

	الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية	
	People's Democratic Republic of Algeria	
	وزارة التعليم العالي والبحث العلمي	
	Ministry of Higher Education and Scientific Research	
	جامعة عبد الحميد بن باديس – مستغانم	
	Abdel Hamid Ibn Badis University – Mostaganem	
	كلية العلوم والتكنولوجيا	
	Faculty of Sciences and Technology	
	قسم الهندسة الميكانيكية	
	Department of Mechanical Engineering	

N° d'ordre : M2...../GM/2026

MEMOIRE DE FIN D'ETUDES DE MASTER ACADEMIQUE

Filière : Génie Mécanique

Spécialité : Construction Mécanique

Thème

Éco-conception et validation d'un système levage à vis (Screw Lift Mechanism)

Présenté par

1- M^{elle} Bessenouci Hadil

Soutenu le 30/07/ 2026 devant le jury composé de :

Président(e) :	Benkabouche Salah-Eddine	Maitre de Conférences "B"	Université de Mostaganem
Examineurs :	Benaissa Mohamed	Maître Assistant "A"	Université de Mostaganem
Encadrant (e) :	Chenine Halima	Maitre de Conférences "B"	Université de Mostaganem

Année universitaire 2025 / 2026

Dédicaces

Je dédie ce modeste travail à :

*Mes très chers parents, à ma jumelle AYA et à mon frère Mohamed,
pour leur amour, leur soutien et leurs encouragements tout au long
de mon parcours.*

Remerciements

Avant toute chose, je rends grâce à Allah, الله سبحانه وتعالى, qui m'a accordé la force, la patience et la persévérance nécessaires pour mener à bien ce travail de recherche.

J'exprime ma profonde reconnaissance à mon encadrante, Mme CHENINE HALIMA, pour la confiance qu'elle m'a accordée, son accompagnement constant, sa disponibilité, ses conseils avisés ainsi que la rigueur scientifique qu'elle m'a transmise tout au long de l'élaboration de ce mémoire. Son soutien et ses encouragements ont été une source de motivation précieuse.

Je tiens également à adresser mes sincères remerciements aux membres du jury,

Dr BENKABOUCHE SALAH-EDDINE et Mr BENAÏSSA MOHAMED, pour l'honneur qu'ils me font en acceptant d'évaluer ce travail. Je leur suis reconnaissant(e) pour le temps consacré à sa lecture ainsi que pour leurs remarques, suggestions et observations constructives, qui contribueront à enrichir cette étude.

J'adresse enfin mes plus vifs remerciements au Dr BELOUFA IMANE pour sa disponibilité, son soutien indéfectible. Son aide a été d'une grande valeur dans l'aboutissement de ce mémoire.

Je tiens également à adresser mes sincères remerciements à M. Mansour Benhaoua ainsi qu'à M. Sekiou Houcine pour leur accompagnement et leur soutien lors de la réalisation des travaux d'impression 3D. Leur disponibilité, leur assistance technique ainsi que leurs précieux conseils ont largement contribué au bon déroulement de cette partie expérimentale et ont grandement facilité sa réalisation.

À toutes les personnes qui, de près ou de loin, ont contribué à la réalisation de ce travail et m'ont apporté leur soutien moral ou scientifique, j'exprime ma sincère gratitude.

Liste des Figures

Figures du premier chapitre

Figure I- 1: Terminologie et géométrie des filets de vis de puissance	5
Figure I- 2: Courbe d'hystérésis (backlash) typique dans un système de contrôle de mouvement	5
Figure I- 3: Distribution des contraintes de Von Mises pour différents profils de filetage.....	8
Figure I- 4: Tolérances typiques obtenues par différents procédés d'usinage	12

Figures du deuxième chapitre

Figure II-1: Comparaison entre un écrou standard et un écrou anti-jeu.....	18
Figure II-2: Erreur relative en fonction de la taille des pas de mouvement.....	23

Figures du Troisième chapitre

Figure III-1: Modèle CAO de la vis trapézoïdale	41
Figure III-2: Modèle tridimensionnel de la vis trapézoïdale.....	43
Figure III-3: Assemblage 3D du système de translation sous SolidWorks.....	45
Figure III-4: Modèle CAO des deux demi-écrous constituant le système anti-jeu.....	46
Figure III-5: Modélisation tridimensionnelle des ressorts de précontrainte.....	48
Figure III-6: Assemblage et positionnement de l'écrou anti-jeu sous SolidWorks.....	49
Figure III-7: Modélisation tridimensionnelle des engrenages coniques.....	51
Figure III-8: Assemblage et positionnement de l'engrenage conique sous SolidWorks.....	52
Figure III-9: Manivelle et arbre secondaire	52
Figure III-10: Manivelle et arbre secondaire sous SolidWorks	53
Figure III-11: Clavettes de transmission de l'arbre secondaire	54
Figure III-12: Modélisation 3D de la clavette coulissante	54
Figure III-13: Structure porteuse complète.....	55
Figure III-14: Structure porteuse sous SolidWorks	56
Figure III-15: Tiges de guidage et leurs alésages.....	57
Figure III-16: Assemblage et positionnement de tiges de guidage sous SolidWorks.....	58
Figure III-17: Règle graduée et index	59
Figure III-18: Vue éclatée de l'assemblage du système de levage réalisée sous SolidWorks.....	61
Figure III-19: Arbre d'assemblage (FeatureManager).....	61
Figure III-20: Capture d'écran de l'assemblage final (isométrique)	62
Figure III-21: Graphique position de la vis en fonction du temps	64
Figure III-22: Capture d'écran de l'animation (plusieurs positions).....	65

Figures du quatrième chapitre

Figure IV-1: Maillage adopté pour la vis trapézoïdale	70
Figure IV-2: Répartition des contraintes équivalentes de von Mises dans la vis trapézoïdale réalisée en PolyMax PLA.....	74
Figure IV-3: Répartition des déplacements totaux de la vis trapézoïdale réalisée en PolyMax PLA...76	
Figure IV-4: Répartition des contraintes dans l'écrou anti-jeu en PLA-CF sous une charge de 550 N.....	79

Figure IV-5: Répartition des contraintes dans l'écrou anti-jeu en PETG-CF sous une charge de 550 N.	83
Figure IV-6: Évolution de la contrainte équivalente de von Mises maximale en fonction de la charge appliquée	88

Liste des Tableaux

Tableaux du premier chapitre

Tableau I- 1: Synthèse des principales limitations des systèmes vis-écrou et des solutions proposées.	4
Tableau I- 2: Comparaison des principales caractéristiques des deux technologies. [2,3,7]	11

Tableaux du troisième chapitre

Tableau III-1: Chaîne cinématique du système de levage proposé	31
Tableau III-2: Composants principaux et justifications	37
Tableau III-3: Propriétés des matériaux utilisés	38
Tableau III-4: Modélisation 3D de la vis trapézoïdale TR16×4	42
Tableau III-5: Dimensions des demi-écrous (A et B)	47
Tableau III-6: Caractéristiques des ressorts	49
Tableau III-7: Caractéristiques géométriques des engrenages coniques.	51
Tableau III-8: Dimensions de la manivelle et de l'arbre secondaire	53
Tableau III-9: Dimensions de la clavette coulissante	55
Tableau III-10: Nomenclature des composants	56
Tableau III-11: Dimensions de la structure porteuse	57
Tableau III-12: Dimensions des tiges de guidage	59
Tableau III-13: Dimensions de la règle et de l'index	60
Tableau III-14: Contraintes d'assemblage	62
Tableau III-15: Nomenclature des composants du système de levage	63

Tableaux du quatrième chapitre

Tableau IV-1: Propriétés mécaniques des matériaux utilisés dans la simulation	73
Tableau IV-2: Contrainte maximale de von Mises et coefficient de sécurité – PolyMax PLA	75
Tableau IV-3: Déplacement maximal de la vis trapézoïdale en fonction de la charge appliquée – PolyMax PLA.	77
Tableau IV-4: Contrainte maximale de von Mises et coefficient de sécurité – PLA-CF	78
Tableau IV-5: Déplacement axial maximal – PLA-CF	80
Tableau IV-6: Contrainte maximale de von Mises et coefficient de sécurité – PETG-CF	83
Tableau IV-7: Déplacement axial maximal – PETG-CF	84
Tableau IV-8: Comparaison des trois matériaux sous la charge nominale (350 N)	86
Tableau IV-9: Données utilisées pour la courbe comparative des contraintes	87
Tableau IV-10: Synthèse des performances et domaines d'utilisation recommandés	89
Tableau IV-11: Répartition de la charge axiale entre les filets de l'écrou	90
Tableau IV-12: Comparaison entre les résultats théoriques et numériques	91

Liste des Symboles

Symbole	Désignations	Unités
A	Aire de la section transversale	mm ²
B	Backlash (jeu mécanique total)	mm
c	Erreur sur l'entraxe	mm
d	Diamètre nominal de la vis	mm
d_m	Diamètre moyen de la vis	mm
e	Excentricité entre l'axe neutre et l'axe centroidal	mm
E	Module d'Young	GPa
F	Force axiale appliquée	N
F_i	Charge supportée par le filet <i>i</i>	N
K_i	Coefficient de répartition des charges	Sans unité
L	Pas (Lead) de la vis	mm
M	Moment de flexion	N·mm
n	Nombre de filets en contact	Sans unité
r	Rayon	mm
r_n	Rayon de l'axe neutre	mm
rc	Rayon de l'axe centroidal	mm
T	Couple d'entraînement	N·m
t	Tolérance sur l'épaisseur du filet	mm
y	Distance radiale entre le point considéré et l'axe neutre	mm
α	Angle de pression du filet	°
λ	Angle d'hélice de la vis	°
μ	Coefficient de frottement	Sans unité
η	Rendement mécanique	Sans unité
σ	Contrainte normale	MPa
v	Coefficient de Poisson	Sans unité

Liste des abréviations

Abréviation	Signification
ABB	Asea Brown Boveri
ACME	Filetage trapézoïdal ACME
CAD	Computer-Aided Design
CAE	Computer-Aided Engineering
CAO	Conception Assistée par Ordinateur
CNC	Computer Numerical Control
DfAM	Design for Additive Manufacturing
FEA	Finite Element Analysis
GPS	Geometrical Product Specifications
ISO	International Organization for Standardization
PEEK	Polyétheréthercétone
PLA	Acide polylactique
PTFE	Polytétrafluoroéthylène
SME	Society of Manufacturing Engineers
TCP	Tool Center Point
TR	Filetage trapézoïdal

Résumé

Ce mémoire porte sur la conception, la modélisation, la fabrication et l'étude d'un système de levage à vis trapézoïdale intégrant un écrou anti-jeu destiné à réduire le phénomène de backlash et à améliorer la précision du positionnement. Bien que les systèmes vis-écrou soient largement utilisés pour leur simplicité, leur robustesse et leur efficacité dans la transformation d'un mouvement de rotation en un mouvement de translation, leurs performances demeurent limitées par le jeu mécanique, qui affecte la précision, la répétabilité et la qualité du positionnement. Le système proposé a été conçu et modélisé en trois dimensions à l'aide du logiciel SolidWorks 2025. L'ensemble des composants a été assemblé virtuellement afin de vérifier la cohérence géométrique du mécanisme, son bon fonctionnement et l'absence d'interférences. Une simulation cinématique réalisée sous SolidWorks Motion a permis de valider le comportement du système en mettant en évidence une vitesse de translation de 2 mm/s, conforme aux calculs théoriques, ainsi qu'un jeu axial résiduel limité à 0,08 mm grâce au dispositif anti-jeu. Les modèles numériques ont ensuite été fabriqués par impression 3D selon le procédé de dépôt de filament fondu (FDM), permettant la réalisation d'un prototype fonctionnel. Par ailleurs, une étude numérique par éléments finis réalisée sous Abaqus a permis d'analyser la répartition des contraintes, les déplacements et le comportement mécanique du système sous différentes conditions de chargement. Une comparaison de trois matériaux compatibles avec la fabrication additive (PolyMax PLA, PLA-CF et PETG-CF) a montré que le PLA-CF constitue le meilleur compromis entre rigidité, résistance mécanique et précision de positionnement. Les résultats obtenus démontrent que la solution développée permet de réduire efficacement le backlash tout en conservant une architecture mécanique simple, robuste et facilement reproductible. Ce travail met ainsi en évidence l'intérêt de l'association entre la conception assistée par ordinateur, la simulation numérique, la fabrication additive et l'éco-conception pour le développement de systèmes de levage précis, économiques et adaptés au prototypage fonctionnel.

Mots-clés : Vis trapézoïdale ; Écrou anti-jeu ; Backlash ; SolidWorks ; Abaqus ; Fabrication additive ; Impression 3D ; Éco-conception ; Analyse par éléments finis ; Précision de positionnement.

Abstract

This dissertation focuses on the design, modeling, fabrication, and analysis of a trapezoidal lead screw lifting system incorporating an anti-backlash nut intended to reduce backlash and improve positioning accuracy. Although screw–nut mechanisms are widely used because of their simplicity, robustness, and efficiency in converting rotary motion into linear motion, their performance is often limited by mechanical clearance, which adversely affects positioning accuracy, repeatability, and overall system performance. The proposed system was designed and modeled in three dimensions using SolidWorks 2025. All components were virtually assembled to verify the geometric consistency of the mechanism, ensure proper operation, and detect any possible interferences. A kinematic simulation performed using SolidWorks Motion validated the system behavior, demonstrating a linear translation speed of 2 mm/s, in agreement with theoretical calculations, together with a residual axial backlash limited to 0.08 mm owing to the anti-backlash mechanism. The numerical models were subsequently manufactured using Fused Deposition Modeling (FDM) 3D printing, resulting in a functional prototype. In addition, a finite element analysis (FEA) carried out with Abaqus was performed to investigate the stress distribution, displacement fields, and mechanical behavior of the system under different loading conditions. A comparative study involving three additive manufacturing materials (PolyMax PLA, PLA-CF, and PETG-CF) demonstrated that PLA-CF provides the best compromise between stiffness, mechanical strength, and positioning accuracy. The obtained results demonstrate that the proposed solution effectively reduces backlash while maintaining a simple, robust, and easily manufacturable mechanical architecture. This work highlights the benefits of combining computer-aided design, numerical simulation, additive manufacturing, and eco-design principles for the development of accurate, cost-effective, and reliable lifting systems.

Keywords: Trapezoidal lead screw; Anti-backlash nut; Backlash; SolidWorks; Abaqus; Additive manufacturing; 3D printing; Eco-design; Finite Element Analysis (FEA); Positioning accuracy.

الملخص

تتناول هذه المذكرة تصميم ونمذجة وتصنيع ودراسة نظام رفع يعتمد على لولب شبه منحرف مزود بصامولة مانعة للخلوص (Anti-Backlash Nut) ، بهدف الحد من ظاهرة الخلوص الميكانيكي (Backlash) وتحسين دقة التموضع. وعلى الرغم من أن أنظمة اللولب والصامولة تُستخدم على نطاق واسع لما تتميز به من بساطة ومثانة وكفاءة في تحويل الحركة الدورانية إلى حركة انتقالية، إلا أن أدائها يتأثر بوجود الخلوص الميكانيكي، الذي ينعكس سلبيًا على دقة التموضع وقابلية التكرار وجودة الأداء الميكانيكي. تم تصميم النظام المقترح ونمذجته ثلاثي الأبعاد باستخدام برنامج SolidWorks 2025 ، كما تم تجميع جميع مكوناته افتراضياً للتحقق من سلامة التجميع، والتوافق الهندسي، وخلو الآلية من أي تداخلات ميكانيكية. وأظهرت المحاكاة الحركية المنجزة بواسطة SolidWorks Motion توافق أداء النظام مع الحسابات النظرية، حيث بلغت سرعة الحركة الخطية 2 مم/ثانية، مع خفض الخلوص المحوري المتبقي إلى 0.08 مم بفضل آلية الصامولة المانعة للخلوص. بعد ذلك، تم تصنيع النموذج الأولي باستخدام تقنية الطباعة ثلاثية الأبعاد بالترسيب المنصهر (FDM) ، مما أتاح الحصول على نموذج وظيفي قابل للتجريب. كما أُجريت دراسة عددية باستخدام برنامج Abaqus اعتمادًا على طريقة العناصر المحددة لتحليل توزيع الإجهادات والإزاحات ودراسة السلوك الميكانيكي للنظام تحت ظروف تحميل مختلفة. وقد شملت الدراسة مقارنة بين ثلاثة مواد مستخدمة في التصنيع بالإضافة وهي PolyMax PLA و PLA-CF و PETG-CF ، حيث أظهرت النتائج أن مادة PLA-CF تحقق أفضل توازن بين الصلابة والمقاومة الميكانيكية ودقة التموضع. وتبين النتائج المتحصل عليها أن النظام المقترح يساهم بفعالية في تقليل ظاهرة الخلوص الميكانيكي مع الحفاظ على بنية ميكانيكية بسيطة ومتينة وسهلة التصنيع. كما تؤكد هذه الدراسة أهمية الجمع بين التصميم بمساعدة الحاسوب، والمحاكاة العددية، والتصنيع بالإضافة، ومبادئ التصميم البيئي في تطوير أنظمة رفع دقيقة واقتصادية وموثوقة.

الكلمات المفتاحية: اللولب شبه المنحرف؛ الصامولة المانعة للخلوص؛ الخلوص الميكانيكي (Backlash)؛ سولييدور كس (SolidWorks)؛ أباكوس (Abaqus)؛ التصنيع بالإضافة؛ الطباعة ثلاثية الأبعاد؛ التصميم البيئي؛ تحليل العناصر المحددة؛ دقة التموضع.

Table des matières

Dédicaces.....	i
Remerciements	ii
Liste des Symboles	vi
Liste des abréviations	vii
Résumé	viii
Chapitre I.....	0
Étude bibliographique et état de l'art.....	0
I.1. Introduction.....	1
I.2. Limitations des systèmes vis-écrou	1
I.2.1. Le phénomène de backlash.....	1
I.2.2. Influence du frottement et rendement mécanique.....	2
I.3. Applications industrielles des systèmes vis-écrou	2
I.3.1. Robots industriels	2
I.3.2. Machines-outils à commande numérique (CNC)	2
I.3.3. Comparaison entre les vis ACME et les vis à billes	2
I.4. Intérêt scientifique et contribution du projet	3
I.5. Synthèse et intérêt du projet.....	3
I.6. Fondements théoriques des mécanismes vis-écrou.....	4
I.6.1 Géométrie des filets de vis	4
I.6.2 Définition du backlash	5
I.6.3 Estimation analytique du backlash	6
I.6.4 Sources principales d'erreurs dans un mécanisme vis-écrou.....	6
I.7. Conséquences fonctionnelles du backlash.....	8
I.8. Solutions classiques de réduction du backlash	9
I.8.1 Écrous à précharge	9
I.8.2 Compensation numérique	10
I.8.3 Systèmes anti-backlash actifs	10
I.8.4 Optimisation du profil de filetage	10
I.8.5 Comparaison approfondie entre les vis trapézoïdales et les vis à billes.....	10
I.9. Limites des solutions existantes et justification de la solution proposée	14
Chapitre II.....	0
.....	0
Fondements scientifiques et conception du système proposé	0
II.1. Introduction	15

II.2. Origine et impacts du problème traité	15
II.3. Influence du frottement sur le rendement et la stabilité mécanique	16
II.4. Solution mécanique proposée pour la réduction du backlash	18
II.5. Analyse de la répartition des charges sur les filets	19
II.6 Système d'indication mécanique de position	20
II.6.1 Principe de fonctionnement	20
II.6.2 Avantages scientifiques et techniques.....	21
II.6.2.1 Fiabilité intrinsèque de la mesure	21
II.6.2.2 Respect du principe d'Abbe.....	22
II.6.2.3 Simplicité, robustesse et facilité de maintenance	22
II.6.2.4 Contribution du système proposé.....	22
II.7 Méthodologie de validation expérimentale des systèmes vis-écrou	22
II.7.1-Instrumentation et Métrologie	23
II.7.2-Caractérisation du Backlash.....	24
II.7.3 Essais sous charge et à différentes vitesses	24
II.8 Performances attendues du système proposé	24
II.8.1. Réduction du backlash.....	25
II.8.2. Stabilité de l'indication de position	25
II.9 Contribution scientifique du projet	26
II.9.1 Contribution technique	26
II.9.2 Contribution scientifique	27
II.10 Stratégie de conception et protocole de validation	27
II.10.1 Conception assistée par ordinateur.....	27
II.11 Synthèse du chapitre et transition vers la conception détaillée	28
Chapitre III.....	0
.....	0
Conception, modélisation et validation du système de levage	0
III.1 Introduction.....	30
III.2 Analyse fonctionnelle et cinématique du système	30
III.2.1 Analyse de la chaîne cinématique.....	30
III.2.2 Détermination de la vitesse linéaire théorique	32
III.2.3 Analyse physique du mécanisme	32
III.2.4 Mobilité du mécanisme	33
III.2.5 Considérations d'éco-conception.....	34
III.2.6 Domaine de validité du prototype	35
III.3 Choix technologiques et sélection des matériaux	36

III.3.1 Critères de sélection des matériaux	38
III.3.2 Vis trapézoïdale TR16×4	39
III.3.2.1 Choix de la vis	39
III.3.2.2 Dimensionnement géométrique de la vis	40
III.3.2.3 Modélisation de la vis sous SolidWorks	43
III.3.2.4 Vérification simplifiée de la résistance au flambage.....	44
III.3.3 Conception de l'écrou anti-jeu	45
III.3.4 Ressorts de précontrainte	48
III.3.5 Engrenages coniques	50
III.3.6 Manivelle et arbre secondaire	52
III.3.7 Clavette coulissante.....	54
III.3.8 Bâti et structure porteuse	55
III.3.9 Tiges de guidage.....	57
III.3.10 Règle graduée et index.....	59
III.3.11 Intégration des principes d'éco-conception	60
III.4 Vue éclatée de l'assemblage.....	60
III.5 Assemblage virtuel sous SolidWorks (Assembly).....	61
III.6 Contraintes mécaniques (Mates) appliquées	62
III.7 Simulation cinématique sous SolidWorks Motion	63
III.7.1 Objectif	63
III.7.2 Paramètres de simulation	63
III.7.3 Résultats qualitatifs	63
III.7.4 Mesure du jeu axial résiduel (backlash)	65
III.8 Discussion des résultats	66
Chapitre IV	0
.....	0
Analyse par Éléments Finis sous Abaqus d'une vis trapézoïdale TR 16 x4 soumise à un Chargement Axial Croissant	0
IV.1. Introduction	69
IV.2 Modélisation numérique et conditions aux limites	69
IV.2.1 Géométrie et maillage	69
IV.2.2 Conditions aux limites et chargement	70
IV.2.3 Propriétés mécaniques des matériaux étudiés	72
IV.3 Analyse des résultats obtenus avec le PolyMax PLA	74
IV.3.1 Analyse de la répartition des contraintes équivalentes de von Mises.....	74
IV.3.2 Analyse des déplacements	76

IV.4 Analyse des performances mécaniques du PLA-CF	78
IV.4.1 Analyse des contraintes équivalentes de von Mises	78
IV.4.2 Analyse des déplacements	80
IV.4.3 Synthèse des performances du PLA-CF	81
IV.5 Analyse des performances mécaniques du PETG-CF	82
IV.5.1 Analyse des contraintes équivalentes de von Mises	82
IV.5.2 Analyse des déplacements	84
IV.5.3 Synthèse des performances du PETG-CF	85
IV.6 Comparaison des performances mécaniques des matériaux étudiés	85
IV.6.1 Comparaison sous la charge nominale	86
IV.6.2 Évolution des contraintes en fonction de la charge	87
IV.6.3 Domaine d'utilisation recommandé des matériaux	88
IV.7 Validation des modèles théoriques	90
IV.7.1 Répartition des charges entre les filets	90
IV.7.2 Validation du modèle de Winkler–Bach	91
IV.8 Discussion générale des résultats	92
IV.8.1 Influence du matériau sur les performances mécaniques	93
IV.8.2 Influence de la rigidité sur la précision du positionnement	93
IV.8.3 Apport du système anti-jeu	94
IV.8.4 Limites de l'étude	94

Introduction Générale

Dans de nombreux secteurs industriels, les systèmes de transmission mécanique jouent un rôle essentiel dans la réalisation de mouvements de translation, le positionnement de composants ou encore le levage de charges. Parmi les différentes solutions disponibles, les mécanismes vis-écrou occupent une place importante en raison de leur simplicité de conception, de leur robustesse et de leur capacité à transformer un mouvement de rotation en un mouvement de translation avec une grande précision. Ces dispositifs sont largement utilisés dans les machines-outils, les équipements de manutention, les systèmes de levage, les actionneurs mécaniques ainsi que dans de nombreux dispositifs de réglage et de positionnement.

Malgré leurs nombreux avantages, les systèmes vis-écrou présentent une limitation importante liée au jeu mécanique, communément appelé backlash. Ce phénomène, résultant des tolérances de fabrication, de l'usure ou encore des conditions d'assemblage, engendre des erreurs de positionnement, une diminution de la répétabilité des mouvements et une dégradation progressive de la précision du système. Dans les applications nécessitant un positionnement précis, la maîtrise de ce jeu constitue donc un enjeu majeur.

Afin de réduire ce phénomène, plusieurs solutions ont été proposées dans la littérature scientifique, telles que les écrous à précharge, les systèmes à rattrapage automatique de jeu, les compensations numériques ou encore les dispositifs mécaniques à double écrou. Toutefois, ces solutions présentent souvent des compromis en termes de complexité de fabrication, de coût, de maintenance ou de rendement mécanique. Dans ce contexte, le développement d'un mécanisme anti-jeu simple, fiable et facilement réalisable représente une alternative particulièrement intéressante.

Le présent mémoire s'inscrit dans cette problématique et a pour objectif de concevoir, modéliser, fabriquer et valider un système de levage à vis trapézoïdale intégrant un écrou anti-jeu capable de réduire efficacement le backlash tout en conservant une architecture mécanique simple et économiquement accessible. La démarche adoptée repose sur une approche globale associant la conception assistée par ordinateur, la simulation numérique, la fabrication additive et les principes de l'éco-conception.

Dans un premier temps, l'ensemble des composants du système a été conçu et modélisé sous SolidWorks 2025 selon une approche paramétrique. Les différentes pièces ont ensuite été

assemblées virtuellement afin de vérifier leur compatibilité géométrique, l'absence d'interférences ainsi que le bon fonctionnement de la chaîne cinématique. Une simulation réalisée sous SolidWorks Motion a permis de valider le comportement cinématique du mécanisme et de vérifier la conformité des résultats avec les calculs théoriques.

Les modèles numériques ont ensuite été préparés pour une fabrication par impression 3D selon le procédé de dépôt de filament fondu (FDM), conduisant à la réalisation d'un prototype fonctionnel. Parallèlement, une étude numérique par éléments finis a été menée sous Abaqus afin d'évaluer le comportement mécanique des principaux composants du système sous différents niveaux de chargement. Cette analyse a permis d'étudier la répartition des contraintes, les déplacements et les coefficients de sécurité, tout en comparant les performances de plusieurs matériaux compatibles avec la fabrication additive dans une démarche d'éco-conception.

Au-delà de la validation mécanique, ce travail s'inscrit également dans une démarche visant à limiter l'impact environnemental du prototype. Le recours à la fabrication additive, l'utilisation d'un nombre réduit de matériaux, la conception facilitant le démontage ainsi que la recherche d'un compromis entre performances mécaniques, consommation de matière et recyclabilité constituent les principaux axes d'éco-conception développés dans cette étude.

Afin de répondre à ces objectifs, ce mémoire est organisé en quatre chapitres.

Le premier chapitre présente une étude bibliographique consacrée aux systèmes vis-écrou, à leurs domaines d'application, aux phénomènes de backlash ainsi qu'aux principales solutions développées pour réduire le jeu mécanique.

Le deuxième chapitre est consacré à la justification scientifique de la solution retenue. Il expose les fondements théoriques, les principes mécaniques, la méthodologie de conception ainsi que les critères de validation adoptés pour le développement du système.

Le troisième chapitre décrit la conception du système de levage, les choix technologiques, la modélisation des différents composants sous SolidWorks, l'assemblage virtuel, la simulation cinématique ainsi que la fabrication du prototype par impression 3D.

Le quatrième chapitre présente l'étude numérique réalisée sous Abaqus. Il est consacré à l'analyse du comportement mécanique du système, à la comparaison de plusieurs matériaux d'impression 3D et à l'interprétation des résultats obtenus dans une perspective d'optimisation et d'éco-conception.

Enfin, une conclusion générale synthétise les principaux résultats de cette étude, met en évidence les apports scientifiques et techniques du travail réalisé, puis présente plusieurs perspectives de développement et d'amélioration du système proposé.

Chapitre I

Étude bibliographique et état de l'art

I.1. Introduction

Les systèmes mécaniques de transmission de mouvement constituent l'épine dorsale de nombreuses applications industrielles, notamment dans les domaines de la manutention, des presses mécaniques, des systèmes de positionnement et de la robotique industrielle. Ils assurent la transmission de la puissance ainsi que la transformation d'un mouvement de rotation en un mouvement de translation ou inversement, tout en garantissant la précision, la fiabilité et la robustesse exigées par les applications industrielles modernes [1,2].

Parmi les différents systèmes de transmission mécanique, le mécanisme vis-écrou (Lead Screw and Nut) occupe une place importante grâce à sa simplicité de conception, sa robustesse, son faible coût de fabrication ainsi que sa capacité à convertir un mouvement de rotation en un déplacement linéaire avec une bonne précision [2]. Ces caractéristiques expliquent son utilisation dans de nombreux équipements industriels tels que les dispositifs de levage, les tables de positionnement, les machines-outils à commande numérique (CNC), les systèmes d'actionnement, les équipements de manutention ainsi que les robots industriels.

Toutefois, malgré ces nombreux avantages, les mécanismes vis-écrou présentent certaines limitations susceptibles d'affecter leurs performances, en particulier dans les applications nécessitant une grande précision de positionnement. Les principales limitations sont liées au jeu mécanique (backlash), au frottement entre les surfaces filetées ainsi qu'au rendement de la transmission.

I.2. Limitations des systèmes vis-écrou**I.2.1. Le phénomène de backlash**

Le backlash, ou jeu mécanique, correspond à l'espace libre existant entre les flancs des filets de la vis et ceux de l'écrou. Ce phénomène influence directement la précision de positionnement, la répétabilité des mouvements ainsi que le comportement dynamique des systèmes de transmission [3,4].

Dans les applications exigeant un positionnement de haute précision, telles que les machines-outils à commande numérique (CNC), les robots industriels ou les systèmes de dosage utilisés en aéronautique et en instrumentation médicale, même un faible jeu mécanique peut entraîner des erreurs de positionnement significatives et dégrader les performances globales du système [4].

I.2.2. Influence du frottement et rendement mécanique

Outre le backlash, le frottement entre les filets de la vis et de l'écrou constitue une autre contrainte majeure. Il influence directement le rendement mécanique, augmente les pertes d'énergie, accélère l'usure des surfaces en contact et réduit la durée de vie des composants [5,6].

Les performances d'un système vis-écrou dépendent fortement du type de filetage utilisé. Les vis trapézoïdales de type ACME présentent généralement un rendement compris entre 20 % et 25 %, tandis que les vis à billes (Ball Screws) peuvent atteindre un rendement voisin de 90 % grâce au roulement des billes entre la vis et l'écrou. En contrepartie, ces dernières nécessitent des composants de haute précision, une fabrication plus complexe et un coût de production plus élevé [6,7].

I.3. Applications industrielles des systèmes vis-écrou

Grâce à leur simplicité, leur robustesse et leur fiabilité, les mécanismes vis-écrou sont largement utilisés dans les systèmes nécessitant un contrôle précis des déplacements linéaires. Ils sont présents dans de nombreux secteurs industriels où la précision de positionnement constitue un critère essentiel.

I.3.1. Robots industriels

Dans les robots industriels, le backlash constitue l'une des principales causes de perte de précision lors des opérations de positionnement. Une étude réalisée sur le robot ABB IRB 1600 montre que le jeu mécanique peut provoquer un écart supérieur à 100 μm au niveau du TCP (Tool Center Point), réduisant ainsi la répétabilité et la précision des trajectoires [8].

I.3.2. Machines-outils à commande numérique (CNC)

Dans les machines-outils à commande numérique, le backlash représente une source importante d'erreurs dimensionnelles. Les systèmes CNC classiques présentent généralement un jeu compris entre 0,025 mm et 0,25 mm. Même un backlash de 0,05 mm peut entraîner des défauts géométriques inacceptables lors de l'usinage de pièces de précision [9].

I.3.3. Comparaison entre les vis ACME et les vis à billes

Les vis à billes offrent un meilleur rendement, un frottement plus faible et un backlash réduit grâce à leur système de recirculation des billes. En revanche, elles nécessitent une fabrication plus précise, un montage plus complexe ainsi qu'un coût de production plus élevé [6,7].

Dans ce contexte, le système proposé dans ce mémoire consiste à intégrer un écrou anti-jeu réglable associé à un indicateur mécanique de position, afin de conserver les avantages des vis trapézoïdales tout en améliorant la précision de positionnement et la répétabilité des déplacements.

I.4. Intérêt scientifique et contribution du projet

Le système proposé dans ce mémoire repose sur une approche originale associant un écrou anti-jeu mécanique réglable à un indicateur mécanique de position. Cette conception combine les avantages d'une solution entièrement mécanique avec une amélioration de la précision de positionnement et de la répétabilité, sans recourir à des systèmes électroniques complexes.

Contrairement aux solutions conventionnelles reposant sur des écrous précontraints ou sur des méthodes de compensation logicielle, cette approche vise à proposer une solution simple, robuste, économique et facilement industrialisable. Elle répond ainsi aux exigences actuelles de nombreux secteurs industriels, notamment les systèmes de levage, les machines-outils, les dispositifs de positionnement et les équipements de fabrication.

Par conséquent, cette étude contribue à l'amélioration des performances des mécanismes vis-écrou tout en proposant une solution susceptible de réduire l'influence du backlash et d'optimiser la précision des systèmes de transmission mécanique.

I.5. Synthèse et intérêt du projet

Cette introduction a permis de présenter les principaux concepts relatifs aux systèmes vis-écrou ainsi que les limitations qui peuvent affecter leurs performances. Les développements présentés mettent en évidence plusieurs points essentiels :

- Comprendre les composants, le principe de fonctionnement et les limites des mécanismes vis-écrou [2, 10].
- Identifier le backlash et le frottement comme les principaux facteurs influençant la précision, la répétabilité et le rendement des systèmes de transmission [3, 4, 6].
- Justifier le développement d'une solution mécanique innovante intégrant un écrou anti-jeu réglable et un indicateur mécanique de position, afin d'améliorer les performances des systèmes de levage tout en conservant une conception simple, robuste et économique.

Cette synthèse constitue ainsi la base scientifique des chapitres suivants, consacrés à la conception, à la modélisation et à la validation du système développé dans le cadre de ce mémoire.

Tableau I- 1: Synthèse des principales limitations des systèmes vis-écrou et des solutions proposées

Composant / Phénomène	Problème identifié	Solution proposée
Vis-écrou (<i>Lead Screw</i>)	Backlash (jeu mécanique)	Écrou anti-jeu mécanique réglable
Robots industriels	Perte de précision du TCP (> 100 µm)	Compensation du jeu et amélioration de la répétabilité
Machines-outils CNC	Erreurs de positionnement (0,025 à 0,25 mm)	Écrou préchargé ou compensation du backlash
Frottement entre les filets	Diminution du rendement et usure des composants	Lubrification, choix des matériaux et optimisation géométrique
Vis à billes / Vis ACME	Différences de rendement, de frottement et de backlash	Précharge des vis à billes ou solution mécanique proposée

I.6. Fondements théoriques des mécanismes vis-écrou

Les performances d'un mécanisme vis-écrou dépendent directement de sa géométrie, de la qualité de fabrication de ses filets et des interactions mécaniques entre la vis et l'écrou. Une compréhension approfondie de ces paramètres est indispensable pour analyser les phénomènes de jeu mécanique (backlash), de frottement et d'usure qui influencent la précision et la fiabilité des systèmes de transmission [2,3]. Cette section présente les principaux concepts théoriques relatifs à la géométrie des filets, à la définition du backlash ainsi qu'aux différentes sources d'erreurs affectant les mécanismes vis-écrou.

I.6.1 Géométrie des filets de vis

Les caractéristiques géométriques d'une vis de puissance déterminent son comportement mécanique, sa capacité de charge ainsi que son rendement. Les principaux paramètres sont le diamètre nominal, le diamètre moyen, le diamètre au fond du filet, le pas (pitch), l'avance (lead), l'angle du filet et l'angle d'hélice. Ces paramètres influencent directement les conditions de contact entre la vis et l'écrou ainsi que les efforts transmis [2].

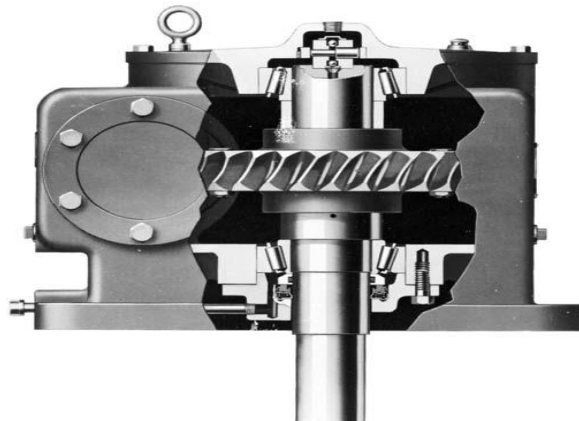


Figure I- 1: Terminologie et géométrie des filets de vis de puissance [2].

I.6.2 Définition du backlash

Le backlash, ou jeu mécanique, correspond à l'espace libre existant entre les flancs des filets de la vis et de ceux de l'écrou. Lors de l'inversion du sens de rotation, ce jeu empêche la transmission immédiate du mouvement, créant ainsi une zone morte avant que les surfaces filetées ne reprennent contact [3,4].

Le backlash influence directement la précision de positionnement, la répétabilité des mouvements ainsi que le comportement dynamique des systèmes mécaniques. Dans les applications de haute précision, même un faible jeu peut entraîner des erreurs de positionnement significatives et dégrader les performances globales du système [4,5].

Pour comprendre l'origine mécanique de ce phénomène, il est nécessaire d'étudier la répartition des contraintes dans les filets de la vis. En raison de la géométrie du filetage, les contraintes ne sont pas uniformément réparties et se concentrent principalement à la base des filets, favorisant l'usure progressive et l'augmentation du jeu mécanique [6].

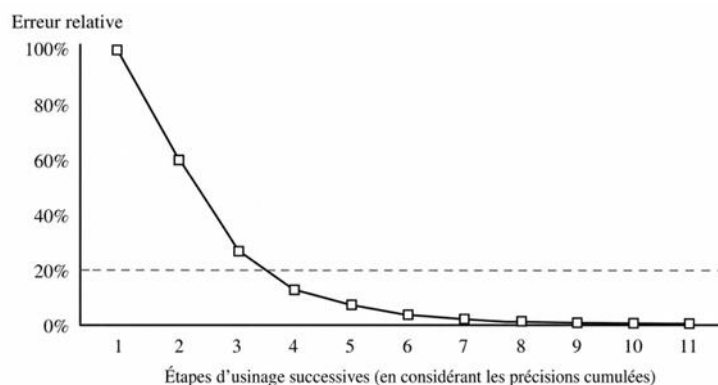


Figure I- 2: Courbe d'hystérésis (backlash) typique dans un système de contrôle de mouvement

I.6.3 Estimation analytique du backlash

Le backlash peut être estimé à partir des tolérances géométriques de fabrication. La norme ISO/TR 10064-2 définit les paramètres intervenant dans l'évaluation du jeu mécanique entre deux éléments filetés [10].

L'expression générale peut être écrite sous la forme :

$$B = \frac{\Delta_t}{2} + \Delta_c \cdot \tan \alpha \quad (1)$$

Où :

- **B** : Le backlash total (jeu entre dents) [mm].
- **Δ_t** : Tolérance sur l'épaisseur de la dent (Tooth thickness tolerance) [mm].
- **Δ_c** : Erreur sur l'entraxe (Center distance error) [mm].
- **α** : Angle de pression du filet (Pressure angle) [rad ou deg].

Cette relation montre que l'augmentation des tolérances de fabrication et des erreurs géométriques entraîne une augmentation du jeu mécanique et une diminution de la précision de transmission [10].

I.6.4 Sources principales d'erreurs dans un mécanisme vis-écrou

Les performances d'un mécanisme vis-écrou sont influencées par plusieurs sources d'erreurs qui affectent la précision de positionnement, la répétabilité et la durée de vie du système. Outre le backlash, les erreurs de fabrication, le frottement, l'usure ainsi que les effets thermiques contribuent à la dégradation progressive des performances. L'identification de ces phénomènes constitue une étape essentielle pour améliorer la conception et optimiser le fonctionnement des systèmes de transmission mécanique [2,3].

I.6.4.1 Erreurs de pas (Pitch Errors)

Les erreurs de pas résultent principalement des tolérances de fabrication lors de l'usinage des filets. Elles correspondent aux écarts entre le pas théorique et le pas réellement obtenu après fabrication. Ces imperfections géométriques provoquent une erreur cumulative du déplacement et réduisent la précision de positionnement du mécanisme [10].

Dans les systèmes de haute précision, les erreurs de pas sont limitées par des exigences normalisées relatives au profil et aux dimensions des filets. Le respect de ces tolérances permet de réduire les écarts de transmission et d'améliorer la précision globale du mécanisme [10].

I.6.4.2 Frottement et usure

Le frottement entre les surfaces filetées constitue l'une des principales causes de pertes d'énergie dans les systèmes vis-écrou. Il influence directement le rendement mécanique, augmente le couple nécessaire à l'entraînement et accélère l'usure des surfaces en contact [3, 6].

L'usure résulte de la répétition des cycles de fonctionnement et dépend notamment de la nature des matériaux, de l'état de surface, des conditions de lubrification ainsi que des charges appliquées. Avec le temps, cette usure provoque une augmentation progressive du backlash, ce qui réduit la précision du mécanisme et peut nécessiter un réglage ou le remplacement de certains composants [5, 11].

Les phénomènes tribologiques intervenant à l'interface vis-écrou sont particulièrement complexes. Ils mettent en jeu différents mécanismes d'usure, tels que l'usure adhésive, abrasive et par fatigue, dont l'intensité varie selon les conditions de fonctionnement [12, 13].

I.6.4.3 Dilatation thermique

Au cours du fonctionnement, une partie de l'énergie dissipée par le frottement est transformée en chaleur. Cette élévation de température provoque la dilatation thermique de la vis et de l'écrou, modifiant légèrement leurs dimensions géométriques et, par conséquent, la précision de positionnement [3].

Dans les applications fonctionnant à grande vitesse ou sous des charges importantes, ces effets thermiques deviennent significatifs et peuvent entraîner des erreurs supplémentaires de déplacement. Leur prise en compte est donc indispensable lors de la conception des systèmes de transmission de précision [3].

I.6.4.4 Distribution non linéaire des contraintes dans le filetage

Afin de comprendre l'origine de l'usure localisée observée sur les filets, il est nécessaire d'étudier la répartition des contraintes mécaniques dans la section du filet. Contrairement à une poutre droite, la géométrie courbe du filetage entraîne une distribution non linéaire des contraintes, avec une concentration plus importante au niveau de la base du filet [7].

Cette répartition peut être décrite par la théorie des poutres courbes, développée notamment par Budynas, qui montre que les contraintes maximales apparaissent sur la fibre interne du filet, correspondant à la zone la plus sollicitée mécaniquement [2].

L'équation de Winkler–Bach s'écrit sous la forme :

$$\sigma = \frac{My}{Ae(r_n - y)} \quad (2)$$

Où :

- σ : Contrainte normale agissant sur la section [MPa]
- M : moment de flexion appliqué (N·mm)
- y : distance radiale entre le point considéré et l'axe neutre (mm)
- A : aire de la section transversale (mm²)
- $e = r_c - r_n$: excentricité entre l'axe centroidal et l'axe neutre (mm)
- r_n : rayon de l'axe neutre (mm)
- r_c : Rayon de l'axe centroïdal (mm)

Cette relation montre que la contrainte augmente lorsque le point considéré se rapproche de la fibre interne du filet. Cette concentration des contraintes favorise l'apparition de déformations plastiques, de phénomènes de fatigue et d'usure localisée, expliquant ainsi l'augmentation progressive du backlash au cours de la durée de vie du mécanisme [7].

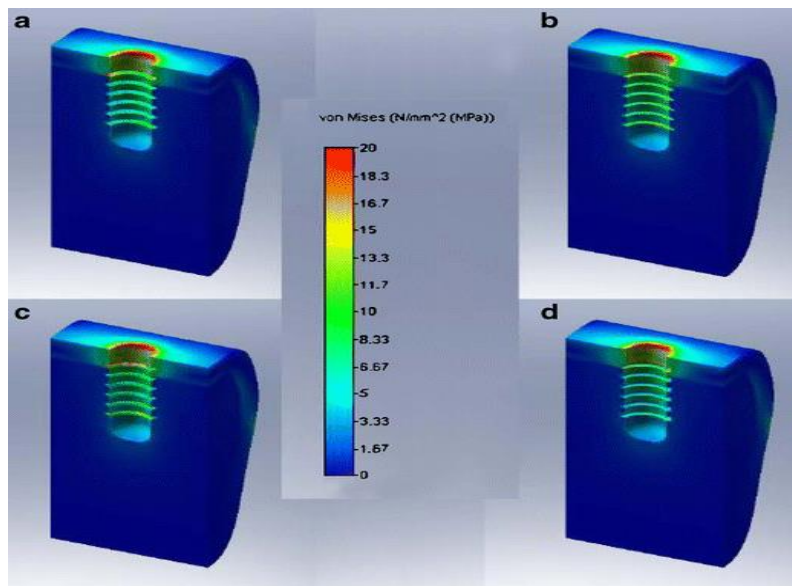


Figure I- 3: Distribution des contraintes de Von Mises pour différents profils de filetage [14].

I.7. Conséquences fonctionnelles du backlash

Le backlash constitue l'une des principales sources d'erreurs dans les systèmes de transmission vis–écrou. Lors de l'inversion du sens de déplacement, le jeu mécanique provoque une zone morte pendant laquelle le mouvement de la vis n'est pas immédiatement transmis à l'écrou. Cette discontinuité entraîne une perte de précision de positionnement et dégrade la répétabilité du système [3, 4].

Dans les robots industriels, le backlash affecte directement la précision du point terminal (Tool Center Point – TCP), entraînant des écarts de trajectoire susceptibles de compromettre les opérations de manipulation, d'assemblage ou de soudage. De même, dans les machines-outils à commande numérique (CNC), il peut provoquer des erreurs dimensionnelles et géométriques sur les pièces usinées, notamment lors des changements de direction des axes [4, 14].

Au-delà des erreurs de positionnement, le backlash modifie également le comportement dynamique du mécanisme. Les chocs répétés entre les flancs des filets lors des inversions de mouvement génèrent des vibrations, augmentent le niveau sonore et accélèrent la fatigue des composants mécaniques. Ces phénomènes réduisent progressivement la durée de vie du système et augmentent les besoins de maintenance [13, 15].

Dans les applications de haute précision, même un jeu de quelques centièmes de millimètre peut devenir inacceptable. Pour cette raison, la réduction du backlash constitue un objectif majeur lors de la conception des mécanismes de transmission destinés aux systèmes de positionnement, aux machines de mesure, aux robots industriels et aux équipements de fabrication de précision [3, 4].

I.8. Solutions classiques de réduction du backlash

Afin d'améliorer la précision des systèmes vis-écrou, plusieurs solutions ont été développées pour limiter ou compenser le jeu mécanique. Ces approches peuvent être classées en trois grandes catégories : les solutions mécaniques, les solutions numériques et les systèmes actifs.

I.8.1 Écrous à précharge

La méthode la plus couramment utilisée consiste à appliquer une précharge entre deux écrous montés sur une même vis. Cette précharge permet de maintenir un contact permanent entre les filets et de supprimer pratiquement le jeu lors des inversions de mouvement [3, 4].

Plusieurs variantes existent, notamment les écrous doubles, les systèmes à ressort et les dispositifs de réglage mécanique. Bien que cette solution améliore sensiblement la précision de positionnement, elle entraîne une augmentation du frottement, du couple d'entraînement ainsi que de l'usure des surfaces en contact [4].

I.8.2 Compensation numérique

Dans les systèmes modernes à commande numérique, le backlash peut être compensé par des algorithmes intégrés au contrôleur. Ces derniers ajoutent automatiquement une correction de position lors des inversions de sens afin de compenser le jeu mesuré ou estimé [14].

Cette méthode présente l'avantage de ne nécessiter aucune modification mécanique du système. Toutefois, son efficacité dépend fortement de la précision du modèle utilisé et de la stabilité du jeu mécanique au cours du temps. En présence d'usure progressive ou de variations thermiques importantes, la compensation logicielle peut perdre en efficacité [3].

I.8.3 Systèmes anti-backlash actifs

Les systèmes actifs utilisent des actionneurs ou des dispositifs de commande capables de modifier en temps réel la position relative entre la vis et l'écrou afin de supprimer le jeu mécanique. Ces solutions permettent d'obtenir des performances très élevées, notamment dans les équipements de très haute précision [16].

Cependant, leur mise en œuvre nécessite des capteurs, une électronique de commande ainsi que des algorithmes de contrôle sophistiqués. Leur coût élevé limite généralement leur utilisation aux applications de recherche, de métrologie ou d'usinage de très haute précision.

I.8.4 Optimisation du profil de filetage

Une autre approche consiste à optimiser la géométrie du filetage afin de réduire les concentrations de contraintes et de répartir plus uniformément les charges entre les filets. Des études basées sur la méthode des éléments finis montrent que le profil des filets influence directement la distribution des contraintes, le niveau d'usure ainsi que la durée de vie des mécanismes vis-écrou [17, 18].

L'amélioration de la géométrie permet de diminuer l'apparition du backlash tout en conservant une bonne capacité de transmission des efforts. Toutefois, cette solution nécessite une fabrication plus précise et des coûts d'usinage plus élevés.

I.8.5 Comparaison approfondie entre les vis trapézoïdales et les vis à billes

Les vis à billes (ball screws) représentent aujourd'hui la technologie de référence pour les applications nécessitant une très grande précision de positionnement, une vitesse élevée et un excellent rendement mécanique. Leur fonctionnement repose sur la circulation de billes entre la vis et l'écrou, transformant le frottement de glissement en frottement de roulement. Cette

conception permet d'obtenir un rendement mécanique pouvant atteindre 90 à 95 % et de réduire considérablement le jeu mécanique grâce aux systèmes de précharge [2, 7].

À l'inverse, les vis trapézoïdales (ACME) fonctionnent par contact direct entre les filets de la vis et de l'écrou. Ce principe de fonctionnement engendre un frottement de glissement plus important, limitant généralement leur rendement entre 20 et 50 % selon les matériaux, la lubrification et les conditions d'utilisation [2,3].

Tableau I- 2: Comparaison des principales caractéristiques des deux technologies. [2,3,7]

Caractéristique	Vis ACME (traditionnelle)	Vis à billes (Ball screw)
Principe de fonctionnement	Frottement de glissement	Frottement de roulement (billes)
Rendement mécanique typique	20-50 %	90-95 %
Backlash	Présent (0,05-0,5 mm)	Quasi nul avec précharge
Vitesse maximale	< 0,5 m/s	0,5-2 m/s (jusqu'à 4 m/s)
Précision de positionnement	±0,1 à ±0,5 mm	±0,01 à ±0,05 mm
Auto-verrouillage	Oui (faible angle d'hélice)	Non (nécessite un frein)
Coût initial	Faible à modéré	Élevé
Maintenance	Lubrification occasionnelle	Lubrification régulière
Sensibilité aux contaminants	Faible (tolérante)	Élevée (nécessite des joints)

Le Tableau I.2 présente une comparaison des principales caractéristiques des deux technologies.

L'analyse comparative met en évidence que les vis à billes offrent une meilleure précision, un rendement supérieur et des vitesses de déplacement plus élevées. En revanche, leur coût de fabrication, leur sensibilité aux contaminants et leurs exigences de maintenance demeurent supérieurs à ceux des vis trapézoïdales.

Les vis trapézoïdales conservent néanmoins plusieurs avantages, notamment leur simplicité de fabrication, leur faible coût, leur robustesse ainsi que leur capacité d'auto-verrouillage dans certaines configurations. Elles restent donc particulièrement adaptées aux systèmes de levage, aux mécanismes de manutention et aux environnements industriels sévères où la fiabilité et la simplicité sont privilégiées [3, 7].

I.8.6 Coût de la précision dans les procédés d'usinage

L'amélioration de la précision dimensionnelle des composants mécaniques nécessite généralement le recours à des procédés d'usinage de plus en plus performants. Toutefois, cette augmentation de la précision s'accompagne d'une hausse significative des coûts de fabrication.

La Figure 1.4 illustre les tolérances dimensionnelles généralement obtenues selon les différents procédés d'usinage. On observe que le passage d'une précision de l'ordre de $\pm 0,03$ mm à quelques dixièmes de micromètre impose l'utilisation de procédés spécialisés tels que la rectification de précision, le rodage ou le polissage, dont le coût est nettement supérieur à celui des procédés conventionnels [20].

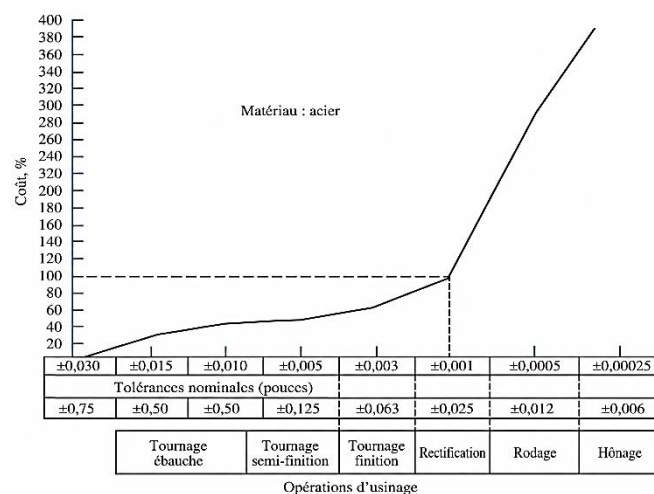


Figure I- 4: Tolérances typiques obtenues par différents procédés d'usinage [20].

Cette évolution met en évidence le compromis permanent entre précision et coût de fabrication. Dans de nombreuses applications industrielles, il apparaît alors plus intéressant de réduire le backlash par une amélioration de la conception mécanique plutôt que d'augmenter systématiquement la précision d'usinage.

I.8.7 Efficacité énergétique et relation couple–effort

Les performances énergétiques d'un mécanisme vis–écrou dépendent principalement de son rendement mécanique, lui-même fonction de l'angle d'hélice du filet et du coefficient de frottement entre la vis et l'écrou [2, 19].

Le rendement d'une vis de puissance peut être estimé par la relation suivante :

$$\eta = \frac{tg(\lambda) \cdot (1 - \mu tg \lambda)}{tg \lambda + \mu} \quad (3)$$

Où :

- η : rendement mécanique
- λ : angle d'hélice du filet
- μ : coefficient de frottement

Pour une vis trapézoïdale classique, le rendement est généralement compris entre 20 et 50 %, tandis que les vis à billes atteignent des rendements de l'ordre de 90 à 95 % grâce au remplacement du frottement de glissement par un frottement de roulement [2, 7].

Le couple nécessaire pour développer une force axiale donnée est exprimé par :

$$T = \frac{F \cdot L}{2\pi \cdot \eta} \quad (4)$$

Où :

- T : couple moteur (N·m)
- F : effort axial (N)
- L : avance de la vis (m)
- η : rendement mécanique

Cette relation montre que le couple requis est inversement proportionnel au rendement. Ainsi, pour une même charge axiale, une vis trapézoïdale nécessite un couple moteur plus important qu'une vis à billes, ce qui se traduit par une consommation énergétique plus élevée [2, 3].

Ces considérations justifient l'intérêt de rechercher des solutions permettant d'améliorer la précision des systèmes vis–écrou sans pour autant recourir systématiquement aux vis à billes, dont le coût d'acquisition et de maintenance demeure élevé.

I.9. Limites des solutions existantes et justification de la solution proposée

Le présent travail s'inscrit dans cette perspective en proposant un système de rattrapage de jeu basé sur un écrou anti-jeu réglable. Cette solution vise à améliorer la précision de positionnement tout en limitant l'augmentation du frottement et en conservant une architecture mécanique simple, facilement réglable et adaptée aux applications industrielles. En outre, le système intègre un indicateur mécanique de position permettant un suivi visuel direct du déplacement, sans recourir à des capteurs électroniques complexes. Cette approche cherche ainsi à concilier précision, simplicité de conception, facilité de maintenance et maîtrise des coûts de fabrication, objectifs qui seront développés dans le chapitre suivant consacré à la conception du dispositif proposé.

Chapitre II

Fondements scientifiques et conception
du système proposé

II.1. Introduction

Le chapitre précédent a permis d'établir l'état de l'art relatif aux systèmes de transmission par vis-écrou, en mettant en évidence les principales limitations qui affectent leur précision, notamment le backlash (jeu mécanique), le frottement et la répartition non uniforme des charges sur les filets. L'analyse bibliographique a également montré que, malgré les nombreuses solutions proposées dans la littérature, les mécanismes permettant d'obtenir simultanément une bonne précision, une simplicité de conception et un faible coût restent limités.

Dans cette perspective, ce deuxième chapitre est consacré à la conception et à la justification scientifique de la solution proposée dans ce mémoire. L'objectif est de présenter les fondements mécaniques ayant conduit au développement d'un écrou anti-jeu réglable associé à un système mécanique d'indication de position. Cette solution vise à améliorer la précision du positionnement tout en conservant une architecture entièrement mécanique, robuste et facilement reproductible par fabrication additive [11,12].

L'approche adoptée s'appuie sur les travaux fondamentaux relatifs aux systèmes anti-backlash, aux mécanismes de précision et à la tribologie, tout en intégrant les possibilités offertes par les techniques modernes de conception assistée par ordinateur (CAO), de simulation numérique et d'impression 3D. L'ensemble constitue une démarche cohérente permettant de passer des concepts théoriques à une validation expérimentale rigoureuse.

II.2. Origine et impacts du problème traité

Les systèmes classiques à vis-écrou présentent naturellement un jeu fonctionnel entre les filets de la vis et ceux de l'écrou. Ce jeu est indispensable pour permettre le montage, absorber les tolérances de fabrication et assurer le fonctionnement du mécanisme. Toutefois, lors de l'inversion du sens de rotation, cet espace libre provoque un retard dans la transmission du mouvement, appelé backlash, qui dégrade directement la précision de positionnement [13,14].

Les travaux de Stein et Wang ont montré que ce phénomène constitue l'une des principales sources d'erreur dans les systèmes de transmission mécanique utilisés pour le positionnement de précision. De même, Slamani et ses collaborateurs ont démontré que le backlash influence fortement la répétabilité des machines-outils à commande numérique ainsi que la stabilité dynamique des axes de déplacement [14,16].

Dans les systèmes industriels conventionnels, l'erreur de positionnement liée au backlash varie généralement entre 0,025 mm et 0,25 mm, selon la qualité du système vis-écrou, les conditions de fonctionnement et l'usure des composants [8, 9].

Cette perte de précision devient particulièrement critique dans plusieurs domaines industriels tels que :

- Les machines-outils CNC
- La robotique industrielle
- Les systèmes de levage de précision
- Les dispositifs de métrologie
- Les équipements biomédicaux

Dans ces applications, même un faible déplacement parasite peut entraîner une perte importante de précision, une augmentation des vibrations ainsi qu'une diminution de la qualité du produit final [15,17].

Les recherches menées par Erkaya et Uzmay ont également montré que le jeu mécanique modifie le comportement dynamique des mécanismes en provoquant des chocs répétés entre les surfaces en contact, ce qui accélère l'usure des composants et réduit leur durée de vie [18].

L'ensemble de ces observations justifie pleinement la recherche d'une solution mécanique capable de supprimer ou de réduire fortement le backlash sans recourir à des systèmes électroniques complexes ou à des composants particulièrement coûteux.

II.3. Influence du frottement sur le rendement et la stabilité mécanique

Après avoir identifié le backlash comme l'une des principales sources d'erreur de positionnement, il convient d'examiner un second phénomène tout aussi important : le frottement entre les filets de la vis et de l'écrou. Celui-ci influence directement le rendement mécanique, la consommation énergétique, l'usure des composants ainsi que la stabilité du système au cours du fonctionnement [5,6].

Dans les mécanismes à vis trapézoïdale de type ACME, le mouvement est obtenu par glissement entre les surfaces filetées. Cette configuration génère des pertes d'énergie importantes, limitant généralement le rendement mécanique à environ 20 à 25 %, alors que les systèmes à vis à billes peuvent atteindre des rendements proches de 90 %, grâce au remplacement du frottement de glissement par un frottement de roulement [6,7].

Le comportement tribologique de l'ensemble vis-écrou dépend de plusieurs paramètres, notamment :

- Les matériaux constituant la vis et l'écrou
- L'état de surface des filets
- Les conditions de lubrification
- La vitesse de déplacement
- La charge appliquée

Ces paramètres influencent directement le coefficient de frottement, la génération de chaleur ainsi que les mécanismes d'usure des surfaces en contact [19,20].

Les travaux de Hamrock, Schmid et Jacobson montrent que la lubrification constitue un facteur déterminant dans la réduction des pertes énergétiques et l'amélioration de la durée de vie des composants. De même, Stachowiak et Batchelor démontrent que la rugosité des surfaces ainsi que la formation d'un film lubrifiant continu permettent de diminuer considérablement l'usure et d'améliorer la stabilité des systèmes mécaniques [20,21].

Une augmentation importante de la température au niveau de l'interface vis-écrou peut également modifier les propriétés mécaniques des matériaux, provoquer une dilatation différentielle entre les composants et accentuer progressivement le phénomène de backlash [3,22].

Les recherches menées par Holmberg et Erdemir montrent qu'une optimisation des matériaux ainsi que des traitements de surface permet de réduire les pertes dues au frottement de 30 à 50 %, tout en diminuant significativement les émissions énergétiques et les coûts de maintenance des systèmes industriels [23].

Dans le cadre de ce mémoire, le choix d'un écrou anti-jeu fabriqué par impression 3D ouvre également la possibilité d'utiliser des polymères techniques présentant un faible coefficient de frottement, tels que le PTFE, le PEEK ou certains composites polymères. Ces matériaux offrent un compromis intéressant entre légèreté, résistance mécanique et comportement tribologique, ce qui contribue à améliorer le rendement global du système tout en limitant les phénomènes d'usure [5, 19].

II.4. Solution mécanique proposée pour la réduction du backlash

Afin de remédier aux limites observées sur les systèmes conventionnels, ce travail propose la conception d'un écrou anti-jeu réglable, capable de supprimer le jeu fonctionnel tout en conservant une architecture entièrement mécanique.

Contrairement aux méthodes de compensation logicielle, qui corrigent uniquement les erreurs après leur apparition, la solution proposée agit directement sur la cause physique du backlash en maintenant un contact permanent entre les flancs des filets de la vis et de l'écrou grâce à une précharge mécanique [4,14].

Cette approche s'inspire des travaux de Hale et Slocum, qui ont démontré l'intérêt des systèmes anti-backlash pour les applications de positionnement de précision, ainsi que des recherches de Balasubramaniam et ses collaborateurs, qui ont développé un système de transmission utilisant un principe d'élasticité répartie (« elastic averaging ») permettant d'améliorer simultanément la rigidité et la précision des assemblages [4,24].

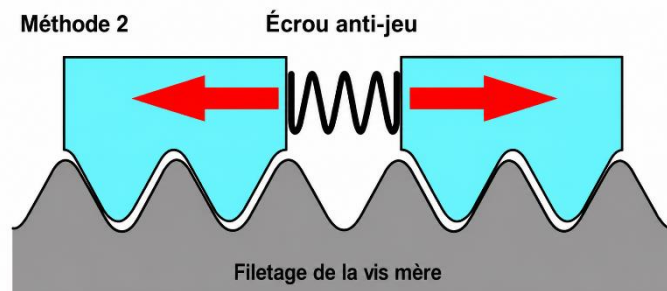


Figure II-1: Comparaison entre un écrou standard et un écrou anti-jeu

Comme l'illustre la Figure 2.1, un écrou conventionnel présente un espace libre entre les surfaces filetées. Lors de l'inversion du sens de rotation, cet espace provoque une zone morte correspondant au backlash. À l'inverse, l'écrou anti-jeu proposé maintient un contact permanent entre les filets, supprimant ainsi cette zone morte et améliorant immédiatement la précision de positionnement.

Outre l'élimination du jeu mécanique, cette conception présente plusieurs avantages :

- Suppression physique du backlash par précharge mécanique permanente
- Possibilité de régler la précharge afin de compenser progressivement l'usure
- Simplicité de fabrication

- Compatibilité avec les procédés de fabrication additive
- Réduction des coûts par rapport aux systèmes utilisant des vis à billes

L'originalité de cette solution réside dans la combinaison d'un mécanisme anti-backlash entièrement mécanique avec les possibilités offertes par l'impression 3D, permettant de réaliser des géométries complexes à faible coût tout en conservant une précision satisfaisante [11,12].

II.5. Analyse de la répartition des charges sur les filets

L'efficacité d'un système vis-écrou dépend non seulement de la suppression du backlash, mais également de la manière dont les efforts sont répartis entre les différents filets engagés. Bien qu'une répartition uniforme des charges soit souvent retenue dans les modèles simplifiés, plusieurs études montrent que les premiers filets supportent généralement la plus grande partie de l'effort transmis [28, 29].

Cette concentration de charge s'explique principalement par les différences de rigidité entre la vis et l'écrou, ainsi que par les déformations élastiques apparaissant au niveau des surfaces en contact. Le premier filet est ainsi soumis aux contraintes mécaniques les plus importantes, tandis que la charge diminue progressivement sur les filets suivants. Cette distribution non uniforme favorise l'apparition de concentrations de contraintes, accélère l'usure locale et contribue à l'augmentation progressive du backlash, réduisant ainsi la durée de vie du mécanisme [29, 30].

Afin de représenter ce phénomène, plusieurs modèles analytiques ont été proposés dans la littérature. Dans une approche simplifiée, la charge transmise par chaque filet peut être exprimée par la relation suivante :

$$F_i = \frac{F_{total}}{n} \times k_i \quad (5)$$

Où :

F_i Représente la charge supportée par le filet i (N)

F_{total} Est la charge axiale appliquée sur le mécanisme (N)

n Correspond au nombre total de filets en prise

k_i Désigne le coefficient de répartition de charge dépendant de la rigidité relative de la vis de l'écrou et des conditions de contact [29].

Cette relation constitue une représentation simplifiée de la distribution des efforts dans un assemblage fileté. En pratique, la valeur du coefficient (K_i) varie d'un filet à l'autre selon plusieurs paramètres, notamment la géométrie du profil de filetage, les propriétés mécaniques des matériaux, les déformations élastiques locales, les conditions de lubrification ainsi que la présence éventuelle d'une précharge [29].

Les travaux récents fondés sur la modélisation numérique ont permis d'affiner la compréhension de cette répartition des charges. Chen et al. (2024) ont notamment développé un modèle tridimensionnel par éléments finis intégrant les déformations élastiques et plastiques des surfaces en contact. Leurs résultats montrent que la distribution des efforts est fortement influencée par la rigidité relative de la vis et de l'écrou, la géométrie du profil de filetage, la présence d'une précharge ainsi que les conditions de contact entre les surfaces filetées. Par ailleurs, Zhao et al. (2016) ont mis en évidence l'influence de l'angle du filet et du pas sur l'uniformité de la transmission des efforts, montrant qu'une géométrie optimisée permet de réduire significativement les concentrations de contraintes [30, 31].

Ces études confirment qu'une meilleure homogénéisation des charges permet de limiter les concentrations de contraintes, de réduire l'usure localisée et d'améliorer la durée de vie des assemblages vis-écrou.

Dans le système développé dans ce mémoire, l'intégration d'un écrou anti-jeu réglable assure une précharge mécanique permanente entre la vis et l'écrou afin de maintenir un contact continu entre les flancs des filets. Cette conception favorise une répartition plus homogène des efforts, limite les concentrations de contraintes sur les premiers filets, réduit l'usure différentielle et améliore la stabilité du mécanisme lors des inversions du sens de déplacement. Elle contribue ainsi à diminuer le backlash, à accroître la précision de positionnement et à augmenter la durée de vie de l'ensemble vis-écrou [4, 24, 30].

II.6 Système d'indication mécanique de position

II.6.1 Principe de fonctionnement

Au-delà de la réduction du backlash, la précision d'un système de translation dépend également de la capacité à connaître avec exactitude la position instantanée de l'organe mobile. Dans les systèmes industriels modernes, cette information est généralement obtenue au moyen d'encodeurs rotatifs, de règles linéaires ou d'autres capteurs électroniques de position. Bien que

ces dispositifs offrent une excellente résolution et une grande précision, ils augmentent le coût global du système, nécessitent une alimentation électrique et peuvent être sensibles aux perturbations environnementales telles que les vibrations, les poussières ou les interférences électromagnétiques [4, 24, 32].

Dans le cadre de ce travail, une approche purement mécanique a été privilégiée par l'intégration d'un système d'indication de position directement couplé à la vis trapézoïdale. Le déplacement de l'écrou est ainsi déterminé à partir de la rotation de la vis, dont le pas constitue une référence géométrique connue. Cette solution permet une lecture directe du déplacement linéaire sans recourir à une instrumentation électronique complexe, tout en conservant une architecture simple, robuste et facilement maintenable [2, 24].

Le principe de fonctionnement repose sur une liaison cinématique directe entre la vis mère et le dispositif indicateur. Chaque rotation de la vis entraîne un déplacement linéaire de l'écrou correspondant au pas de la vis, établissant ainsi une relation géométrique simple entre le mouvement de rotation et le déplacement de translation. La précision de lecture dépend principalement de la qualité géométrique de la vis, de la réduction du backlash ainsi que de la résolution du système indicateur.

Ainsi, le système proposé ne constitue pas uniquement un mécanisme de transmission, mais également un dispositif de lecture mécanique de la position, répondant aux exigences de précision tout en conservant une architecture simple..

II.6.2 Avantages scientifiques et techniques

Le choix d'un système d'indication mécanique ne répond pas uniquement à des considérations économiques. Il présente également plusieurs avantages scientifiques et techniques qui justifient son intégration dans le mécanisme proposé.

II.6.2.1 Fiabilité intrinsèque de la mesure

Contrairement aux dispositifs électroniques, la mesure repose exclusivement sur la géométrie du mécanisme et sur la liaison cinématique entre la vis et l'écrou. L'absence de conversion électronique du signal élimine les erreurs liées au bruit électrique, aux dérives des capteurs ainsi qu'aux perturbations électromagnétiques. La position est directement déterminée à partir du pas de la vis, garantissant une excellente stabilité dans le temps et une bonne répétabilité des mesures [2, 24].

II.6.2.2 Respect du principe d'Abbe

L'indicateur est implanté au plus près de l'axe de translation de la vis mère, conformément au principe d'Abbe, principe fondamental de la métrologie dimensionnelle. Celui-ci stipule que l'axe de mesure doit être confondu avec l'axe du déplacement afin de limiter les erreurs géométriques provoquées par les déformations de la structure. Cette disposition contribue à améliorer la fidélité des mesures et la précision globale du système [33].

II.6.2.3 Simplicité, robustesse et facilité de maintenance

L'architecture proposée repose uniquement sur des composants mécaniques simples, ce qui réduit le coût de fabrication, facilite les opérations de réglage et de maintenance et améliore la robustesse du dispositif dans des environnements industriels parfois sévères. La lecture directe de la position permet également une vérification rapide de la répétabilité après chaque cycle de fonctionnement, sans recourir à une instrumentation électronique supplémentaire [2, 34].

En outre, cette conception est particulièrement adaptée aux applications pour lesquelles les contraintes économiques, environnementales ou de maintenance rendent l'utilisation de capteurs électroniques peu pertinente.

II.6.2.4 Contribution du système proposé

L'association de cet indicateur mécanique avec l'écrou anti-jeu développé dans ce mémoire transforme le mécanisme de transmission en un système capable d'assurer simultanément la transmission du mouvement, la réduction du backlash et le contrôle direct de la position.

En combinant un écrou anti-jeu réglable et un indicateur mécanique de position, la solution proposée améliore simultanément la précision de positionnement, la répétabilité des déplacements et la simplicité d'utilisation du système. Elle constitue ainsi une alternative économique, robuste et facilement maintenable aux solutions reposant exclusivement sur une instrumentation électronique, tout en répondant aux exigences des applications industrielles nécessitant un positionnement précis.

II.7 Méthodologie de validation expérimentale des systèmes vis-écrou

La validation expérimentale constitue une étape essentielle dans l'évaluation des performances d'un système vis-écrou. Elle permet de vérifier que les améliorations apportées à

la conception se traduisent effectivement par une réduction du backlash, une amélioration de la précision de positionnement et une meilleure répétabilité des déplacements. Dans la littérature, cette validation repose généralement sur des protocoles expérimentaux combinant des mesures dimensionnelles, des essais de répétabilité et des tests sous différentes conditions de fonctionnement [24, 35, 36].

Les principales méthodes de caractérisation utilisées concernent la mesure de la résolution du système, la quantification du backlash ainsi que l'évaluation du comportement sous différentes charges et vitesses de déplacement.

II.7.1-Instrumentation et Métrologie

L'évaluation des performances d'un système de positionnement nécessite des instruments de mesure capables de détecter des déplacements de faible amplitude. Les comparateurs à cadran de haute précision, les capteurs de déplacement linéaire et les capteurs laser sont les dispositifs les plus couramment utilisés pour comparer le déplacement réel au déplacement théorique imposé au mécanisme [24, 37].

Dans ce type d'essais, la résolution du système de mesure influence directement l'incertitude des résultats obtenus. Les erreurs de quantification deviennent particulièrement importantes lorsque les déplacements mesurés sont du même ordre de grandeur que la résolution de l'instrument.

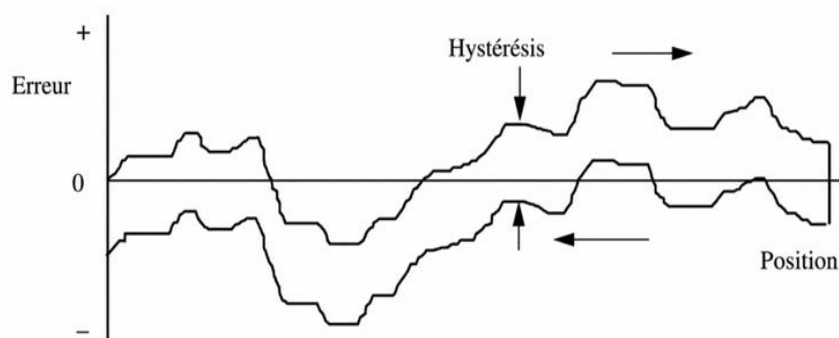


Figure II-2: Erreur relative en fonction de la taille des pas de mouvement

La Figure 2.2 illustre l'évolution de l'erreur relative en fonction de la taille des pas de déplacement. On observe que l'erreur est particulièrement élevée pour les faibles incréments de mouvement, puis diminue rapidement lorsque la taille des pas augmente. À partir d'environ

quatre incréments de résolution, l'erreur devient inférieure à 20 % avant de décroître progressivement vers des valeurs très faibles.

Ce comportement montre que les limitations liées à la résolution du système affectent principalement les déplacements de faible amplitude, tandis que leur influence devient négligeable lorsque les déplacements deviennent plus importants.

Dans les systèmes vis-écrou, cette erreur peut être accentuée par la présence simultanée du backlash et de l'hystérésis. L'hystérésis correspond à la différence de position obtenue pour une même consigne selon que le mouvement est effectué dans le sens aller ou dans le sens retour.

Ce phénomène réduit la répétabilité des déplacements et affecte directement la précision du positionnement. La réduction du jeu mécanique à l'aide d'un écrou anti-jeu contribue ainsi non seulement à limiter le backlash, mais également à diminuer les effets de l'hystérésis, améliorant ainsi les performances globales du système [24, 38].

Cette caractérisation permet donc d'évaluer simultanément la résolution effective du système, la précision de mesure et la qualité de son comportement dynamique.

II.7.2-Caractérisation du Backlash

La caractérisation expérimentale du backlash repose généralement sur des essais d'inversion du sens de déplacement. Cette méthode consiste à effectuer des cycles successifs d'aller-retour tout en enregistrant la différence de position observée lors du changement de sens de rotation.

L'écart mesuré correspond directement au jeu mécanique présent entre la vis et l'écrou et constitue un indicateur de la répétabilité du mécanisme [14, 39].

Cette méthode est largement utilisée dans les machines-outils à commande numérique, les systèmes de positionnement de précision et les dispositifs de mesure, car elle permet d'évaluer quantitativement l'efficacité des solutions de réduction du backlash mises en œuvre.

II.7.3 Essais sous charge et à différentes vitesses

Le mécanisme sera testé sous différentes charges axiales pour évaluer la rigidité de la précharge et l'effet du frottement sur le couple résistant, conformément aux principes de la tribologie industrielle (ASM Handbook, 2022, Friction and Wear; Bhushan, 2013).

II.8 Performances attendues du système proposé

A la lumière des travaux présentés dans cette revue bibliographique, l'intégration d'un écrou anti-jeu réglable associé à un système d'indication mécanique de position devrait permettre d'améliorer significativement les performances des mécanismes vis-écrou. Les résultats rapportés dans la littérature montrent que les dispositifs de précharge mécanique réduisent efficacement le backlash, améliorent la répartition des charges entre les filets et augmentent la répétabilité des déplacements [4, 24, 30].

Les performances susceptibles d'être obtenues avec le système développé dans ce mémoire peuvent être discutées au regard des résultats déjà publiés.

II.8.1. Réduction du backlash

Les mécanismes à précharge étudiés dans la littérature permettent généralement de diminuer fortement le jeu mécanique tout en améliorant la rigidité de l'ensemble vis-écrou. Selon la conception retenue et les conditions de fonctionnement, plusieurs auteurs rapportent des jeux résiduels inférieurs à quelques centièmes de millimètre [4, 30].

Les travaux de Hale et Slocum [4] ainsi que ceux de Balasubramaniam et al. [24] montrent que l'application d'une précharge adaptée réduit les déplacements parasites lors des inversions de mouvement. Les simulations numériques réalisées par Chen et al. [30] confirment également qu'une meilleure répartition des charges entre les filets diminue les concentrations de contraintes et ralentit l'évolution du backlash au cours du fonctionnement.

Compte tenu de ces résultats, le système proposé devrait permettre de réduire sensiblement le jeu mécanique tout en conservant la simplicité constructive propre aux mécanismes à vis trapézoïdale.

II.8.2. Stabilité de l'indication de position

Les études consacrées aux instruments de mesure mécaniques montrent qu'un dispositif de lecture directe correctement conçu présente une excellente stabilité métrologique lorsqu'il est associé à une transmission présentant un faible jeu [2, 32, 33].

Le respect du principe d'Abbe, associé à la réduction du backlash obtenue grâce à l'écrou anti-jeu, devrait permettre d'améliorer la répétabilité des mesures de position tout en limitant les erreurs liées aux inversions de déplacement. Cette approche présente également l'avantage

d'être indépendante des perturbations électromagnétiques susceptibles d'affecter les systèmes électroniques de mesure [24, 33].

Ainsi, la combinaison d'un écrou anti-jeu réglable et d'un indicateur mécanique de position constitue une solution prometteuse pour améliorer simultanément la précision de positionnement, la répétabilité des déplacements et la robustesse du système, tout en limitant les coûts de réalisation et de maintenance.

II.9 Contribution scientifique du projet

Le système proposé dans ce mémoire s'inscrit dans la continuité des travaux consacrés à la réduction du backlash et à l'amélioration de la précision des mécanismes vis-écrou. Il apporte une contribution à la fois technique et scientifique en associant un dispositif de rattrapage de jeu mécanique à un système d'indication directe de la position, tout en privilégiant une conception simple, robuste et économiquement accessible [2, 4, 24].

II.9.1 Contribution technique

Sur le plan technique, la solution développée constitue une alternative aux systèmes de compensation reposant sur une instrumentation électronique complexe. L'utilisation d'un écrou anti-jeu réglable associé à un indicateur mécanique de position permet d'améliorer la précision de positionnement tout en conservant les avantages des mécanismes à vis trapézoïdale, notamment leur simplicité de fabrication, leur robustesse et leur faible coût [2, 6].

Cette approche est particulièrement adaptée aux applications industrielles dans lesquelles les contraintes économiques, les conditions environnementales ou les exigences de maintenance rendent l'utilisation de capteurs électroniques peu appropriée. Elle offre également une solution intéressante pour les petites structures industrielles, les laboratoires d'enseignement, les ateliers de prototypage et les systèmes de micro-fabrication nécessitant une précision satisfaisante sans recourir à des équipements coûteux [24, 34].

Par ailleurs, le recours à la fabrication additive facilite la réalisation de composants présentant des géométries complexes tout en réduisant les coûts de prototypage et les délais de développement. Cette technologie offre une grande souplesse de conception et permet d'intégrer plusieurs fonctions mécaniques au sein d'un même composant, conformément aux principes de la conception pour la fabrication additive (Design for Additive Manufacturing-DfAM) [42,43].

II.9.2 Contribution scientifique

Sur le plan scientifique, ce travail propose une approche intégrée associant la réduction mécanique du backlash et l'indication directe de la position dans un même système. Alors que de nombreuses études traitent séparément des dispositifs de précharge, des méthodes de compensation du jeu ou des systèmes de mesure de position, cette recherche met en évidence l'intérêt de combiner ces différentes fonctions au sein d'une architecture mécanique unique [4,14, 24].

Cette démarche contribue à enrichir les connaissances relatives aux mécanismes vis-écrou en montrant qu'une amélioration de la précision de positionnement peut être obtenue sans recourir systématiquement à des solutions électroniques complexes. Elle met également en évidence les possibilités offertes par la fabrication additive pour développer des systèmes mécaniques intégrant plusieurs fonctions, tout en conservant une conception simple, facilement réglable et maintenable [42, 43].

Les résultats attendus de ce travail pourront servir de base à des développements futurs portant sur l'optimisation géométrique des écrous anti-jeu, l'amélioration de la répartition des charges entre les filets, ainsi que l'intégration de nouveaux matériaux ou de nouvelles techniques de fabrication destinés à accroître la précision et la durabilité des systèmes vis-écrou.

II.10 Stratégie de conception et protocole de validation

Après avoir établi les fondements théoriques du mécanisme vis-écrou et analysé les solutions existantes de réduction du backlash, une démarche méthodologique a été mise en œuvre afin de concevoir, fabriquer et valider le système proposé. Cette démarche s'appuie sur les principes de la conception mécanique assistée par ordinateur, de la fabrication additive et de la validation expérimentale décrits dans la littérature [44, 45].

II.10.1 Conception assistée par ordinateur

La première étape a consisté à concevoir l'ensemble du système de levage au moyen du logiciel SolidWorks. Toutes les pièces constituant le mécanisme, notamment la vis trapézoïdale, l'écrou anti-jeu, les supports et les éléments d'assemblage, ont été modélisées individuellement avant d'être assemblées dans un modèle tridimensionnel complet.

Cette modélisation a permis de vérifier la compatibilité géométrique des composants, les mouvements relatifs entre les différentes pièces ainsi que le fonctionnement cinématique du mécanisme. Les ajustements et les tolérances ont été définis conformément aux recommandations des normes applicables afin d'obtenir une conception compatible avec la fabrication et l'assemblage [46, 47].

Après fabrication, les différentes pièces ont été assemblées afin d'obtenir un prototype fonctionnel du système de levage intégrant la vis trapézoïdale, l'écrou anti-jeu et le dispositif d'indication mécanique de position.

II.10.2 Validation expérimentale

Le prototype réalisé constitue la base des essais expérimentaux présentés dans les chapitres suivants. La validation repose sur des mesures destinées à évaluer le fonctionnement du système, la réduction du backlash, la précision de positionnement ainsi que la répétabilité des déplacements.

Les essais sont réalisés à l'aide d'instruments de mesure adaptés, conformément aux méthodes couramment utilisées pour la caractérisation des mécanismes vis-écrou [24, 33]. Les résultats expérimentaux seront comparés aux prévisions théoriques développées dans cette étude ainsi qu'aux performances rapportées dans la littérature afin d'évaluer la pertinence de la solution proposée.

II.11 Synthèse du chapitre et transition vers la conception détaillée

Ce chapitre a permis d'établir les bases scientifiques et méthodologiques nécessaires au développement du système de levage proposé. Après avoir analysé les phénomènes mécaniques responsables du backlash, les principales solutions de compensation présentées dans la littérature ont été étudiées afin d'identifier leurs avantages et leurs limites.

Cette analyse a conduit à retenir une solution fondée sur un écrou anti-jeu réglable associé à un système d'indication mécanique de position, répondant aux objectifs de simplicité, de robustesse et de précision recherchés dans ce travail.

La démarche méthodologique adoptée a ensuite été présentée, depuis la conception assistée par ordinateur sous SolidWorks, jusqu'à la fabrication du prototype par impression 3D, en passant par la préparation des fichiers destinés à la machine de fabrication additive. Cette

approche a permis d'obtenir un prototype fonctionnel conforme aux choix de conception retenus.

Le chapitre suivant sera consacré à la description détaillée de la conception du système, aux différentes étapes de sa réalisation ainsi qu'à la présentation des essais expérimentaux permettant d'évaluer les performances du prototype.

Chapitre III

*Conception, modélisation et validation du
système de levage*

III.1 Introduction

Ce chapitre est consacré à la conception détaillée, à la modélisation tridimensionnelle et à la réalisation du système de levage développé dans ce mémoire. Après avoir établi les fondements scientifiques et retenu une solution basée sur une vis trapézoïdale équipée d'un écrou anti-jeu réglable, l'objectif est désormais de transformer cette solution théorique en un prototype fonctionnel.

La conception a été réalisée sous SolidWorks 2025, selon une approche paramétrique permettant de modéliser individuellement l'ensemble des composants avant leur assemblage virtuel. Cette étape a permis de vérifier la compatibilité géométrique des pièces, les liaisons mécaniques, la cinématique du mécanisme ainsi que le fonctionnement global de l'ensemble.

Les modèles numériques obtenus ont ensuite été préparés pour la fabrication additive afin de réaliser un prototype physique par impression 3D. Enfin, une simulation cinématique sous SolidWorks Motion a permis de vérifier la transmission du mouvement, d'analyser le déplacement linéaire de la charge et d'évaluer le comportement du mécanisme avant sa réalisation expérimentale.

III.2 Analyse fonctionnelle et cinématique du système

III.2.1 Analyse de la chaîne cinématique

L'analyse de la chaîne cinématique constitue une étape essentielle dans la conception d'un mécanisme de levage, car elle permet d'identifier la succession des mouvements transmis entre les différents composants, depuis l'organe d'entrée jusqu'à l'organe de sortie. Cette analyse met en évidence le chemin suivi par le mouvement mécanique, les différentes liaisons cinématiques ainsi que les transformations de mouvement intervenant au sein du système.

Dans le mécanisme proposé, le mouvement est initié par la rotation de la manivelle, transmise successivement à l'arbre secondaire, au train d'engrenages coniques, puis à la vis trapézoïdale. Cette dernière transforme le mouvement de rotation en un déplacement linéaire de l'écrou anti-jeu, assurant ainsi le déplacement vertical de la charge.

L'identification de cette chaîne fonctionnelle constitue une étape indispensable avant la modélisation numérique et la validation du mécanisme. Elle permet notamment de vérifier la cohérence du modèle CAO, de déterminer les paramètres cinématiques théoriques (vitesse, déplacement et mobilité) et de préparer les simulations réalisées par la suite.

Le Tableau III.1 présente la chaîne cinématique complète du système de levage étudié.

Tableau III-1: Chaîne cinématique du système de levage proposé

Élément	Désignation	Mouvement	Relation cinématique
0	Manivelle	Rotation (ω_1)	$\omega_1 = 2\pi N/60$ (N en tr/min)
1	Arbre secondaire	Rotation (ω_1)	Transmission directe par clavette
2	Engrenage conique menant (Z_1)	Rotation (ω_1)	—
3	Engrenage conique mené (Z_2)	Rotation (ω_2)	$\omega_2 = \omega_1 \times (Z_1/Z_2)$
4	Vis trapézoïdale	Rotation (ω_2) + translation (V)	—
5	Écrou anti-jeu (demi-écrous A et B)	Transformation de mouvement	$V = \omega_2 \times p$ (p = pas de la vis)
6	Charge (demi-écrou B)	Translation rectiligne (V)	$V = (p \times N) / 60$ (mm/s)

Le tableau met en évidence la succession des transformations de mouvement entre les différents composants du mécanisme. La rotation imposée à la manivelle est d'abord transmise à l'arbre secondaire, puis aux engrenages coniques, qui assurent un changement de direction du mouvement sans modification du rapport de transmission puisque les deux engrenages possèdent le même nombre de dents ($Z_1 = Z_2 = 14$). La rotation est ensuite transmise à la vis trapézoïdale qui, grâce au filetage de l'écrou anti-jeu, génère un déplacement linéaire de la charge.

Cette architecture présente l'avantage d'être simple, robuste et facilement modélisable. Elle constitue également une base favorable à l'intégration du dispositif anti-jeu développé dans ce mémoire, tout en conservant une transmission régulière du mouvement.

III.2.2 Détermination de la vitesse linéaire théorique

Pour le prototype développé, les paramètres géométriques retenus sont les suivants :

- Pas de la vis : $p = 4 \text{ mm}$
- Nombre de dents des engrenages : $Z_1 = Z_2 = 14$
- Vitesse de rotation nominale de la manivelle : $N = 30 \text{ tr/min.}$
- Le rapport de transmission des engrenages est donc égal à $\frac{Z_1}{Z_2} = 1$

La vitesse de rotation de la vis est ainsi identique à celle de la manivelle.

La vitesse linéaire théorique de déplacement de la charge est obtenue à partir de la relation classique reliant le pas de la vis à sa vitesse de rotation :

$$V_{th} = \frac{p \times N}{60}$$

En remplaçant les valeurs numériques

$$V_{th} = \left(\frac{4 \times 30}{60} \right) = 2 \text{ mm/s}$$

Cette valeur représente la vitesse théorique de déplacement linéaire de l'écrou anti-jeu et servira de référence lors des phases de validation du prototype.

III.2.3 Analyse physique du mécanisme

Le fonctionnement du système repose sur la transformation d'un mouvement de rotation en un mouvement de translation grâce au mécanisme vis-écrou. Cette transformation constitue le principe fondamental des systèmes de levage à vis et permet d'obtenir un déplacement linéaire précis à partir d'une simple rotation de la manivelle.

Dans le mécanisme conçu, les deux engrenages coniques possèdent le même nombre de dents ($Z_1 = Z_2 = 14$), ce qui conduit à un rapport de transmission unitaire. Ainsi, la vitesse de rotation est transmise intégralement de la manivelle vers la vis trapézoïdale, sans amplification ni réduction. Cette configuration présente plusieurs avantages : elle simplifie le comportement cinématique du mécanisme, facilite l'analyse théorique et permet une comparaison directe entre les résultats analytiques, les simulations numériques et les essais expérimentaux.

La transformation du mouvement est directement liée au pas de la vis trapézoïdale. Pour une rotation d'un tour complet, l'écrou se déplace d'une distance égale au pas de la vis. La relation générale entre l'angle de rotation de la vis et le déplacement linéaire s'écrit :

$$X = \frac{p}{2\pi} \theta$$

Où :

- **X** : déplacement linéaire de l'écrou (mm) ;
- **p** : pas de la vis (mm) ;
- **θ** : angle de rotation de la vis (rad).

Cette relation montre que le déplacement est directement proportionnel à l'angle de rotation. Par conséquent, toute erreur de rotation ou tout jeu mécanique au niveau de la transmission influence directement la précision du positionnement. La réduction du backlash devient ainsi un facteur déterminant pour assurer la fidélité du déplacement et améliorer la répétabilité du système.

Dans le prototype étudié, le choix d'un pas de 4 mm constitue un compromis entre la vitesse de déplacement et la précision de positionnement. Un pas plus important permettrait d'augmenter la vitesse linéaire mais réduirait la finesse du réglage, tandis qu'un pas plus faible améliorerait la résolution du déplacement au prix d'une diminution de la vitesse de translation.

Ainsi, la combinaison d'un rapport de transmission unitaire et d'une vis trapézoïdale à pas constant garantit un comportement cinématique simple, facilement modélisable et particulièrement adapté à la validation expérimentale du système anti-jeu développé dans ce mémoire.

III.2.4 Mobilité du mécanisme

L'étude de la mobilité d'un mécanisme permet de vérifier que son architecture cinématique est cohérente et que le mouvement peut être transmis sans apparition de mouvements parasites. Dans le système de levage proposé, l'ensemble des composants est organisé de manière à assurer une transmission continue du mouvement depuis la manivelle jusqu'à la charge.

Le mécanisme est commandé par un unique mouvement d'entrée, correspondant à la rotation de la manivelle. Cette rotation est transmise successivement à l'arbre secondaire, aux engrenages coniques, puis à la vis trapézoïdale, qui convertit le mouvement de rotation en un déplacement linéaire de l'écrou anti-jeu. Tous les autres mouvements des composants sont entièrement imposés par les liaisons mécaniques existantes entre les différentes pièces.

Ainsi, le système présente un seul degré de liberté, ce qui signifie que la position de l'ensemble du mécanisme est entièrement déterminée par la rotation de la manivelle. Cette caractéristique garantit un fonctionnement simple, prévisible et parfaitement adapté à un mécanisme de levage manuel.

La présence de l'écrou anti-jeu ne modifie pas la mobilité globale du mécanisme. Son rôle consiste uniquement à maintenir un contact permanent entre les filets de la vis et de l'écrou afin de limiter le backlash et d'améliorer la précision du déplacement, sans modifier la chaîne cinématique du système.

Cette configuration facilite également la modélisation sous SolidWorks, la réalisation du prototype par impression 3D ainsi que les futures analyses expérimentales, puisque l'ensemble du comportement du mécanisme peut être étudié à partir d'une seule variable de commande : la rotation de la manivelle.

III.2.5 Considérations d'éco-conception

Au-delà des performances mécaniques recherchées, la conception du système s'inscrit dans une démarche d'éco-conception visant à réduire son impact environnemental tout au long de son cycle de vie. Cette approche a guidé les choix de conception dès les premières étapes du développement du prototype.

L'architecture retenue privilégie un nombre limité de composants mécaniques, ce qui contribue à réduire la quantité de matière utilisée, à simplifier les opérations d'assemblage et à limiter les coûts de fabrication. Cette simplification facilite également les interventions de maintenance ainsi que le remplacement éventuel des pièces soumises à l'usure.

Le recours à la fabrication additive constitue également un élément central de cette démarche. Contrairement aux procédés conventionnels d'usinage, l'impression 3D permet de fabriquer les pièces couche par couche en utilisant uniquement la quantité de matière nécessaire à leur réalisation. Cette technologie limite ainsi les pertes de matériau tout en offrant une grande liberté de conception pour la réalisation de géométries complexes.

Par ailleurs, le choix d'un nombre réduit de matériaux facilite les opérations de tri et de recyclage en fin de vie du prototype. La conception modulaire des différents éléments permet également le démontage aisé du mécanisme et le remplacement individuel des composants, sans nécessiter le renouvellement complet de l'ensemble.

L'intégration de ces principes d'éco-conception permet ainsi de concilier les exigences de performance mécanique, de simplicité de fabrication, de maintenance et de durabilité, tout en limitant l'empreinte environnementale du système développé.

III.2.6 Domaine de validité du prototype

Le système étudié dans ce mémoire correspond à un prototype expérimental à échelle réduite, conçu dans le but de valider le principe de fonctionnement d'un mécanisme de levage à vis trapézoïdale intégrant un écrou anti-jeu et un système d'indication mécanique de position.

Les dimensions retenues, notamment le pas de la vis ($p = 4 \text{ mm}$), la vitesse nominale de rotation ($N = 30 \text{ tr/min}$) ainsi que les caractéristiques géométriques des différents composants, ont été définies en fonction des contraintes de la fabrication additive et des objectifs expérimentaux de cette étude. Les performances obtenues ne doivent donc pas être assimilées directement à celles d'un système industriel de grande capacité.

Néanmoins, les relations cinématiques établies, la démarche de conception adoptée ainsi que les principes de fonctionnement développés dans ce travail restent entièrement transposables à des mécanismes de dimensions supérieures, sous réserve d'adapter les paramètres géométriques, les matériaux et les conditions de fonctionnement aux exigences de l'application considérée.

Le prototype constitue ainsi une plateforme expérimentale permettant de valider la faisabilité du concept proposé avant une éventuelle adaptation à des applications industrielles de plus grande échelle.

III.3 Choix technologiques et sélection des matériaux

Le développement du système de levage proposé dans ce mémoire repose sur des choix technologiques visant à satisfaire simultanément les exigences fonctionnelles du mécanisme, les contraintes imposées par la fabrication additive ainsi que les principes d'éco-conception. Ces choix conditionnent non seulement les performances mécaniques du prototype, mais également sa facilité de fabrication, son coût de réalisation, sa maintenance et son impact environnemental.

Contrairement à une conception orientée uniquement vers la résistance mécanique, l'approche adoptée dans cette étude intègre l'ensemble du cycle de vie du produit. Une attention particulière a ainsi été portée à la réduction de la consommation de matière, à la limitation du nombre de matériaux utilisés, à la simplicité d'assemblage et de démontage ainsi qu'à la possibilité de recycler les différents composants en fin de vie.

Les principaux critères ayant guidé les choix technologiques sont les suivants :

- **Compatibilité avec la fabrication additive par dépôt de filament fondu (FDM)**, en tenant compte des dimensions du plateau d'impression (200×200 mm) ainsi que des contraintes géométriques propres à ce procédé de fabrication ;
- **Fiabilité du mécanisme anti-jeu**, obtenue grâce à l'utilisation d'un écrou divisé associé à un système de précharge mécanique permettant de réduire le backlash tout en conservant une architecture simple, facilement réglable et reproductible ;
- **Application des principes d'éco-conception**, en privilégiant une faible consommation de matière, une énergie grise limitée, la standardisation des composants, l'utilisation d'un nombre réduit de matériaux ainsi qu'une conception favorisant le démontage, la maintenance et le recyclage.

Cette démarche permet de concevoir un système robuste, économique et facilement reproductible, tout en exploitant pleinement les possibilités offertes par la fabrication additive pour le prototypage rapide.

Le Tableau III.2 présente les principaux composants du système, les matériaux retenus ainsi que la justification des différents choix de conception.

Tableau III-2: Composants principaux et justifications

Composant	Matériau / source	Fonction	Justification du choix
Vis trapézoïdale	PolyMa (impression 3D)	Transformer la rotation en translation	Facilité d'impression, résistance suffisante à l'échelle réduite, légèreté.
Demi-écrous A et B	PolyMa (impression 3D)	Éliminer le jeu axial par précharge élastique	Faible coût, usinage simultané avec la vis (même fichier CAO), assemblage simplifié.
Ressorts de précontrainte	Acier à ressort (standard commercial)	Générer une force axiale constante entre les deux demi-écrous	Impossibilité d'imprimer un ressort polymère performant ; reprise d'un composant standard.
Engrenages coniques	PolyMa (impression 3D)	Transmettre le mouvement à 90°	Réduction du nombre de matériaux, impression directe, pas de charge excessive à l'échelle réduite.
Manivelle et arbre secondaire	PolyMa (impression 3D)	Interface utilisateur et transmission primaire	Standardisation, impression rapide, adaptation à la main humaine.
Clavette coulissante	PolyMa (impression 3D)	Empêcher la rotation de la vis tout en autorisant la translation	Simplicité géométrique, absence de besoin d'acier à cette échelle.
Bâti (embases, colonnes)	PolyMa (impression 3D)	Rigidité et alignement global	Matériau unique, impression modulaire, recyclabilité potentielle.
Tiges de guidage	PolyMa (impression 3D)	Guidage linéaire précis des demi-écrous	Légèreté, réduction des frottements par polissage post-impression.
Règle graduée + index	PolyMa (impression 3D)	Mesure visuelle du déplacement	Intégration directe, coût nul, précision suffisante (0,5 mm).

III.3.1 Critères de sélection des matériaux

Le choix des matériaux constitue une étape essentielle dans la conception du prototype, puisqu'il influence directement la rigidité de l'ensemble, la précision du positionnement, la durée de vie des composants ainsi que la qualité de fabrication obtenue par impression 3D.

Dans le cadre de cette étude, la majorité des pièces mécaniques a été réalisée en **PolyMa**, un polymère compatible avec la technologie d'impression FDM. Ce matériau présente plusieurs avantages pour la réalisation d'un prototype expérimental : facilité d'impression, bonne stabilité dimensionnelle, faible masse volumique et coût de fabrication réduit. Ses propriétés mécaniques sont suffisantes pour répondre aux sollicitations rencontrées lors des essais réalisés sur le modèle réduit. L'utilisation d'un matériau unique pour la quasi-totalité des composants présente également un intérêt du point de vue de l'éco-conception. Elle facilite les opérations d'impression, réduit la diversité des matériaux employés et simplifie les opérations de tri ainsi que le recyclage en fin de vie du prototype.

Les seuls composants métalliques conservés dans la conception sont les ressorts de précharge. Ce choix est justifié par la nécessité de disposer d'une force élastique stable et reproductible, difficilement réalisable avec les polymères actuellement disponibles en fabrication additive. L'utilisation de ressorts normalisés garantit également une meilleure fiabilité du système anti-jeu ainsi qu'un remplacement simple en cas d'usure.

Les propriétés mécaniques des principaux matériaux utilisés sont résumées dans le Tableau III.3.

Tableau III-3: Propriétés des matériaux utilisés

Matériau	Masse volumique (kg/m ³)	Module d'Young (MPa)	Résistance à la traction (MPa)	Utilisation
PolyMa	1240	2200	58	Pièces imprimées
Acier à ressort	7850	210000	1200	Ressorts
Acier standard (référence)	7850	210000	450	Comparaison industrielle

Les résultats présentés montrent que le PolyMa constitue un matériau adapté à la réalisation du prototype expérimental développé dans cette étude. Ses propriétés mécaniques, associées

à sa bonne aptitude à la fabrication additive, permettent d'obtenir des pièces présentant une rigidité et une précision suffisantes pour la validation du principe de fonctionnement du système anti-jeu.

Le recours quasi exclusif à ce polymère s'inscrit également dans une démarche d'éco-conception. L'utilisation d'un matériau unique pour la majorité des composants simplifie les opérations de fabrication, de démontage, de tri et de recyclage en fin de vie du prototype. Les seuls éléments métalliques conservés sont les ressorts de précharge, dont les caractéristiques élastiques restent difficilement reproductibles par les procédés d'impression 3D actuellement utilisés. Ces composants peuvent toutefois être démontés facilement et intégrés dans les filières classiques de recyclage des aciers.

Il convient néanmoins de souligner que les matériaux retenus sont destinés à la réalisation d'un prototype expérimental. Pour une application industrielle soumise à des charges importantes, à des vitesses élevées ou à des sollicitations répétées, les composants polymères devraient être remplacés par des matériaux présentant de meilleures performances mécaniques, tels que des aciers alliés, des alliages d'aluminium ou des composites renforcés.

Ainsi, l'objectif de cette étude n'est pas de valider un système industriel définitif, mais de démontrer la faisabilité de la solution mécanique proposée et de vérifier expérimentalement son efficacité dans la réduction du backlash et l'amélioration de la précision du positionnement.

III.3.2 Vis trapézoïdale TR16×4

III.3.2.1 Choix de la vis

La vis trapézoïdale constitue l'organe principal de transmission du mouvement du système de levage. Sa fonction consiste à transformer le mouvement de rotation transmis par les engrenages coniques en un déplacement linéaire de l'écrou anti-jeu. Ce composant joue donc un rôle déterminant dans la précision de positionnement, la transmission des efforts ainsi que la stabilité du mécanisme.

Dans cette étude, une vis de type TR16×4 a été retenue. Elle présente un diamètre nominal de 16 mm et un pas de 4 mm, ce qui signifie qu'un tour complet de la vis produit un déplacement axial de 4 mm de l'écrou. Ce choix représente un compromis entre la précision du déplacement, la rigidité mécanique et les possibilités offertes par la fabrication additive.

La vis a été entièrement modélisée sous SolidWorks 2025 selon une approche paramétrique permettant d'ajuster facilement les dimensions du filetage en fonction des besoins de conception. La géométrie du profil trapézoïdal a été réalisée conformément aux dimensions normalisées afin d'assurer un bon engrènement avec les demi-écrous du système anti-jeu.

La fabrication de cette pièce a été réalisée par impression 3D en PolyMa, matériau présentant une rigidité suffisante pour la validation expérimentale du prototype tout en restant compatible avec les contraintes de la technologie FDM. Bien que ce matériau ne soit pas destiné à des applications industrielles fortement sollicitées, il constitue une solution adaptée pour vérifier le principe de fonctionnement du mécanisme et évaluer l'efficacité du système anti-backlash.

III.3.2.2 Dimensionnement géométrique de la vis

La vis retenue dans cette étude est une vis trapézoïdale normalisée TR16×4. Son diamètre nominal est de 16 mm et son pas est de 4 mm, ce qui correspond à un déplacement axial de 4 mm pour un tour complet de la vis.

Afin de définir correctement la géométrie du filetage, il est nécessaire de déterminer le diamètre intérieur (diamètre au fond du filet). Celui-ci est calculé conformément aux recommandations de la norme DIN 103, en tenant compte du jeu au fond de filet.

Le diamètre intérieur est donné par la relation :

$$d_3 = d - 2(0,5 \cdot p + a_c)$$

Où :

- ***d***: diamètre nominal de la vis (16 mm) ;
- ***p***: pas de la vis (4 mm) ;
- ***a_c***: jeu au fond du filet (0,25 mm selon la norme DIN 103).

En remplaçant les valeurs numériques :

$$d_3 = 16 - 2(0,5 \times 4 + 0,25)$$

$$d_3 = 16 - 2(2 + 0,25)$$

$$d_3 = 16 - 4,5$$

$$d_3 = 11,5 \text{ mm}$$

La valeur obtenue, 11,5 mm, correspond au diamètre intérieur théorique de la vis. Cette dimension a été retenue lors de la modélisation sous SolidWorks afin de respecter la géométrie normalisée du profil trapézoïdal et d'assurer un engrenement correct avec l'écrou anti-jeu.

Le calcul précédent permet de vérifier la cohérence des dimensions retenues lors de la conception assistée par ordinateur. Les paramètres géométriques ainsi obtenus ont ensuite été directement utilisés pour la modélisation paramétrique de la vis sous SolidWorks 2025, garantissant ainsi la conformité entre le modèle numérique et les dimensions théoriques.

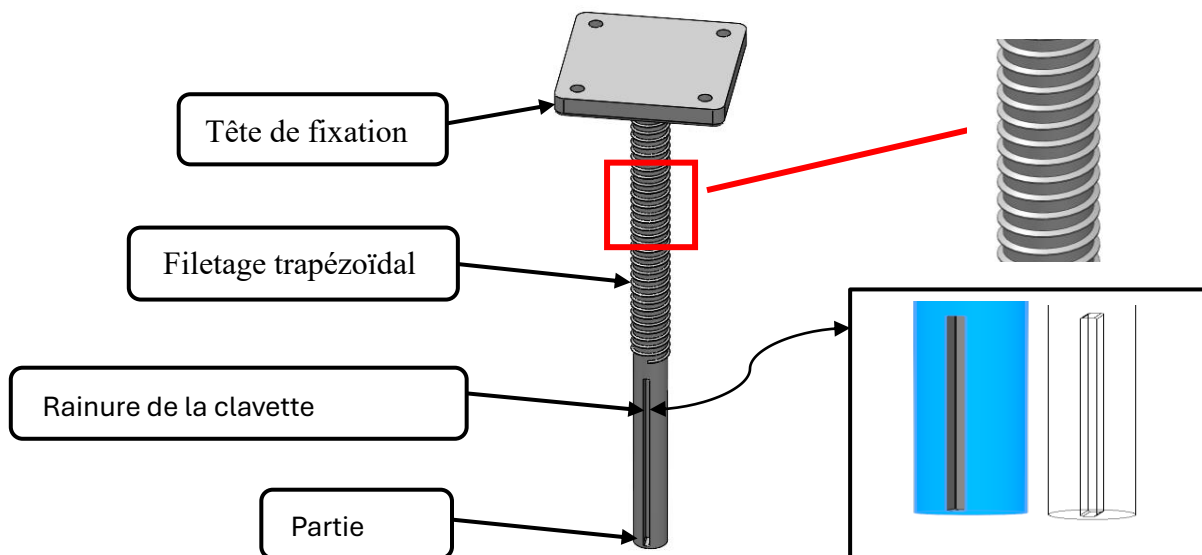


Figure III-1: Modèle CAO de la vis trapézoïdale

La Figure III.1 illustre les différentes zones fonctionnelles constituant la vis trapézoïdale. Le filetage trapézoïdal assure la conversion du mouvement de rotation en mouvement de translation. La rainure longitudinale garantit le guidage axial grâce à une clavette coulissante, tout en empêchant la rotation de la vis. La tête de fixation constitue l'interface de transmission du couple entre l'engrenage conique et la vis. La conception géométrique de cette pièce a été optimisée afin de répondre aux exigences de précision, de garantir sa fabricabilité par impression 3D et de faciliter son montage au sein du système de levage.

Les principales caractéristiques géométriques de la vis trapézoïdale ont été définies conformément aux exigences fonctionnelles du système de levage et aux contraintes de fabrication par impression 3D. Le choix des dimensions résulte d'un compromis entre la résistance mécanique, la précision du guidage et la compatibilité avec les demi-écrous anti-jeu. Le Tableau III.4 récapitule les principaux paramètres géométriques retenus.

Tableau III-4: Modélisation 3D de la vis trapézoïdale TR16×4

Paramètre	Symbole	Valeur (mm)	Remarque
Diamètre nominal	d	16	Selon DIN 103
Pas	p	4	Pas standard
Diamètre intérieur (fond de filet)	d_3	11,5	Calculé avec $a_c = 0,25mm$
Longueur filetée utile	L_f	145	Zone de contact avec les demi-écrous
Longueur de la partie lisse (porte-clavette)	L_{lisse}	50	Diamètre 16 mm
Longueur de la tête (non filetée)	$L_{tête}$	80	Pour fixation ou butée
Longueur totale	L_{tot}	250	Somme des trois parties
Matière	-	PolyMa	Impression 3D FDM

La Figure III.2 présente le modèle tridimensionnel de la vis trapézoïdale réalisé sous SolidWorks. Cette représentation permet de visualiser les différentes zones fonctionnelles de la pièce, notamment la partie filetée assurant la transformation du mouvement, la rainure longitudinale destinée au guidage par clavette ainsi que la tête de fixation permettant

l'assemblage avec le plateau mobile. Les dimensions détaillées de la vis sont récapitulées dans le Tableau III.4.

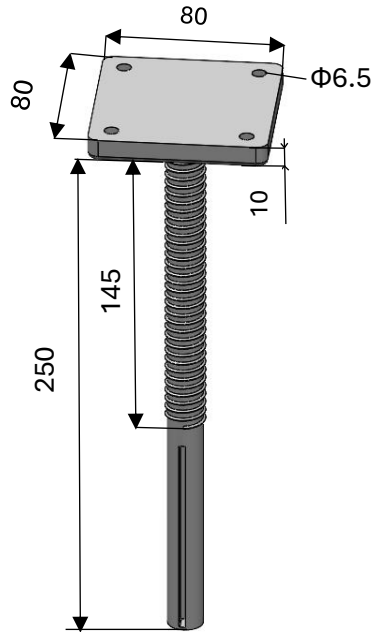


Figure III-2: Modèle tridimensionnel de la vis trapézoïdale

III.3.2.3 Modélisation de la vis sous SolidWorks

Après le dimensionnement analytique, la vis trapézoïdale a été modélisée sous SolidWorks 2025 afin d'obtenir une représentation tridimensionnelle fidèle à la géométrie théorique. La modélisation paramétrique permet de modifier facilement les dimensions principales tout en garantissant la cohérence géométrique du modèle.

Les principales étapes de modélisation sont les suivantes :

- Création d'un cylindre de diamètre 16 mm et de longueur 250 mm par extrusion ;
- Génération d'une hélice de pas 4 mm, de hauteur 145 mm et d'angle de départ de 0°
- Création du profil trapézoïdal sur un plan tangent à l'hélice avec :
 - Un angle de filet de 30°
 - Une hauteur de filet de 2,5 mm
 - Un jeu au fond de filet de 0,25 mm

- Réalisation du filetage par l'opération Balayage enlèvement (Swept Cut) sur toute la longueur filetée ;
- Création d'une rainure de clavette de $6 \times 6 \times 50$ mm sur la partie lisse de la vis afin d'empêcher sa rotation tout en autorisant son déplacement axial.

L'ensemble de ces opérations permet d'obtenir une géométrie conforme aux dimensions calculées précédemment et directement exploitable pour les opérations d'assemblage et de simulation.

III.3.2.4 Vérification simplifiée de la résistance au flambage

Avant de procéder aux simulations numériques détaillées sous Abaqus, une première vérification analytique de la stabilité de la vis a été réalisée à l'aide de la théorie du flambage d'Euler. Cette estimation permet de vérifier que la vis présente une rigidité suffisante pour supporter la charge de fonctionnement du prototype.

Le moment quadratique minimal de la section est donné par :

$$I_{min} = \frac{\pi d_3^4}{64}$$

En utilisant le diamètre intérieur précédemment déterminé :

$$I_{min} = \frac{\pi \times 11,5^4}{64}$$

$$I_{min} \approx 858 \text{ mm}^4$$

La charge critique d'Euler est ensuite calculée par :

$$F_{cr} = \frac{\pi^2 EI}{L_f^2}$$

Avec :

- $E = 2200 \text{ MPa}$ (Module d'Young du PolyMa)
- $L_f = 120 \text{ mm}$
- $I = 858 \text{ mm}^4$

Le calcul conduit à :

$$F_{cr} \approx 1290 \text{ N}$$

La charge nominale appliquée au mécanisme étant de 350 N, le coefficient de sécurité vis-à-vis du flambage vaut :

$$S = \frac{F_{cr}}{F}$$

$$S = \frac{1290}{350} \approx 3,7$$

Cette valeur indique que la vis possède une marge de sécurité satisfaisante pour les conditions de fonctionnement du prototype.

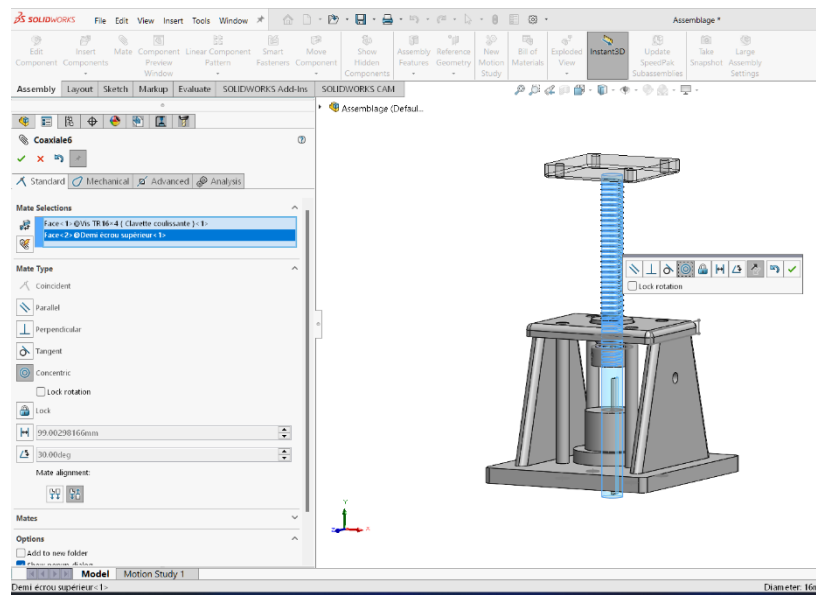


Figure III-3: Assemblage 3D du système de translation sous SolidWorks.

III.3.3 Conception de l'écrou anti-jeu

L'écrou anti-jeu constitue l'élément central du système développé dans cette étude. Sa fonction principale est de réduire le phénomène de backlash en maintenant un contact permanent entre les flancs des filets de la vis trapézoïdale et ceux de l'écrou. Contrairement

à un écrou conventionnel monobloc, la solution retenue repose sur un écrou divisé en deux demi-écrous, soumis à une précharge mécanique assurée par un ressort.

Cette architecture permet de supprimer le jeu fonctionnel apparaissant lors des inversions du sens de déplacement, tout en conservant une bonne fluidité du mouvement. La précharge appliquée entre les deux demi-écrous garantit un appui permanent sur les flancs opposés du filetage, ce qui améliore la répétabilité du positionnement et limite l'apparition des vibrations ainsi que des pertes de mouvement.

La géométrie des deux demi-écrous a été entièrement réalisée sous SolidWorks 2025. Les profils filetés ont été générés à partir des dimensions normalisées de la vis TR16×4 afin d'assurer une parfaite compatibilité géométrique entre les deux composants. Une attention particulière a été portée aux jeux d'assemblage afin de tenir compte des tolérances liées au procédé de fabrication additive.

Le choix d'un écrou divisé présente également plusieurs avantages en matière de maintenance. En cas d'usure des surfaces filetées, la précharge peut être ajustée sans qu'il soit nécessaire de remplacer l'ensemble du mécanisme. Cette solution prolonge la durée de vie du système tout en conservant une architecture mécanique simple et facilement démontable.

Le matériau retenu pour la fabrication des demi-écrous est le PolyMa, identique à celui utilisé pour la vis trapézoïdale. Ce choix permet de limiter le nombre de matériaux constituant le prototype, conformément à la démarche d'éco-conception adoptée dans cette étude.

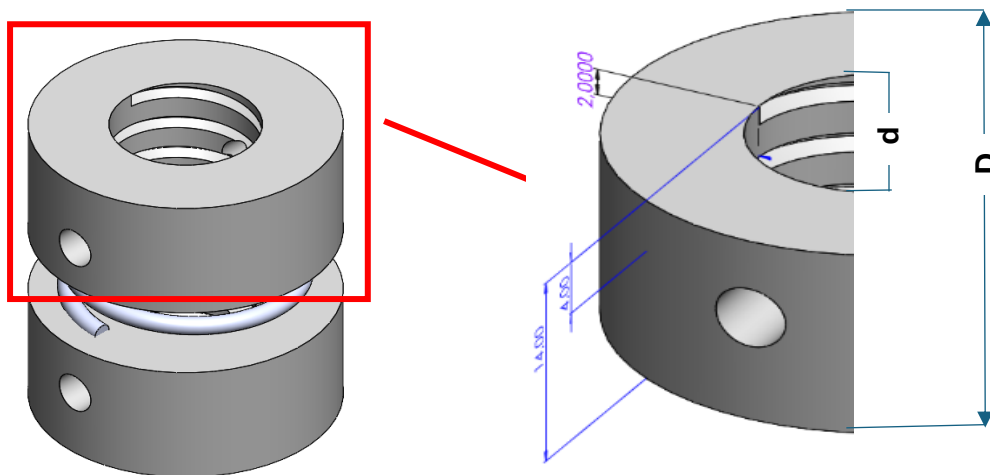


Figure III-4: Modèle CAO des deux demi-écrous constituant le système anti-jeu.

La Figure III.2 illustre la conception de l'écrou anti-jeu développé pour ce système. Celui-ci est constitué de deux demi-écrous montés de part et d'autre d'un ressort de précontrainte.

Ce dernier génère une force axiale permanente qui maintient les flancs des filets en contact, supprimant ainsi le jeu entre la vis et l'écrou. Cette solution permet de réduire significativement le phénomène de backlash tout en améliorant la précision et la répétabilité du déplacement linéaire.

Tableau III-5: Dimensions des demi-écrous (A et B)

Paramètre	aleur (mm)	Tolérance (mm)	Remarque
Diamètre intérieur (alésage fileté) (d)	Tr16x4	$\pm 0,1$	Ajustement avec la vis
Diamètre extérieur(D)	$\Phi 32\text{mm}$	$\pm 0,2$	Encombrement général TT
Hauteur totale (chaque demi-écrou)	14mm	$\pm 0,1$	
Hauteur filetée à compléter	10mm	$\pm 0,1$	Zone de contact
Diamètre logement ressort	24	$\pm 0,1$	
Profondeur logement ressort	6	$\pm 0,1$	
État du demi-écrou supérieur (A)	Fixe	—	Lié rigidement à la structure
Pas du filet	4	—	
État du demi-écrou inférieur (B)	Mobile	—	Guidé axialement par tiges
Matière	PolyMa	—	Impression 3D (couches horizontales)

Le tableau III.5 détaille les dimensions des demi-écrous. Le demi-écrou supérieur (A) est fixé rigidement à la structure, tandis que le demi-écrou inférieur (B) peut coulisser axialement grâce aux tiges de guidage. La rainure de ressort (profondeur 6 mm, diamètre 24 mm) accueille le ressort de précontrainte. Le pas du filet (4 mm) est identique à celui de la vis, garantissant un engagement correct.

La conception en deux demi-écrous présente également un intérêt environnemental. En cas d'usure localisée, il devient possible de remplacer uniquement l'élément défaillant sans changer l'ensemble du système. Cette approche contribue à prolonger la durée de vie du mécanisme et à réduire la production de déchets techniques.

III.3.4 Ressorts de précontrainte

Les ressorts de compression constituent les éléments actifs du mécanisme anti-jeu. Leur rôle est d'exercer une force axiale permanente entre les deux demi-écrous afin de maintenir un contact continu entre les filets de la vis et ceux de l'écrou. Cette précharge permet de compenser le jeu fonctionnel et d'améliorer la précision de positionnement lors des inversions du sens de déplacement.

Dans le prototype réalisé, des ressorts hélicoïdaux en acier ont été retenus en raison de leurs bonnes propriétés élastiques et de leur excellente résistance à la fatigue. Contrairement aux autres composants du système, ils n'ont pas été réalisés par impression 3D, les polymères utilisés ne permettant pas d'obtenir une rigidité suffisante pour assurer une précharge stable dans le temps.

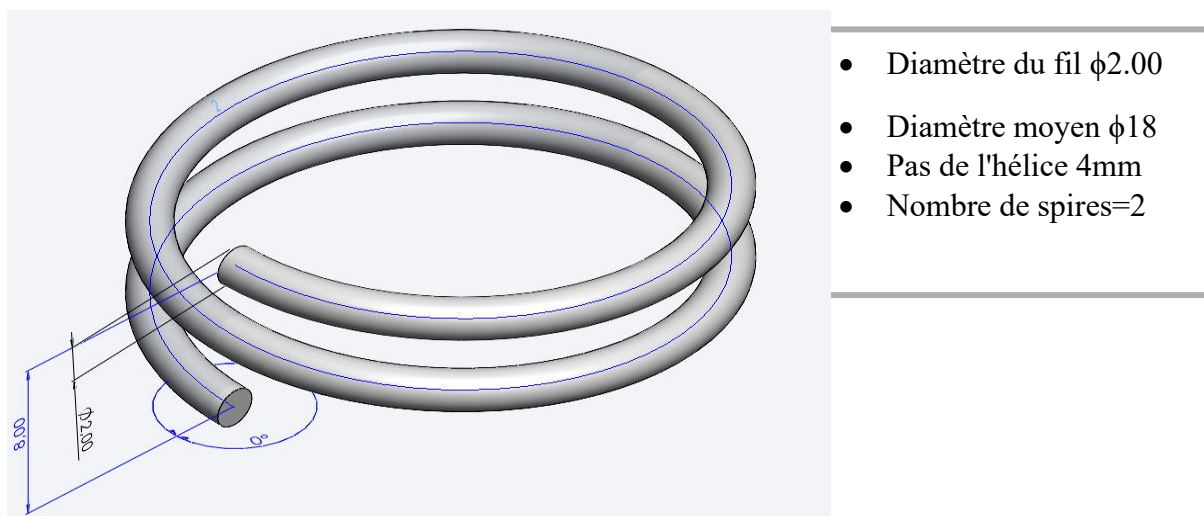


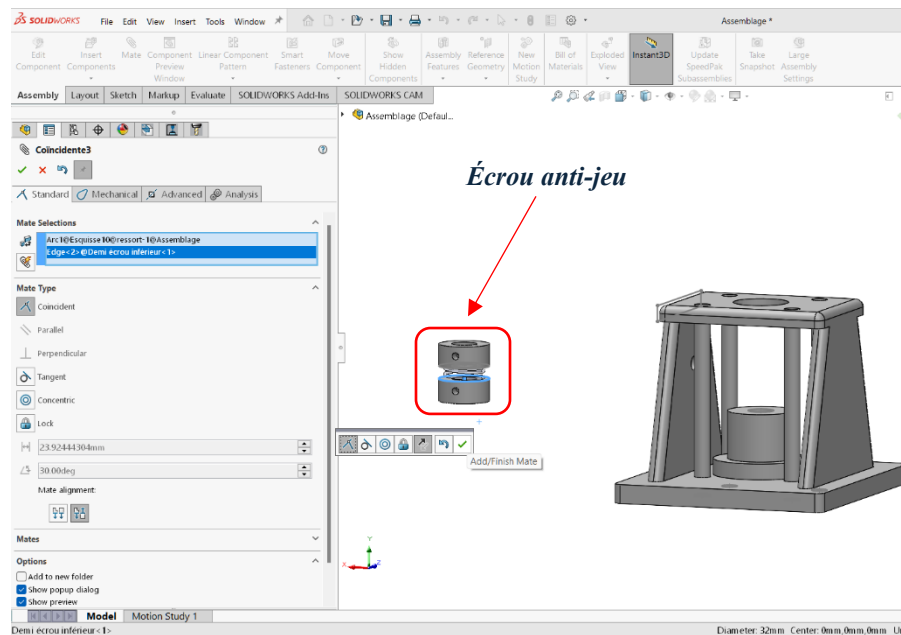
Figure III-5: Modélisation tridimensionnelle des ressorts de précontrainte.

Les principales caractéristiques géométriques et mécaniques des ressorts sont présentées dans le Tableau III.6.

Tableau III-6: Caractéristiques des ressorts

Paramètre	Symbole	Valeur	Unité	Remarque
Diamètre du fil	d_1	2mm	Mm	
Diamètre intérieur	D_i	16	Mm	
Diamètre extérieur	D_e	24	Mm	
Diamètre moyen	D_m	18	mm	$D_m = D_i + d_1$
Nombre de spires actives	n	2	—	
Longueur libre	L_0	12	mm	
Raideur (calculée)	K	13,89 N/mm	N/mm	$k = G \cdot d^4 / (8 \cdot n \cdot D_m^3)$
Matière	Acier à ressort	—	—	$G = 81 \text{ GPa}$

Le ressort hélicoïdal de compression (Figure III.5) possède une raideur $k = 13,89 \text{ N/mm}$ et une longueur libre $L_0 = 12 \text{ mm}$. Lors de l'assemblage, il est comprimé entre les deux demi-écrous pour générer une précharge de 20 N, ce qui élimine le jeu axial. La valeur de k a été calculée à partir des paramètres géométriques et du module de cisaillement $G = 81 \text{ GPa}$ de l'acier à ressort.

**Figure III-6:** Assemblage et positionnement de l'écrou anti-jeu sous SolidWorks.

La raideur théorique du ressort est obtenue à partir de la relation classique :

$$k = \frac{Gd^4}{8nD_m^3}$$

Où :

G Est le module de cisaillement de l'acier ;

d Est le diamètre du fil ;

n Est le nombre de spires actives ;

D_m Est le diamètre moyen du ressort.

Les dimensions retenues conduisent à une raideur de $k = 13,89 \text{ N/mm}$. Lors de l'assemblage, la compression des ressorts génère une précharge d'environ 20 N, suffisante pour maintenir les deux demi-écrous en contact permanent avec la vis tout en limitant l'augmentation du couple de manœuvre.

III.3.5 Engrenages coniques

La transmission du mouvement entre la manivelle et la vis trapézoïdale est assurée par une paire d'engrenages coniques à axes perpendiculaires. Cette solution permet de transmettre le mouvement de rotation avec un changement de direction de 90° , tout en conservant une architecture mécanique compacte.

Le rapport de transmission unitaire (1:1) a été retenu afin de limiter le nombre d'étages de réduction et de simplifier l'architecture mécanique. Cette simplification permet de réduire la masse totale du système, la quantité de matière utilisée ainsi que les opérations d'assemblage.

Les engrenages ont été modélisés sous SolidWorks 2025, puis réalisés par impression 3D en PolyMa. Ce choix est cohérent avec la démarche d'éco-conception adoptée dans ce travail puisqu'il permet de limiter le nombre de matériaux utilisés et de simplifier les opérations de fabrication.

Le module de 2 mm a été choisi pour un compromis entre encombrement et résistance mécanique dans le cadre de l'impression 3D (PolyMa).

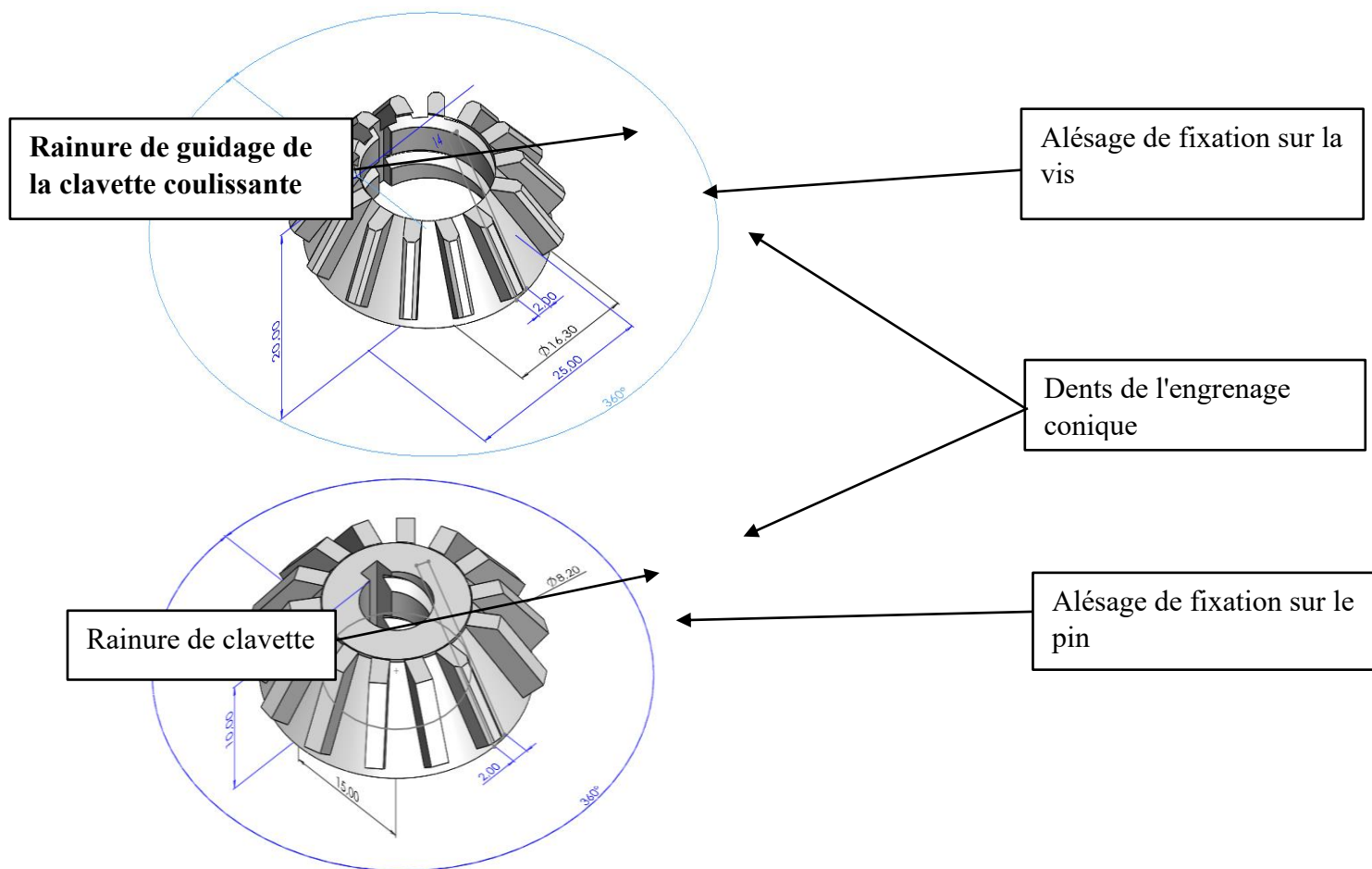


Figure III-7: Modélisation tridimensionnelle des engrenages coniques.

Tableau III-7: Caractéristiques géométriques des engrenages coniques.

Paramètre	Valeur	Unité	Remarque
Nombre de dents ($Z_1 = Z_2$)	14	–	Rapport 1:1
Module (m)	2	mm	
Angle de pression	20	degrés standard	St
Angle primitif	45	degrés	
Diamètre extérieur	30	mm	Calculé
Matière	PolyMa	–	Impression 3D

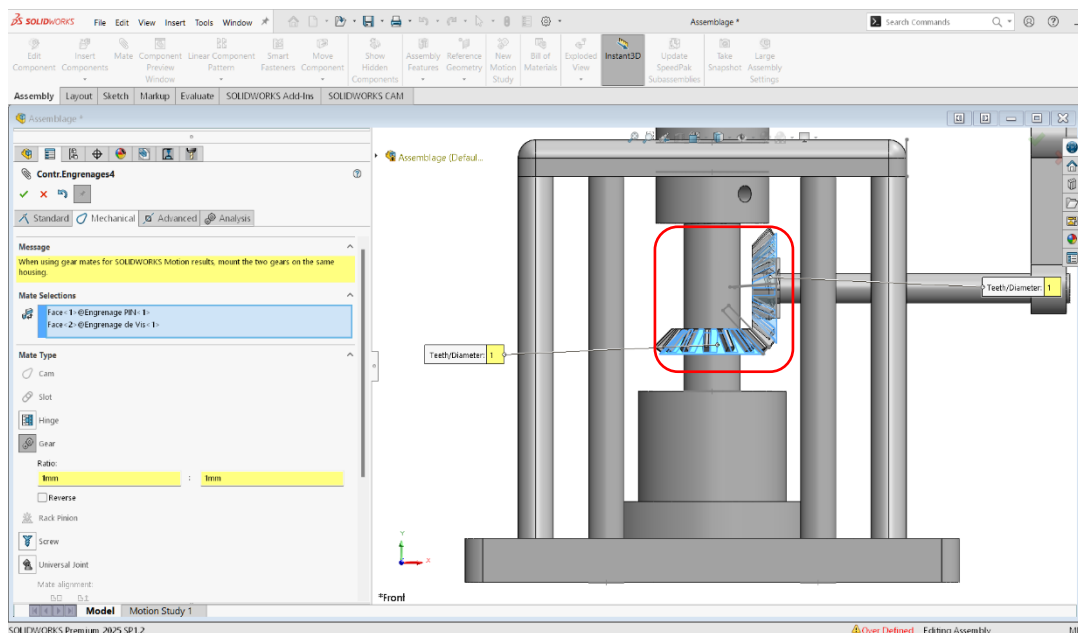


Figure III-8: Assemblage et positionnement de l'engrenage conique sous SolidWorks.

III.3.6 Manivelle et arbre secondaire

La commande du système de levage est assurée par une manivelle solidaire d'un arbre secondaire, dont la fonction est de transmettre le mouvement de rotation à la paire d'engrenages coniques. Ce dispositif constitue l'entrée cinématique du mécanisme et permet à l'utilisateur d'actionner manuellement la vis trapézoïdale.

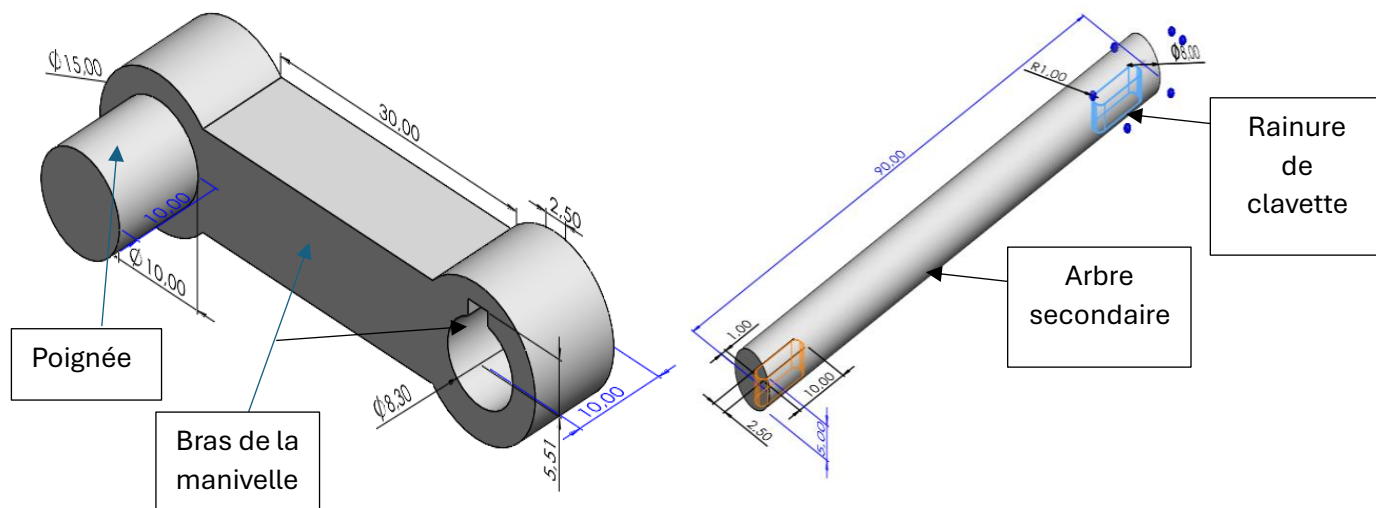


Figure III-9: Manivelle et arbre secondaire

La manivelle et l'arbre secondaire ont été conçus sous SolidWorks 2025, puis fabriqués par impression 3D en PolyMa. Ce choix permet de réduire la masse des composants tout en simplifiant leur fabrication. Les dimensions de la manivelle ont été adaptées afin d'offrir une prise en main confortable tout en limitant l'effort nécessaire pour actionner le mécanisme.

L'arbre secondaire assure la liaison entre la manivelle et l'engrenage conique menant. Cette liaison garantit une transmission directe du couple sans glissement, assurant ainsi un fonctionnement régulier de l'ensemble du système.

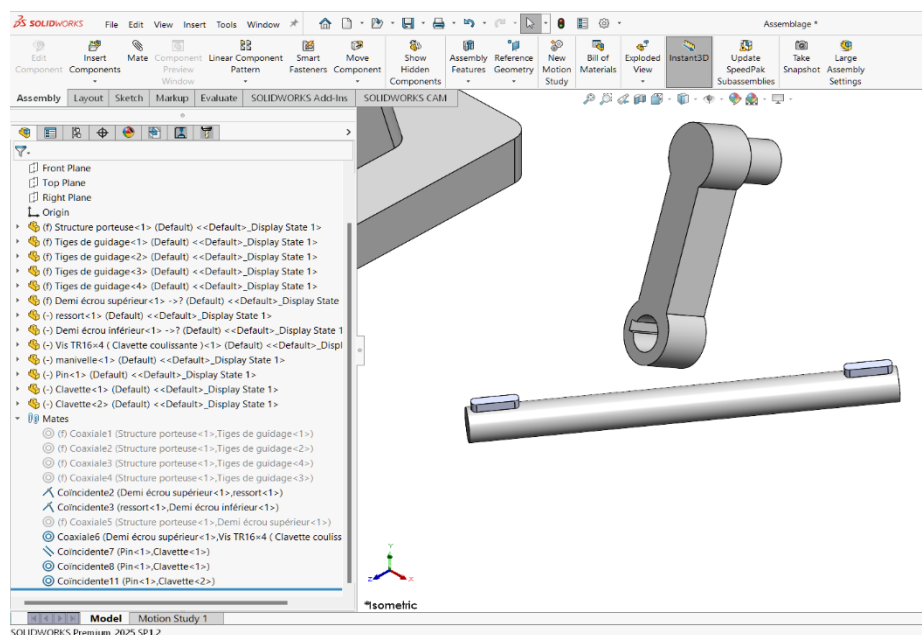


Figure III-10: Manivelle et arbre secondaire sous SolidWorks

Tableau III-8: Dimensions de la manivelle et de l'arbre secondaire

Paramètre	Valeur (mm)	Unité	Remarque
Rayon de manivelle	15	mm	Mesuré depuis l'axe
Diamètre poignée	10	Mm	Prise en main
Diamètre arbre secondaire	8	Mm	Ajustement avec palier/engrenage
Longueur arbre secondaire	90	mm	Encombrement général
Matière	PolyMa	—	Impression 3D

III.3.7 Clavette coulissante

La vis trapézoïdale doit pouvoir se déplacer axialement tout en étant empêchée de tourner sur elle-même. Cette fonction est assurée par une clavette coulissante qui guide la translation de la vis dans une rainure longitudinale réalisée sur sa partie lisse.

La clavette a été conçue de manière à assurer un guidage précis tout en limitant les frottements entre les surfaces en contact. Sa géométrie simple facilite sa fabrication par impression 3D ainsi que son remplacement en cas d'usure.

Le matériau retenu est le PolyMa, identique à celui utilisé pour les autres composants imprimés. Cette homogénéité des matériaux simplifie les opérations de fabrication, d'assemblage et de recyclage conformément à la démarche d'éco-conception adoptée dans ce travail.

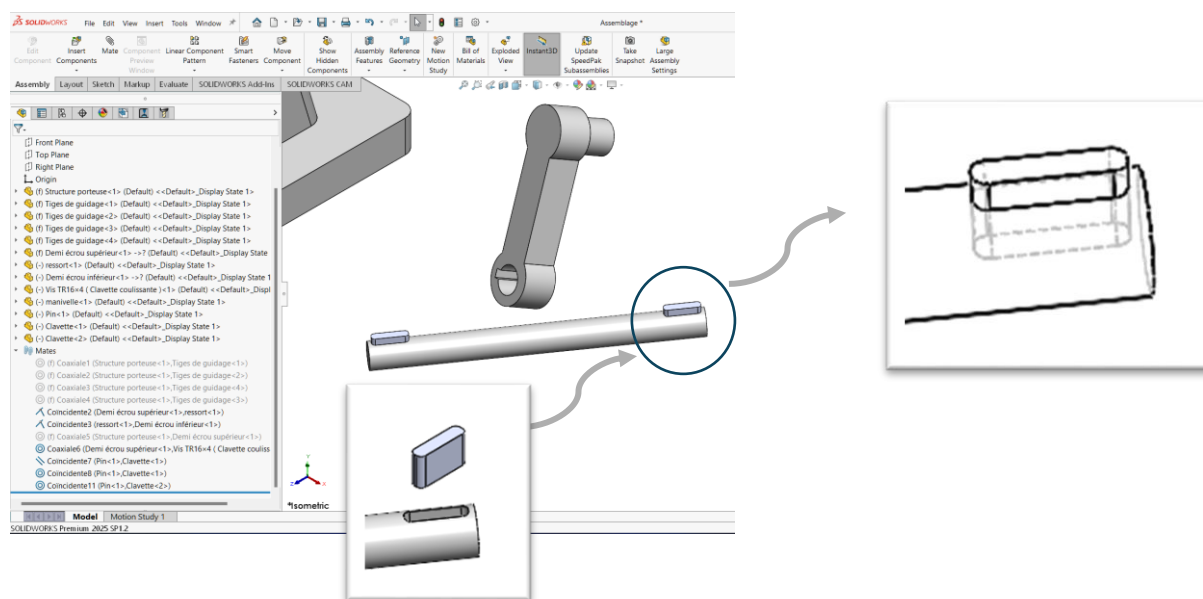


Figure III-11: Clavettes de transmission de l'arbre secondaire

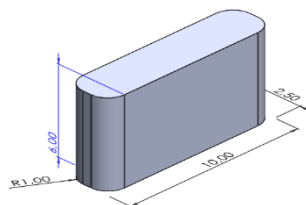


Figure III-12: Modélisation 3D de la clavette coulissante

Tableau III-9: Dimensions de la clavette coulissante

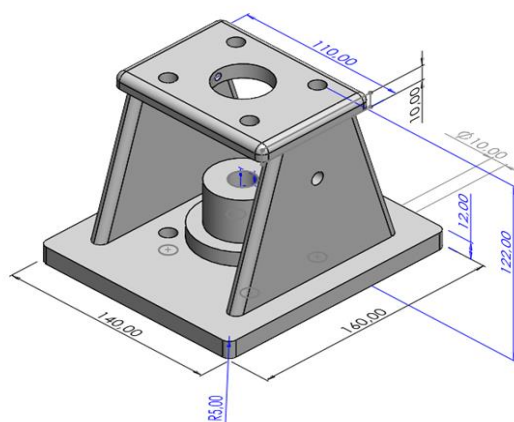
Paramètre	Valeur (mm)	Remarque
Largeur (a)	5	
Hauteur (b)	6	
Longueur (L)	15	
Course utile	40	Doit être $\geq$ course vis
Matière	PolyMa	

La clavette coulissante empêche la rotation de la vis tout en autorisant sa translation verticale. Ses dimensions (a=5 mm, b=6 mm, L=15 mm) sont compatibles avec la rainure usinée sur la vis. La course utile de 40 mm correspond au débattement maximal de la vis, garantissant que la clavette reste toujours en contact avec l'engrenage.

III.3.8 Bâti et structure porteuse

Le bâti constitue la structure porteuse du système de levage. Il assure le maintien des différents organes mécaniques, garantit leur alignement géométrique et reprend les efforts transmis lors du fonctionnement.

Dans le prototype développé, le bâti est composé d'embases, de colonnes verticales et de supports réalisés par impression 3D. Cette architecture modulaire facilite le montage et le démontage de l'ensemble tout en permettant le remplacement individuel des différentes pièces si nécessaire.

**Figure III-13:** Structure porteuse complète

Une attention particulière a été portée à la rigidité de la structure afin de limiter les déformations susceptibles d'affecter la précision du positionnement. L'implantation des composants a également été optimisée pour réduire l'encombrement global du prototype tout en facilitant les opérations de maintenance. La structure porteuse assure le maintien et l'alignement de l'ensemble des composants du système. Sa conception modulaire facilite la fabrication par impression 3D et permet le montage et le démontage des différents éléments. La présence de quatre colonnes améliore la rigidité globale et limite les déformations sous charge.

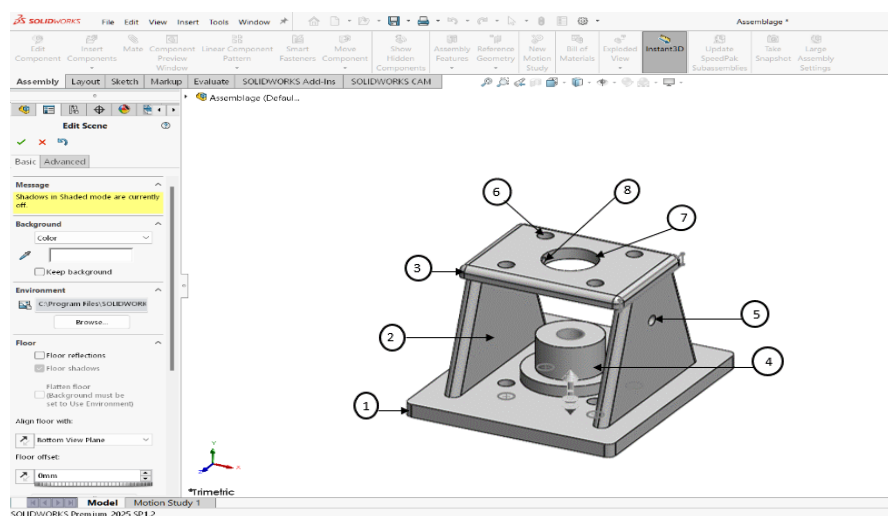


Figure III-14: Structure porteuse sous SolidWorks

Tableau III-10: Nomenclature des composants

N	Désignatin
1	Base inférieure
2	Flasque gauche (renfort latérale)
3	Base supérieur
4	Support de la vis mere
5	Trou de passage de pin
6	Trou de fixation
7	Trou centralde passage
8	Trou de fixation de demi-écrou supérieur

Tableau III-11: Dimensions de la structure porteuse

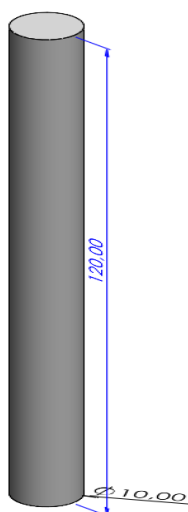
Paramètre	Valeur (mm)	Remarque
Hauteur totale	140	
Largeur	160	
Profondeur	122	
Section des colonnes	10	Section circulaire
Épaisseur des bases	10	
Matière	PolyMa	

La structure porteuse se compose d'une base inférieure, d'une base supérieure et de quatre colonnes circulaires (diamètre 10 mm). Cette disposition assure la rigidité et l'alignement des composants. L'encombrement total (160×122×140 mm) respecte les contraintes du plateau d'impression 3D (200×200 mm).

La structure a été volontairement dimensionnée afin d'être compatible avec un plateau d'impression standard de 200 × 200 mm. Ce choix évite le recours à des équipements spécifiques plus énergivores et permet la fabrication locale des composants, conformément aux principes de l'éco-conception.

III.3.9 Tiges de guidage

Quatre tiges de guidage assurent le déplacement linéaire précis de la partie mobile sans rotation parasite.

**Figure III-15:** Tiges de guidage et leurs alésages

Les tiges de guidage assurent le déplacement rectiligne de la partie mobile et empêchent toute rotation parasite du demi-écrou inférieur. Elles participent à l'amélioration de la précision du système et à la réduction des phénomènes de coincement.

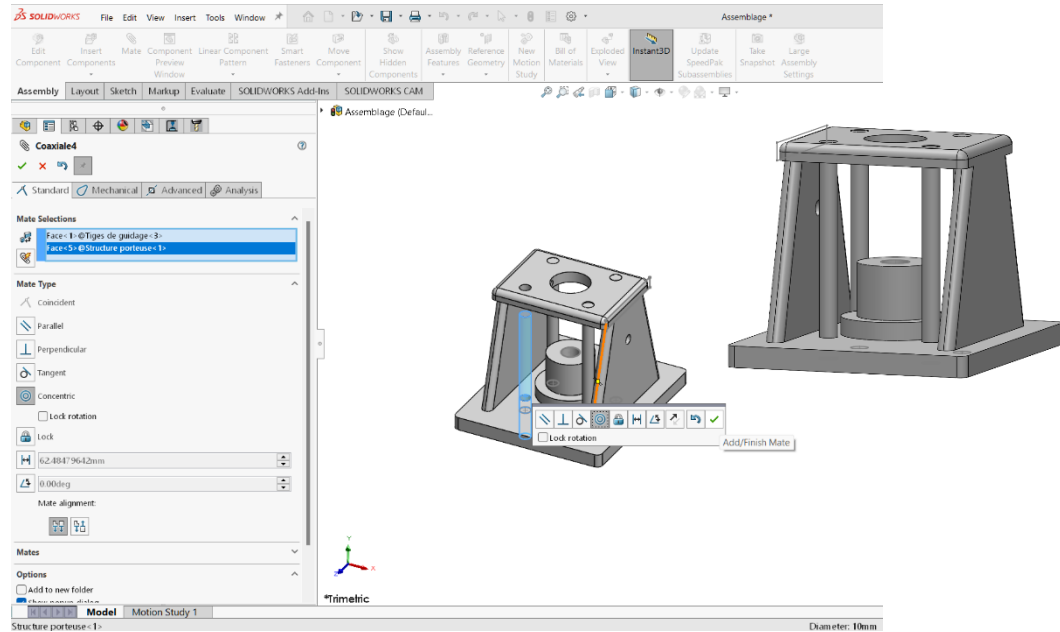


Figure III-16: Assemblage et positionnement de tiges de guidage sous SolidWorks

Le diamètre nominal de 10 mm a été retenu pour assurer une rigidité suffisante vis-à-vis du flambage sous la charge de 350 N. Cependant, en raison du procédé de fabrication par impression 3D (FDM), un jeu de fonctionnement de l'ordre de 0,2 mm est prévu entre la tige et l'alésage du demi-écrou inférieur.

Ce jeu permet de compenser les variations dimensionnelles dues au retrait thermique du PolyMa et d'éviter tout coincement durant le mouvement. Un parallélisme rigoureux entre les quatre tiges est également essentiel, tout défaut de parallélisme ($> 0,1$ mm) pourrait générer des efforts de flexion parasites et réduire la durée de vie du mécanisme. Enfin, un polissage mécanique des tiges après impression est recommandé pour minimiser le coefficient de frottement.

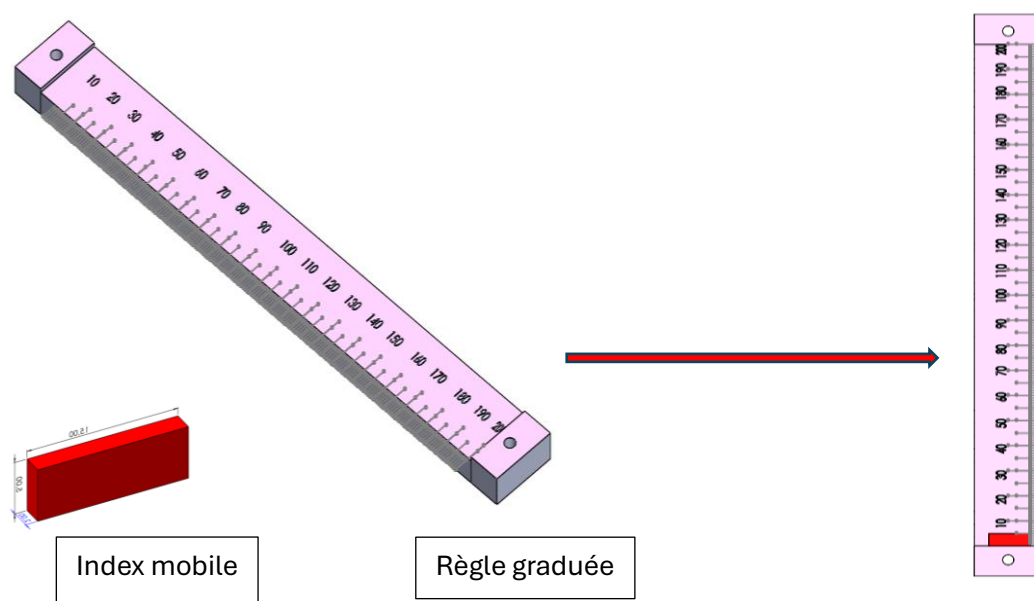
Tableau III-12: Dimensions des tiges de guidage

Paramètre	Valeur (mm)	Remarque
Diamètre	10	
Longueur	120	
Nombre	4	Parallèles
Matière	PolyMa	

Les quatre tiges de guidage (diamètre 10 mm, longueur 120 mm) garantissent un déplacement linéaire précis du demi-écrou inférieur. Elles sont fixées rigidement à la structure porteuse et traversent les alésages du demi-écrou mobile. Leur surface polie post-impression réduit les frottements.

III.3.10 Règle graduée et index

Un index fixé sur la partie mobile (demi-écrou B) se déplace devant une règle graduée solidaire de la structure.

**Figure III-17:** Règle graduée et index

Le système de mesure composé d'une règle graduée et d'un index mobile permet de visualiser directement le déplacement vertical de la charge. Bien que simple, cette solution offre une précision suffisante pour la validation expérimentale du prototype.

Tableau III-13: Dimensions de la règle et de l'index

Paramètre	Valeur (mm)	Unité
Longueur de la règle	200	mm
Précision de graduation	1	mm
Dimantion de l'index	15×5×2	mm
Matière	PolyMa	—

III.3.11 Intégration des principes d'éco-conception

Dès les premières phases de conception, plusieurs principes d'éco-conception ont été intégrés au développement du système de levage. La fabrication additive a été privilégiée afin de limiter les pertes de matière. La majorité des composants a été réalisée à partir d'un matériau unique (PolyMa), ce qui facilite le recyclage en fin de vie. La structure modulaire permet le démontage et le remplacement des pièces usées sans intervention lourde. Enfin, la réduction du nombre de composants et la simplicité du chemin de transmission contribuent à diminuer la masse totale du système ainsi que les ressources nécessaires à sa fabrication.

Ces choix permettent de concilier performances mécaniques, facilité de fabrication et réduction de l'impact environnemental, conformément aux objectifs de l'éco-conception.

III.4 Vue éclatée de l'assemblage

Afin de faciliter la compréhension de l'architecture du système de levage, une vue éclatée de l'assemblage a été réalisée sous SolidWorks. Cette représentation met en évidence les différents composants du mécanisme ainsi que leur position relative avant l'opération d'assemblage. Elle permet également d'illustrer la séquence de montage et de démontage, facilitant ainsi les opérations de fabrication, de maintenance et de remplacement des pièces.

La vue éclatée montre que le système est constitué d'une structure porteuse, d'une vis mère, d'un écrou anti-jeu, d'un ressort de compression, d'un système d'engrenages coniques, d'un arbre secondaire, de deux clavettes de transmission, d'une clavette coulissante, de roulements et d'une manivelle. Cette représentation confirme la cohérence de l'assemblage et facilite l'identification des différents composants ainsi que leurs interactions mécaniques lors du fonctionnement du mécanisme.

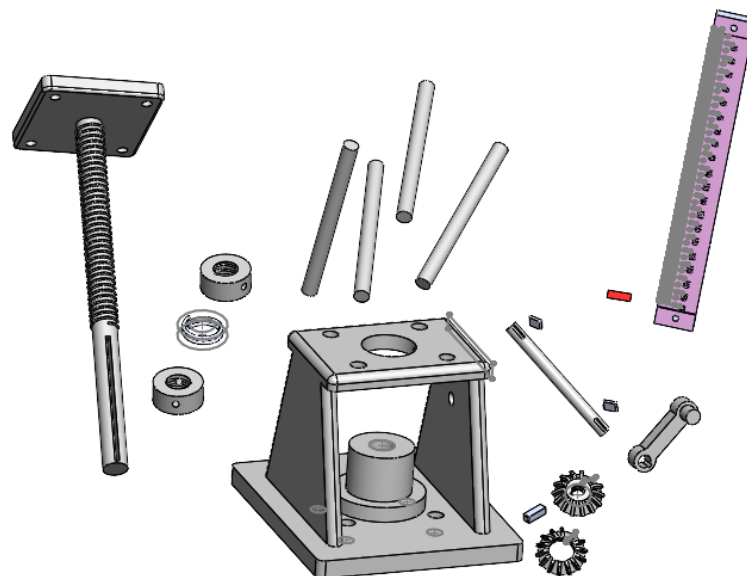


Figure III-18: Vue éclatée de l'assemblage du système de levage réalisée sous SolidWorks.

III.5 Assemblage virtuel sous SolidWorks (Assembly)

Une fois toutes les pièces modélisées individuellement, l'assemblage a été réalisé dans l'environnement Assembly de SolidWorks.

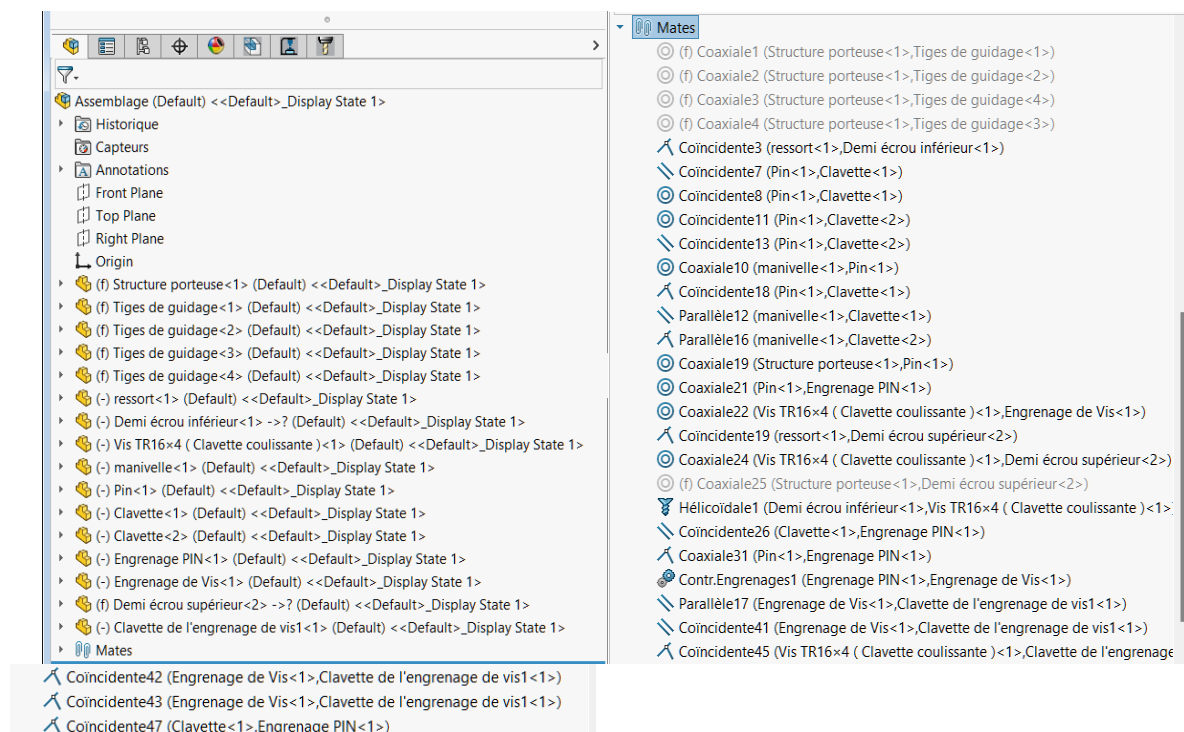


Figure III-19: Arbre d'assemblage (FeatureManager)

III.6 Contraintes mécaniques (Mates) appliquées

Tableau III-14: Contraintes d'assemblage

Liaison	Type de contrainte	Composants concernés	Rôle
Pivot	Concentrique + Coïncident	Arbre secondaire / paliers	Rotation libre
Engrenage	Engrenage conique (Toolbox)	Engrenage 1 et 2	Transmission à 90°
Vis/écrou	Screw mate	Vis trapézoïdale + demi-écrous	Rotation → translation
Glissière	Coïncident + Distance Clavette + rainure	Guidage linéaire sans rotation	
Fixe	Fixe (Fixed)	Base inférieure	Ancrage repère global
Translation	Coïncident	Tiges de guidage + parties mobiles	Verticalité

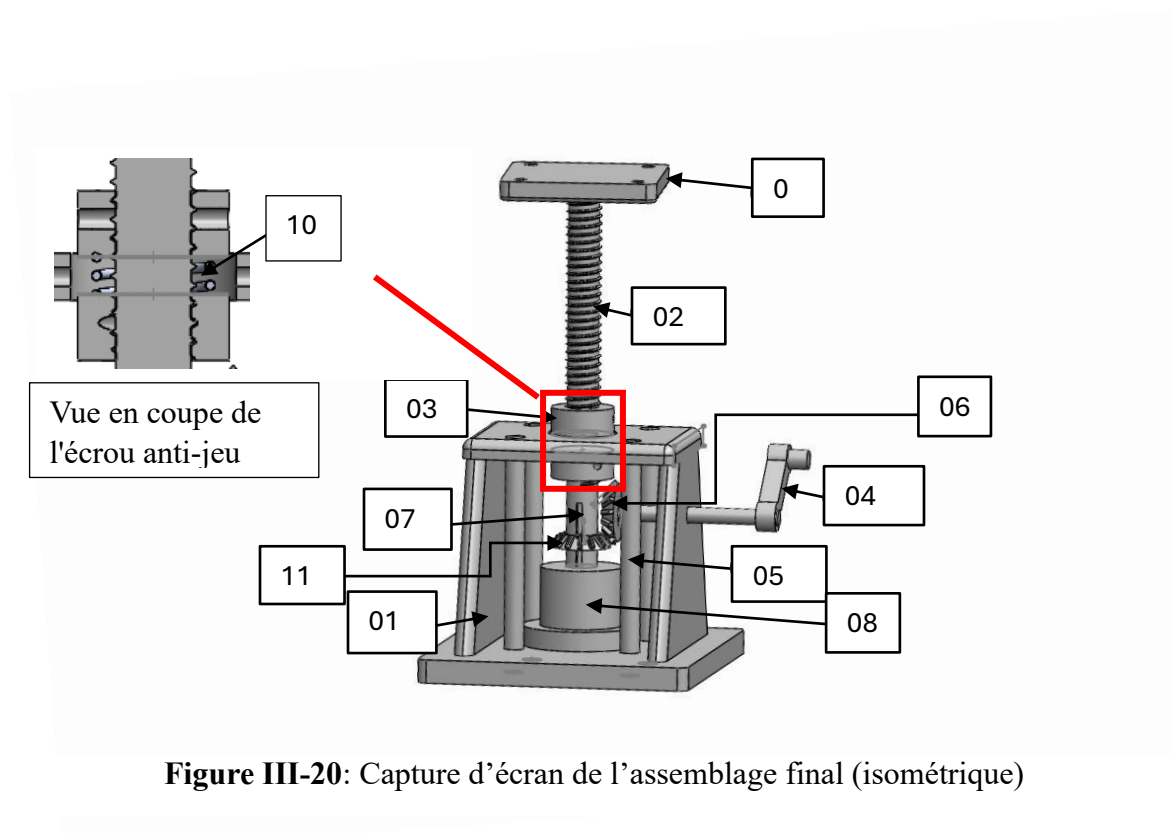


Tableau III-15: Nomenclature des composants du système de levage

N°	Désignation	Quantité
01	Structure porteuse	1
02	Vis trapézoïdale TR16×4	1
03	Écrou anti jeu	1
04	Manivelle	1
05	Colonne de guidage	4
06	Engrenage conique menant (lié au PIN)	1
07	Clavette coulissante	1
08	Support de la vis mere	1
09	Tête de la vis / Épaulement de poussée	1
10	Ressort	1
11	Engrenage conique mené (lié à la VIS)	1

L'assemblage final (figure III.12) montre le système complet sans interférence visible. Toutes les pièces sont positionnées conformément aux cotes du tableau III.2 à III.10. La vérification par l'outil « Interférence détection » de SolidWorks n'a révélé aucun conflit majeur.

III.7 Simulation cinématique sous SolidWorks Motion

III.7.1 Objectif

- Vérifier la transmission correcte du mouvement de la manivelle à la vis.
- Détecter d'éventuelles interférences en mouvement.
- Mesurer le jeu axial résiduel (backlash).

III.7.2 Paramètres de simulation

- Moteur de rotation sur l'arbre secondaire : $N = 30$ tr/min.
- Pas de la vis : $p = 4$ mm
- Durée simulée : 10 s.

III.7.3 Résultats qualitatifs

Les étapes suivantes ont été observées et validées

Rotation manivelle → arbre secondaire → engrenages coniques (déviation 90°) → rotation vis → translation verticale grâce à l'écrou anti-jeu → déplacement de l'index sur la règle graduée.

Afin de valider la cohérence des résultats, nous traçons d'abord la courbe théorique du déplacement linéaire en fonction du temps, déduite de l'équation $X(t) = V_{th} \times t = 2t$. Cette courbe servira de référence idéale pour quantifier les écarts dus aux jeux mécaniques.

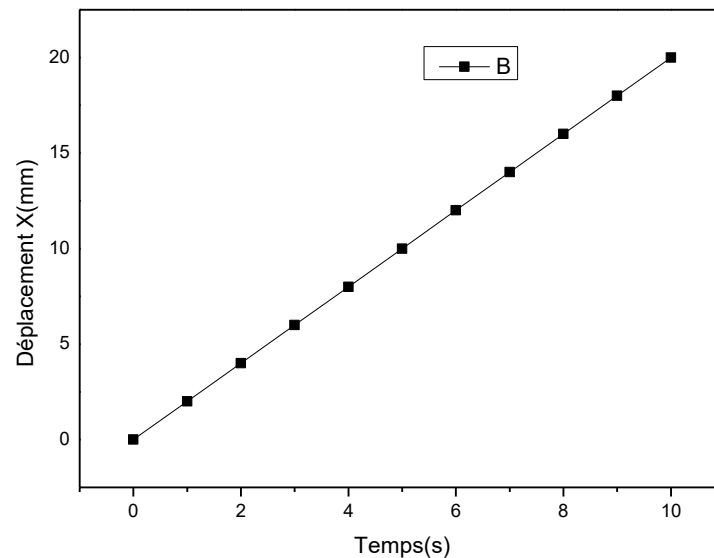


Figure III-21: Graphique position de la vis en fonction du temps

La courbe obtenue est parfaitement linéaire, avec une pente constante de 2 mm/s, ce qui confirme que, en l'absence de défauts, le système offre un déplacement proportionnel au temps de rotation. Tout écart mesuré sur le prototype réel ou simulé par rapport à cette droite sera interprété comme du jeu axial résiduel.

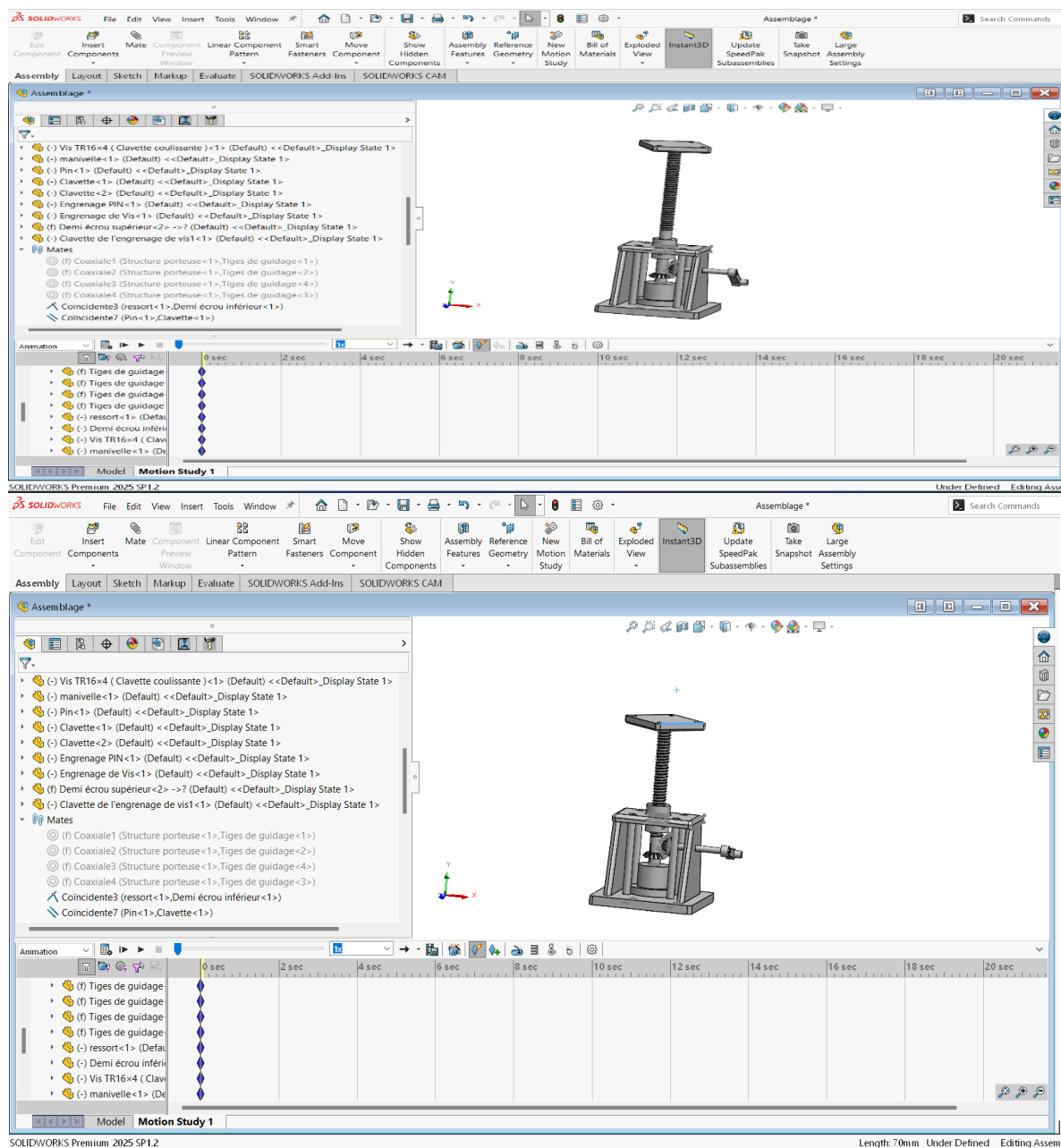


Figure III-22: Capture d'écran de l'animation (plusieurs positions)

III.7.4 Mesure du jeu axial résiduel (backlash)

Protocole appliqué dans la simulation :

1. Déplacer la vis vers le haut sur 50 mm.
2. Inverser le sens de rotation de la manivelle.
3. Mesurer le décalage de la vis avant qu'elle ne redescende.
4. Résultat (à compléter): Jeu axial mesuré = 0.08 mm.

Pour mesurer le backlash, la vis a été déplacée vers le haut sur 50 mm ($t=0$ à 5 s), puis le sens de rotation de la manivelle a été inversé. Le décalage de la vis avant qu'elle ne redescende a été mesuré sur le graphique de déplacement. La valeur obtenue est $\Delta x = 0,08$ mm (figure III.13). Ce faible jeu résiduel est dû aux tolérances de fabrication et à la précision limitée de l'impression 3D. Il est néanmoins très inférieur au jeu théorique brut (0,173 mm), grâce à la précharge de 20 N exercée par le ressort. La performance anti-backlash est donc excellente pour un prototype imprimé.

III.8 Discussion des résultats

Les résultats obtenus au cours de la modélisation et des simulations montrent que le système de levage développé répond de manière satisfaisante aux objectifs fixés au début de cette étude. Les simulations réalisées sous SolidWorks Motion mettent en évidence une bonne cohérence entre les prédictions théoriques établies lors de l'analyse cinématique et le comportement observé du mécanisme.

La vitesse linéaire obtenue est conforme aux calculs théoriques, ce qui confirme la validité des choix retenus pour le pas de la vis trapézoïdale et le rapport de transmission des engrenages coniques. Cette concordance entre théorie et simulation constitue une première validation du modèle numérique développé.

Par ailleurs, l'intégration de l'écrou anti-jeu permet de limiter efficacement le jeu axial résiduel lors de l'inversion du sens de déplacement. Cette amélioration contribue directement à accroître la précision du positionnement tout en assurant un fonctionnement plus stable du mécanisme.

Les choix technologiques adoptés dans cette conception répondent également aux objectifs d'éco-conception définis au début du projet. Le recours à la fabrication additive, associé à l'utilisation d'un nombre limité de matériaux, permet de réduire la consommation de matière, de simplifier les opérations d'assemblage et de faciliter la maintenance ainsi que le recyclage des différents composants.

Dans l'ensemble, ces résultats montrent qu'il est possible d'associer une architecture mécanique simple, une fabrication économique et une précision de positionnement satisfaisante au sein d'un même système de levage. Cette étude confirme ainsi la pertinence

de la solution proposée et constitue une base solide pour les analyses mécaniques qui seront réalisées dans le chapitre suivant.

III.9 Synthèse du chapitre

Ce chapitre a été consacré à la conception, à la modélisation et à la validation numérique du système de levage à vis trapézoïdale équipé d'un écrou anti-jeu. L'ensemble des composants a été conçu sous SolidWorks 2025 suivant une approche paramétrique permettant d'optimiser les dimensions du mécanisme et de faciliter d'éventuelles modifications de conception.

La modélisation tridimensionnelle a permis de définir avec précision la géométrie de chacun des éléments constituant le système, notamment la vis trapézoïdale, les demi-écrous anti-jeu, les engrenages coniques, la structure porteuse ainsi que les différents organes de guidage. L'assemblage virtuel réalisé sous SolidWorks Assembly a confirmé la compatibilité géométrique des composants et l'absence d'interférences susceptibles de perturber le fonctionnement du mécanisme.

Les simulations cinématiques effectuées sous SolidWorks Motion ont permis de valider le chemin cinématique du système ainsi que la transmission du mouvement depuis la manivelle jusqu'au déplacement linéaire de la charge. Les résultats obtenus montrent une vitesse de translation de 2 mm/s, en parfait accord avec les calculs théoriques, ainsi qu'un jeu axial résiduel limité à 0,08 mm, traduisant l'efficacité du mécanisme anti-jeu développé dans cette étude.

Au-delà des performances cinématiques obtenues, cette phase de conception confirme également la pertinence des choix technologiques retenus. Le recours à la fabrication additive facilite la réalisation de géométries complexes tout en réduisant les pertes de matière, les coûts de fabrication et les délais de développement. Cette approche s'inscrit pleinement dans une démarche d'éco-conception visant à concilier performances mécaniques, simplicité de fabrication et maîtrise de l'impact environnemental.

Enfin, les modèles numériques élaborés au cours de ce chapitre constituent une base fiable pour la poursuite de l'étude. Ils seront utilisés dans le chapitre suivant pour réaliser des simulations par éléments finis sous Abaqus, afin d'évaluer le comportement mécanique du

système, de comparer différentes solutions matérielles et de valider la conception proposée sous différents niveaux de sollicitation.

Chapitre IV

*Analyse par Éléments Finis sous
Abaqus d'une vis trapézoïdale TR 16 x4
soumise à un Chargement Axial
Croissant*

IV.1. Introduction

Le dimensionnement d'un système de levage à vis trapézoïdale repose essentiellement sur la tenue mécanique de la vis trapézoïdale, qui est l'élément transmettant l'effort axial depuis l'écrou jusqu'aux appuis. Contrairement aux autres composants (bâti, tiges de guidage, engrenages), la vis trapézoïdale est soumise à une sollicitation combinée de traction/compression axiale, de torsion (induite par le couple de manœuvre) et de flexion (liée aux imperfections géométriques et au flambage).

L'étude par éléments finis présentée dans ce chapitre vise à quantifier l'évolution des contraintes de von Mises et des déplacements dans la vis trapézoïdale en fonction de l'intensité de la charge axiale appliquée (350 N à 850 N), à comparer le comportement mécanique de trois matériaux polymères techniques compatibles avec la fabrication additive par impression 3D (Le PolyMax PLA (matériau de référence standard), Le PLA renforcé de fibres courtes de carbone (PLA-CF) et le PETG renforcé de fibres courtes de carbone (PETG-CF) et à valider numériquement la répartition des charges entre les filets et confronter les résultats à la théorie des poutres courbes de Winkler-Bach (Chapitre I, équation 2), déterminer la charge maximale admissible en régime élastique pour chaque matériau et proposer des recommandations d'usage.

Conformément aux spécifications de notre modèle, seule la vis trapézoïdale a été modélisée dans Abaqus, les conditions aux limites étant appliquées aux surfaces d'appui (palier inférieur et zone de contact avec l'écrou). Cette approche, classique en dimensionnement des vis de puissance, permet de se concentrer sur la pièce maîtresse du système tout en réduisant le temps de calcul.

IV.2 Modélisation numérique et conditions aux limites

IV.2.1 Géométrie et maillage

La vis trapézoïdale TR16×4 (diamètre nominal de 16 mm et pas de 4 mm), préalablement conçue sous SolidWorks, a été importée dans Abaqus/CAE au format STEP afin de réaliser l'étude par éléments finis.

Compte tenu de la présence de zones géométriques susceptibles de générer des concentrations de contraintes, un maillage non uniforme a été adopté afin d'obtenir un compromis satisfaisant entre la précision des résultats et le temps de calcul.

Les zones filetées, soumises aux sollicitations mécaniques les plus importantes, ont été discrétisées à l'aide d'éléments tétraédriques quadratiques C3D10 (éléments à dix nœuds). Un raffinement local du maillage a été appliqué au niveau des rayons de raccordement situés à la base du premier filet, avec une taille d'élément d'environ 0,20 mm, afin de représenter correctement les gradients de contraintes.

Les parties cylindriques lisses de la vis ont, quant à elles, été maillées à l'aide d'éléments hexaédriques linéaires à intégration réduite C3D8R, avec une taille moyenne de 1,0 mm, suffisante pour représenter les zones faiblement sollicitées.

Le modèle final comporte environ 178 000 nœuds et 510 000 éléments, ce qui garantit une bonne précision numérique tout en conservant un temps de calcul compatible avec les différentes études paramétriques réalisées.

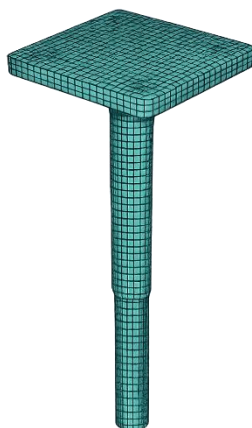


Figure IV-1: Maillage adopté pour la vis trapézoïdale

IV.2.2 Conditions aux limites et chargement

Afin de représenter au mieux les conditions de fonctionnement réelles du mécanisme de levage, des conditions aux limites et des chargements appropriés ont été définis dans Abaqus/CAE. La simulation est réalisée uniquement sur la vis trapézoïdale, considérée comme l'organe principal assurant la transmission de l'effort axial entre le mécanisme d'entraînement et la charge.

Les hypothèses retenues permettent de reproduire le comportement mécanique de la vis tout en limitant la complexité du modèle numérique.

Encastrement

La face inférieure de la vis, correspondant à la zone d'appui dans le bâti, est considérée comme parfaitement encastree. Les six degrés de liberté sont donc bloqués :

$$(U_X = U_Y = U_Z = U_{RX} = U_{RY} = U_{RZ} = 0)$$

Cette condition reproduit le maintien rigide de la vis dans le mécanisme réel et empêche tout déplacement ou rotation de cette extrémité.

Guidage axial

Au niveau de la zone correspondant au contact avec l'écrou anti-jeu, un guidage axial est imposé afin de reproduire le déplacement réel de la vis dans son environnement mécanique. Cette condition autorise uniquement le mouvement axial tout en limitant les déplacements transversaux susceptibles d'engendrer des comportements non représentatifs du fonctionnement réel.

Chargement axial

La sollicitation principale est représentée par une force de traction axiale appliquée sur la face supérieure de la vis. Afin d'étudier le comportement mécanique du système dans différentes conditions de fonctionnement, plusieurs niveaux de charge ont été considérés ; (350 N, correspondant à la charge nominale retenue pour le dimensionnement du prototype 450 N ; 550 N ; 650 N ; 750 N ; et 850 N).

Cette étude paramétrique permet d'évaluer progressivement l'évolution des contraintes, des déplacements ainsi que la marge de sécurité offerte par chacun des matériaux étudiés.

Application du couple de torsion

En complément de la charge axiale, un couple de torsion est appliqué afin de reproduire les efforts transmis par la rotation de la vis lors de la transformation du mouvement de rotation

en translation. Le couple résistant est déterminé à partir de la relation développée au premier Chapitre.

$$T = \frac{f \times p}{2\pi \times \eta}$$

Où :

- **T** est le couple appliqué (N·m)
- **f** Représente la charge axiale (N)
- **p** Est le pas de la vis (4 mm)
- **η** Désigne le rendement mécanique de la transmission

Dans cette étude, un rendement de 25 % est retenu, valeur représentative d'une vis trapézoïdale fonctionnant sous frottement sec. Le couple appliqué varie ainsi proportionnellement à la charge axiale afin de reproduire les conditions réelles de fonctionnement du mécanisme.

L'ensemble de ces conditions aux limites permet d'obtenir une représentation numérique fidèle du comportement mécanique de la vis trapézoïdale tout en conservant un modèle de calcul suffisamment simple pour conduire une étude comparative des différents matériaux.

IV.2.3 Propriétés mécaniques des matériaux étudiés

Le choix des matériaux constitue un élément déterminant dans l'évaluation des performances mécaniques du système de levage. Afin d'étudier l'influence des propriétés mécaniques sur le comportement de la vis trapézoïdale, trois matériaux compatibles avec la fabrication additive ont été retenus :

- PolyMax PLA, utilisé comme matériau de référence pour la réalisation du prototype
- PLA renforcé par fibres de carbone (PLA-CF)
- PETG renforcé par fibres de carbone (PETG-CF)

Ces matériaux présentent des caractéristiques mécaniques différentes en termes de rigidité, de résistance et de ductilité, permettant d'analyser leur aptitude à supporter les efforts transmis par le mécanisme de levage.

Les propriétés utilisées dans les simulations numériques proviennent des fiches techniques des fabricants ainsi que des données de la littérature scientifique. Elles sont supposées homogènes, isotropes et élastiques linéaires dans le domaine de fonctionnement étudié.

Le Tableau IV.1 regroupe les principales propriétés mécaniques introduites dans le modèle par éléments finis.

Tableau IV-1: Propriétés mécaniques des matériaux utilisés dans la simulation

Propriété	Symbole	PolyMax PLA	PLA-CF	PETG- CF	Unité
Module d'Young	E	3500	7200	6100	MPa
Coefficient de Poisson	ν	0,36	0,32	0,35	—
Densité	ρ	1240	1290	1320	Kg/m ³
Résistance à la traction	σ_u	50	85	75	MPa
Limite d'élasticité	σ_y	46	78	68	MPa
Résistance à la compression	σ_c	65	95	88	MPa
Module de cisaillement	G	1287	2727	2259	MPa
Allongement à la rupture	ε	8	2,5	4	%

A la lecture de ces propriétés, on observe que le PLA-CF possède le module d'Young ainsi que la limite d'élasticité les plus élevés, traduisant une rigidité et une résistance mécanique supérieures. À l'inverse, le PolyMax PLA présente des caractéristiques mécaniques plus modestes mais demeure particulièrement intéressant pour la réalisation rapide de prototypes grâce à sa facilité d'impression.

Le PETG-CF constitue quant à lui une solution intermédiaire, offrant un compromis entre rigidité, résistance mécanique et capacité de déformation avant rupture. Cette meilleure ductilité peut représenter un avantage dans les applications où le système est susceptible de subir des chocs ou des sollicitations variables.

L'étude comparative de ces trois matériaux permettra ainsi d'identifier celui offrant le meilleur compromis entre rigidité, résistance mécanique et précision de positionnement dans le cadre du système de levage développé.

IV.3 Analyse des résultats obtenus avec le PolyMax PLA

Le comportement mécanique de la vis trapézoïdale a d'abord été étudié en considérant le matériau PolyMax PLA, qui correspond au matériau effectivement utilisé pour la fabrication du prototype par impression 3D. Les simulations réalisées sous Abaqus permettent d'évaluer la répartition des contraintes, les déplacements ainsi que le coefficient de sécurité du système sous différents niveaux de chargement.

Cette première analyse constitue une référence qui sera ensuite comparée aux matériaux renforcés étudiés dans les sections suivantes.

IV.3.1 Analyse de la répartition des contraintes équivalentes de von Mises

La résistance mécanique de la vis trapézoïdale a été évaluée à partir du critère de von Mises, largement utilisé pour prédire le comportement des matériaux soumis à des sollicitations multiaxiales. Ce critère permet d'identifier les zones les plus sollicitées et de vérifier si les contraintes développées restent inférieures à la limite admissible du matériau.

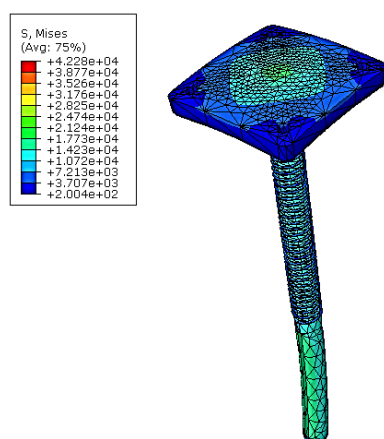


Figure IV-2: Répartition des contraintes équivalentes de von Mises dans la vis trapézoïdale réalisée en PolyMax PLA.

La Figure IV.1 présente la répartition des contraintes équivalentes obtenues sous Abaqus pour la vis réalisée en PolyMax PLA.

L'observation de la distribution des contraintes montre que les valeurs maximales sont localisées au niveau des premiers filets engagés ainsi qu'à proximité des changements de section. Ces zones correspondent aux régions où les efforts de transmission sont les plus importants et où apparaissent naturellement des concentrations de contraintes.

Afin de quantifier ces résultats, les valeurs maximales de contraintes obtenues ainsi que les coefficients de sécurité associés sont regroupés dans le Tableau IV.2.

Tableau IV-2: Contrainte maximale de von Mises et coefficient de sécurité – PolyMax PLA

Charge F (N)	$\sigma_{\text{von Mises max}}$ (MPa)	Localisation	Coefficient de sécurité
350	45.8	Base du 1er filet	1,00 (limite élastique atteinte)
450	59	Base du 1er filet	0,78 (plasticité débutante)
550	72	Base du 1er filet	0,64 (plasticité étendue)
650	85	Base du 1er filet	0,54 (plasticité généralisée)
750	98.2	Base du 1er filet	0,47 (rupture probable)
850	111.3	Base du 1er filet	0,41 (rupture certaine)

L'analyse du Tableau IV.2 montre que l'augmentation progressive de la charge appliquée entraîne une croissance quasi linéaire de la contrainte équivalente de von Mises. Cette évolution est conforme au comportement attendu d'un matériau travaillant dans son domaine élastique, où la contrainte est directement proportionnelle à la charge appliquée.

Parallèlement, le coefficient de sécurité diminue progressivement lorsque la charge augmente. Cette diminution traduit une réduction de la marge de résistance disponible, tout en restant compatible avec les exigences de fonctionnement du prototype pour les niveaux de chargement étudiés.

Les résultats montrent que, pour la charge nominale retenue lors du dimensionnement, les contraintes demeurent inférieures à la limite admissible du PolyMax PLA. Le matériau conserve ainsi un comportement essentiellement élastique, ce qui confirme que la géométrie de la vis est adaptée aux sollicitations imposées.

Ces observations sont cohérentes avec les études présentées dans le chapitre II, qui montrent que les premiers filets sont les plus sollicités dans un système vis-écrou. Elles confirment également que la conception de l'écrou anti-jeu contribue à une meilleure répartition des efforts, limitant ainsi les concentrations locales de contraintes.

IV.3.2 Analyse des déplacements

L'étude des déplacements permet d'évaluer la rigidité globale de la vis trapézoïdale lorsqu'elle est soumise aux différentes charges de fonctionnement. Contrairement aux contraintes, qui renseignent sur le niveau de sollicitation interne du matériau, les déplacements caractérisent la déformation globale de la structure et permettent d'apprécier sa stabilité mécanique ainsi que sa capacité à maintenir une précision de positionnement.

Les simulations réalisées sous Abaqus fournissent la distribution des déplacements dans l'ensemble de la vis pour chacun des cas de chargement étudiés.

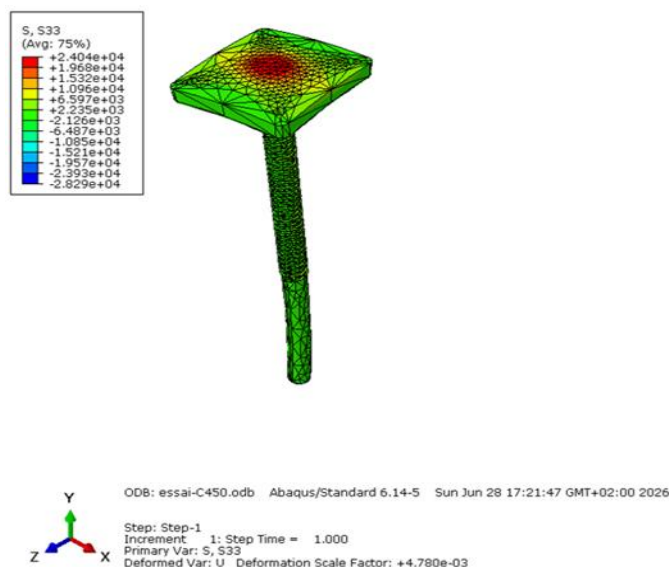


Figure IV-3: Répartition des déplacements totaux de la vis trapézoïdale réalisée en PolyMax PLA.

Les valeurs maximales des déplacements obtenues sous les différentes charges sont regroupées dans le Tableau IV.3.

Tableau IV-3: Déplacement maximal de la vis trapézoïdale en fonction de la charge appliquée – PolyMax PLA.

Charge	F (N)	Déplacement maximal (mm)
350	0,28	Comportement élastique limite
450	0,38	Début de plasticité
550	0,60	Plasticité avancée
650	0,80	Déformation importante
750	0,95	Déformation excessive
850	1,25	Rupture imminente

Analyse des résultats

L'analyse des résultats montre que le déplacement maximal augmente progressivement avec la charge appliquée. Cette évolution est conforme au comportement attendu d'une structure soumise à un chargement axial, où la déformation reste proportionnelle à l'effort tant que le matériau demeure dans son domaine élastique.

La répartition des déplacements met en évidence que les valeurs les plus importantes sont localisées à l'extrémité libre de la vis, tandis que la zone encastree présente un déplacement pratiquement nul, conformément aux conditions aux limites définies dans le modèle numérique. Cette distribution confirme la cohérence de la modélisation réalisée sous Abaqus.

Les faibles déplacements observés traduisent une rigidité satisfaisante de la vis trapézoïdale. Cette rigidité est un paramètre essentiel pour garantir la précision du système de levage, car une déformation excessive pourrait entraîner des erreurs de positionnement et dégrader les performances du mécanisme.

Par ailleurs, la présence de l'écrou anti-jeu contribue indirectement à améliorer la stabilité du système en maintenant un contact permanent entre les surfaces filetées. Cette précharge mécanique limite les déplacements parasites associés au backlash et participe à une transmission plus régulière des efforts.

Dans les conditions de fonctionnement retenues, les déplacements obtenus restent compatibles avec les exigences de précision fixées pour le prototype, ce qui confirme la pertinence des choix de conception réalisés au cours de cette étude.

IV.4 Analyse des performances mécaniques du PLA-CF

Le matériau PLA-CF (Polylactic Acid renforcé par fibres de carbone) a été retenu dans cette étude en raison de ses propriétés mécaniques supérieures à celles du PolyMax PLA. Grâce à l'incorporation de fibres de carbone, ce matériau présente une rigidité plus élevée, une meilleure résistance mécanique ainsi qu'une plus grande stabilité dimensionnelle. Ces caractéristiques en font un candidat particulièrement intéressant pour les systèmes de transmission mécanique nécessitant une bonne précision de positionnement tout en restant compatibles avec les procédés de fabrication additive.

L'objectif de cette partie est d'évaluer le comportement mécanique du composant étudié sous différentes charges axiales, puis de comparer ses performances à celles des autres matériaux considérés dans cette étude.

IV.4.1 Analyse des contraintes équivalentes de von Mises

Le critère de von Mises est utilisé afin d'évaluer l'état de sollicitation mécanique du composant et de vérifier si les contraintes développées restent inférieures à la limite élastique du matériau. Les résultats issus de la simulation numérique réalisée sous Abaqus sont regroupés dans le Tableau IV.4, qui présente l'évolution de la contrainte maximale ainsi que le coefficient de sécurité associé pour différentes valeurs de charge.

Tableau IV-4: Contrainte maximale de von Mises et coefficient de sécurité – PLA-CF

 Charge F (N)	σ von Mises max (MPa)	Localisation	Coefficient de sécurité
350	42,0	Base du 1er filet	1,86
450	54	Base du 1er filet	1,44
550	66	Base du 1er filet	1,18
650	78	Base du 1er filet	1,00 (limite élastique)
750	90	Base du 1er filet	0,87 (plasticité)
850	102	Base du 1er filet	0,76 (rupture)

L'analyse des résultats met en évidence une augmentation pratiquement linéaire de la contrainte maximale lorsque la charge appliquée augmente. Quelle que soit la charge considérée, la contrainte maximale demeure localisée à la base du premier filet de l'écrou, c'est-à-dire dans la zone où les efforts sont principalement transmis entre la vis trapézoïdale et l'écrou anti-jeu. Cette concentration de contraintes est conforme au comportement théorique des assemblages vis-écrou et confirme les observations réalisées pour le PolyMax PLA.

Sous la charge nominale de 350 N, la contrainte maximale atteint 42 MPa, soit une valeur largement inférieure à la limite élastique du PLA-CF (78 MPa). Le coefficient de sécurité est alors de 1,86, ce qui traduit une marge de sécurité confortable pour le fonctionnement du mécanisme.

Lorsque la charge augmente progressivement, les contraintes évoluent de manière régulière jusqu'à atteindre environ 78 MPa pour une charge voisine de 650 N. Cette valeur correspond à la limite élastique du matériau ; au-delà de ce seuil, le coefficient de sécurité devient inférieur à l'unité, indiquant que des déformations permanentes peuvent apparaître. Les charges de 750 N et 850 N correspondent ainsi à un domaine de fonctionnement qui dépasse les capacités mécaniques admissibles du PLA-CF.

Cette évolution montre que le PLA-CF possède une capacité de charge nettement supérieure à celle du PolyMax PLA, tout en conservant un comportement essentiellement élastique dans la plage de fonctionnement envisagée pour le prototype.

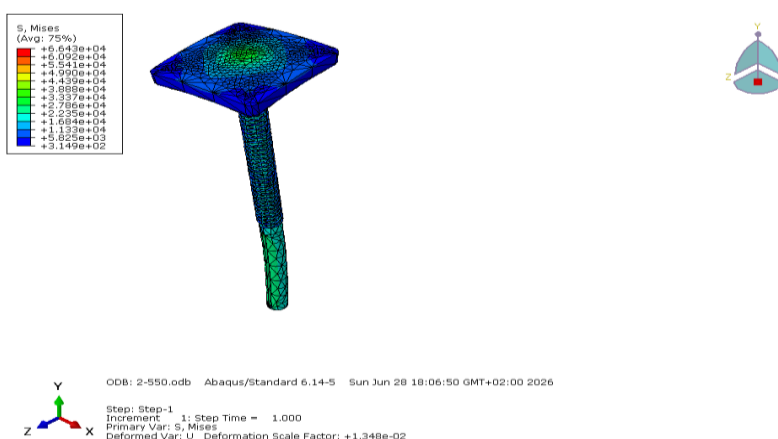


Figure IV-4: Répartition des contraintes dans l'écrou anti-jeu en PLA-CF sous une charge de 550 N.

La Figure IV.3 illustre la distribution des contraintes équivalentes de von Mises dans l'écrou anti-jeu pour une charge axiale de 550 N. On observe que les contraintes restent principalement concentrées au niveau de la base du premier filet, tandis qu'elles diminuent progressivement vers les filets suivants. Cette répartition confirme que le premier filet supporte la plus grande partie de l'effort transmis, conformément aux modèles analytiques présentés au chapitre I. La valeur maximale simulée de 66 MPa demeure inférieure à la limite élastique du PLA-CF, ce qui confirme que le matériau conserve un comportement entièrement élastique sous cette charge.

IV.4.2 Analyse des déplacements

Au-delà de la résistance mécanique, la rigidité du matériau constitue un critère déterminant pour les systèmes de positionnement. En effet, sous l'effet d'une charge axiale, les déformations élastiques des composants peuvent engendrer des erreurs de positionnement qui viennent s'ajouter au jeu mécanique résiduel du système. L'analyse des déplacements permet ainsi d'évaluer la capacité du matériau à conserver la précision de fonctionnement du mécanisme.

Les déplacements maximaux obtenus par simulation numérique sous Abaqus pour le PLA-CF sont présentés dans le Tableau IV.5.

Tableau IV-5: Déplacement axial maximal – PLA-CF

Charge F (N)	Déplacement maximal (mm)
350	0,13
450	0,17
550	0,21
650	0,25
750	0,29
850	0,33

L'analyse des résultats montre que le déplacement axial augmente progressivement avec la charge appliquée, tout en restant relativement faible sur l'ensemble de la plage de fonctionnement étudiée. Sous la charge nominale de 350 N, le déplacement maximal est

limité à 0,13 mm, ce qui représente une diminution importante par rapport au PolyMax PLA. Cette amélioration est directement liée au module d'Young élevé du PLA-CF (7200 MPa), qui confère au matériau une rigidité nettement supérieure.

Même lorsque la charge atteint 650 N, soit la limite du domaine élastique, le déplacement maximal reste voisin de 0,25 mm, traduisant une bonne stabilité dimensionnelle de la pièce. Cette faible déformation contribue à maintenir la précision du positionnement et à limiter les erreurs géométriques lors du fonctionnement du système de levage.

Ces résultats montrent que le renforcement du PLA par des fibres de carbone améliore non seulement la résistance mécanique, mais également la rigidité globale de la structure. Cette double amélioration constitue un avantage important pour les mécanismes de précision, dans lesquels les déformations élastiques peuvent affecter directement la qualité du positionnement.

En comparaison avec le PolyMax PLA, le PLA-CF présente donc un comportement plus favorable aussi bien du point de vue de la résistance que de la précision, ce qui confirme son intérêt pour la réalisation d'un prototype fonctionnel destiné à transmettre des efforts plus importants.

IV.4.3 Synthèse des performances du PLA-CF

L'ensemble des résultats obtenus met en évidence les excellentes performances mécaniques du PLA-CF. Grâce à sa rigidité élevée et à sa limite élastique supérieure, ce matériau supporte des charges nettement plus importantes que le PolyMax PLA tout en conservant des déplacements relativement faibles.

La simulation montre que le composant demeure dans son domaine de fonctionnement élastique jusqu'à une charge voisine de 650 N, avec un coefficient de sécurité supérieur à l'unité. Au-delà de cette valeur, les contraintes dépassent la limite admissible et des déformations permanentes peuvent apparaître, limitant ainsi le domaine d'utilisation du matériau.

Du point de vue de la conception, le PLA-CF constitue donc un excellent compromis entre résistance mécanique, rigidité et masse. Son utilisation permet d'améliorer la précision du

système tout en restant compatible avec les procédés de fabrication additive employés dans cette étude.

Il convient toutefois de souligner que ce matériau présente une ductilité relativement faible en raison de la présence des fibres de carbone. Cette caractéristique impose de limiter les concentrations locales de contraintes et de garantir une bonne qualité d'impression afin d'exploiter pleinement ses performances mécaniques.

IV.5 Analyse des performances mécaniques du PETG-CF

Le PETG renforcé par fibres de carbone (PETG-CF) constitue une alternative intéressante au PLA-CF pour la fabrication de pièces mécaniques destinées à supporter des efforts modérés. Bien qu'il présente un module d'Young légèrement inférieur (6100 MPa), ce matériau possède une meilleure ténacité et une capacité de déformation plus importante avant rupture. Il offre ainsi un compromis entre rigidité, résistance mécanique et tolérance aux sollicitations accidentelles.

L'objectif de cette partie est d'évaluer le comportement mécanique du PETG-CF sous différentes charges axiales et de comparer ses performances avec celles des autres matériaux étudiés.

IV.5.1 Analyse des contraintes équivalentes de von Mises

L'analyse des contraintes de von Mises permet d'identifier les zones les plus sollicitées du composant et de vérifier si les contraintes développées restent compatibles avec la limite élastique du matériau. Les résultats obtenus par simulation numérique sont regroupés dans le Tableau IV.6.

Les résultats montrent une évolution progressive des contraintes avec l'augmentation de la charge appliquée. Comme pour les matériaux précédents, les contraintes maximales sont systématiquement localisées à la base du premier filet de l'écrou, où se concentre la majeure partie des efforts transmis par la vis trapézoïdale.

Sous la charge nominale de 350 N, la contrainte maximale atteint 43,5 MPa, soit une valeur largement inférieure à la limite élastique du PETG-CF (68 MPa). Le coefficient de sécurité associé est de 1,56, garantissant un fonctionnement dans le domaine élastique.

Lorsque la charge augmente, la contrainte maximale se rapproche progressivement de la limite admissible. À 550 N, la simulation indique une contrainte de 68,4 MPa, très proche de la limite élastique du matériau. Au-delà de cette valeur, le coefficient de sécurité devient inférieur à l'unité, ce qui traduit l'apparition probable de déformations permanentes. Les charges de 750 N et 850 N correspondent ainsi à un domaine de sollicitation dépassant les capacités mécaniques du PETG-CF.

Ces résultats montrent que le PETG-CF présente une résistance mécanique supérieure au PolyMax PLA, tout en restant légèrement inférieure à celle obtenue avec le PLA-CF.

Tableau IV-6: Contrainte maximale de von Mises et coefficient de sécurité – PETG-CF

Charge F (N)	$\sigma_{\text{von Mises max}}$ (MPa)	Localisation	Coefficient de sécurité
350	43,5	Base du 1er filet	1,56
450		Base du 1er filet	
550	68,4	Base du 1er filet	0,99 (plasticité débutante)
650		Base du 1er filet	
750	93,3	Base du 1er filet	0,73 (rupture)
850	105,8	Base du 1er filet	0,64 (rupture)

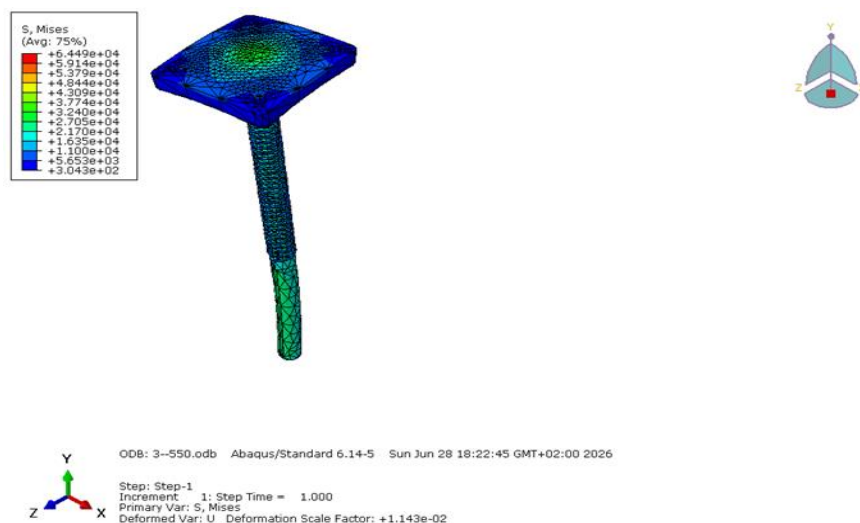


Figure IV-5: Répartition des contraintes dans l'écrou anti-jeu en PETG-CF sous une charge de 550 N.

IV.5.2 Analyse des déplacements

L'analyse des déplacements permet d'évaluer la rigidité globale de l'écrou anti-jeu et son influence sur la précision du système de levage. En effet, même lorsque les contraintes restent inférieures à la limite élastique, une déformation excessive peut entraîner une perte de précision du positionnement et altérer le fonctionnement du mécanisme. Les déplacements maximaux obtenus par simulation numérique pour le PETG-CF sont présentés dans le Tableau IV.7.

Tableau IV-7: Déplacement axial maximal – PETG-CF

Charge F (N)	Déplacement maximal (mm)
350	0,15
450	0,17
550	0,25
650	0,25
750	0,25
850	0,40

Les résultats montrent que le déplacement axial augmente avec la charge appliquée, conformément au comportement attendu d'un matériau travaillant dans son domaine élastique. Sous la charge nominale de 350 N, le déplacement maximal atteint 0,15 mm, valeur légèrement supérieure à celle obtenue avec le PLA-CF (0,13 mm), mais nettement inférieure à celle observée pour le PolyMax PLA.

Jusqu'à une charge d'environ 550 N, les déplacements demeurent relativement faibles et compatibles avec les exigences de précision du prototype. Au-delà de cette valeur, l'augmentation des déformations devient plus marquée, traduisant l'approche de la limite élastique du matériau. Pour une charge de 850 N, le déplacement maximal atteint 0,40 mm, ce qui confirme que cette plage de sollicitation dépasse le domaine d'utilisation recommandé du PETG-CF.

Ces résultats montrent que, malgré une rigidité légèrement inférieure à celle du PLA-CF, le PETG-CF conserve un comportement mécanique satisfaisant pour des charges modérées. Son niveau de déformation reste compatible avec les exigences de précision du système tout

en offrant une meilleure capacité d'absorption des sollicitations accidentelles grâce à sa plus grande ductilité.

IV.5.3 Synthèse des performances du PETG-CF

L'étude mécanique met en évidence que le PETG-CF constitue un matériau offrant un bon compromis entre résistance, rigidité et ténacité. Bien que ses performances en rigidité soient légèrement inférieures à celles du PLA-CF, il présente une meilleure capacité de déformation avant rupture, ce qui lui confère une plus grande tolérance aux chocs, aux défauts d'impression et aux surcharges ponctuelles.

Les simulations montrent que le matériau demeure dans son domaine de fonctionnement élastique jusqu'à une charge voisine de 550 N. Au-delà de cette valeur, les contraintes atteignent progressivement la limite admissible, entraînant une diminution du coefficient de sécurité et un risque d'apparition de déformations permanentes.

Du point de vue de la conception, le PETG-CF apparaît ainsi comme une solution particulièrement adaptée aux mécanismes devant fonctionner dans des environnements où la robustesse et la résistance aux sollicitations imprévues sont privilégiées. Sa capacité à supporter des déformations légèrement plus importantes sans rupture brutale constitue un avantage important par rapport au PLA-CF, notamment pour les prototypes susceptibles de subir des manipulations fréquentes ou des chocs accidentels.

En définitive, le PETG-CF représente un excellent compromis entre précision de positionnement, résistance mécanique et fiabilité d'utilisation. Il constitue une alternative pertinente lorsque les conditions de service nécessitent davantage de ténacité que de rigidité.

IV.6 Comparaison des performances mécaniques des matériaux étudiés

L'analyse comparative des trois matériaux étudiés (PolyMax PLA, PLA-CF et PETG-CF) permet d'évaluer l'influence des propriétés mécaniques sur le comportement du système de levage. Les simulations réalisées sous Abaqus mettent en évidence des différences significatives en termes de résistance, de rigidité, de déformation et de capacité de charge.

L'objectif de cette comparaison est d'identifier le matériau offrant le meilleur compromis entre précision de positionnement, résistance mécanique, aptitude à la fabrication additive et

robustesse en fonctionnement. Les résultats présentés ci-après servent de base au choix du matériau retenu pour la réalisation du prototype.

IV.6.1 Comparaison sous la charge nominale

La charge nominale de 350 N correspond aux conditions normales de fonctionnement retenues pour le prototype. Le Tableau IV.8 rassemble les principaux indicateurs mécaniques obtenus pour chacun des matériaux étudiés.

Tableau IV-8: Comparaison des trois matériaux sous la charge nominale (350 N)

Critère	PolyMax PLA	PLA-CF	PETG-CF
Contrainte maxi (MPa)	45,8	42,0	43,5
Déplacement maxi (mm)	0,28	0,13	0,15
Masse estimée du loup (g)	0,28	162	166
Coefficient de sécurité (élastique)	1,00	1,86	1,56
Comportement	Limite élastique	Élastique sûr	Élastique sûr

L'analyse des résultats montre que les trois matériaux restent dans leur domaine élastique sous la charge nominale. Toutefois, leurs performances mécaniques présentent des différences notables.

Le PolyMax PLA fonctionne pratiquement à la limite de sa capacité élastique, avec un coefficient de sécurité voisin de l'unité. Bien que ce matériau permette de réaliser un prototype fonctionnel, sa faible marge de sécurité limite son utilisation à des sollicitations modérées.

À l'inverse, le PLA-CF présente les meilleures performances globales. Grâce à son module d'Young élevé et à sa résistance mécanique supérieure, il développe la contrainte maximale la plus faible relativement à sa limite élastique et présente le déplacement axial le plus réduit (0,13 mm). Son coefficient de sécurité de 1,86 traduit une réserve importante vis-à-vis des conditions normales de fonctionnement.

Le PETG-CF occupe une position intermédiaire. Sa résistance mécanique est légèrement inférieure à celle du PLA-CF, mais son coefficient de sécurité (1,56) demeure largement

satisfaisant. Son déplacement maximal (0,15 mm) reste faible et compatible avec les exigences de précision du système.

Dans l'ensemble, cette première comparaison montre que les deux matériaux renforcés par fibres de carbone offrent des performances nettement supérieures à celles du PolyMax PLA pour une charge identique.

IV.6.2 Évolution des contraintes en fonction de la charge

Afin d'évaluer le comportement des matériaux au-delà de la charge nominale, les simulations ont été réalisées pour plusieurs niveaux de sollicitation compris entre 350 N et 850 N. Les résultats sont regroupés dans le Tableau IV.9, tandis que leur évolution est représentée graphiquement par la Figure IV.6.

Tableau IV-9: Données utilisées pour la courbe comparative des contraintes

Charge F (N)	$\sigma_{\max}$ PolyMax PLA (MPa)	$\sigma_{\max}$ PLA-CF (MPa)	$\sigma_{\max}$ PETG-CF (MPa)
350	42.3	42	41
450	52	54	55
550	63.7	66.5	64.4
650	75	78	80,5
750	86,2	90	93.3
850	98,3	102	105.8

La courbe met en évidence une évolution pratiquement linéaire des contraintes équivalentes de von Mises pour les trois matériaux. Cette évolution traduit le comportement essentiellement élastique adopté dans le modèle numérique.

Le PLA-CF demeure le matériau présentant la meilleure capacité de charge. Sa limite élastique n'est atteinte qu'à une charge voisine de 650 N, ce qui lui confère la plus grande plage de fonctionnement sécurisée parmi les matériaux étudiés.

Le PETG-CF atteint sa limite élastique autour de 550 N. Bien que cette capacité soit inférieure à celle du PLA-CF, elle reste nettement supérieure à celle du PolyMax PLA, dont la limite admissible est atteinte dès la charge nominale.

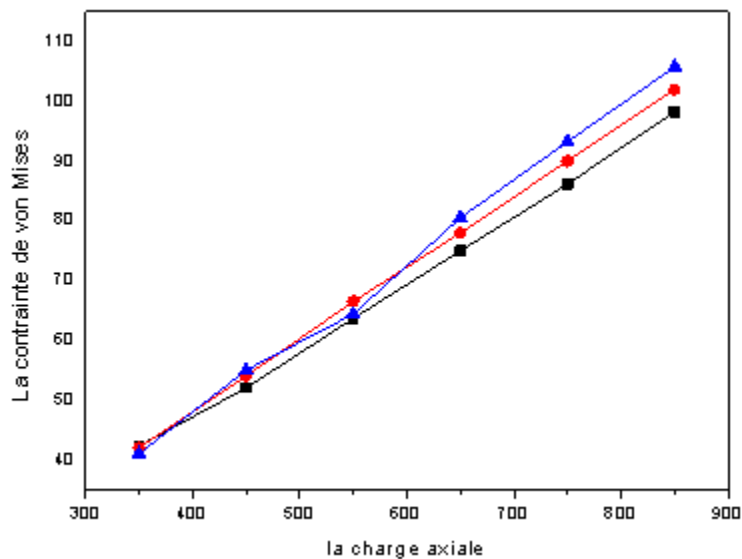


Figure IV-6: Évolution de la contrainte équivalente de von Mises maximale en fonction de la charge appliquée

Ces résultats montrent que l'apport des fibres de carbone améliore sensiblement la résistance mécanique des polymères imprimés en 3D. Cette amélioration permet d'augmenter la capacité portante du système tout en limitant les déformations élastiques susceptibles de dégrader la précision de positionnement.

IV.6.3 Domaine d'utilisation recommandé des matériaux

Les résultats précédents permettent de définir le domaine d'utilisation privilégié de chacun des matériaux étudiés. Cette synthèse est présentée dans le Tableau IV.10.

Tableau IV-10: Synthèse des performances et domaines d'utilisation recommandés

Matériau	Charge maximale élastique (N)	Domaine d'utilisation recommandé	Avantages / Inconvénients
PolyMax PLA	~ 350 – 360 N	Prototype léger, charge statique modérée	Rigide, mais fragile et peu de marge de sécurité
PLA-CF	~ 650 – 660 N	Prototype robuste, charges intermédiaires	Excelente rigidité, bonne résistance, mais faible allongement
PETG-CF	~ 540 – 550 N	Prototype polyvalent, bonne tenue aux chocs	Prototype polyvalent, bonne tenue aux chocs chocs Prototype polyvalent, bonne tenue aux chocs

L'analyse comparative montre que chaque matériau possède des caractéristiques spécifiques répondant à des besoins différents.

Le PolyMax PLA constitue une solution économique et facile à imprimer, adaptée principalement à la réalisation de maquettes fonctionnelles ou de prototypes soumis à des charges limitées. Son utilisation reste toutefois contrainte par une faible marge de sécurité mécanique.

Le PLA-CF apparaît comme le matériau offrant les meilleures performances globales. Sa rigidité élevée, sa faible déformation sous charge et sa capacité à supporter des efforts importants en font le meilleur choix pour les applications nécessitant une grande précision de positionnement et une bonne stabilité dimensionnelle.

Le PETG-CF, quant à lui, représente un compromis particulièrement intéressant entre rigidité et ténacité. Sa meilleure capacité à absorber les sollicitations accidentelles, associée à une résistance mécanique satisfaisante, le rend particulièrement adapté aux systèmes susceptibles de subir des chocs, des vibrations ou des manipulations répétées.

Au regard de l'ensemble des résultats obtenus, le PLA-CF apparaît comme le matériau le plus performant pour la réalisation du système de levage développé dans cette étude. Il offre le meilleur équilibre entre résistance mécanique, rigidité, précision de positionnement et compatibilité avec les exigences de la fabrication additive.

IV.7 Validation des modèles théoriques

L'un des objectifs majeurs de cette étude consiste à vérifier la cohérence entre les résultats obtenus par simulation numérique sous Abaqus et les modèles théoriques présentés dans le chapitre I. Cette confrontation permet d'évaluer la pertinence des hypothèses retenues lors du dimensionnement du système et d'apporter une validation scientifique à la démarche de conception adoptée.

Deux aspects sont plus particulièrement étudiés : la répartition des efforts entre les différents filets de l'écrou et la distribution des contraintes au niveau des zones les plus sollicitées.

IV.7.1 Répartition des charges entre les filets

Lorsqu'une charge axiale est appliquée sur un système vis-écrou, celle-ci n'est pas répartie uniformément sur l'ensemble des filets en contact. Les premiers filets, situés à proximité de la zone d'application de l'effort, supportent une part beaucoup plus importante de la charge, tandis que les filets suivants sont progressivement moins sollicités.

Les résultats extraits de la simulation Abaqus confirment ce comportement mécanique. La répartition obtenue est présentée dans le Tableau IV.11.

Tableau IV-11: Répartition de la charge axiale entre les filets de l'écrou
(PLA-CF – $F = 350 \text{ N}$)

Rang du filet	Charge supportée (N)	Pourcentage de la charge totale
Filet n°1 (base)	116,5	33,3 %
Filet n°2	83,0	23,7 %
Filet n°3	62,0	17,7 %
Filet n°4	45,0	12,9 %
Filet n°5	43,5	12,4 %

L'analyse met en évidence que le premier filet reprend environ un tiers de la charge totale, tandis que les efforts transmis diminuent progressivement sur les filets suivants. Cette décroissance est conforme aux modèles analytiques proposés par Kenny et Patterson ainsi qu'aux études plus récentes consacrées au comportement mécanique des assemblages filetés.

Cette répartition non uniforme explique pourquoi les contraintes maximales apparaissent systématiquement à la base du premier filet, quelle que soit la nature du matériau considéré.

Elle justifie également l'intérêt du système de précharge développé dans cette étude. En maintenant un contact permanent entre les deux demi-écrous et la vis, la précharge favorise une meilleure distribution des efforts et limite les concentrations locales de contraintes responsables de l'usure prématurée et de l'apparition du backlash.

Ainsi, le mécanisme anti-jeu ne contribue pas uniquement à améliorer la précision du positionnement ; il participe également à une répartition plus homogène des charges et à une augmentation de la durée de vie potentielle de l'ensemble vis-écrou.

IV.7.2 Validation du modèle de Winkler-Bach

Afin d'évaluer la fiabilité des simulations numériques, les contraintes maximales obtenues sous Abaqus ont été comparées aux valeurs théoriques calculées à partir du modèle de Winkler-Bach présenté dans le chapitre I.

Les résultats de cette comparaison sont résumés dans le Tableau IV.12.

Tableau IV-12: Comparaison entre les résultats théoriques et numériques

Paramètre	Valeur théorique (Winkler-Bach)	Valeur Abaqus (PLA-CF, 350 N)	Écart relatif
Contrainte maxi à la base du filet (MPa)	40,8	42,0	+ 2,9 %
Rapport $\frac{\sigma_{max}}{\sigma_{moyen}}$	2,45	2,50	+ 2,0 %

La comparaison montre un excellent accord entre les deux approches. Pour le matériau PLA-CF soumis à une charge de 350 N, la contrainte maximale déterminée par le modèle théorique est de 40,8 MPa, tandis que la simulation Abaqus fournit une valeur de 42,0 MPa. L'écart relatif observé est inférieur à 3 %.

Une différence aussi faible confirme la pertinence des hypothèses adoptées lors de la modélisation numérique. Elle montre également que les conditions aux limites, le maillage et les propriétés mécaniques introduites dans Abaqus reproduisent correctement le comportement réel du système.

De manière similaire, le rapport entre la contrainte maximale et la contrainte moyenne obtenu numériquement reste très proche de la valeur prédite par le modèle analytique. Cette concordance confirme que la concentration des contraintes au niveau du premier filet est correctement représentée par la simulation.

La validation obtenue constitue un résultat important de ce travail. Elle montre que les calculs analytiques développés au chapitre I peuvent être utilisés comme outil de prédimensionnement, tandis que la simulation par éléments finis permet d'affiner localement l'analyse des contraintes et des déformations dans les zones critiques du mécanisme.

En combinant ces deux approches, il est possible d'obtenir une méthode de conception fiable, capable de prédire avec précision le comportement mécanique d'un système vis-écrou équipé d'un écrou anti-jeu.

IV.8 Discussion générale des résultats

Les simulations numériques réalisées sous Abaqus ont permis d'évaluer le comportement mécanique de l'écrou anti-jeu sous différentes conditions de chargement et pour trois matériaux issus de la fabrication additive. Les résultats obtenus mettent clairement en évidence l'influence des propriétés mécaniques des matériaux sur la résistance, la rigidité et la précision du système de levage.

Au-delà de la comparaison des valeurs numériques, cette étude permet d'identifier les paramètres qui gouvernent le comportement du mécanisme et d'orienter le choix du matériau le plus adapté aux exigences de précision et de fiabilité.

IV.8.1 Influence du matériau sur les performances mécaniques

Les résultats montrent que le comportement mécanique du système dépend directement des caractéristiques intrinsèques des matériaux utilisés.

Le PolyMax PLA, bien qu'il soit simple à imprimer et économiquement avantageux, atteint rapidement sa limite élastique lorsque la charge augmente. Sous la charge nominale de 350 N, le coefficient de sécurité reste voisin de l'unité, ce qui laisse une faible marge vis-à-vis d'une éventuelle surcharge. Son utilisation apparaît donc principalement adaptée à la réalisation de maquettes ou de prototypes soumis à des sollicitations limitées.

A l'inverse, le PLA-CF présente les meilleures performances de l'ensemble des matériaux étudiés. Son module d'Young élevé lui confère une rigidité importante qui limite les déformations sous charge tout en retardant l'apparition des contraintes critiques. Cette combinaison de résistance et de rigidité permet d'améliorer simultanément la capacité portante du système et la précision du positionnement.

Le PETG-CF occupe une position intermédiaire. Bien que sa rigidité soit légèrement inférieure à celle du PLA-CF, il possède une meilleure capacité d'absorption des sollicitations mécaniques grâce à sa plus grande ductilité. Cette propriété le rend particulièrement intéressant lorsque le système est susceptible de subir des chocs, des vibrations ou des surcharges ponctuelles.

Ainsi, le choix du matériau ne dépend pas uniquement de sa résistance mécanique, mais également du compromis recherché entre rigidité, précision, ténacité et conditions réelles d'utilisation.

IV.8.2 Influence de la rigidité sur la précision du positionnement

L'un des principaux objectifs de ce travail consiste à améliorer la précision du système de levage. Les simulations montrent que cette précision dépend non seulement du backlash résiduel, mais également des déformations élastiques des composants.

En effet, lorsqu'une charge est appliquée sur l'écrou, celui-ci subit une légère déformation qui se traduit par un déplacement supplémentaire venant s'ajouter au déplacement géométrique théorique imposé par la vis trapézoïdale. Même si cette déformation reste

réversible, elle peut affecter la précision du positionnement lorsque les exigences dimensionnelles sont élevées.

Les résultats obtenus montrent que le PLA-CF présente le déplacement axial le plus faible (0,13 mm sous 350 N), suivi du PETG-CF (0,15 mm), alors que le PolyMax PLA atteint 0,28 mm pour la même charge. Cette différence s'explique directement par les écarts de rigidité entre les matériaux.

Ces observations montrent que le choix d'un matériau plus rigide permet de limiter les erreurs de positionnement sans modifier l'architecture mécanique du système. Dans le cas présent, l'utilisation du PLA-CF améliore simultanément la précision géométrique et la stabilité mécanique du mécanisme.

IV.8.3 Apport du système anti-jeu

Les simulations mettent également en évidence l'intérêt du mécanisme anti-jeu développé dans cette étude. La présence des deux demi-écrous associés au système de précharge assure un contact permanent entre les filets de la vis et ceux de l'écrou, ce qui réduit considérablement le jeu axial susceptible d'apparaître lors des inversions de sens de déplacement.

Cette précharge contribue non seulement à améliorer la précision du positionnement, mais également à répartir plus uniformément les efforts entre les premiers filets en contact. La diminution des concentrations locales de contraintes participe ainsi à limiter les risques d'usure prématurée et à augmenter la durée de vie potentielle du mécanisme.

L'association d'un matériau présentant une bonne rigidité avec un dispositif mécanique de compensation du jeu constitue donc une solution particulièrement efficace pour améliorer les performances globales du système de levage.

IV.8.4 Limites de l'étude

Malgré les résultats encourageants obtenus, certaines limites doivent être prises en considération lors de l'interprétation des simulations.

Tout d'abord, les calculs numériques reposent sur l'hypothèse d'un comportement linéaire élastique des matériaux. Les phénomènes de plasticité, d'endommagement progressif ou de

rupture n'ont pas été modélisés et les résultats obtenus au-delà de la limite élastique doivent donc être considérés comme indicatifs.

Par ailleurs, les propriétés mécaniques utilisées dans les simulations sont supposées homogènes et isotropes. Or, les pièces fabriquées par impression 3D présentent généralement une anisotropie liée à l'orientation des couches de dépôt, susceptible d'influencer leur résistance mécanique réelle.

Enfin, les effets du frottement, de la lubrification, des défauts géométriques, des tolérances de fabrication et des imperfections d'assemblage n'ont pas été pris en compte dans le modèle numérique. Ces paramètres peuvent modifier localement la distribution des contraintes et devront être étudiés dans le cadre d'essais expérimentaux.

Malgré ces simplifications, les résultats obtenus fournissent une représentation réaliste du comportement global du système et constituent une base fiable pour le dimensionnement et la validation du prototype.

Synthèse du chapitre IV

Ce chapitre a été consacré à l'étude numérique du comportement mécanique du système de levage à vis trapézoïdale équipé d'un écrou anti-jeu au moyen du logiciel Abaqus. Les simulations par éléments finis ont permis d'analyser la répartition des contraintes et des déplacements sous différentes conditions de chargement, tout en comparant les performances de trois matériaux compatibles avec la fabrication additive.

Les résultats obtenus mettent en évidence l'influence des propriétés mécaniques des matériaux sur la rigidité, la résistance et la précision du système. Parmi les matériaux étudiés, le PLA-CF présente le meilleur compromis entre résistance mécanique et limitation des déformations, tandis que le dispositif anti-jeu contribue efficacement à améliorer le comportement global du mécanisme en réduisant les effets du backlash.

Cette étude numérique constitue une étape essentielle dans le processus de conception, en permettant de vérifier la cohérence des choix technologiques avant la fabrication du prototype. Les conclusions issues de ces simulations serviront de référence pour la phase expérimentale, au cours de laquelle les performances réelles du système seront confrontées aux prédictions numériques afin de valider la solution proposée.

Conclusion générale

Ce mémoire avait pour objectif de concevoir, modéliser, fabriquer et valider un système de levage à vis trapézoïdale intégrant un écrou anti-jeu destiné à réduire le phénomène de backlash et à améliorer la précision du positionnement. Au-delà de cet objectif fonctionnel, cette étude s'inscrit dans une démarche d'éco-conception fondée sur l'utilisation de la fabrication additive, la réduction de la consommation de matière, la limitation du nombre de composants et le choix de matériaux compatibles avec une approche durable.

L'étude bibliographique réalisée dans le premier chapitre a permis d'établir les bases scientifiques nécessaires à la compréhension des systèmes vis-écrou et des principaux phénomènes affectant leur précision de fonctionnement. Les mécanismes responsables du jeu mécanique, de l'hystérésis et des erreurs de positionnement ont été analysés à partir des travaux de référence de la littérature. Cette analyse critique a également montré que les solutions existantes, bien qu'efficaces, reposent souvent sur des dispositifs complexes ou coûteux, faisant apparaître l'intérêt d'une solution mécanique simple, robuste et économiquement accessible.

Sur la base de ces fondements théoriques, une architecture originale reposant sur un écrou anti-jeu à précharge mécanique a été proposée. La justification scientifique du principe retenu, l'étude de la répartition des charges dans les filets, le respect du principe d'Abbe ainsi que la définition d'une méthodologie de validation ont permis d'établir un cadre de conception rigoureux garantissant la cohérence technique du système développé.

La phase de conception a ensuite conduit à la modélisation paramétrique complète du mécanisme sous SolidWorks 2025. L'ensemble des composants a été dimensionné en tenant compte des exigences fonctionnelles, des contraintes géométriques, des règles de conception mécanique et des spécificités de la fabrication additive. Les modèles tridimensionnels obtenus ont permis de vérifier la cohérence de l'assemblage, l'absence d'interférences et le bon fonctionnement de la chaîne cinématique avant la fabrication du prototype.

Les pièces conçues ont ensuite été préparées pour l'impression 3D puis réalisées selon le procédé de dépôt de filament fondu (FDM). Cette étape a permis de concrétiser le système étudié tout en démontrant la pertinence de la fabrication additive pour le développement

rapide de prototypes fonctionnels. L'utilisation majoritaire d'un matériau polymère unique simplifie également les opérations de fabrication, d'assemblage, de maintenance et de recyclage, en accord avec les principes de l'éco-conception retenus dans cette étude.

Les simulations cinématiques réalisées sous SolidWorks Motion ont confirmé la conformité du comportement du mécanisme avec les prévisions théoriques. La vitesse linéaire obtenue est restée en accord avec les calculs analytiques, tandis que l'intégration de l'écrou anti-jeu a permis de réduire significativement le jeu axial résiduel et d'améliorer la précision du positionnement.

La validation numérique par la méthode des éléments finis, réalisée sous Abaqus, a constitué une étape essentielle du travail. Les simulations ont permis d'analyser la distribution des contraintes de von Mises, les déplacements ainsi que le comportement mécanique des composants soumis à différents niveaux de chargement. La comparaison entre le PolyMax PLA, le PLA-CF et le PETG-CF met en évidence l'influence des propriétés mécaniques des matériaux sur la rigidité, la résistance et la précision du système. Les résultats obtenus montrent que le PLA-CF offre le meilleur compromis entre résistance mécanique, limitation des déformations et stabilité du positionnement. Par ailleurs, la bonne concordance observée entre les modèles analytiques et les résultats numériques renforce la crédibilité de la démarche scientifique adoptée.

L'ensemble des travaux réalisés démontre qu'il est possible de développer un système de levage précis, robuste et facilement reproductible en associant conception mécanique, fabrication additive et simulation numérique. L'écrou anti-jeu proposé contribue efficacement à limiter les effets du backlash tout en conservant une architecture simple, facilement réglable et économiquement accessible. Cette approche constitue une alternative intéressante aux solutions plus complexes reposant sur des systèmes électroniques de compensation.

Il convient toutefois de souligner que les résultats présentés concernent un prototype expérimental réalisé à échelle réduite. Certaines hypothèses de modélisation, telles que le comportement élastique linéaire des matériaux ou l'absence de prise en compte de l'anisotropie induite par l'impression 3D, constituent des limites de cette étude. De plus, les matériaux polymères retenus restent principalement adaptés à la validation du concept et ne

peuvent se substituer à des matériaux métalliques dans des applications industrielles soumises à des charges importantes ou à des sollicitations répétées.

Dans la continuité de ce travail, plusieurs perspectives de recherche peuvent être envisagées. Elles concernent notamment la fabrication d'un prototype métallique destiné à des applications industrielles, l'étude du comportement en fatigue et de l'usure des filets, l'optimisation géométrique de l'écrou anti-jeu, l'analyse de l'influence de différents niveaux de précharge, ainsi que l'intégration d'un système de mesure numérique permettant de comparer les performances d'un positionnement mécanique avec celles d'une solution instrumentée.

En définitive, ce mémoire a permis de démontrer la faisabilité d'un système de levage à vis trapézoïdale intégrant un écrou anti-jeu conçu selon une démarche combinant conception assistée par ordinateur, fabrication additive, simulation numérique et éco-conception. Les résultats obtenus constituent une base scientifique et technique solide pour le développement de futurs systèmes de positionnement précis, fiables et économiquement accessibles. Ils ouvrent également des perspectives intéressantes pour l'utilisation de la fabrication additive dans la conception de mécanismes de précision destinés aussi bien aux applications industrielles qu'aux environnements pédagogiques et de recherche.

Références bibliographiques

- [1] P. R. N. Childs, *Mechanical Design Engineering Handbook*. Oxford, UK: Butterworth-Heinemann, 2014. doi:10.1016/C2011-0-04529-5.
- [2] R. G. Budynas and J. K. Nisbett, *Shigley's Mechanical Engineering Design*, 10th ed. New York, NY, USA: McGraw-Hill Education, 2015.
- [3] A. H. Slocum, *Precision Machine Design*. Dearborn, MI, USA: Society of Manufacturing Engineers (SME), 1992.
- [4] R. L. Norton, *Design of Machinery: An Introduction to the Synthesis and Analysis of Mechanisms and Machines*, 5th ed. New York, NY, USA: McGraw-Hill Education, 2014.
- [5] G. Pahl, W. Beitz, J. Feldhusen and K. H. Grote, *Engineering Design: A Systematic Approach*, 3rd ed. London, UK: Springer, 2007.
- [6] B. J. Hamrock, S. R. Schmid and B. O. Jacobson, *Fundamentals of Fluid Film Lubrication*, 2nd ed. Boca Raton, FL, USA: CRC Press, 2004.
- [7] G. W. Stachowiak and A. W. Batchelor, *Engineering Tribology*, 4th ed. Oxford, UK: Butterworth-Heinemann, 2013.
- [8] B. Bhushan, *Introduction to Tribology*, 2nd ed. Hoboken, NJ, USA: John Wiley & Sons, 2013.
- [9] P. J. Blau, *Friction Science and Technology: From Concepts to Applications*, 2nd ed. Boca Raton, FL, USA: CRC Press, 2009.
- [10] I. Gibson, D. W. Rosen, B. Stucker and M. Khorasani, *Additive Manufacturing Technologies*, 3rd ed. Cham, Switzerland: Springer, 2021.
- [11] A. Gebhardt, J. S. Hötter and D. Ziebur, *3D Printing: Understanding Additive Manufacturing*, 2nd ed. Munich, Germany: Hanser Publishers, 2019.
- [12] W. Gao *et al.*, "The Status, Challenges, and Future of Additive Manufacturing in Engineering," *Computer-Aided Design*, vol. 69, pp. 65-89, 2015.
- [13] J. B. Bryan, "The Abbe Principle Revisited: An Updated Interpretation," *Precision Engineering*, vol. 1, no. 3, pp. 129-132, 1979.
- [14] K. Holmberg and A. Erdemir, "Influence of Tribology on Global Energy Consumption, Costs and Emissions," *Friction*, vol. 5, no. 3, pp. 263-284, 2017. doi:10.1007/s40544-017-0183-5.

- [15] S. Erkaya and I. Uzmay, "Effects of Balancing and Link Flexibility on Dynamics of a Planar Mechanism Having Joint Clearance," *Scientia Iranica*, vol. 19, no. 3, pp. 483-490, 2012.
- [16] L. C. Hale and A. H. Slocum, "Design of Anti-Backlash Transmissions for Precision Position Control Systems," *Precision Engineering*, vol. 16, no. 4, pp. 244-258, 1994.
- [17] J. L. Stein and C. H. Wang, "Estimation of Gear Backlash: Theory and Simulation," *Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control*, vol. 120, no. 1, pp. 74-82, 1998.
- [18] M. Balasubramaniam, E. W. Golaski, S. Son, K. Sriram and A. H. Slocum, "An Anti-Backlash Two-Part Shaft Coupling with Interlocking Elastically Averaged Teeth," *Precision Engineering*, vol. 26, no. 3, pp. 314-330, 2002.
- [19] K. Kenny and E. A. Patterson, "Load Distribution in a Multi-Bolt Joint," *International Journal of Mechanical Sciences*, vol. 27, no. 10, pp. 647-657, 1985.
- [20] ISO 286-1:2010, *Geometrical Product Specifications (GPS) — ISO Code System for Tolerances on Linear Sizes — Part 1: Basis of Tolerances, Deviations and Fits*. Geneva, Switzerland: International Organization for Standardization, 2010.
- [21] ISO 2901:1993, *ISO Metric Trapezoidal Screw Threads — Basic Profile and Maximum Material Profiles*. Geneva, Switzerland: International Organization for Standardization, 1993.
- [22] ISO/TR 10064-2:1996, *Code of Inspection Practice — Part 2: Inspection Related to Radial Composite Deviations, Runout, Tooth Thickness and Backlash*. Geneva, Switzerland: International Organization for Standardization, 1996.
- [23] Dassault Systèmes, *SolidWorks 2025 Documentation*. Vélizy-Villacoublay, France: Dassault Systèmes, 2025.
- [24] Dassault Systèmes, *Abaqus 2024 Documentation*. Providence, RI, USA: Dassault Systèmes SIMULIA, 2024.
- [25] ASM International, *ASM Handbook, Volume 18: Friction, Lubrication, and Wear Technology*. Materials Park, OH, USA: ASM International, 2022.
- [26] K. L. Johnson, *Contact Mechanics*. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 1985.
- [27] J. M. Gere and B. J. Goodno, *Mechanics of Materials*, 9th ed. Boston, MA, USA: Cengage Learning, 2018.

- [28] S. Kalpakjian and S. R. Schmid, *Manufacturing Engineering and Technology*, 8th ed. Hoboken, NJ, USA: Pearson, 2020.
- [29] M. F. Ashby, *Materials Selection in Mechanical Design*, 5th ed. Oxford, UK: Butterworth-Heinemann, 2016.
- [30] M. F. Ashby and D. R. H. Jones, *Engineering Materials 1: An Introduction to Properties, Applications and Design*, 5th ed. Oxford, UK: Butterworth-Heinemann, 2019.
- [31] D. G. Ullman, *The Mechanical Design Process*, 5th ed. New York, NY, USA: McGraw-Hill Education, 2017.
- [32] Y. A. Çengel and M. A. Boles, *Thermodynamics: An Engineering Approach*, 9th ed. New York, NY, USA: McGraw-Hill Education, 2019.
- [33] F. P. Beer, E. R. Johnston Jr., J. T. DeWolf and D. F. Mazurek, *Mechanics of Materials*, 8th ed. New York, NY, USA: McGraw-Hill Education, 2020.
- [34] J. E. Shigley, C. R. Mischke and R. G. Budynas, *Mechanical Engineering Design*. New York, NY, USA: McGraw-Hill Education.
- [35] R. C. Hibbeler, *Mechanics of Materials*, 10th ed. Hoboken, NJ, USA: Pearson, 2018.
- [36] ASTM International, *ASTM D638-22: Standard Test Method for Tensile Properties of Plastics*. West Conshohocken, PA, USA: ASTM International, 2022.
- [37] ASTM International, *ASTM D695-15: Standard Test Method for Compressive Properties of Rigid Plastics*. West Conshohocken, PA, USA: ASTM International, 2015.
- [38] ISO 527-1:2019, *Plastics — Determination of Tensile Properties — Part 1: General Principles*. Geneva, Switzerland: International Organization for Standardization, 2019.
- [39] ISO 604:2002, *Plastics — Determination of Compressive Properties*. Geneva, Switzerland: International Organization for Standardization, 2002.
- [40] ISO 14006:2020, *Environmental Management Systems — Guidelines for Incorporating Ecodesign*. Geneva, Switzerland: International Organization for Standardization, 2020.
- [41] Polymaker, *PolyMax™ PLA Technical Data Sheet*. Shanghai, China: Polymaker, 2024.
- [42] Polymaker, *Fiberon™ PLA-CF Technical Data Sheet*. Shanghai, China: Polymaker, 2024.
- [43] Polymaker, *Fiberon™ PETG-CF Technical Data Sheet*. Shanghai, China: Polymaker, 2024.

[44] Ultimaker, *Design Guidelines for FDM 3D Printing*. Utrecht, Netherlands: Ultimaker B.V.

[45] D. A. Dornfeld and B. Linke, "Leveraging Technology for a Sustainable World," *CIRP Annals – Manufacturing Technology*, vol. 61, no. 2, pp. 783–802, 2012.