simulations numériques du système existant. Les zones apparaissant en rouge correspondent aux niveaux de contraintes les plus élevés. On observe que ces zones sont localisées au niveau de l'axe arrière, ce qui correspond à la position de la rupture constatée en service.

4.2.1 Interprétations du Resultat

On observe une concentration de contraintes dans la zone de transition entre la section circulaire de l'axe et le méplat, ce qui constitue le point le plus critique de la pièce. Sous l'effet combiné de la torsion, due à la transmission du couple moteur, et de la flexion, provoquée

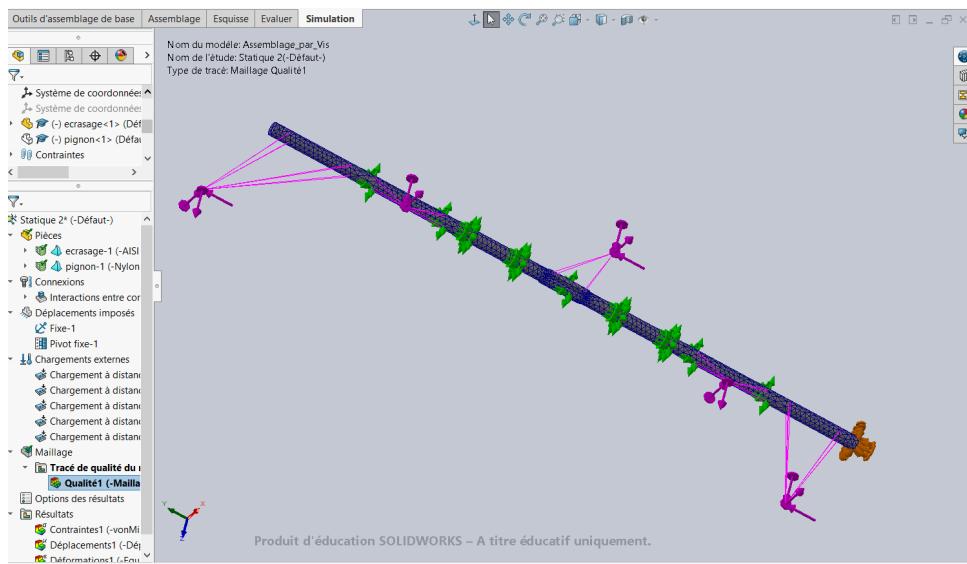


FIGURE 9 – Application des efforts et les chargements sur l'axe

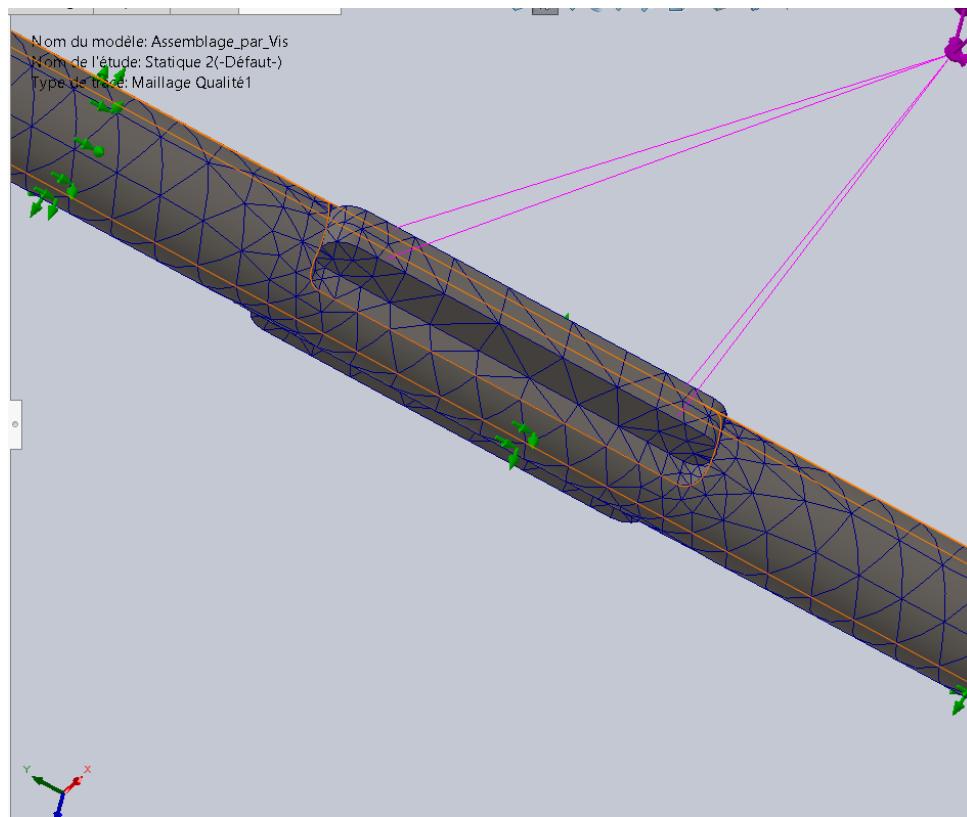


FIGURE 10 – Modèle de maillage

par le poids de l'enfant et du tracteur, ce pic de contrainte atteint des valeurs élevées. De plus, les contraintes résiduelles de traction introduites par le matriçage à froid du méplat viennent s'ajouter aux contraintes d'utilisation, réduisant ainsi la limite d'endurance effective du matériau. Cette combinaison de facteurs favorise l'amorçage et la propagation des fissures, expliquant la rupture par fatigue observée dans cette zone.

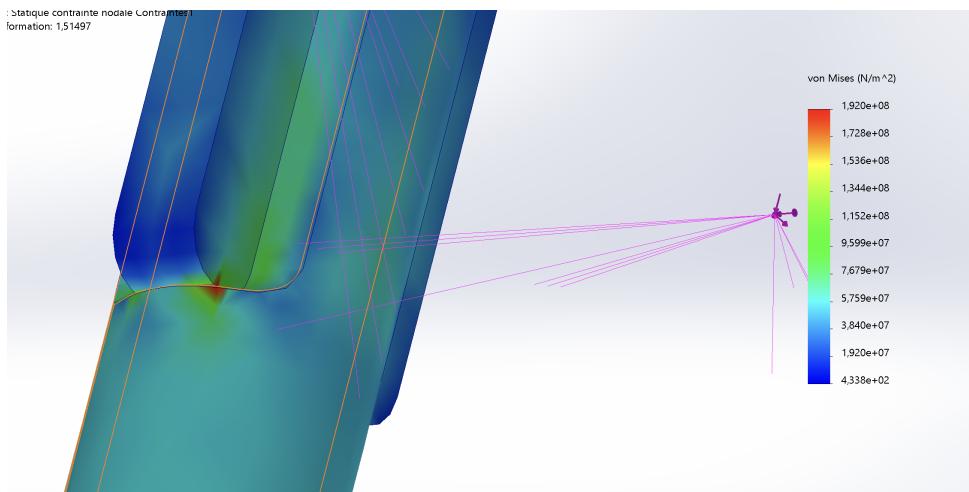


FIGURE 11

4.3 Analyse des faiblesses

Les faiblesses identifiées sont :

- La section réduite due au méplat crée une concentration de contraintes.
- Les jeux dans les guidages plastiques provoquent des chocs et des charges dynamiques non prises en compte dans le modèle statique, mais qui aggravent la situation.

5 Proposition de solutions d'amélioration

Afin d'optimiser la répartition des contraintes dans la zone critique, plusieurs solutions ont été étudiées et retenues augmenter la durée de vie de l'axe :

1. **Renfort local** : ajout de **nervures** ou **goussets** et **renures** dans les zones de concentration de contraintes pour augmenter la rigidité et mieux répartir les efforts.
2. **Amélioration des fixations** : utilisation de **goupilles**, vis de pression et collage pour sécuriser l'assemblage.
3. **Optimisation de la géométrie de la clavette** : adaptation de la forme de la clavette pour réduire les concentrations locales de contraintes.

6 Simulation des solutions proposées & Observation

Chaque solution a été simulée individuellement afin de pouvoir analyser précisément ses effets sur les résultats.

6.1 Renfort local

6.1.1 Nervures et goussets

Les **nervures** et **goussets** sont des renforts ajoutés aux zones critiques d'une pièce afin d'augmenter la rigidité et de mieux répartir les contraintes. Ils permettent également de limiter les déformations locales et d'améliorer la durabilité de l'assemblage.

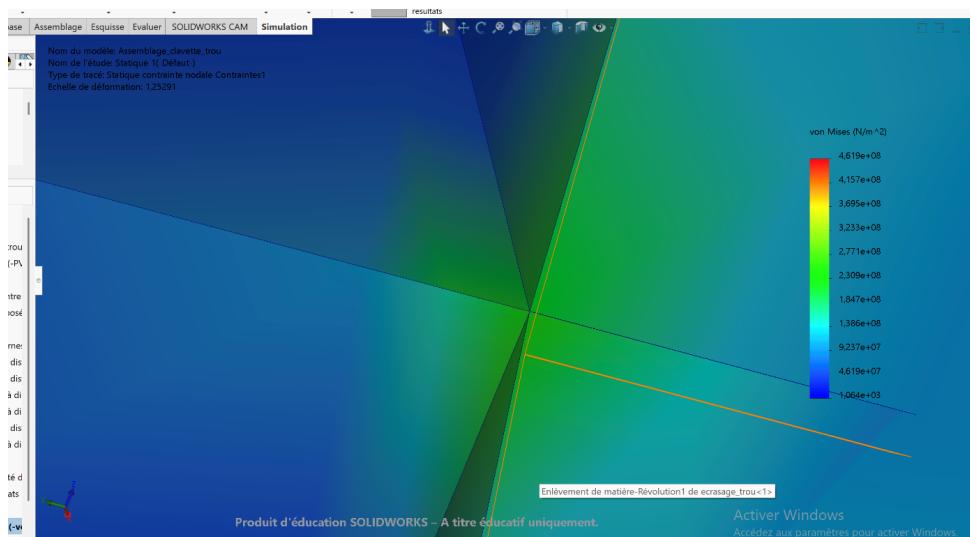


FIGURE 12

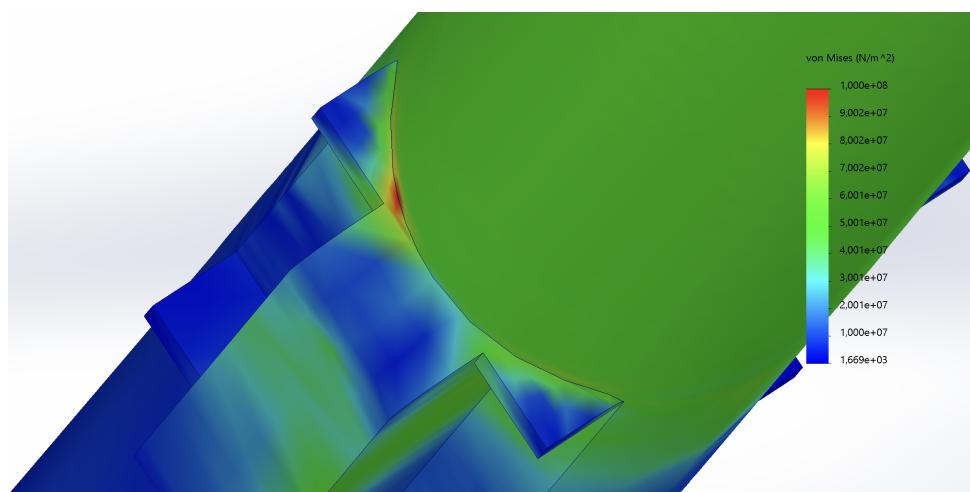


FIGURE 13

6.1.2 Rainures

Les **rainures** sont des rainures ou découpes réalisées dans la matière pour guider ou loger un élément, ou encore pour réduire les concentrations de contraintes. Elles contribuent à la redistribution des efforts et à la stabilité de la structure.

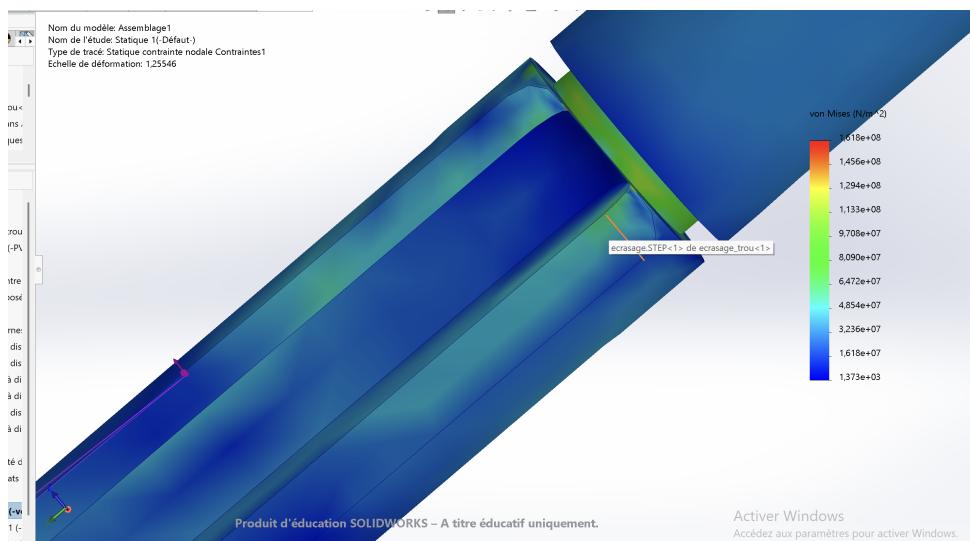


FIGURE 14

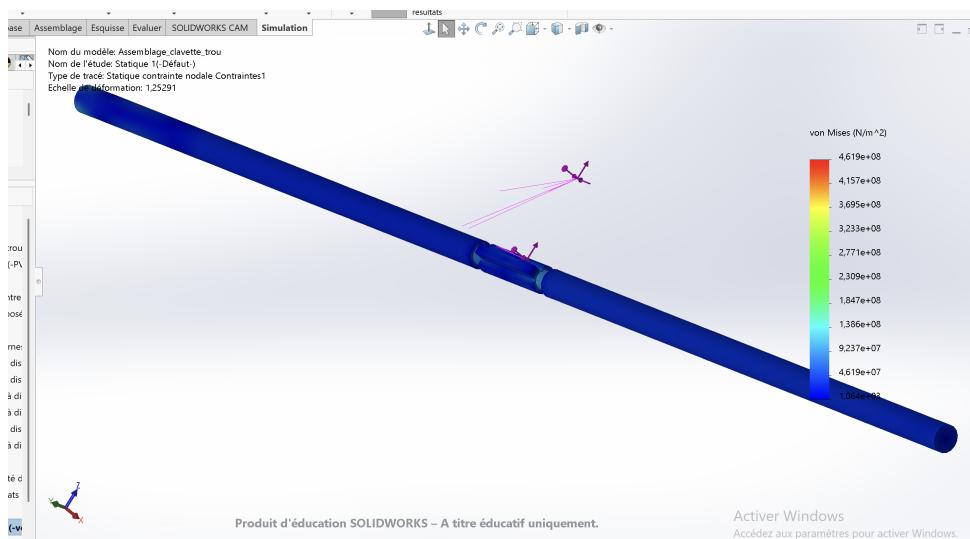


FIGURE 15

6.2 Amélioration des fixations

6.2.1 Goupilles

Une **goupille** est une tige cylindrique, en métal insérée dans un trou créé à l'intérieur de l'axe pour maintenir ensemble les deux pièces (pignon et l'axe).

6.2.2 Vis de pression

Les **vis de pression** sont des dispositifs de fixation qui exercent une force localisée sur une pièce pour la maintenir en position sans nécessiter de perçage permanent. Elles permettent un assemblage démontable et sécurisé.

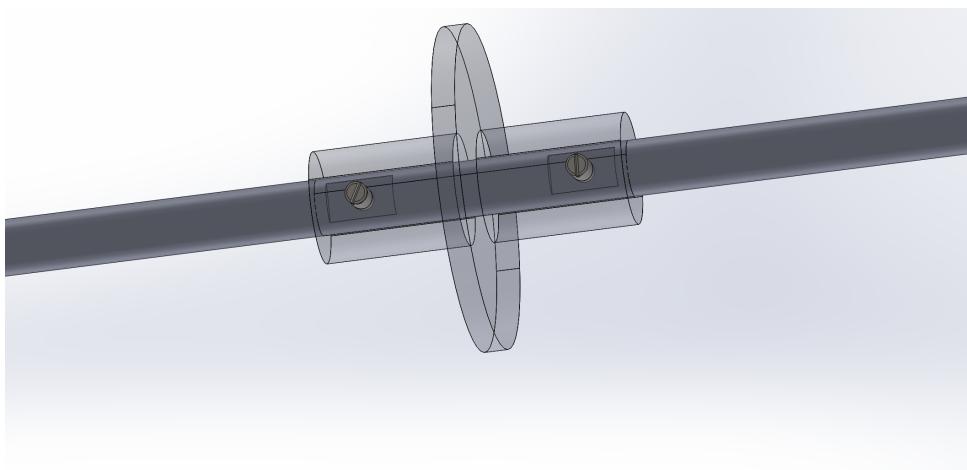


FIGURE 16

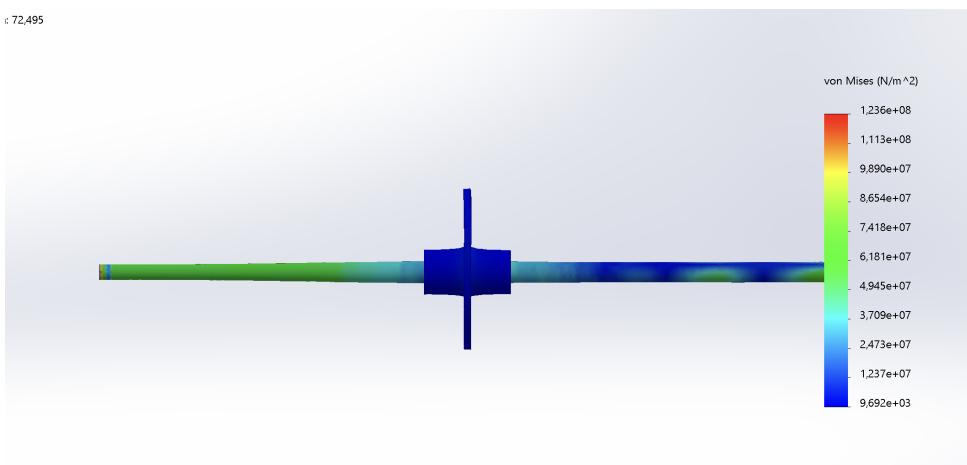


FIGURE 17

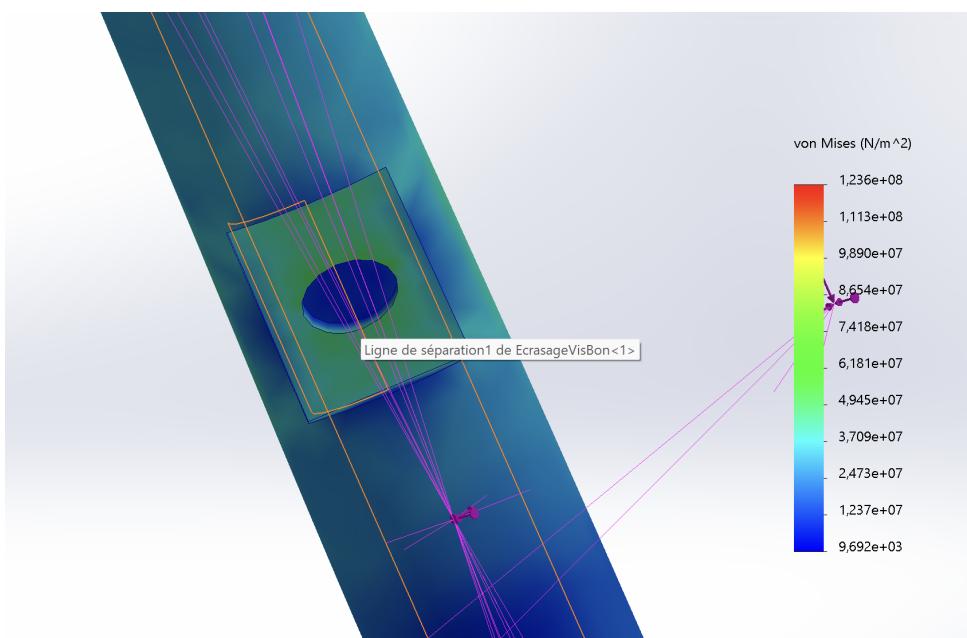


FIGURE 18

Interprétation : Tout comme la solution utilisant la vis de pression, cette approche permet de réduire l'initiation des fissures en limitant les concentrations de contraintes. Toutefois, elle nécessite des opérations d'usinage supplémentaires, ce qui engendre des coûts de fabrication plus élevés.

6.2.3 Collage

Le **collage** consiste à assembler deux pièces en utilisant un adhésif chimique ou époxy. Cette méthode répartit les contraintes sur une large surface et peut compléter ou remplacer des fixations mécaniques.

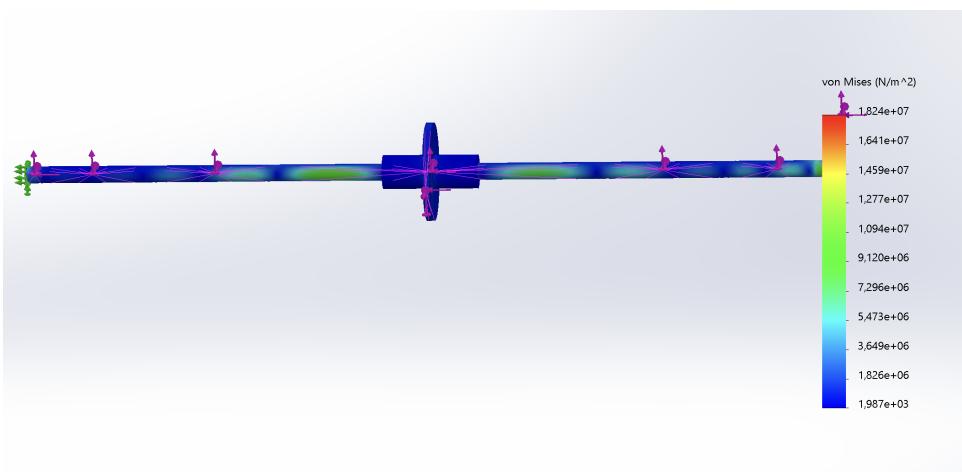


FIGURE 19

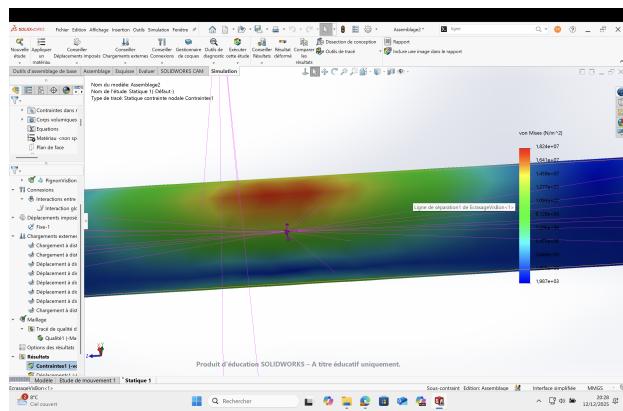


FIGURE 20 – Description image 1

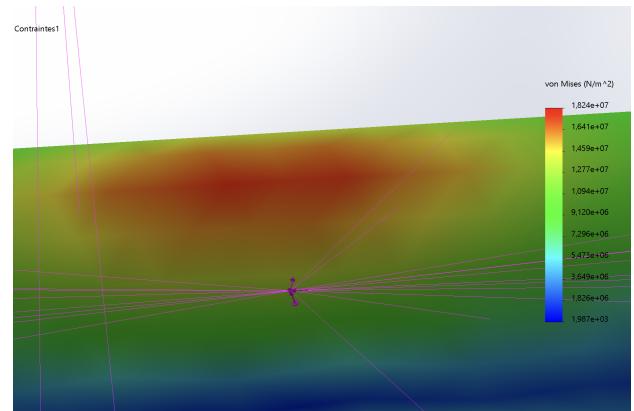


FIGURE 21 – Description image 2

Interprétation : La simulation montre que le collage permet une répartition des contraintes sur l'ensemble de la surface de contact, alors qu'à l'état initial, elles étaient fortement localisées en un point. Néanmoins, la zone collée présente un module plus faible, ce qui peut générer des

concentrations locales de contraintes. Un traitement de surface approprié pourrait être envisagé pour limiter l'usure prématûrée de la pièce.

6.3 Optimisation de la géométrie de la clavette

Les figures ci-après illustrent les différentes modifications de la forme de la clavette envisagées dans le cadre de la simulation.

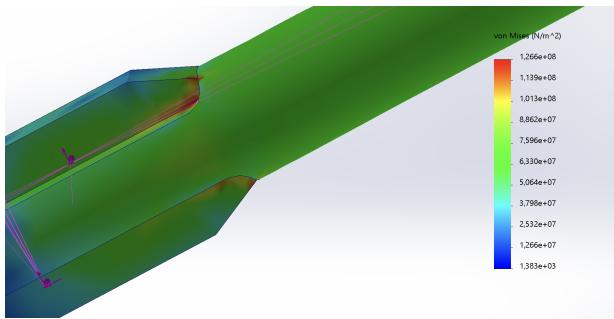


FIGURE 22 – Clavette optimisée 1

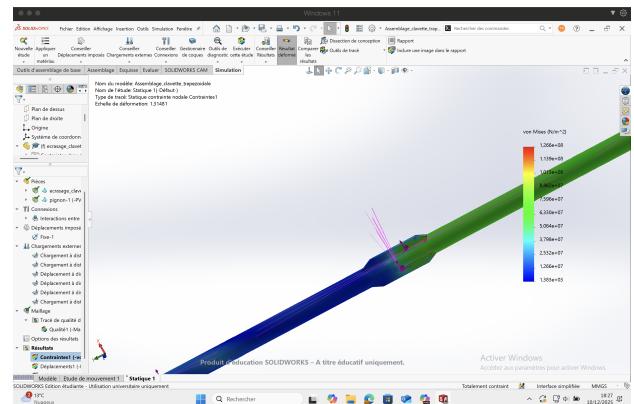


FIGURE 23 – Clavette optimisée 2

6.4 Matrice de Choix des solutions proposées

Dans le cadre de l'étude comparative, une matrice de choix a été élaborée afin d'évaluer les différentes solutions proposées. Une pondération élevée a été attribuée aux critères jugés prioritaires, à savoir l'efficacité mécanique, la faisabilité de mise en œuvre et la durabilité, tandis que le coût de fabrication a été pris en compte dans une optique de minimisation. Cette approche permet d'identifier la solution offrant le meilleur compromis entre performances mécaniques, viabilité industrielle et contraintes économiques.

6.5 Solution retenue

À l'issue de l'étude comparative des résultats obtenus à partir de la matrice de choix, la solution par collage apparaît comme la plus appropriée, avec une note de **11/12**. Elle présente le meilleur compromis entre efficacité mécanique, faisabilité de mise en œuvre, durabilité et coût de fabrication.

Les solutions utilisant la **vis de pression** et la **goupille** obtiennent chacune une note de **9/12**. Bien qu'elles offrent de bonnes performances mécaniques, elles nécessitent des opérations d'usinage supplémentaires, ce qui impacte leur coût et leur mise en œuvre.

Toutefois, ces solutions restent envisageables comme alternatives selon les contraintes industrielles, les exigences de démontabilité ou les conditions d'exploitation spécifiques.

7 Conclusion

À l'issue de ce projet, il a été mis en évidence que la rupture de l'axe est principalement due à une forte concentration de contraintes localisée au niveau de la transition entre la section circulaire et le méplat. Ce phénomène est aggravé par la combinaison des efforts de flexion, de torsion ainsi que par les contraintes résiduelles issues du procédé de fabrication.

L'étude comparative menée à l'aide d'une matrice de choix, portant sur six solutions techniques, a permis d'identifier la **modification géométrique de la clavette**, notamment par l'ajout d'un congé de raccordement, comme la solution la plus pertinente. Cette approche permet une réduction significative des concentrations de contraintes tout en garantissant un coût de fabrication maîtrisé, une mise en œuvre simple et une amélioration notable de la durée de vie de la pièce.

Ainsi, cette solution répond efficacement aux exigences techniques et économiques de l'industriel, tout en assurant une fiabilité accrue pour les utilisateurs finaux.