

Université 8 mai 1945 – Guelma
Faculté des Sciences et de la Technologie
Département de Génie Mécanique



Mémoire de Fin d'Études
Pour l'obtention du diplôme de Master

Option : Construction Mécanique

Présenté par : MILOUDI Ahmed Younes

=====
**Etude de la simulation numérique du comportement
mécanique d'un support coudé**
=====

Sous la Direction de :

Dr. GHERIB Samia

Dr. FRIHI Djamel

Année universitaire 2024/2025

Remerciement

Je tiens à exprimer ma profonde gratitude à toutes les personnes qui ont contribué à la réalisation de ce travail de recherche.

Mes premiers remerciements vont à mes encadreurs, **Dr. GHERIB Samia** et **Dr. FRIHI Djamel**, pour leur accompagnement précieux tout au long de ce mémoire. Leurs conseils avisés, leur disponibilité et leur expertise ont été déterminants dans la conduite de mes recherches et la qualité finale de ce travail. Leur rigueur scientifique et leurs retours constructifs m'ont permis de progresser considérablement.

Je souhaite également remercier l'ensemble des enseignants du département pour les connaissances transmises durant ma formation.

Un merci tout particulier à ma famille pour son soutien inconditionnel, sa patience et ses encouragements durant ces mois de travail intensif.

Enfin, je n'oublie pas mes amis et collègues de promotion pour les échanges enrichissants et les moments de partage qui ont rendu ce parcours académique plus agréable.

Dédicace

Je tiens à dédier ce travail :

À mes parents bien-aimés, en témoignage de ma gratitude pour leur dévouement et leur soutien constant tout au long de mes années d'études. Leurs sacrifices infinis et leur réconfort moral ont été d'une importance inestimable. Ils ont fourni des efforts considérables pour mon éducation, mon instruction, et pour m'aider à atteindre cet objectif. Pour tout cela et bien plus encore, mes sentiments d'affection sont sans limites. Je dédie également cette dédicace à ceux qui sont la source de mon inspiration et de mon courage :

Toute ma famille, Mon collègue Haddad Sami, Mes chers ami(e)s.

RÉSUMÉ :

Le travail réalisé dans le cadre de notre projet de fin d'étude est fondé essentiellement sur la **simulation** numérique du comportement mécanique d'un élément mécanique appelé bras de levage sous forme d'un **support coudé**, utilisé pour le soulèvement de voitures dans les ateliers, sous **Comsol Multiphysics** ainsi qu'une optimisation géométrique via SolidWorks.

Dans cette dynamique notre étude a été faite tout en explorant l'application de la méthode des éléments finis (**MEF**) pour l'analyse et l'**optimisation** du support coudé.

L'objectif principal est d'étudier son comportement sous différentes sollicitations (statiques, dynamiques, fréquentielles) et d'optimiser sa conception pour en améliorer les performances tout en réduisant sa masse. Pour cela, nous avons utilisé le logiciel Comsol Multiphysics, un environnement de simulation puissant et polyvalent, ainsi que des outils d'optimisation topologique intégrés à SolidWorks Simulation.

À travers ce mémoire, nous avons cherché non seulement à approfondir notre compréhension théorique des phénomènes étudiés, mais également à développer des compétences pratiques essentielles en simulation numérique, un outil désormais incontournable dans le champ de l'ingénierie et de la recherche scientifique.

Les travaux menés, ont non seulement permis de consolider notre compréhension des théories sous-jacentes, mais ont également offert une plateforme pour l'application pratique de ces concepts dans des scénarios complexes. Les résultats obtenus, concordant avec les prévisions théoriques, attestent de l'efficacité de la simulation numérique comme outil indispensable dans le domaine de l'ingénierie et de la recherche scientifique.

Mots clés : Support coudé, Comsol, SolidWorks, Simulation, Optimisation, MEF.

ABSTRACT:

The work carried out as part of our graduation project focuses on the numerical **simulation** of the mechanical behavior of a lifting arm component, designed as a **bent support** used for vehicle lifting in automotive workshops. The study was conducted using **COMSOL Multiphysics** for simulation and SolidWorks for geometric optimization.

Within this framework, our research explored the application of the Finite Element Method (**FEM**) for analyzing and **optimizing** the bent support. The primary objective was to investigate its performance under various loading conditions (static, dynamic, and frequency-based) while optimizing its design to enhance performance and reduce mass. For this purpose, we employed COMSOL Multiphysics, a powerful and versatile simulation environment, alongside topology optimization tools integrated into SolidWorks Simulation.

Through this study, we aimed not only to deepen our theoretical understanding of the phenomena involved but also to develop essential practical skills in numerical simulation—a now-indispensable tool in engineering and scientific research.

The conducted work not only reinforced our grasp of underlying theories but also provided a platform for applying these concepts to complex real-world scenarios. The obtained results, consistent with theoretical predictions, demonstrate the effectiveness of numerical simulation as a critical tool in engineering and scientific research.

Keywords: Bent support, COMSOL, SolidWorks, Simulation, Optimization, FEM.

المُلخَص

يتمحور العمل المُنجز في إطار مشروع نهاية الدراسة حول **المحاكاة العددية** للسلوك الميكانيكي لعنصر يُسمى **ذراع الرفع** (على شكل دعامة منحنية) المُستخدم لرفع السيارات في الورشات، باستخدام برنامج **Comsol Multiphysics**، بالإضافة إلى **تحسين هندسي** عبر **SolidWorks**.

في هذا الإطار، اعتمدت دراستنا على تطبيق **طريقة العناصر المحدودة (MEF)** لتحليل وتحسين الدعامة المنحنية. الهدف الرئيسي هو دراسة سلوكها تحت تأثير أحمال مختلفة (ساكنة، ديناميكية، ترددية) وتحسين تصميمها لتعزيز الأداء مع **تقليل الكتلة**. لتحقيق ذلك، استخدمنا بيئة المحاكاة المتقدمة **Comsol Multiphysics**، بالإضافة إلى أدوات التحسين **الطبولوجي المُدمجة** في **SolidWorks Simulation**.

سعى هذا البحث إلى تعميق الفهم النظري للظواهر المدروسة، وإلى تطوير مهارات عملية في **المحاكاة العددية** -أداة أصبحت حاسمة في مجال الهندسة والبحث العلمي.

لم تُسهم النتائج المُتحصّل عليها في تعزيز فهمنا للنظريات الأساسية فحسب، بل وفرت أيضاً منصة لتطبيق هذه المفاهيم في **سيناريوهات عملية معقدة**. النتائج، التي تتفق مع التوقعات النظرية، تُثبت فعالية المحاكاة العددية كأداة لا غنى عنها في الهندسة والعلوم.

الكلمات المفتاحية: الدعامة المنحنية، **Comsol**، **SolidWorks**، المحاكاة، التحسين، طريقة العناصر المحدودة.

LISTE DES FIGURES

CHAPITRE I : DEMARCHE GENERALE D'UNE SIMULATION PAR ÉLÉMENTS FINIS

Fig.I.1 : Exemple de simulation numérique d'un système mécanique.....	6
Fig.I.2 : Les bases de la MEF.....	8
Fig.I.3 : Différents types de problème en éléments finis	9
Fig.I.4 : Etapes de la MEF appliqué à un problème de mécanique	10
Fig. I.5 : Différents types d'éléments utilisés.....	11
Fig.I.6 : Exemple des modèles (surface).....	12
Fig.I.7 : Exemples des modèles	13
Fig.I.8 : Loi de comportement des différents matériaux.....	13
Fig.I.9 : Exemple de maillage.....	16
Fig.I.10 : Exemple de conditions aux limites et chargement.....	16
Fig.I.11 : Exemple d'analyse dynamique	17
Fig.I.12 : Exemple d'analyse modale	18
Fig.I.13 : Illustration d'une optimisation topologique.....	18
Fig.I.14 : Etude Thermique d'un piston.....	19

CHAPITRE II : PRÉSENTATION DU CODE DE SIMULATION UTILISÉ

Fig.II.1 : Logo du COMSOL Multiphysics.....	24
Fig.II.2 : Étapes de simulation sous Comsol	27
Fig.II.3 : Fenêtre après ouverture du logiciel COMSOL Multiphysics	30
Fig.II.4 Sélection de l'espace de dimension	30
Fig.II.5 : Sélection de physique dans Cosmol Multiphysics.....	31
Fig.II.6 : Sélection de l'étude dans COMSOL Multiphysics.	31
Fig.II.7 : Fenêtre principale de COMSOL Multiphysics	32
Fig.II.8 : Création d'une géométrie simple.....	33
Fig.II.9 : Importation d'une géométrie.....	33
Fig.II.10 : Bibliothèque des matériaux	34
Fig.II.11 : Ajout du matériau à un composant.....	35
Fig.II.12 : La barre Physics	35
Fig.II.13 : Choix de fixation.....	36
Fig.II.14 : Choix de chargement.....	36
Fig.II.15 : Interface fixée.....	36

Fig.II.16 : Interface chargée.....	37
Fig.II.17 : La barre Mesh.....	37
Fig.II.18 : Exemple de maillage d'une géométrie 3D.....	38
Fig.II.19 : La barre de résolution	39
Fig.II.20 : Résultat sur la fenêtre graphique	39
Fig.II.21 : La barre du post traitement des résultats	39

CHAPITRE III : SIMULATION MÉCANIQUE DU BRAS COUDÉ

Fig.III.1 : Pont élévateur de voiture à deux colonnes.....	43
Fig.III.2 : Schéma cinématique du pont élévateur de voiture	43
Fig.III.3 : Dessin de définition du support coudé (Support de levage).....	44
Fig.III.4 : Navigateur de modèle	48
Fig.III.5 : Sélection de la dimension.	48
Fig.III.6 : Sélection de physique dans Cosmol Multiphysics.....	49
Fig.III.7 : Sélection de l'étude dans COMSOL Multiphysics	49
Fig.III.8 : La barre de géométrie	50
Fig.III.9 : Importation de la géométrie	50
Fig.III.10 : Ajout des matériaux	51
Fig.III.12 : Propriétés du matériau choisi	52
Fig.III.13 : Condition de fixation	53
Fig.III.14 : Les interfaces fixées.....	53
Fig.III.15 : Condition de chargement.....	53
Fig.III.16 : Interface chargée.....	53
Fig.III.17 : La barre Mesh.....	54
Fig.III.18 : Sélection du type de maillage	54
Fig.III.19 : Géométrie maillée.....	54
Fig.III.20 : La barre study.....	54
Fig.III.21 : La barre des résultats	55
Fig.III.22 : Déplacement total 3D	55
Fig.III.23 : Déplacement total en isosurface.....	55
Fig.III.24: Flèches du champ de déplacement.....	56
Fig.III.25: Ligne de coupe	56
Fig.III.26: Déplacement total selon x	56
Fig.III.28 : Isosurface de la contrainte de Von mises.....	57
Fig.III.29 : Contrainte de Von Mises selon x	57

Fig.III.30 :Choix de l'étude.....	59
Fig.III.31: Déplacement total 3D . (1ère fréquence propre)	60
Fig.III.33: Déplacement totale 3D (2eme fréquence propre).....	60
Fig.III.35 : Courbe de déplacement total selon x pour les 6 fréquences propres.	61
Fig.III.36: Contraintes de von mises 3D (1 ^{ère} fréquence propre).....	61
Fig.III.37: Contours de contrainte de Von mises (1 ^{ère} fréquence propre).....	61
Fig.III.38: Contraintes de von mises 3D (2 ^{ème} fréquence propre).....	62
Fig.III.39: Contours de contrainte de Von mises (2 ^{ème} fréquence propre)	62
Fig.III.40 : Courbe de contraintes de Von mises selon x pour les 6 fréquences propres.	62
Fig.III.41 : Choix de l'étude.....	65
Fig.III.42: Condition de Chargement	65
Fig.III.43 :Application d'amrtissement	66
Fig.III.44 : Les valeurs α et β	66
Fig.III.45 : Paramètres de l'étude	66
Fig. III.46 : Déplacement total 3D.....	67
Fig. III.47 :Champ de déplacement dans les 3 directions.....	67
Fig.III.48 : Point choisi	68
Fig. III.49: Déplacement total	68
Fig. III.50: Contrainte de Von Mises 3D.....	68
Fig. III.51: Contraintes principales.....	68
Fig. III.52 : Contrainte de Von Mises	69
Fig. III.53 : Choix de l'étude	70
Fig. III.54 : Choix de type d'étude.....	70
Fig. III.55 : Condition de chargement.....	71
Fig. III.56 : Paramètres du solveur.....	72
Fig. III.57 : Déplacement total 3D (Alpha=-45°)	73
Fig. III.58 : Déplacement total 3D (Alpha=0°).....	73
Fig. III.59: Déplacement total (Alpha=45°).....	73
Fig. III.60: Déplacement total en fonction de Alpha	73
Fig. III.61 : Déplacement total selon x en fonction de Alpha	73
Fig. III.62:Contrainte de Von Mises (Alpha=-45°)	74
Fig. III.63: Contrainte de Von Mises (Alpha=0°)	74
Fig. III.65 : Contrainte de Von Mises en fonction de Alpha	74
Fig. III.66 : Contrainte de Von Mises en fonction de Alpha	74

CHAPITRE IV : ETUDE D'OPTIMISATION TOPOLOGIQUE APPLIQUEE AU SUPPORT COUDE

Fig.IV.1 : Support Coudé.....	77
Fig.IV.2 : Domaine discrétisé lors de l'optimisation.....	82
Fig.IV.3 : Loi de puissance appliquée lors de l'optimisation.....	83
Fig.IV.4 : Présentation des déplacements et chargement imposés sur le support	85
Fig.IV.5 : Lancement d'une étude de topologie à partir du complément Simulation	85
Fig.IV.6 : Choix du type de matériaux.....	85
Fig.IV.7 : Choix des déplacements imposés (Géométrie fixe)	86
Fig.IV.8 : Introduction du chargement externe (Quart du poids de la voiture).....	86
Fig.IV.9 : Objectifs et limites imposées.....	87
Fig.IV.10 : Réduction de masse et limite imposée du coefficient de sécurité.....	88
Fig.IV.11 : Contrôles de Fabrication.....	89
Fig.IV.12 : Régions conservées	89
Fig.IV.13 : Contrôle d'épaisseur	89
Fig.IV.14 : Contrôle de démoulage	90
Fig.IV.15 : Contrôle de symétrie	90
Fig.IV.16 : Création du maillage et exécution de l'étude.....	91
Fig.IV.17 : Pourcentage d'enlèvement de matière	91
Fig.IV.18 : Etape intermédiaire de calcul (début de convergence).....	92
Fig.IV.19 : Convergence du processus itératif (après la 32 ^{ème} Itération)	92
Fig.IV.20 : Masse du matériau après optimisation	93
Fig.IV.21 : Extraction du maillage de la nouvelle configuration après optimisation	93
Fig.IV.22 : Nouvelle configuration du support coudé.....	93
Fig.IV.23 (a) : Déplacement du support coudé initial.....	94
Fig.IV.23 (b) : Déplacement du support coudé optimisé.....	94
Fig.IV.24 : Déplacements sous chargement statique du support coudé.....	94
Fig.IV.25 (a) : Déformation du support coudé initial.....	95
Fig.IV.25 (b) : Déformation du support coudé optimisé.....	95
Fig.IV.26 : Déformation maximale sous chargement statique du support coudé.....	96
Fig.IV.27 (a) : Contraintes du support coudé initial.....	96
Fig.IV.27 (b) : Contraintes du support coudé optimisé	97
Fig.IV.28 : Contrainte maximale sous chargement statique du support coudé	97

Fig.IV.29 (a) : Coefficient de sécurité du support coudé initial	98
Fig.IV.29 (b) : Coefficient de sécurité du support coudé optimisé	98
Fig.IV.30 : Coefficient de sécurité sous chargement statique du support coudé.....	98

Liste des Symboles

$\{U\}$: Vecteur des degrés de liberté du système.....	17
$[K]$: Matrice de rigidité caractérisant le système.	17
$\{F\}$: Vecteur des sollicitations mécaniques appliquées sur le système.....	17
σ_{ij} : Tenseur des contraintes,	45
ϵ_{kl} : Tenseur des déformations,.....	45
C_{ijkl} Tenseur des propriétés élastiques, dépendant des caractéristiques du matériau	46
λ et μ : Coefficients de Lamé,	46
$\text{Tr}(\epsilon)$: Trace du tenseur des déformations, représentant la déformation volumétrique.	46
$\nabla\sigma$: Divergence du tenseur des contraintes,	46
f : Vecteur des forces volumiques appliquées.	46
σ_x et σ_y : Contraintes normales dans les directions x et y,	46
τ_{xy} : Contrainte de cisaillement dans le plan xy,	46
σ_1 : Contrainte principale maximale	46
σ_2 : Contrainte principale minimale.....	46
σ_d : Limite d'élasticité du matériau en traction simple	46
ω_n : Fréquence propre (en rad/s),.....	57
k : Constante de raideur du système,	57
m : Masse du système.	57
K : Matrice de rigidité,.....	57
M : Matrice de masse.....	57
$F(t)$: Force externe appliquée.....	61
ω : Fréquence angulaire de l'excitation (en rad/s),.....	61
$u'(t), u''(t)$: Vitesse et accélération,	62
α : Coefficient d'amortissement proportionnel à la masse,	62
β : Coefficient d'amortissement proportionnel à la rigidité.	62
ρ_{\min} : Densité relative minimale,.....	81
ρ_e : Densité relative des éléments,	81
p : Facteur de pénalité,	81
$[u_e]$: Vecteur de déplacement nodal de l'élément e,.....	82

SOMMAIRE

INTRODUCTION GENERALE.....	1
CHAPITRE I : DEMARCHE GENERALE D'UNE SIMULATION PAR ÉLÉMENTS FINIS	
I-1 INTRODUCTION.....	4
I-2 ÉNONCÉ D'UN PROBLÈME DE MÉCANIQUE	4
I-3 C'EST QUOI UNE SIMULATION.....	5
I-4 LES AVANTAGES DE LA SIMULATION	6
I-5 METHODE DES ÉLÉMENTS FINIS	7
I-5-1 Généralités	7
I-5-2 Domaines d'application	7
I-5-3 : Les bases de la MEF.....	8
I-5-3-1 Les lois du physique	8
I-5-3-2 L'analyse numérique.....	8
I-5-3-3 L'informatique appliquée	8
I-5-4 : Types de problèmes en éléments finis.....	8
I-5-4-1 Problèmes d'équilibre stationnaire	8
I-5-4-2 Problèmes aux valeurs propres.....	9
I-5-4-3 Problème dépendant du temps	9
I-5-5 : Etapes de base de la MEF	9
I-5-6 Types d'éléments utilisés dans la MEF	10
I-6 LES PRINCIPAUX LOGICIELS DE SIMULATION PAR LA MEF	11
I-7 DÉMARCHE GÉNÉRAL D'UNE SIMULATION PAR LA MEF	12
I-7-1 Etape 1 : Pré-traitement / Préparation du modèle (Preprocessing)	12
I-7-1-1 Réalisation de la géométrie	12
I-7-1-2 Simplification de la géométrie	12
I-7-1-3 Définition des propriétés des matériaux.....	13
I-7-1-4 Définition du type d'éléments utilisés	14
I-7-1-5 Réalisation du maillage de la géométrie	15
I-7-1-6 Application des conditions aux limites.....	16
I-7-1-7 Application des chargements.....	16
I-7-2 Etape 2 : Calcul (Solveur).....	16
I-7-2-1 Paramétrage de l'étude	16
I-7-2-2 Réalisation du calcul.....	19
I-7-3 Etape 3 : post-traitement / Analyse des résultats (Postprocessing).....	19

I-7-3-1 Extraction des résultats souhaités	19
I-7-3-2 Analyse des résultats du modèle	19
I-7-3-3 Exploitation des résultats.....	20
I-8 CONCLUSION.....	20

CHAPITRE II : PRÉSENTATION DU CODE DE SIMULATION UTILISÉ

II-1 INTRODUCTION.....	23
II-2 DÉFINITION	23
II-3 UTILITÉ DE COMSOL.....	24
II-4 PRINCIPE D'UTILISATION	24
II-5 DOMAINES D'APPLICATION SPÉCIFIQUES DE COMSOL.....	25
II-6 ÉTAPES GÉNÉRALES DE SIMULATION SOUS COMSOL	26
II-7 DIFFÉRENTS MODULES DE COMSOL	27
II-8 LES ÉTAPES DE SIMULATION SOUS COMSOL 5.1.....	30
II-8-1 Lancement du logiciel :.....	30
II-8-2 Sélection des dimensions de l'espace :	30
II-8-3 Sélection de la physique :.....	30
II-8-4 Sélection de l'étude :	31
II-8-5 Fenêtre principale de COMSOL Multiphysics	31
II-8-6 Géométrie	32
II-8-7 Choix du matériau	33
II-8-8 Condition au limites.....	35
II-8-9 Choix du maillage	37
II-8-10 Discrétisation du modèle.....	37
II-8-11 Résolution du problème.....	38
II-8-12 Choix du solveur	38
II-8-13 Post-traitement automatique.....	38
II-8-14 Analyse des Résultats	39
II-9 CONCLUSION.....	39

CHAPITRE III : SIMULATION MÉCANIQUE DU BRAS COUDÉ

III-1 INTRODUCTION.....	41
III-2 PRÉSENTATION ET DIMENSIONNEMENT D'ÉLÉMENT D'ÉTUDE.....	41
III-2-1 Définition Technique	44
III-2-2 Rôle du Support Coudé en Cantilever (Support de Levage)	44
III-2-3 Description du Modèle.....	44
III-3 Propriétés matériaux	44
III-4 ANALYSE DU COMPORTEMENT MÉCANIQUE DU SUPPORT COUDÉ.....	45

III-4-1 Analyse statique	45
III-4-1-1 Objectif.....	45
III-4-1-2 Théorie	45
III-4-1-3 Simulation sous Comsol	47
III-4-1-4 Résultats et discussions.....	54
III-4-1-5 Conclusion.....	56
III-4-2 Analyse des fréquences propres	56
III-4-2-1 Objectif.....	56
III-4-2-2 Théorie	57
III-4-2-3 Simulation sous Comsol	57
III-4-2-4 Résultats et discussion	58
III-4-3 Analyse Transitoire	61
III-4-3-1 Objectif.....	61
III-4-3-2 Théorie	61
III-4-3-3 Simulation sous COMSOL.....	63
III 4-3-4 Résultats et discussion	65
III-4-4 Analyse Paramétrique	67
III-4-4-1 Objectif.....	67
III-4-4-2 Théorie	67
III-4-4-3 Simulation sous comsol.....	68
III-4-4-4 Résultats et discussion	70
III-5 Conclusion.....	73

CHAPITRE IV : ETUDE D'OPTIMISATION TOPOLOGIQUE APPLIQUEE AU SUPPORT COUDE

IV-1 INTRODUCTION :	75
IV-2 ETUDE TOPOLOGIQUE	75
IV-3 CONFIGURATION D'UNE ÉTUDE TOPOLOGIQUE.....	76
IV-3-1 OBJECTIFS ET LIMITES IMPOSEES	77
IV-3-1-1 Sélectionner un objectif :	77
IV-3-1-2 Limites imposées.....	77
IV-3-1-3 Contrôles de fabrication.....	78
IV-4 ETAPES POUR RÉALISER UNE « ETUDE DE TOPOLOGIE ».....	79
IV-4-1 Objectifs et limites imposées	79
IV-4-2 Contrôles de fabrication	79
IV-4-3 Masse de matériau.....	79
IV-4-4 Exporter le maillage lissé.....	79

IV-5 MÉTHODE SIMP D'OPTIMISATION DE LATOPOLOGIE	79
IV-5-1 Objectif : maximisation de la rigidité	81
IV-6 OPTIMISATION TOPOLOGIQUE DU SUPPORT COUDÉ.....	82
IV-6-1 Introduction.....	82
IV-6-2 Etude de topologie du support coudé sous un chargement statique	82
IV-6-3 Résultats et Analyses	90
IV-6-3-1 Analyse du diagramme de convergence	90
IV-6-3-2 : Extraction du maillage de la nouvelle configuration.....	90
IV-7 ANALYSE STATIQUE ET ÉTUDE COMPARATIVE DES DEUX CONFIGURATIONS	91
IV-7-1 Déplacement maximal.....	92
IV-7-2 Déformation maximale.....	93
IV-7-3 Contrainte maximale	94
IV-7-4 Coefficient de sécurité.....	96
IV-8 CONCLUSION.....	97
CONCLUSION GÉNÉRALE.....	98

INTRODUCTION GENERALE

La simulation numérique est devenue un outil indispensable dans les domaines de l'ingénierie et de la recherche scientifique. Elle permet de modéliser, d'analyser et de prédire le comportement de systèmes complexes, offrant ainsi des solutions efficaces pour résoudre des problèmes techniques tout en réduisant les coûts et les temps de développement. Parmi les méthodes les plus utilisées, la méthode des éléments finis (MEF) se distingue par sa capacité à traiter des géométries complexes et des phénomènes physiques variés, allant de la mécanique des structures à la thermique, en passant par les interactions multiphysiques.

Au cours de son service, une pièce mécanique est soumise à des sollicitations de plusieurs types. Ces sollicitations peuvent être de nature mécanique (forces ou pressions), thermiques (flux de chaleur ou gradient de température), chimiques (corrosion)...etc. De plus, ces sollicitations peuvent être statiques ou bien dynamique. Les systèmes deviennent de plus en plus complexes avec les développements technologiques, et les méthodes d'études basées sur les solutions analytiques simples ne suffisent plus pour les concevoir. Grâce à l'évolution de l'informatique et des méthodes numériques en tend de plus en plus vers une meilleure approche des phénomènes réels.

Ce mémoire s'inscrit dans cette dynamique en explorant l'application de la MEF pour l'analyse et l'optimisation d'un support coudé, un composant mécanique critique utilisé dans les systèmes de levage automobile. L'objectif principal est d'étudier son comportement sous différentes sollicitations (statiques, dynamiques, fréquentielles et paramétrique) et d'optimiser sa conception pour en améliorer les performances tout en réduisant sa masse. Pour cela, nous avons utilisé le logiciel COMSOL Multiphysics, un environnement de simulation puissant et polyvalent, ainsi que des outils d'optimisation topologique intégrés à SolidWorks Simulation.

Comsol Multiphysics est un logiciel de modélisation par éléments finis qui est applicable à tous les domaines de l'ingénierie et de la science. Il comprend des solutions de modélisation adaptées pour la mécanique des structures, génie chimique, transfert de chaleur, mécanique des fluides...etc. Il facilite la modélisation de tous les phénomènes physiques basés sur les équations aux dérivées partielles.

L'objectif principal de ce travail est de simuler numériquement le comportement d'un élément mécanique appelé bras de levage sous forme d'un support coudé tout en utilisant le module de mécanique des structures de Comsol Multiphysics. Ce dernier permet des analyses classiques de contraintes et de déformations en analyse statique et dynamique avec des possibilités multiphysiques étendues.

Pour mettre en lumière les capacités de modélisation et d'analyse mécanique sous différents types de chargement tout en appuyant sur des principes fondamentaux et des équations régissant ces études ; nous avons réalisé une série d'études de cas, allant de la simple

analyse statique à l'optimisation géométrique de la pièce étudiée. À travers cette démarche, nous avons cherché non seulement à approfondir notre compréhension théorique des phénomènes étudiés, mais également à développer des compétences pratiques essentielles en simulation numérique, un outil désormais incontournable dans le champ de l'ingénierie et de la recherche scientifique.

Au terme de ce modeste travail, nous avons pu apprécier, en premier lieu, la puissance et la polyvalence de COMSOL Multiphysics dans le cadre de l'analyse multiphysique ; et dans un second temps, l'efficacité et la simplicité de l'outil complément SolidWorks-Simulation. Ce dernier a été employé pour faire une optimisation de la topologie du support coudé.

Les travaux menés, ont non seulement permis de consolider notre compréhension des théories sous-jacentes, mais ont également offert une plateforme pour l'application pratique de ces concepts dans des scénarios complexes. Les résultats obtenus, concordant avec les prévisions théoriques, attestent de l'efficacité de la simulation numérique comme outil indispensable dans le domaine de l'ingénierie et de la recherche scientifique.

Le travail exposé dans ce mémoire s'articule autour de quatre principaux chapitres :

1. Démarche générale d'une simulation par éléments finis : Ce chapitre pose les bases théoriques de la MEF, en présentant ses principes, ses avantages, ses domaines d'application et les étapes clés d'une simulation numérique.
2. Présentation du code de simulation utilisé : Nous y détaillons les fonctionnalités de COMSOL Multiphysics, ses modules spécialisés et sa méthodologie de modélisation, en mettant l'accent sur sa capacité à traiter des problèmes multiphysiques.
3. Simulation mécanique du support coudé : Ce chapitre applique les concepts précédents à l'étude du support coudé, avec des analyses statiques, dynamiques, fréquentielles et paramétriques pour évaluer ses performances mécaniques.
4. Étude d'optimisation topologique : Enfin, nous exploitons les outils d'optimisation pour proposer une conception améliorée du support coudé, en réduisant sa masse tout en garantissant sa résistance et sa durabilité. Cette partie d'étude a été réalisée par le biais du complément SolidWorks Simulation.

À travers cette étude, nous démontrons l'efficacité des outils numériques modernes pour la conception et l'optimisation de structures mécaniques. Les résultats obtenus fournissent des insights précieux pour les ingénieurs et les chercheurs, tout en ouvrant des perspectives pour des applications futures dans des domaines variés de l'ingénierie.

A la fin, notre travail est terminé par une conclusion générale résumant les principaux résultats obtenus ainsi que des éventuelles perspectives.

CHAPITRE I
DÉMARCHE GÉNÉRALE D'UNE SIMULATION PAR ÉLÉMENTS FINIS

CHAPITRE I

DÉMARCHE GÉNÉRALE D'UNE SIMULATION PAR ÉLÉMENTS FINIS

I-1 INTRODUCTION

Pour analyser un phénomène naturel en générale ou un problème d'ingénierie en particulier, on est souvent amené à développer un modèle mathématique pouvant décrire d'une manière aussi fiable que possible le problème en question. Le développement d'un modèle mathématique s'appuie généralement sur quelques postulats de base et plusieurs hypothèses simplificatrices pour aboutir à des équations gouvernantes qui sont souvent des équations différentielles auxquelles sont ajoutées des conditions aux limites. La résolution analytique d'équations différentielles pose parfois des difficultés insurmontables, et une solution exacte décrivant bien le problème étudié n'est pas toujours facile à trouver. Le recours aux modèles physiques et à la simulation expérimentale pour la recherche d'une solution analogue à la solution recherchée peut s'avérer coûteux en temps et en moyens.

La simulation numérique fait maintenant partie intégrante du processus de conception et validation de structures mécaniques. Les outils de simulations sont de plus en plus performants permettant une description très fine des phénomènes. De plus ces outils ne se limitent plus à la mécanique linéaire, mais sont développés pour décrire des comportements plus compliqués allant jusqu'à la ruine des structures, ce qui intéresse le domaine de la sécurité. Un chargement dynamique ou statique peut ainsi engendrer un endommagement, une fissuration puis une rupture de la structure.

La simulation numérique consiste à reproduire par le calcul le fonctionnement d'un système, préalablement décrit par un ensemble de modèles. Elle s'appuie sur des méthodes mathématiques et informatiques spécifiques. Les principales étapes de la réalisation d'une étude par simulation numérique sont communes à de nombreux secteurs de la recherche et de l'industrie, en particulier le nucléaire, l'aérospatial ou l'automobile. En chaque point de l'objet considéré, plusieurs grandeurs physiques (vitesse, température...) décrivent l'état et l'évolution du système étudié. Celles-ci ne sont pas indépendantes, mais reliées et régies par des équations, généralement aux dérivées partielles. Ces équations constituent la traduction mathématique des lois de la physique qui modélisent le comportement de l'objet. Simuler l'état de ce dernier, c'est déterminer – idéalement en tout point – les valeurs numériques de ses paramètres.

I-2 ÉNONCÉ D'UN PROBLÈME DE MÉCANIQUE

Un énoncé de problème mécanique décrit de manière claire et précise un problème physique lié à la mécanique, que ce soit au niveau de la statique, de la dynamique, de la résistance des matériaux, ou encore de la cinématique. Voici les étapes à suivre pour formuler un énoncé de problème mécanique [1] :

1- Définir le contexte du problème :

Présentation du système ou de l'objet concerné : Décrivez l'objet ou le système sur lequel porte l'analyse. Il peut s'agir d'une structure, d'une machine, d'une pièce mécanique, etc.

Conditions de départ : Préciser les hypothèses ou les conditions initiales du problème (par exemple, température, pression, vitesse initiale, etc.).

Objectif du problème : Déterminer ce qui est recherché dans ce problème (calcul de force, vitesse, déplacement, contrainte, etc.).

2- Exposer les données :

Données géométriques : Dimensions du système (longueur, diamètre, surface, etc.).

- Propriétés des matériaux : Si nécessaire, spécifie les propriétés des matériaux (densité, module de Young, coefficient de frottement, etc.).

Forces et moments appliqués : Indiquer toutes les forces externes et moments (par exemple, poids, forces de contact, forces de frottement).

Conditions aux limites : Cela peut inclure des conditions de support (fixations, appuis, des vitesses initiales, etc.)

3- Analyser le mouvement ou les interactions :

Types de mouvements ou forces : S'il s'agit d'un problème dynamique, préciser les types de mouvements impliqués (translation, rotation, mouvement oscillatoire, etc.) ou les interactions mécaniques entre les différentes parties du système.

Équations à utiliser : Lier le problème aux lois physiques pertinentes (lois de Newton, principe de conservation de l'énergie, lois de la thermodynamique, etc.).

4- Formuler clairement la question :

La question peut être de type "Quel est la force exercée par..." ou "Quelle est la vitesse finale après..." selon le type de problème. Il est important de poser une question précise à résoudre.

5- Résolution et conclusion

Décrire brièvement les étapes de résolution (analyse, calculs) et indiquer les résultats attendus.

I-3 C'EST QUOI UNE SIMULATION ?

La simulation est un processus qui consiste à créer une représentation simplifiée et abstraite d'un système, d'un phénomène ou d'une situation réelle. Cette représentation, appelée modèle, peut prendre différentes formes et se faire à l'aide de techniques diverses. C'est un outil puissant qui permet de mieux comprendre et prédire le comportement de systèmes complexes dans de nombreux domaines scientifiques et techniques. Le but de la modélisation est de mieux comprendre, analyser, prédire ou simuler le comportement du système ou du phénomène réel étudié [2].

Une simulation mécanique est une méthode utilisée pour reproduire et analyser le comportement d'un système mécanique, tel qu'une structure ou un mécanisme, sous différentes conditions. Elle est réalisée à l'aide de modèles mathématiques et de logiciels informatiques qui résolvent des équations physiques complexes, permettant ainsi de prédire les réponses du système à diverses charges, mouvements, ou contraintes. Cette approche permet de tester virtuellement des prototypes, d'optimiser des conceptions, et de prévenir des défaillances avant la fabrication physique [3].

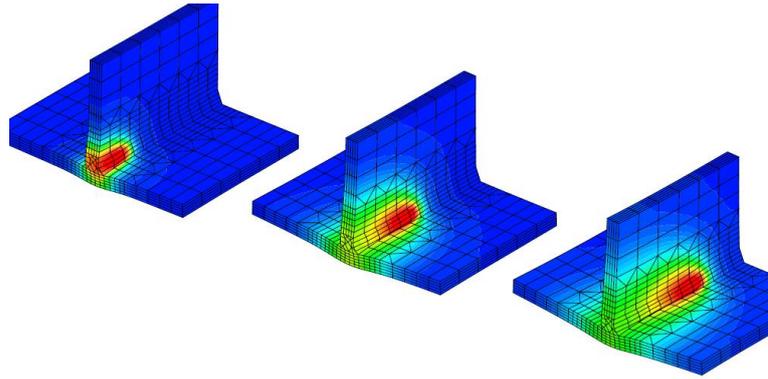


Fig.I.1 : Exemple de simulation numérique d'un système mécanique

I-4 LES AVANTAGES DE LA SIMULATION

La simulation, qu'elle soit par éléments finis (FEM) ou basée sur d'autres méthodes numériques, présente plusieurs avantages clés dans divers domaines d'ingénierie et de recherche. Voici quelques-uns des principaux avantages de la simulation :

- **Réduction des coûts** : La simulation permet de tester des conceptions sans avoir besoin de fabriquer des prototypes physiques. Cela réduit considérablement les coûts liés à la production de prototypes, aux tests physiques et aux modifications après fabrication.
- **Gains de temps** : Les simulations peuvent être réalisées beaucoup plus rapidement que des tests physiques. Cela permet d'accélérer les processus de conception, de validation et de mise sur le marché des produits.
- **Prévision du comportement** : Elle aide à prédire comment un système ou une pièce réagira sous diverses conditions de charge, température, ou autres contraintes. Cela permet de s'assurer que le produit sera fiable et performant dans des situations réelles.
- **Optimisation de la conception** : La simulation offre la possibilité d'explorer une large gamme de scénarios, de modifier des paramètres et de tester différentes configurations avant de choisir la meilleure. Cela aide à optimiser les performances du produit tout en minimisant les défauts.
- **Analyse de scénarios complexes** : La simulation permet de modéliser des phénomènes physiques complexes qui seraient difficiles, voire impossibles, à analyser avec des méthodes expérimentales classiques (interactions fluide-structure, thermique-électromagnétique, comportements non linéaires, ...).
- **Sécurité améliorée** : Grâce aux simulations, il est possible de tester des scénarios extrêmes, tels que des conditions de défaillance ou des événements catastrophiques, sans risquer de compromettre la sécurité des individus ou des équipements.
- **Flexibilité et itération rapide** : Il est possible de modifier rapidement les paramètres de la simulation pour tester différentes hypothèses, ce qui n'est pas possible avec des tests physiques.
- **Meilleure compréhension des comportements physiques** : La simulation permet de visualiser et d'analyser des phénomènes physiques difficiles à observer directement dans la réalité.
- **Validation de conformité** : La simulation permet de s'assurer que les produits ou systèmes respectent les normes et les réglementations de l'industrie avant leur fabrication ou leur mise en service, garantissant ainsi leur conformité avec les exigences légales et de performance.

En résumé, la simulation est un outil précieux qui permet d'améliorer l'efficacité, de réduire les coûts, d'accélérer le processus de conception, et de garantir la sécurité et la fiabilité des produits ou systèmes avant leur production physique [4].

I-5 METHODE DES ÉLÉMENTS FINIS

I-5-1 Généralités

Les codes éléments finis font maintenant partie des outils couramment utilisés lors de la conception et l'analyse des produits industriels. Les outils d'aide à la modélisation devenant de plus en plus perfectionnés, l'utilisation de la méthode des éléments finis s'est largement développée et peut sembler de moins en moins une affaire de spécialistes. Si l'utilisation de la méthode se démocratise de par la simplicité croissante de mise en œuvre, la fiabilité des algorithmes et la robustesse de la méthode.

L'idée fondamentale de cette méthode est de discrétiser le problème en décomposant le domaine matériel à étudier en éléments de forme géométrique simple. Il ne reste alors qu'à assembler les formes matricielles élémentaires pour obtenir les équations relatives à la structure à étudier. [5]

Dans la méthode des éléments finis, au lieu de résoudre le problème pour l'ensemble du corps en une seule opération, nous formulons les équations pour chaque élément fini, puis les combinons pour obtenir la solution pour l'ensemble du corps.

I-5-2 Domaines d'application

Les principaux domaines d'application de la MEF sont résumés dans le tableau ci-dessous.

Spécialité	Problèmes d'équilibre	Problèmes de valeurs propres	Problèmes de propagation
Génie mécanique	Problème de concentration des contraintes. Analyse de contrainte de pistons, de matériaux composites, etc.	Fréquences propres de vibrations et stabilité des machines.	Problèmes de fissures et de fractures sous charges dynamiques.
Génie Civil	Analyse statique de structures : treillis, portiques, plaque, coques, voiles, ponts, béton précontraint.	Fréquences et modes propres et stabilité des structures.	Réponse des structures à des charges accidentelles (séisme, incendie).
Hydraulique	Analyse d'écoulements potentiels, d'écoulements à surface libre, écoulement visqueux. Analyse de structures hydrauliques et barrages, etc.	Périodes et modes propres de bassins superficiels, digues, mouvements des liquides dans des bacs (conteneurs) rigides ou flexibles.	Analyse de problèmes d'écoulements turbulents et propagation d'ondes. Écoulements hydrodynamiques.

Tableau I-1 : Quelques domaines d'application de la MEF [6] :

I-5-3 : Les bases de la MEF

La méthode des éléments finis est une méthode basée sur les trois branches suivantes [7] :

I-5-3-1 Les lois du physique

Ce sont les sciences de l'ingénieur telles que la mécanique des milieux continus, l'élasticité, la plasticité, la mécanique générale, la mécanique des fluides, la thermodynamique, la dynamique des structures ...etc. Après avoir établi le modèle physique, l'ingénieur doit chercher le modèle mathématique adéquat qui décrit fidèlement le phénomène physique en question à l'aide d'une fonctionnelle unique.

I-5-3-2 L'analyse numérique

C'est une branche des mathématiques qui utilise les méthodes d'approximations dans la résolution des équations polynomiales, algébriques linéaires et non linéaires par les méthodes matricielles, les équations différentielles ...etc.

L'analyse numérique s'avère très efficace pour la méthode des éléments finis. En pratique, la résolution par les méthodes directes est presque inutilisable. Par contre, par le biais des méthodes de l'analyse numérique, on peut arriver à la solution en quelques minutes.

I-5-3-3 L'informatique appliquée

C'est un moyen puissant pour pouvoir résoudre les systèmes d'équations en un temps très réduit. On utilise parfois des mini-ordinateurs ou même des stations de calcul pour résoudre les problèmes de grande taille.

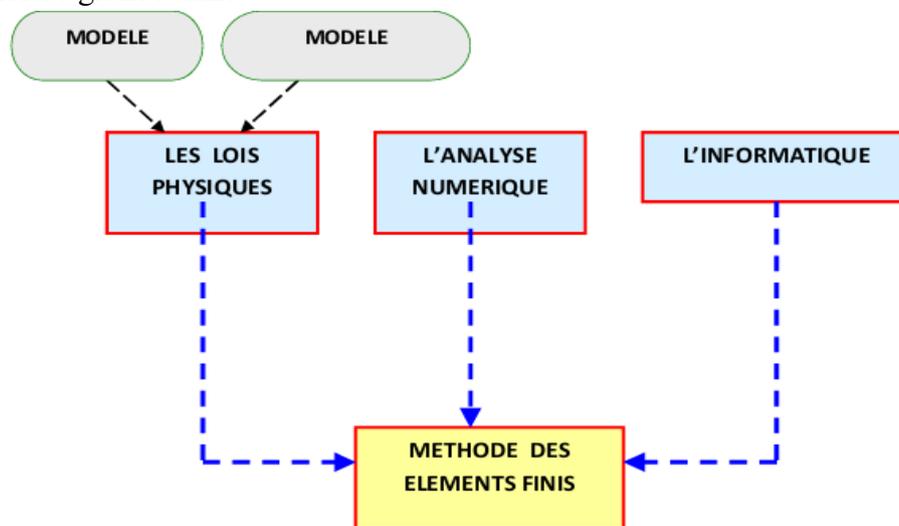


Fig.I.2 : Les bases de la MEF

I-5-4 : Types de problèmes en éléments finis

La MEF permet de résoudre trois types de problèmes principaux :

I-5-4-1 Problèmes d'équilibre stationnaire :

Dans ce type de problème, le comportement est défini en fonction de l'état du système, de sa géométrie, des sollicitations et des conditions aux limites. On trouve dans cette catégorie,

l'équilibre statique et les régimes stationnaires d'écoulement, de transfert thermique et d'électromagnétisme.

I-5-4-2 Problèmes aux valeurs propres :

Il s'agit des phénomènes de vibration ou d'instabilité d'un état stationnaire. Les modes propres de vibration, le flambage des structures ou l'instabilité des flux laminaires font parties de cette catégorie.

I-5-4-3 Problème dépendant du temps :

Lorsque l'état du système dépend de son histoire ou bien des paramètres de sorties, le système devient interdépendant et la résolution directe n'est plus possible. Ce cas inclus par exemple le comportement en dynamique non linéaire, les régimes transitoires et la fissuration des pièces [8].

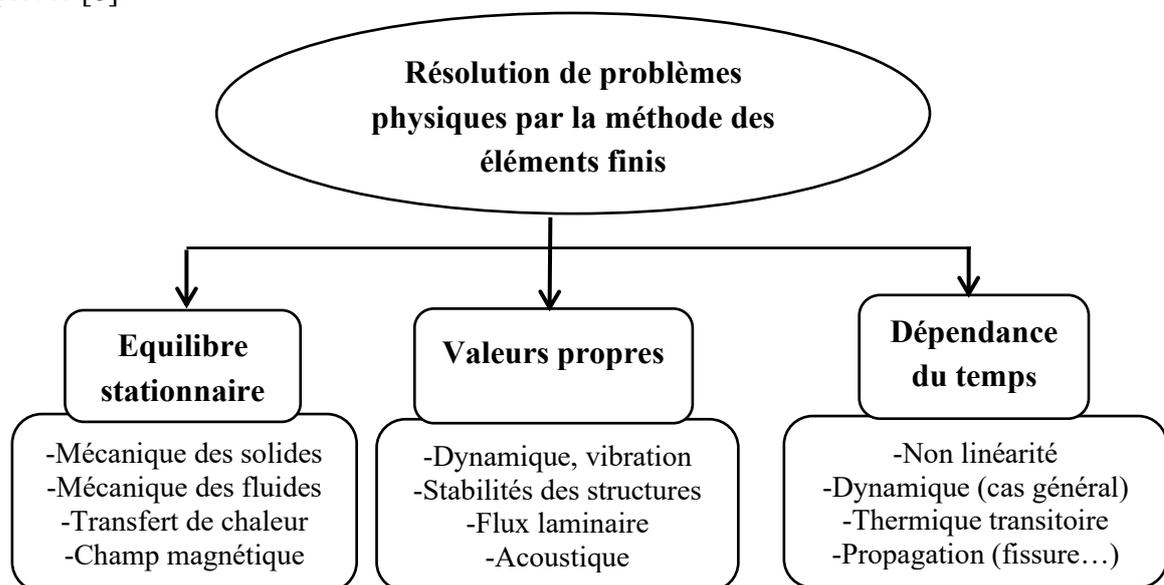


Fig. I.3 : Différents types de problème en éléments finis

I-5-5 : Etapes de base de la MEF

La méthode des éléments finis permet la résolution de problèmes mécaniques dans le domaine statique, dynamique, linéaires et non linéaires, ainsi que d'autres problèmes comme la mécanique des fluides, le transfert de chaleur, etc. Elle s'adapte bien aux géométries complexes et irrégulières.

Dans la méthode des éléments finis, le domaine géométrique Ω (Poutre, Plaque, Coque, Solide... etc.) est divisé (discrétisé) en plusieurs sous-domaines Ω_{ei} de géométries simples. Les fonctions d'approximation par éléments finis sont déterminées en termes de valeurs nodales (au niveau des nœuds) de la grandeur physique recherchée (champs de déplacements, champs de contraintes etc.)

La méthode est un ensemble d'approximation consécutives de la géométrie, la variable physique et de l'intégration mathématique sur le domaine. [5]

L'ensemble de ces approximations peut se résumer dans les étapes suivantes :

Etape 1 : Formulation des équations gouvernantes et des conditions aux limites.

Etape 2 : Division du domaine en sous domaines (discrétisation).

Etape 3 : Assemblage et application des conditions aux limites.

Etape 4 : Résolution du système global :

Etape 5 : Calculez les déformations et les contraintes des éléments.

Etape 6 : Interpréter les résultats :

Les étapes précédentes sont résumées dans l'organigramme suivant :

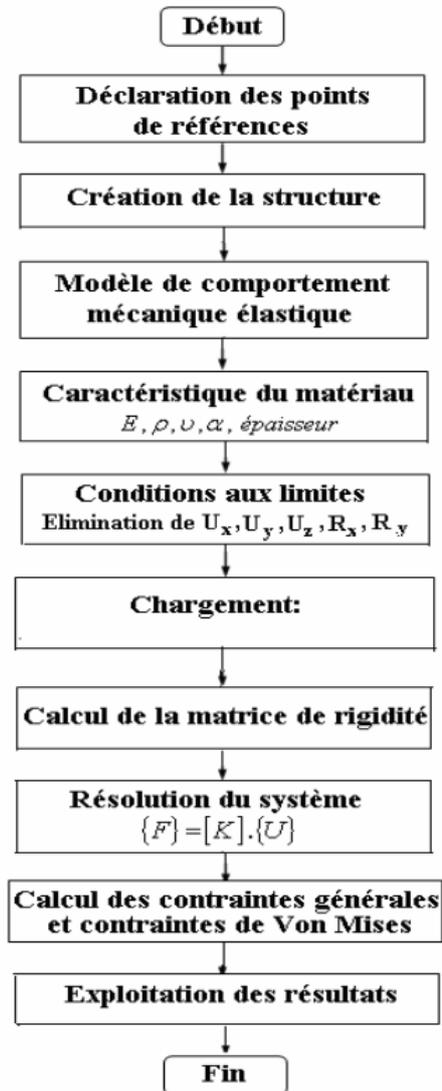


Fig. I.4 : Etapes de la MEF appliquée à un problème de mécanique [10]

I-5-6 Types d'éléments utilisés dans la MEF

Le domaine de résolution est discrétisé en sous-domaines appelés éléments. Ces éléments, dans l'analyse en éléments finis, sont les briques élémentaires dont le maillage va représenter le système géométrique à simuler. Les éléments sont des primitives géométriques composées de plusieurs nœuds. La figure ci-dessous représente des exemples d'éléments classiques en 1D, 2D et 3D que l'on rencontre généralement dans un maillage par éléments finis.

Certains éléments finis ont des nœuds intérieurs pour améliorer la précision, mais l'utilisateur ne travaille pas avec ces nœuds. Ils sont générés et ensuite condensés dans la phase

de calcul des matrices de rigidité des éléments. En connectant les éléments ensemble, la quantité de champ devient interpolée sur l'ensemble de la structure.

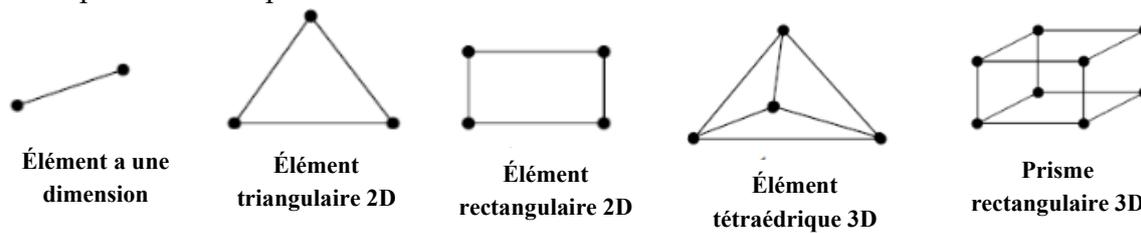


Fig. I.5 : Différents types d'éléments utilisés

I-6 LES PRINCIPAUX LOGICIELS DE SIMULATION PAR LA MEF

Les logiciels de simulation par la méthode des éléments finis (FEM) sont largement utilisés dans de nombreux domaines tels que la mécanique, l'aéronautique, l'automobile, la génie civil, et d'autres secteurs industriels pour simuler et analyser des comportements physiques complexes. Voici quelques-uns des principaux logiciels de simulation FEM :

1-ANSYS : Un des leaders du marché dans le domaine de la simulation numérique, ANSYS est utilisé pour la simulation de structures, de fluides, de thermique, d'électromagnétisme, etc. Il propose des outils puissants pour l'analyse statique, dynamique, thermique, électromagnétique, etc.

2-Abaqus : est un logiciel de simulation avancé qui est particulièrement réputé pour ses capacités d'analyse non linéaire, de matériaux composites et de simulation de crash. Il est largement utilisé dans l'industrie automobile et aéronautique.

3-COMSOL Multiphysics : permet la modélisation et la simulation de phénomènes physiques couplés, tels que les interactions fluides-structures, la thermique et l'électromagnétisme. Il dispose également d'une interface de programmation de modélisation multiphysique qui est très flexible.

4-MSC Nastran : Un autre logiciel bien établi dans le domaine de la simulation par éléments finis. MSC Nastran est utilisé pour des analyses de structures, de vibrations, de transfert thermique, de fatigue, et autres applications spécifiques comme les simulations dynamiques.

5-Altair HyperWorks : Un ensemble de logiciels de simulation intégrés qui offrent une plateforme pour l'analyse de structures, la mécanique des fluides, l'optimisation, etc. Il est particulièrement apprécié dans l'industrie automobile pour sa capacité à effectuer des optimisations topologiques.

6-Siemens NX (Unigraphics) : C'est une suite logicielle qui permet des simulations FEM de haute qualité pour la conception de produits complexes. Il offre des outils puissants pour l'analyse structurelle, thermique, dynamique, et pour les analyses multiphysiques.

7-OpenFOAM : Bien que principalement orienté vers la simulation des fluides, il peut également être utilisé pour des simulations FEM dans des contextes plus spécifiques. Il est particulièrement adapté pour la modélisation de flux complexes et de phénomènes multiphysiques.

8-SALOME : C'est une plateforme de simulation open-source qui permet l'intégration de plusieurs outils de simulation, y compris pour la méthode des éléments finis. Il est souvent utilisé dans la recherche académique et pour des applications industrielles spécifiques.

9-Code_Aster : C'est un logiciel de simulation numérique open-source développé par EDF (Électricité de France). Il est principalement utilisé pour des analyses de structures et thermomécaniques complexes.

I-7 DÉMARCHE GÉNÉRAL D'UNE SIMULATION PAR LA MEF

Lors d'une simulation par éléments finis, on distingue de manière générale 3 grandes étapes pour la réalisation d'un calcul. La démarche générale pour la réalisation d'une étude par la méthode des éléments finis et principalement la démarche d'une analyse de structure mécanique, suit généralement les étapes suivantes :

I-7-1 Etape 1 : Pré-traitement / Préparation du modèle (Preprocessing)

I-7-1-1 Réalisation de la géométrie

La première étape de la méthode de calcul par éléments finis consiste à réaliser la géométrie du système à étudier. Une géométrie dans un calcul par élément finis peut alors prendre plusieurs formes (Volumique (3D), Surfactive (2D), Linéique (1D), Ponctuelle (0D).)

De manière général, les logiciels de calcul par éléments finis intègrent un éditeur de géométrie afin de réaliser la géométrie directement sur le logiciel. Néanmoins, dans la pratique la géométrie est réalisée le plus souvent sur un logiciel de Conception Assisté par Ordinateur (CAO) pour ensuite être importée dans le logiciel de calcul.

I-7-1-2 Simplification de la géométrie

La géométrie d'un système possède un certain nombre de complexités géométriques nécessaires du fait de leurs fonctionnalités. Dans certains cas, une simplification peut être réalisée sur cette géométrie afin de travailler sur une géométrie optimisée pour le calcul.

a- Simplification de géométrie symétrique

Lorsqu'un système étudié possède un ou plusieurs plans de symétrie, une simplification géométrique est possible afin de réaliser un modèle uniquement constitué de la partie symétrique de celui-ci. Une simplification de ce type permet alors de travailler sur un modèle de dimension réduite et donc de gagner en ressource de calcul.

b- Simplification de géométrie de révolution (axisymétrique)

Lorsque la géométrie du système étudié est une géométrie de révolution, il est possible de réaliser l'étude sur la géométrie surfactive (2D) du plan de révolution en utilisant des éléments spécifiques. Cette simplification n'est possible uniquement dans le cas de chargement axisymétrique.

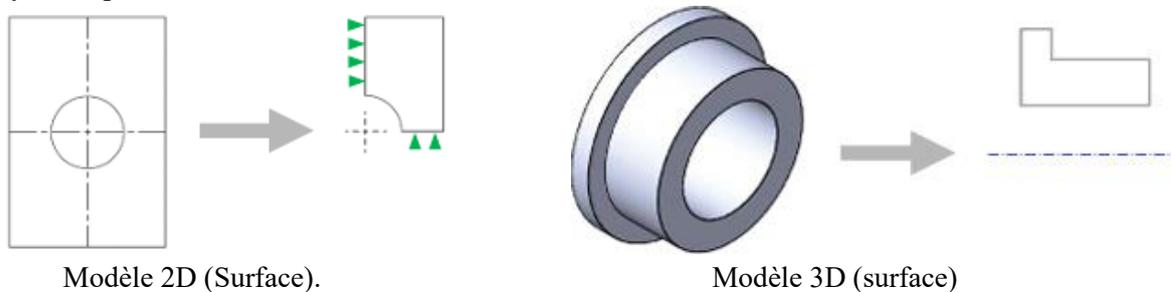


Fig.I.6 : Exemple des modèles (surface)

c- Simplification dimensionnelle géométrique

La méthode de calcul par élément finis permet dans certains cas d'étudier un système complexe volumique en simplification dimensionnelle grâce à des éléments spécifiquement dédiés. Par exemple, les éléments poutres dédiés permettent de retranscrire le comportement d'une poutre grâce à des éléments 1D.

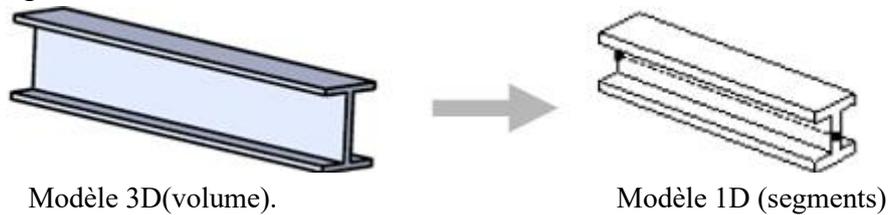


Fig.I.7 : Exemples des modèles

I-7-1-3 Définition des propriétés des matériaux

a- Introduction aux propriétés des matériaux

De manière générale, le choix d'un matériau pour une application donnée est la conséquence de propriétés adaptées dans un ou plusieurs domaines ciblés. On distingue plusieurs types de propriétés des matériaux :

- Propriétés mécaniques : (modules d'élasticité, limite d'élasticité, viscosité, vitesse de fluage, amortissement, charge à la rupture, résistance à la fatigue, ...)
- Propriétés physiques : (conductibilité électrique, aimantation, conductibilité thermique, chaleur spécifique, température et chaleur latente, énergie de surface, masse volumique...)
- Propriétés chimiques : (résistance à la corrosion, à l'oxydation, stabilité.)

Lors d'une simulation par la méthode des éléments finis, ces propriétés du matériau sont donc à retranscrire d'un point de vue numérique au modèle.

b- Loi des comportements des matériaux

Le comportement mécanique d'un matériau est régi par sa loi de comportement. Cette loi est identifiée à la suite de la réalisation d'essais. Elle permet de modéliser le comportement mécanique en identifiant des propriétés clés permettant de caractériser son comportement. La loi de comportement d'un matériau relie la contrainte au sein du matériau à sa déformation.

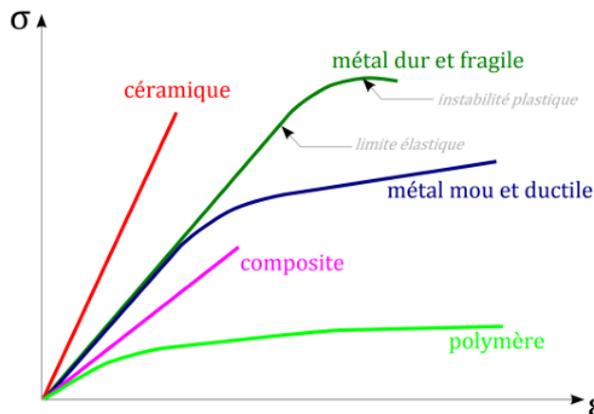


Fig.I.8 : Loi de comportement des différents matériaux

Il existe une multitude de lois matériaux permettant de représenter chaque type de matériau.

- Loi élastique isotrope linéaire (acier, aluminium, titane, ...),

- Loi élasto-plastique (loi de comportement admettant une certaine plasticité),
- Loi de matériaux composites (composites stratifiés, sandwich, ...),
- Loi hyper-élastique (élastomères),
- Loi viscoélastique (certains polymères).

I-7-1-4 Définition du type d'éléments utilisés

Lors d'une analyse par éléments finis la géométrie est discrétisée par un certain nombre d'éléments. Cette discrétisation est réalisée avec des éléments pouvant être de plusieurs formes. Le type d'éléments choisi pour réaliser le maillage est directement lié à la géométrie qui est à discrétiser.

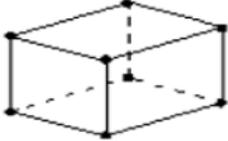
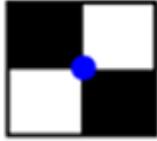
			
Volumique 3D	Surfacique 2D	Unidimensionnel 1D	Ponctuel 0D

Tableau I-2 : Types d'éléments utilisés dans la MEF

a- Degrés d'interpolation des éléments

Dans un modèle par éléments finis, les éléments sont définis par rapport à ce qu'on appelle le « degré d'interpolation » correspondant aux fonctions de formes. Cette grandeur définit l'interpolation des valeurs entre deux nœuds d'un élément. Un élément avec une interpolation plus élevée convergera plus rapidement mais demandera plus de ressources de calcul.

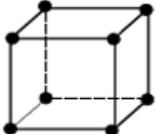
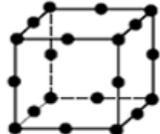
On distingue deux types d'interpolation :

- 1er ordre / linéaire
- 2ème ordre / quadratique (avec nœuds intermédiaire [midside node])
- 3ème ordre / cubique

b- Eléments volumiques – 3D

Ces éléments sont utilisés pour discrétiser une géométrie volumique.

Pour des calculs de structure mécanique les éléments quadratiques sont à privilégier.

Forme	Interpolation linéaire	Interpolation quadratique
Tétraédrique	 TE4 – 4 nœuds	 TE10 – 10 nœuds
Hexaédrique	 H8 – 8 nœuds	 H20 – 20 nœuds

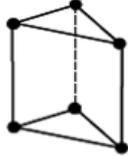
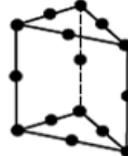
Prismatique	 P6 – 6 nœuds	 P15 – 15 nœuds
-------------	---	---

Tableau I-3 : Types d'éléments 3D

c- Élément surfacique – 2D

Ces éléments sont utilisés pour discrétiser une géométrie plane.

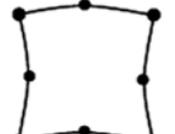
Forme	Interpolation linéaire	Interpolation quadratique
Triangulaire	 T3 - 3 nœuds	 T6 – 6 nœuds
Quadrangle	 Q4 – 4 nœuds	 Q8 – 8 nœuds

Tableau I-4 : Types d'éléments 2D

d- Élément unidimensionnel – 1D

Ces éléments sont utilisés pour discrétiser une géométrie linéique.

Forme	Interpolation linéaire	Interpolation quadratique
Ligne / Courbe	 L1 – 2 nœuds	 L2 – 3 nœuds

Tableau I-5 : Types d'éléments 1D

I-7-1-5 Réalisation du maillage de la géométrie

Lors d'une analyse par éléments finis le maillage est primordial, puisque c'est de lui que sont construits et extrait les résultats. Lors de l'opération de maillage, l'algorithme du logiciel (qui décompose la géométrie en plusieurs éléments) déforme les éléments afin qu'ils puissent prendre la forme de la géométrie. Les éléments ainsi déformés possèdent les mêmes équations physiques de modélisation qu'un élément de dimension parfaite. Un exemple de maillage est présenté sur la figure ci-dessous.

Un modèle avec un grand nombre d'éléments demandera des ressources de calculs conséquentes et donc un temps de calcul élevé. Un compromis entre précision et temps de calcul est alors à trouver, dépendant du système à étudier.

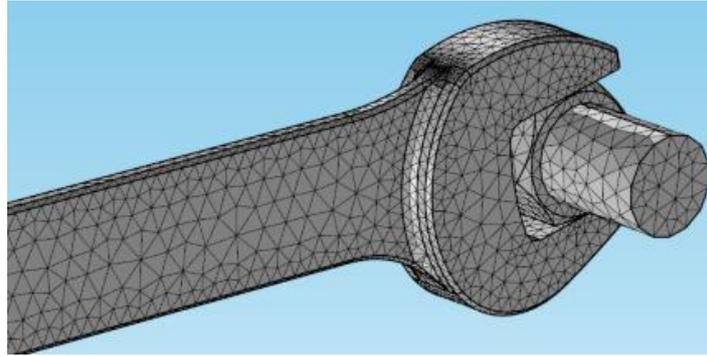


Fig.I.9 : Exemple de maillage

I-7-1-6 Application des conditions aux limites

Lors d'un calcul par éléments finis il est impératif de bien conditionner le modèle, dans le but de retranscrire au mieux lors de la simulation, le comportement du système réel. On distingue alors plusieurs conditions aux limites pouvant être imposées au modèle dans plusieurs directions possibles. Les principaux étant des blocages en translation, en rotation ou des déplacements imposés.

Le calcul par éléments finis se basant sur un équilibre entre les efforts extérieurs et les chargements. L'application des conditions aux limites est toujours appliquée sur les nœuds des éléments. Néanmoins de manière générale, il est plus facile d'imposer des conditions aux limites sur la géométrie du modèle (point, ligne, surface et volume) qui seront ensuite retranscrites par le logiciel aux nœuds associés.

I-7-1-7 Application des chargements

La méthode de calcul par élément finis permet de prendre en considération plusieurs types de chargements sur le modèle (Effort, Moment, Chargement à distance, Pression, Température, etc...)

L'application des chargements est toujours appliquée sur les nœuds des éléments. Néanmoins de manière générale, il est plus facile d'imposer des chargements sur la géométrie du modèle (point, ligne, surface et volume) qui seront ensuite retranscrites par le logiciel aux nœuds associés.

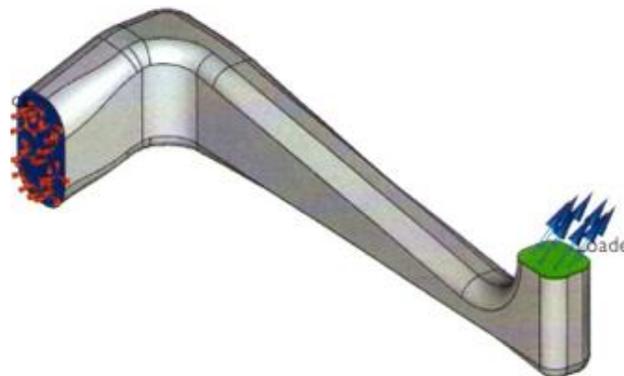


Fig.I.10 : Exemple de conditions aux limites et chargement

I-7-2 Etape 2 : Calcul (Solveur)

I-7-2-1 Paramétrage de l'étude

La méthode de calcul par éléments finis permet de résoudre plusieurs problèmes physiques à travers différents types d'analyses. L'étape du paramétrage de l'étude doit définir quel type d'analyse doit être réalisée.

a- Analyse statique

L'analyse statique est l'analyse classiquement la plus utilisée en calcul des structures. Elle correspond à l'étude de système soumis à des efforts permanents (indépendance de la temporalité).

Equation fondamentale de la statique : $[K]\{U\}=\{F\}$

$\{U\}$: Vecteur des degrés de liberté du système (inconnus à déterminer pour résoudre l'analyse).

Il correspond aux déplacements et aux rotations des nœuds.

$[K]$: Matrice de rigidité caractérisant le système.

$\{F\}$: Vecteur des sollicitations mécaniques appliquées sur le système.

b- Analyse dynamique

L'analyse dynamique est une analyse d'une structure dans des conditions à évolution temporelle. Ce type d'étude est plus complexe et nécessite la définition de « pas de temps » et « d'itération » pour la réalisation du calcul.

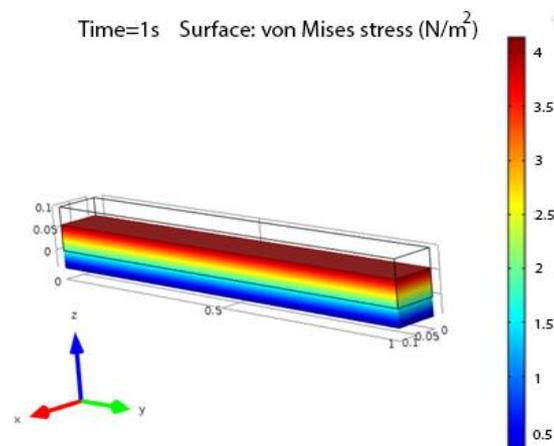


Fig.I.11 : Exemple d'analyse dynamique

c- Analyse modale

Chaque système possède un certain nombre de modes propres correspondant à des fréquences de vibrations naturelles de celui-ci. La réalisation d'une analyse modale (ou analyse fréquentielle) permet d'identifier ces modes de vibration.

Pour le calcul des différents modes propres, seule la masse et la raideur sont prises en compte, il est donc important de les modéliser le plus fidèlement possible. Dans le cadre d'une analyse modale le système possède autant de fréquences propres que de degré de liberté (DDL / DOF). Néanmoins, de manière générale, on s'intéresse uniquement aux premiers modes propres.

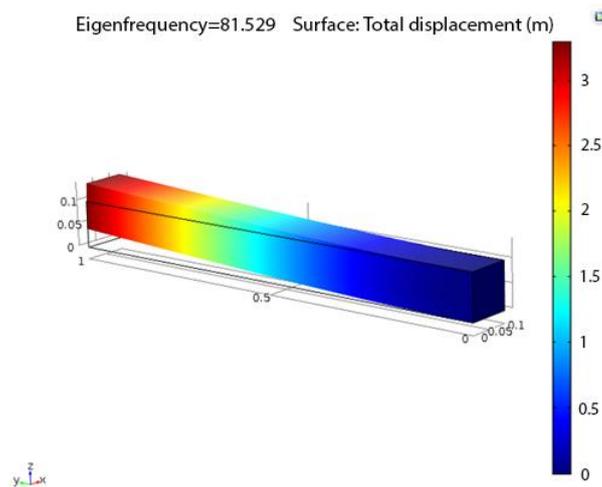


Fig.I.12 : Exemple d'analyse modale

d- Analyse en réponse harmonique

Une analyse harmonique est une étude où on excite un système selon une plage de fréquences donnée, dans le but d'analyser sa réponse fréquentielle.

e- Analyse modale de flambement (Buckling)

Une analyse de flambement peut être réalisée dans le but d'identifier le comportement d'une structure sous charge de flambement. Une analyse de ce type doit être réalisée à la suite d'une analyse statique avec un chargement unitaire afin d'identifier le facteur de « rigidité géométrique » de la structure.

f- Optimisation paramétrique

Une analyse de type optimisation paramétrique permet de pouvoir optimiser un modèle selon différents critères définis dans le paramétrage de l'analyse en jouant sur des variables géométriques ou matériaux par exemple.

g- Optimisation topologique

Une analyse de type optimisation topologique permet d'optimiser la forme d'un modèle en optimisant la souplesse du modèle (compliance). Ce type d'étude est fortement utilisée pour la fabrication additive. L'idée générale est de partir d'un « bloc de matière » et d'identifier par certains critères, où il est possible d'enlever de la matière.

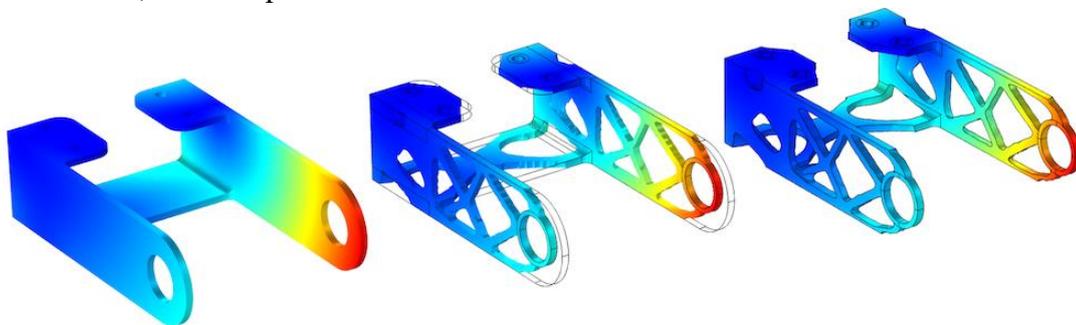


Fig.I.13 : Illustration d'une optimisation topologique

h - Etude Thermique

Une analyse thermique permet d'étudier les échanges thermiques de différents systèmes.

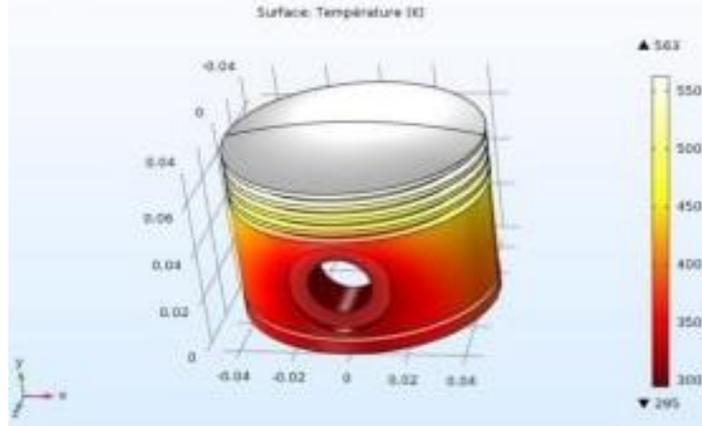


Fig.I.14 : Etude Thermique d'un piston

i - Non linéarité d'une analyse

Dans le cas général, des équations d'ordre linéaire suffisent à modéliser convenablement la physique du réel. Néanmoins dans certains cas de figure, une analyse plus poussée avec des équations représentant la physique avec des équations non linéaires est alors nécessaire. On distingue plusieurs cas de non linéarité dans le cadre d'une analyse par éléments finis.

I-7-2-2 Réalisation du calcul

Une fois l'étude définie et paramétrée le calcul peut être lancé par le logiciel. De manière générale, il est préférable d'enregistrer le modèle directement sur le poste de calcul et non sur un réseau externe.

En effet, durant le calcul des fichiers résultats seront enregistrés dans le dossier de l'étude et seront en permanence en écriture et en lecture par le logiciel. Le fait d'enregistrer l'analyse en local permet donc de gagner en temps de calcul.

I-7-3 Etape 3 : post-traitement / Analyse des résultats (Postprocessing)

I-7-3-1 Extraction des résultats souhaités

De manière générale chaque analyse propose d'extraire les résultats principaux de l'étude de manière automatique. Néanmoins il est possible d'extraire des résultats supplémentaires dans le cas où c'est nécessaire.

I-7-3-2 Analyse des résultats du modèle

Une fois l'analyse terminée la première étape consiste à examiner la pertinence des résultats. Pour une analyse de structure, il s'agit d'examiner le type de déformation du modèle, et l'ordre de grandeur de contrainte et de déplacement.

a- Notion de contrainte

En mécanique, la contrainte est une grandeur physique correspondant à la pression interne d'un système. La contrainte est liée aux différentes sollicitations que subit un système.

Lorsqu'un système est sollicité mécaniquement très sévèrement, cette contrainte peut atteindre une valeur trop importante, valeur dépendant du matériau, qui mène à la ruine mécanique du système. Cette valeur numérique peut être positive dans le cadre de traction et négative en compression.

Dans le cadre d'étude mécanique pour le dimensionnement de structure métallique on utilise principalement la contrainte de Von Mises. Cette contrainte donne un état des lieux général de la contrainte au sein de la pièce.

b- Vérification du modèle – Equilibre des Forces

Une vérification de l'équilibre des forces peut être réalisée afin de vérifier la cohérence et le bon conditionnement du modèle (balance des forces) : la somme des actions extérieures (chargement) appliquée doit être égale aux réactions sur toutes les conditions aux limites.

Cette vérification est primordiale pour vérifier que les chargements sont correctement appliqués au modèle. En effet, il est bon d'avoir en mémoire que certaines erreurs peuvent être commises lors de l'application d'efforts sur le modèle en sélectionnant plusieurs entités. En effet, lors de l'application d'un effort, celui-ci peut être partagé entre toutes les entités sélectionnées, ou bien être identique pour chaque entité.

I-7-3-3 Exploitation des résultats

L'exploitation des résultats ne peut être réalisée qu'une fois que la pertinence des résultats a été examinée. La plupart des logiciels proposent des rapports de calculs automatiques, globalement ces rapports sont plutôt bien réalisés et plutôt corrects pour les études simples. Néanmoins, des ajouts ou un rapport rédigé à la main sont parfois nécessaires.

Il est préconisé que les informations suivantes soient retranscrites dans le rapport :

- Nom du projet, date et rédacteur du rapport
- Plan ou schéma du projet
- Logiciel de calculs et sa version utilisée
- Matériaux utilisés avec le détail de leurs propriétés
- Type d'étude réalisée
- Hypothèses considérées dans l'analyse
- Schéma explicatif des chargements et des conditions limites
- Illustration du maillage, avec description du type d'éléments ainsi que le nombre de nœuds
- Critères de vérification du maillage utilisés
- Présentation des résultats
- Conclusion [9]

I-8 CONCLUSION

La méthode des éléments finis (MEF) s'impose aujourd'hui comme une approche incontournable pour la modélisation et la résolution de problèmes complexes en ingénierie.

Avec l'évolution des technologies numériques, la MEF continue de se perfectionner. L'intégration de l'intelligence artificielle et l'utilisation du calcul haute performance ouvrent de nouvelles perspectives, permettant de traiter des systèmes toujours plus complexes avec une précision accrue. Ces avancées renforcent le rôle central de la MEF dans les processus de conception modernes, en faisant un outil indispensable pour innover tout en maîtrisant les coûts et les risques. Une validation expérimentale reste souvent indispensable, notamment pour les analyses non linéaires impliquant des phénomènes complexes comme le contact ou la plasticité.

En définitive, ce chapitre a permis de poser les bases théoriques et pratiques de la simulation par éléments finis. Il en a souligné à la fois la puissance et les limites, mettant en lumière l'importance d'une approche rigoureuse et critique pour en tirer le meilleur parti. La MEF demeure ainsi un pilier de l'ingénierie numérique, dont les applications ne cessent de s'étendre à de nouveaux domaines et défis technologique

CHAPITRE II
PRÉSENTATION DU CODE DE SIMULATION UTILISÉ

CHAPITRE II

PRÉSENTATION DU CODE DE SIMULATION UTILISÉ

II-1 INTRODUCTION

La simulation numérique est devenue un élément indispensable dans les domaines des sciences et de l'ingénierie. Elle permet de comprendre et de modéliser le fonctionnement des systèmes réels. Aujourd'hui une large gamme d'outils numériques est disponible. Elle repose sur la mise en œuvre des modèles théoriques utilisant différents outils mathématiques dont la technique des éléments finis. La simulation numérique permet d'étudier le fonctionnement et les propriétés d'un système modélisé ainsi qu'à en prédire son évolution. Il est très intéressant d'avoir un environnement de simulation qui inclut la possibilité d'ajouter différents phénomènes physiques au modèle étudié. C'est dans cette philosophie que Comsol Multiphysics a été développé.

Dans ce chapitre, nous allons présenter l'outil de simulation Comsol Multiphysics que nous avons utilisé dans ce travail. Nous commencerons par donner quelques logiciels permettant la simulation dite par éléments finis (FEM), avant de donner une description détaillée sur le logiciel Comsol Multiphysics et comment nous avons procédé pour modéliser notre système.

II-2 DÉFINITION

Comsol Multiphysics, anciennement appelé FEMLAB, est un outil de résolution des équations aux dérivées partielles (PDE) par la méthode des éléments finis. Sa particularité est de disposer d'une base de données d'équations permettant de modéliser différents phénomènes physiques, comme l'électrostatique, la magnétostatique, l'électrodynamique, l'écoulement de fluides, la déformation des matériaux, ainsi que de multiples phénomènes physiques modélisés en PDE.

Ce logiciel permet de simuler de nombreuses applications en ingénierie, et tout particulièrement les phénomènes couplés ou simulations multiphysiques [15]. C'est un logiciel de calcul numérique par éléments finis modulaire permettant de modéliser une grande variété de phénomènes physiques caractérisant un problème réel. Il sera également un outil de conception grâce à son aptitude à gérer les géométries 3D complexes [12].

Grace à sa flexibilité et à sa capacité à résoudre des problèmes couplés de manière efficace, COMSOL est rapidement devenu un outil incontournable dans le domaine de la simulation numérique. Aujourd'hui, il est utilisé dans de nombreux secteurs, y compris l'ingénierie, la biotechnologie, l'aérospatiale, l'automobile et l'énergie, et continue d'évoluer avec l'ajout de nouveaux modules et fonctionnalités.



Fig.II.1 : Logo du COMSOL Multiphysics

II-3 UTILITÉ DE COMSOL

COMSOL Multiphysics est un logiciel permettant la simulation de systèmes multiphysiques complexes, c'est-à-dire des systèmes qui impliquent plusieurs phénomènes physiques simultanément. Il est utilisé dans divers domaines pour plusieurs raisons :

- **Simulation multiphysique** : COMSOL permet de coupler des phénomènes physiques différents dans un même modèle. Par exemple, il peut résoudre simultanément les phénomènes de mécanique des fluides, de thermodynamique et d'électromagnétisme pour étudier des systèmes comme des moteurs électriques ou des échangeurs thermiques.
- **Modélisation détaillée** : Le logiciel permet de créer des modèles géométriques complexes et de définir les propriétés des matériaux, de résoudre les équations différentielles pertinentes et d'appliquer des conditions aux limites adaptées.
- **Méthode des éléments finis (FEM)** : COMSOL utilise la méthode des éléments finis pour résoudre des équations différentielles complexes dans des domaines variés, tels que la mécanique des structures, la thermique, les fluides et l'électromagnétisme.
- **Optimisation de la conception** : COMSOL est souvent utilisé pour l'optimisation de la conception des produits. Par exemple, il permet de tester différents scénarios et de modifier les paramètres du modèle pour améliorer les performances ou réduire les coûts de production.
- **Applications industrielles** : Le logiciel est utilisé dans divers secteurs industriels, notamment l'industrie automobile, l'aérospatiale, l'énergie, la biotechnologie, et l'électronique. Il permet de simuler des systèmes de production d'énergie, des moteurs à combustion, des dispositifs microélectroniques, des circuits intégrés, et bien d'autres.
- **Interfaces personnalisables** : COMSOL permet également aux utilisateurs de créer des interfaces personnalisées et d'utiliser des scripts pour intégrer des fonctions spécifiques ou automatiser des tâches complexes de simulation [14].

II-4 PRINCIPE D'UTILISATION

L'utilisateur définit ses couplages ou sélectionne les interfaces prédéfinies. Les étapes du processus de modélisation sont intégrées dans une seule interface. Des modules d'applications optionnels offrent des interfaces spécialisées notamment en mécanique linéaire et non-linéaire, acoustique, écoulement, transfert de chaleur, génie chimique, géophysique, électromagnétisme basse et haute fréquence, corrosion, plasma, suivi de particules, optimisation, MEMS, ainsi qu'avec les logiciels de CAO et Matlab. Ce logiciel est multiplateforme (Windows, Mac, Linux). En plus des physiques précitées, COMSOL

Multiphysics autorise l'utilisateur à définir ses propres systèmes d'équations aux dérivées partielles (EDP), soit sous forme différentielle, soit sous formulation faible. Les couplages avec des équations aux dérivées ordinaires (EDO) et des équations algèbro-différentielles (EAD) sont également possibles [15].

II-5 DOMAINES D'APPLICATION SPÉCIFIQUES DE COMSOL

- **Génie mécanique :**

- Analyse des contraintes et des déformations : COMSOL permet de simuler les déformations, les contraintes mécaniques et les vibrations des structures sous différentes conditions, qu'elles soient statiques ou dynamiques.

- Interaction fluide-structure : Il permet de modéliser les interactions entre les matériaux solides et les fluides, par exemple dans des applications liées à l'aérodynamique ou à l'hydrodynamique.

- Thermomécanique : Modélisation des effets thermiques dans les composants mécaniques, ce qui est crucial pour des applications telles que les moteurs ou les systèmes de gestion thermique.

- **Génie civil :**

- Structures et fondations : COMSOL est utilisé pour modéliser des structures complexes, des ponts aux bâtiments, et pour analyser leur comportement sous des charges externes (forces, tremblements de terre, variations thermiques).

- Systèmes d'eau et de drainage : Simulation de l'écoulement des fluides dans les réseaux de drainage et dans les sols, afin de prévenir des problèmes comme l'inondation ou l'érosion.

- Gestion des ressources en eau : Modélisation des processus de filtration et de purification de l'eau dans les systèmes environnementaux et industriels.

- **Physique des matériaux :**

- Comportement des matériaux composites : COMSOL aide à la modélisation du comportement mécanique, thermique et électromagnétique des matériaux composites utilisés dans des industries comme l'aérospatiale, l'automobile et l'électronique.

- Propriétés des matériaux à haute température : Simulation des matériaux soumis à des conditions extrêmes, comme les alliages métalliques dans les moteurs à haute température ou les réacteurs nucléaires.

- Vieillesse des matériaux : Étude de la durabilité des matériaux sous l'influence de facteurs tels que l'usure, la corrosion ou la fatigue.

- **Énergie et environnement :**

- Énergies renouvelables : COMSOL est utilisé pour simuler des systèmes de production d'énergie, tels que les panneaux solaires, les éoliennes, et les systèmes géothermiques, en optimisant les performances et en modélisant les effets environnementaux.

- Échange thermique : Simulation des systèmes de gestion thermique dans les bâtiments, les véhicules et les équipements industriels afin de maximiser l'efficacité énergétique.

- Modélisation des émissions et de la pollution : COMSOL permet de simuler la propagation des polluants dans l'air ou l'eau et d'analyser l'impact environnemental de différents processus industriels.

- **Électromagnétisme :**

- Dispositifs électriques et électroniques : COMSOL est largement utilisé pour simuler le comportement des champs électromagnétiques dans des dispositifs comme les antennes, les moteurs électriques, les transformateurs et les composants électroniques.
- Plasmas : Simulation des décharges électriques et des plasmas pour des applications dans la fabrication de semi-conducteurs et d'autres technologies de pointe.
- Interférences et compatibilité électromagnétique (CEM) : Modélisation des effets de l'interférence électromagnétique entre différents composants électroniques et la protection des systèmes contre les perturbations.

- **Acoustique :**

- Propagation des ondes sonores : COMSOL permet de simuler l'acoustique dans divers environnements, des salles de concert aux moteurs industriels, en optimisant la conception pour minimiser le bruit ou améliorer la qualité sonore.
- Contrôle du bruit : Utilisé pour modéliser des dispositifs anti-bruit et des systèmes de réduction du bruit dans des environnements tels que les véhicules et les appareils électroménagers.
- Vibration des structures : La simulation des vibrations acoustiques dans les structures permet d'optimiser les designs pour réduire le bruit et améliorer la performance acoustique des systèmes.

- **Aérospatiale :**

- Simulation aérodynamique : COMSOL permet de simuler les flux d'air autour des véhicules aériens, des fusées et des satellites pour optimiser leur conception et leurs performances.
- Systèmes de propulsion : Modélisation des moteurs à réaction et autres systèmes de propulsion, ainsi que la gestion thermique associée.
- Systèmes d'avionique : Simulation des systèmes électroniques et de communication dans les avions, y compris les antennes et la compatibilité électromagnétique [16].

II-6 ÉTAPES GÉNÉRALES DE SIMULATION SOUS COMSOL

Au démarrage du logiciel, le navigateur de modèle apparaît. C'est lui qui permettra de définir le ou les modèles physiques qui seront utilisés. C'est aussi ici que la dimension de l'espace est choisie (2D, 2D axisymétrique, 3D, ...). Pour chacun des modèles, il est précisé quelles sont les variables, et quel est le suffixe propre à ce modèle.

En effet, COMSOL crée automatiquement des variables pour chaque modèle. Ces variables sont toujours suffixées par le nom du modèle auquel elles sont rattachées. Lorsque le ou les modèles ont été choisis, l'écran général de COMSOL apparaît.

D'une manière générale, lors de la création d'un projet, il faut parcourir le menu en allant de gauche à droite. Nous allons donc d'abord construire la géométrie du problème. On définit ensuite le comportement des domaines en leur associant des propriétés. Ensuite, on impose des conditions sur certaines frontières, et éventuellement sur certains points. Cette opération est à refaire pour chaque modèle utilisé dans le projet. Une fois la physique du problème posée, il faut effectuer le maillage de la géométrie. Il est possible de faire un raffinement local du maillage.

Il ne reste ensuite plus qu'à simuler le projet. Toutes les inconnues sont alors déterminées. Il est possible de les afficher dans la fenêtre de post-processeur. L'utilisateur peut choisir quelles variables il désire représenter, et sous quelle forme [17].

Les étapes essentielles à suivre pour une conception d'une structure sous COMSOL MULTIPHISICS se résume comme suit :

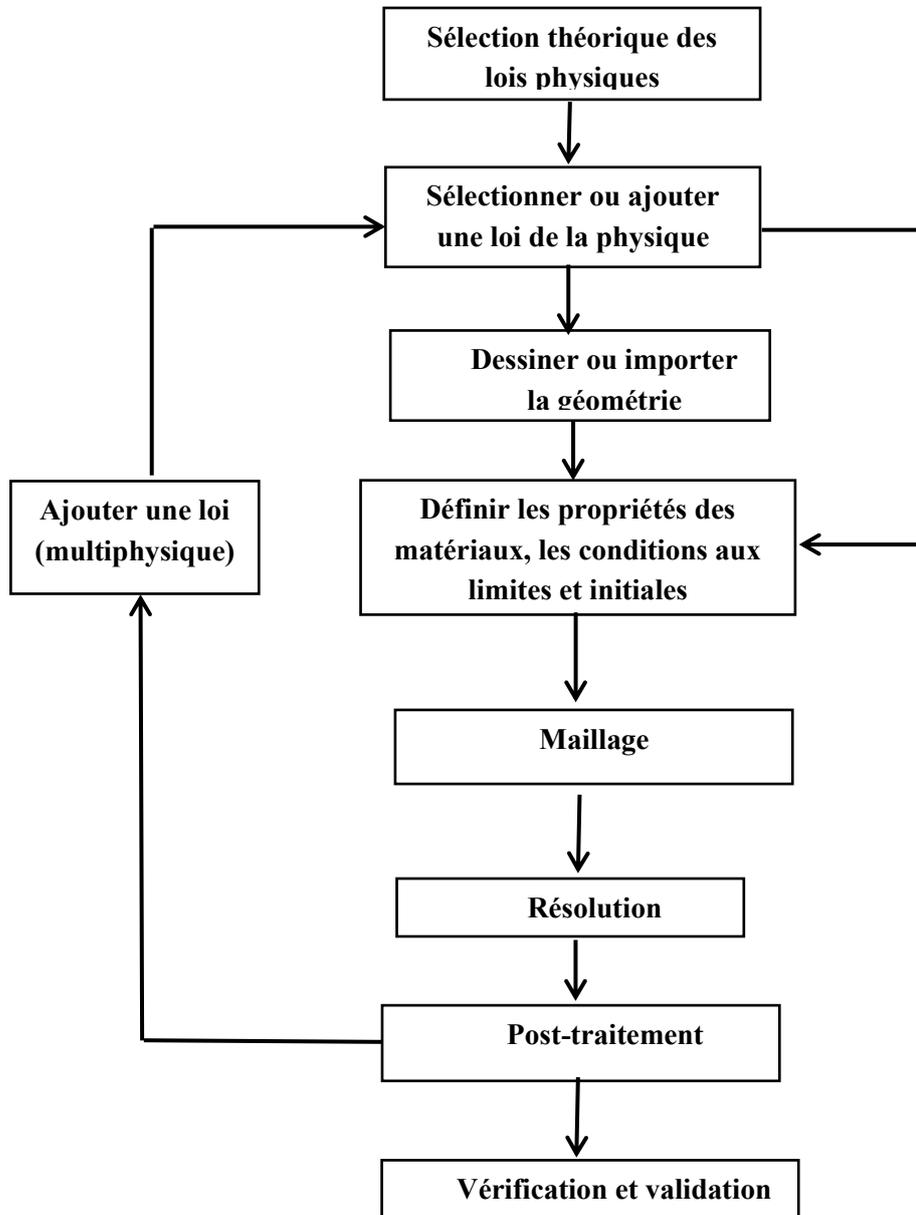


Fig.II.2 : Étapes de simulation sous Comsol

II-7 DIFFÉRENTS MODULES DE COMSOL

1- Module AC/DC

Le module AC/DC prépare le terrain pour la modélisation de la performance des condensateurs, inductances, des moteurs et micro capteurs. Bien que ces dispositifs sont principalement caractérisés par électromagnétisme, ils sont également affectés par d'autres types de physique.

2- Module de transfert de chaleur

Problèmes impliquant toute combinaison de conduction, la convection et le rayonnement sont résolus facilement avec le module de transfert de chaleur. Il trouve une vaste utilisation dans des systèmes qui impliquent la production et la circulation de la chaleur dans n'importe quelle forme. Une variété de modélisations spécialisées et interfaces sont disponibles pour différentes formulations et applications.

3- Module MEMS

Le module MEMS aborde les questions de conception qui se posent dans le micro-monde. Les modèles de phénomènes physiques dans les actionneurs et capteurs microfluidiques et en plus petit des dispositifs piézoélectriques. La plupart des applications MEMS sont multiphysiques par leur nature même et comprennent généralement l'électromagnétique structurelle, thermique structurelle, fluide-structure (FSI), ou interactions électromagnétiques fluide.

4-Module RF

Modélisation en RF, micro-ondes et optiques en ingénierie nécessite la résolution de l'échelle du dispositif de transmission, tout en capturant les effets de plusieurs ordres de grandeur. Le Module RF nous offre les outils nécessaires pour relever ce défi, y compris les couches parfaitement adaptées et les meilleurs solveurs disponibles.

5-Module Mécanique des Structures

Le module de mécanique des structures fournit un ensemble complet d'outils de modélisation pour les différents types d'analyses mécaniques. Basé sur la méthode des éléments finis, il permet non seulement de modéliser des solides en 3D, mais il intègre aussi des formulations en 2D (contraintes planes, déformations planes, déformations planes généralisées et symétrie axiale). De manière similaire, il existe des fonctionnalités pour les formulations coques et plaques, membranes, poutres, tuyaux, treillis et câbles, ainsi que pour les couplages entre ces différentes formulations.

Le module propose des options de modélisation et des fonctionnalités pour la mécanique des solides et la modélisation des matériaux, ainsi que pour la modélisation de la dynamique et des vibrations, des coques, des poutres, des contacts, des fractures, etc. Les domaines d'application comprennent l'ingénierie mécanique, le génie civil, la géomécanique, la biomécanique et les dispositifs MEMS.

Ce module offre des couplages multiphysiques intégrés qui incluent les contraintes thermiques, l'interaction fluide-structure et la piézoélectricité [21].

Plusieurs types d'analyses sont disponibles pour prédire les performances mécaniques dans un environnement virtuel.

- Statique.
- Fréquence propre : (Non amortie. Amortie. Précontrainte).
- Transitoire : (Superposition directe ou modale).
- Réponse en fréquence : (Superposition directe ou modale. Précontrainte).
- Non-linéarité géométrique et grandes déformations.

- Contact mécanique.
- Flambement et post-flambement.
- Spectre de réponse.
- Vibration aléatoire.
- Sous-structuration dynamique.

6-COMSOL Import Module CAD

Le module d'importation CAO simplifie grandement le passage de dessins géométriques créés avec les outils de CAO spécialisés dans l'environnement de simulation COMSOL Multiphysics et de ses modules.

7-COMSOL Script

Toutes les capacités de modélisation multiphysique COMSOL sont disponibles via script COMSOL. C'est un progiciel complet d'analyse et de visualisation technique. Son interface en ligne de commande permet d'accéder facilement aux données, aux fonctions et aux résultats. Ses commandes couvrent l'algèbre linéaire, les calculs numériques et trigonométriques, la prise en charge des objets et des classes, ainsi que la visualisation de données en 2D et 3D. COMSOL Script Desktop offre un environnement de développement interactif pour créer, modifier, exécuter et déboguer vos scripts et fonctions.

Voici une liste des modules complémentaires pour COMSOL Multiphysiques :

- | | |
|--|---|
| ➤ AC/DC Module | ➤ RF Module |
| ➤ Electrode position Module | ➤ Live Link for Space Claim |
| ➤ Acoustics Module | ➤ Semiconductor Module |
| ➤ Fatigue Module | ➤ Live Link for Pro/ENGINEER |
| ➤ Batteries & Fuel Cells Module | ➤ Structural Mechanics Module |
| ➤ File Import for CATIA V5 | ➤ Live Link for Solid Edge |
| ➤ CAD Import Module | ➤ Subsurface Flow Module |
| ➤ Geomechanics Module | ➤ Live Link for Solid Works |
| ➤ CFD Module | ➤ Wave Optics Module |
| ➤ Heat Transfer Module | ➤ Material Library |
| ➤ Chemical Reaction Engineering Module | ➤ MEMS Module |
| ➤ Live Link for AutoCAD | ➤ Microfluidics Module |
| ➤ Live Link for Creon Parametric | ➤ Molecular Flow Module |
| ➤ Corrosion Module | ➤ Multi body Dynamics Module |
| ➤ ECAD Import Module | ➤ Optimization Module |
| ➤ Live Link for Excel | ➤ Particle Tracing Module |
| ➤ Electrochemistry Module | ➤ Pipe Flow Module |
| ➤ Live Link for Inventor | ➤ Nonlinear Structural Materials Module |
| ➤ Live Link for MATLAB | ➤ Plasma Module |

II-8 LES ÉTAPES DE SIMULATION SOUS COMSOL 5.1

II-8-1 Lancement du logiciel :

Pour lancer le logiciel on clique sur l'icône de COMSOL MULTIPHYSICS, L'interface principale de COMSOL s'ouvre avec l'assistant Modèle (Model Wizard) qui guide l'utilisateur à travers les étapes clés de la modélisation :

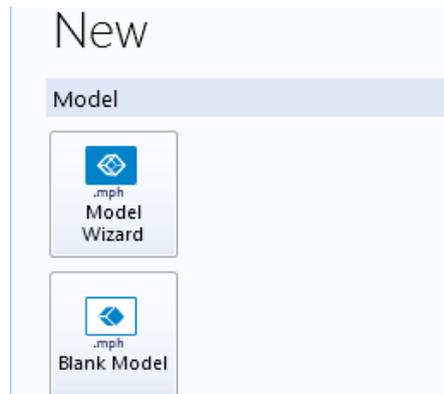


Fig.II.3 : Fenêtre après ouverture du logiciel COMSOL Multiphysics

II-8-2 Sélection des dimensions de l'espace :

Après avoir choisi l'assistant « Model Wizard », la première étape consistera à définir la dimension suivant laquelle nous souhaitons réaliser notre modèle (1D, 2D, 3D ...).

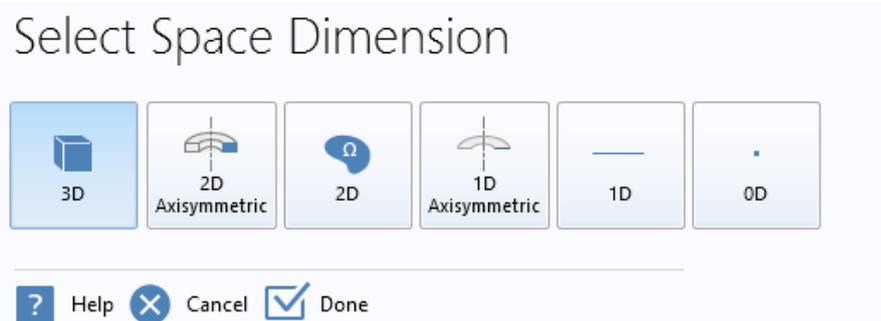


Fig.II.4 Sélection de l'espace de dimension.

II-8-3 Sélection de la physique :

Dans COMSOL, la sélection des physiques (ou interfaces physiques) est une étape clé pour configurer une simulation réaliste, l'assistant « Model Wizard » consiste à définir la physique utiliser dans un modèle. Par exemple « Solid Mechanics ».

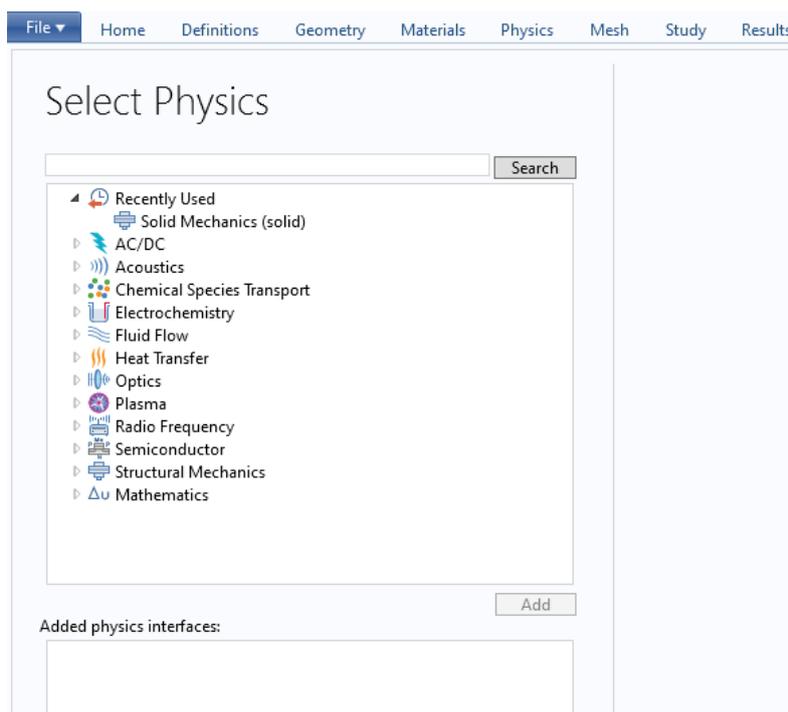


Fig.II.5 : Sélection de physique dans Cosmol Multiphysics.

II-8-4 Sélection de l'étude :

Après avoir sélectionné le modèle physique approprié, nous procédons à la configuration du type d'étude. Par exemple : Dans la section « Preset-Studies ». Nous choisissons l'option « Stationary » pour une analyse stationnaire.

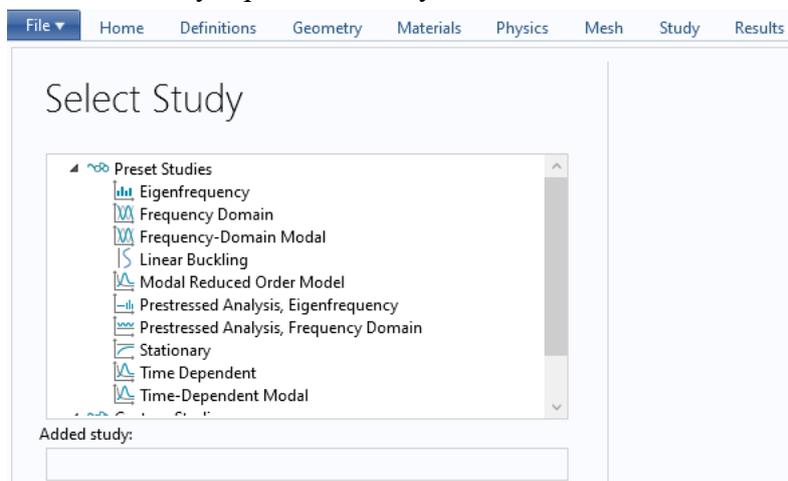


Fig.II.6 : Sélection de l'étude dans COMSOL Multiphysics.

II-8-5 Fenêtre principale de COMSOL Multiphysics

Après avoir confirmé le type d'étude, la fenêtre principale de notre programme s'affiche. Cette dernière est divisée en 6 fenêtres clés.

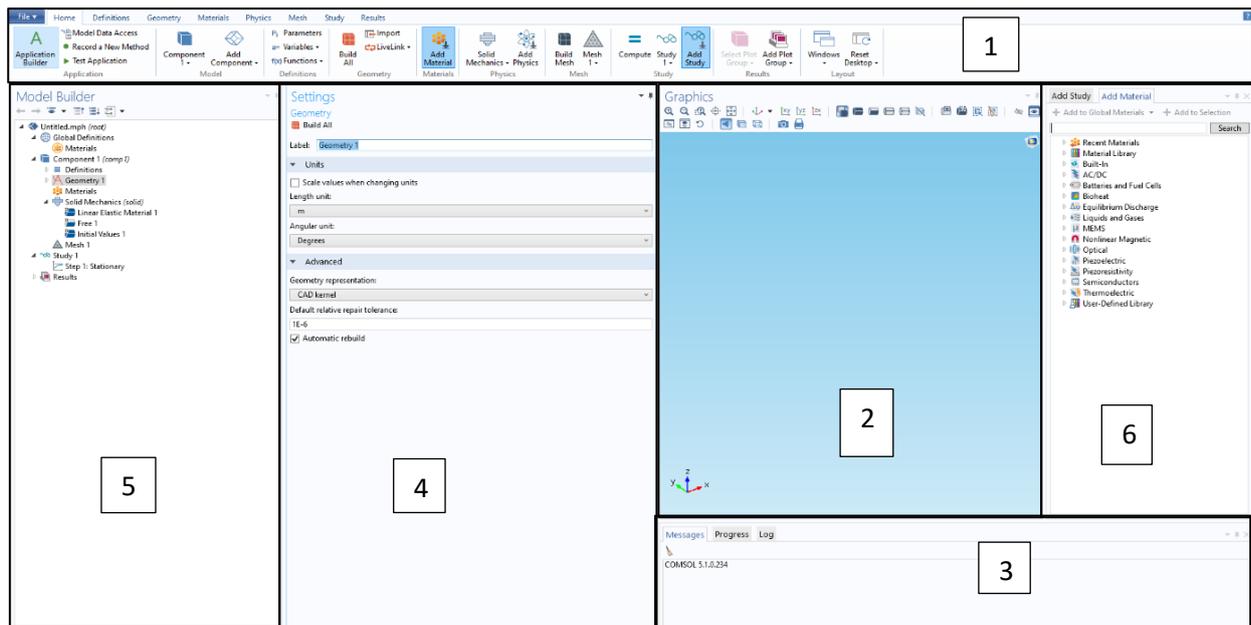


Fig.II.7 : Fenêtre principale de COMSOL Multiphysics

- **La barre d'outils [Tool bar] (1)** : Nous pouvons trouver des outils (géométrie, étude, physique, matériaux, etc...) et des fonctions divisées par leur catégorie et leur cas d'utilisation.
- **La fenêtre des graphiques [Graphics] (2)** : Cette fenêtre sert à visualiser le modèle créé ainsi que les résultats de simulations que nous souhaitons afficher.
- **La fenêtre de [Log/Message/Progress] (3)** : Cette partie est divisée en 3 sous-fenêtres chacune avec ses propres ensembles de cas d'utilisation :
- **La fenêtre des paramètres [Settings] (4)** : Cette fenêtre varie avec chaque interface, elle permet d'afficher les paramètres relatifs à chaque composant du « Model Builder ».
- **La fenêtre de Model Builder (5)** : Cette fenêtre contient toutes les fonctionnalités et composants de notre programme Cosmol Multiphysics tels que la géométrie, l'étude, les résultats, les matériaux, la ou les physiques.
- **La fenêtre [Add] (6)** : cette fenêtre est pour ajouter des études ou des matériaux

II-8-6 Géométrie

a- Construction d'une géométrie

La construction géométrique est l'une des étapes les plus importantes. Elle permet de construire la forme de la pièce ou de l'ensemble des pièces ou bien de l'espace sur lesquels on fait notre simulation.

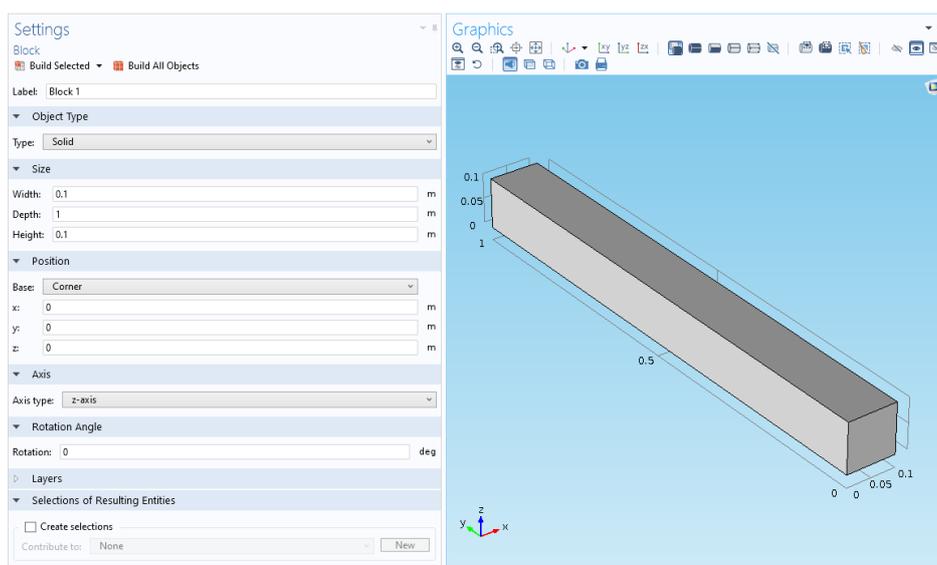


Fig.II.8 : Création d'une géométrie simple

b- Importation de géométries externes

Si la géométrie a été construite par un logiciel de conception mécanique (Solidworks, AutoCAD...) la pièce peut être importée et intégrée dans le logiciel. COMSOL permet l'importation de géométries dans plusieurs formats, comme : Par exemple, les formats (.dwg), (.dxf), (.step), (.iges), (.stl), etc...). Des fichiers au format (.msh) peuvent également être importés, mais cela implique que le maillage est déjà défini.

Pour l'importation, Cliquer sur « browser » après sélectionner le fichier et cliquer sur « Open » et enfin, importer votre géométrie en cliquant sur « import ».

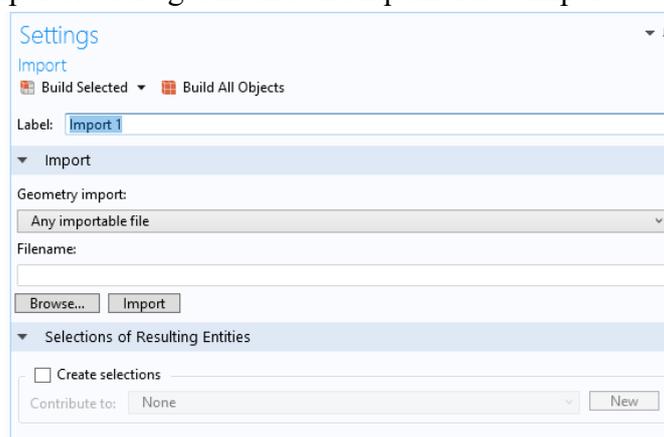


Fig.II.9 : Importation d'une géométrie.

II-8-7 Choix du matériau

a- Bibliothèque de matériaux

La bibliothèque de matériaux dans COMSOL Multiphysics est une ressource intégrée qui fournit des propriétés prédéfinies pour une large gamme de matériaux couramment utilisés en ingénierie et en sciences. Cette bibliothèque permet aux utilisateurs de gagner du temps en évitant de saisir manuellement les propriétés des matériaux, tout en garantissant des données précises et fiables pour les simulations.

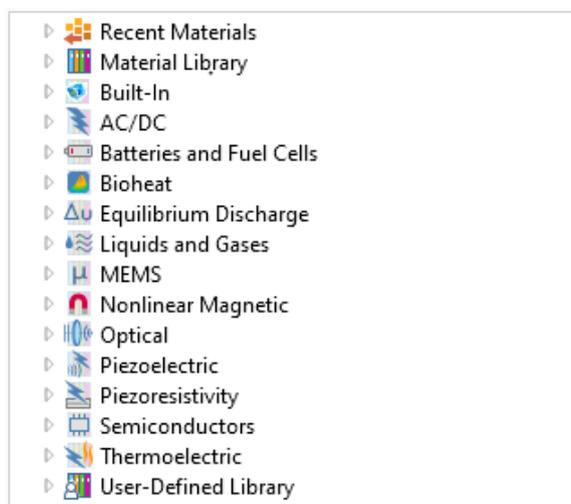


Fig.II.10 : Bibliothèque des matériaux

b- Contenu de la bibliothèque de matériaux

La bibliothèque de matériaux de COMSOL contient des propriétés pour une grande variété de matériaux, classés par catégories. Voici quelques exemples de matériaux disponibles :

- Matériaux métalliques : Acier, Aluminium,
- Matériaux polymères : Polyéthylène, PVC...
- Matériaux céramiques : Alumine, Silice....
- Fluides : Air, Eau...
- Matériaux composites : Fibre de carbone, Fibre de verre...
- Liquides : eau, huiles de lubrification, solutions chimiques...etc.
- Eléments chimiques du tableau périodique
- Alliages métalliques
- Matériaux non-métalliques : polymères, céramiques, semi-conducteurs, ...etc.

c- Personnalisation des matériaux

Si un matériau de la bibliothèque ne correspond pas exactement à vos besoins, vous pouvez le personnaliser comme suit :

- 1- Ajoutez le matériau à partir de la bibliothèque.
- 2- Modifiez ses propriétés (par exemple, densité, conductivité thermique, etc.).
- 3- Enregistrez-le en tant que matériau personnalisé pour une utilisation future. [18]

Il est possible d'intégrer plusieurs matériaux dans un même composant pour l'étude de système hétérogènes. Lors de la sélection d'un matériau pour un domaine de surface ou de volume donné, les paramètres sont vérifiés selon le module physique pour lequel le matériau est sélectionné. Si les équations font intervenir un paramètre non-intégré dans la base de données du logiciel, l'utilisateur doit l'introduire.

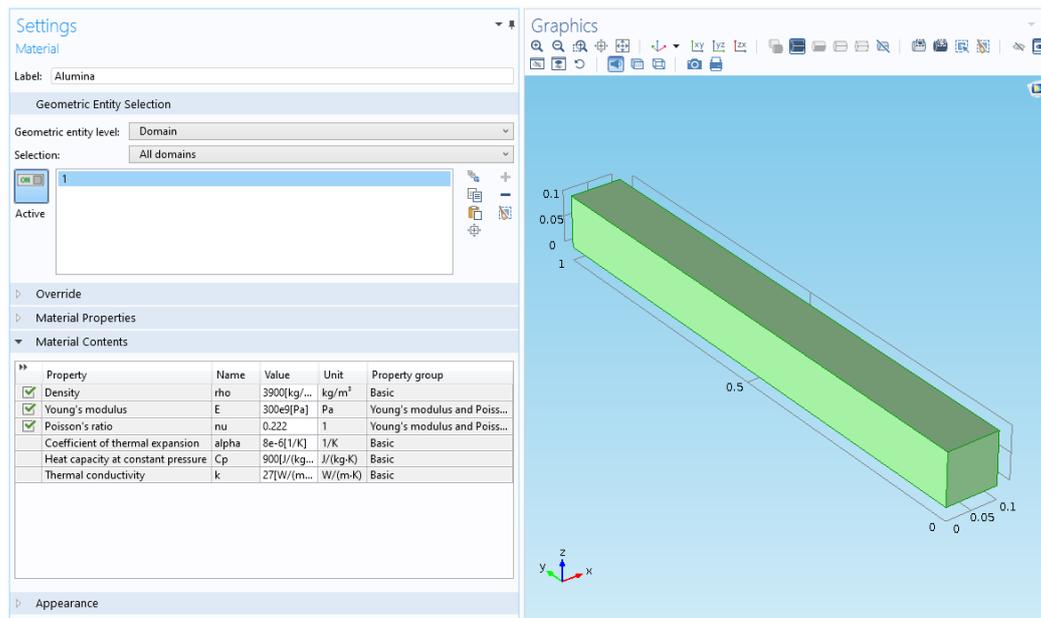


Fig.II.11 : Ajout du matériau à un composant.

II-8-8 Condition au limites

Dans COMSOL 5.1, les conditions aux limites (CAD) jouent un rôle essentiel pour définir le comportement physique aux frontières du modèle. Elles se configurent dans l'onglet « Physics » ou via le menu contextuel des entités géométriques.

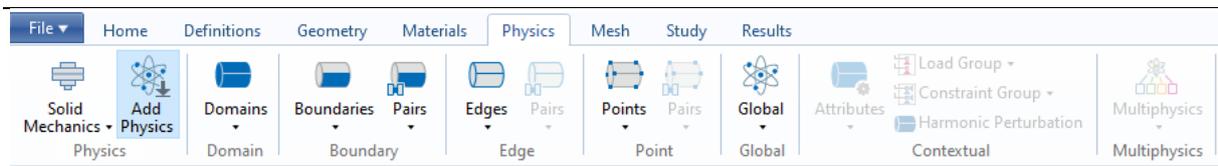


Fig.II.12 : La barre Physics.

- Types Courants de Conditions aux Limites :

▪ Contraintes Mécaniques :

"Fixed Constraint" (Encastrement) : Bloque tous les déplacements ($u=v=w=0$).

"Roller" : Autorise uniquement le déplacement tangentiel.

"Force/Pressure" : Applique une charge (N ou Pa).

▪ Thermiques :

"Temperature" : Impose une valeur fixe ($T=T_0$).

"Heat Flux" : Définit un flux de chaleur (W/m^2).

▪ Fluides :

"No Slip" : Vitesse nulle aux parois.

"Inlet/Outlet" : Prescrit la vitesse ou la pression.

Par exemple, dans le cas simple d'une poutre 3D encastree à une extrémité et chargée sur une autre les conditions aux limites seront introduites comme suit :

- Clic droit sur : Mécanique des Solides, sélectionnez « Contrainte fixe » et choisir la frontière à fixée
- Clic droit sur : Mécanique des Solides, sélectionnez « boundary load » et choisir l'interface chargée.

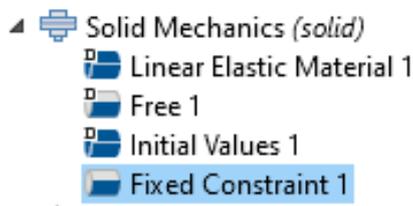


Fig.II.13 : Choix de fixation

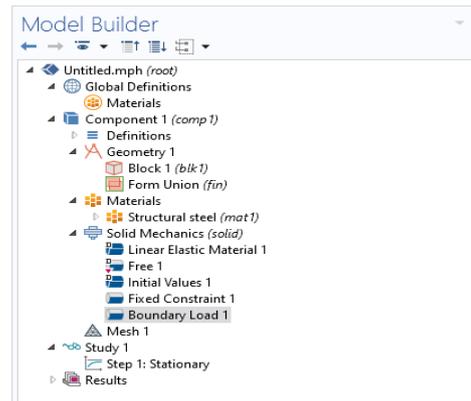


Fig.II.14 : Choix de chargement

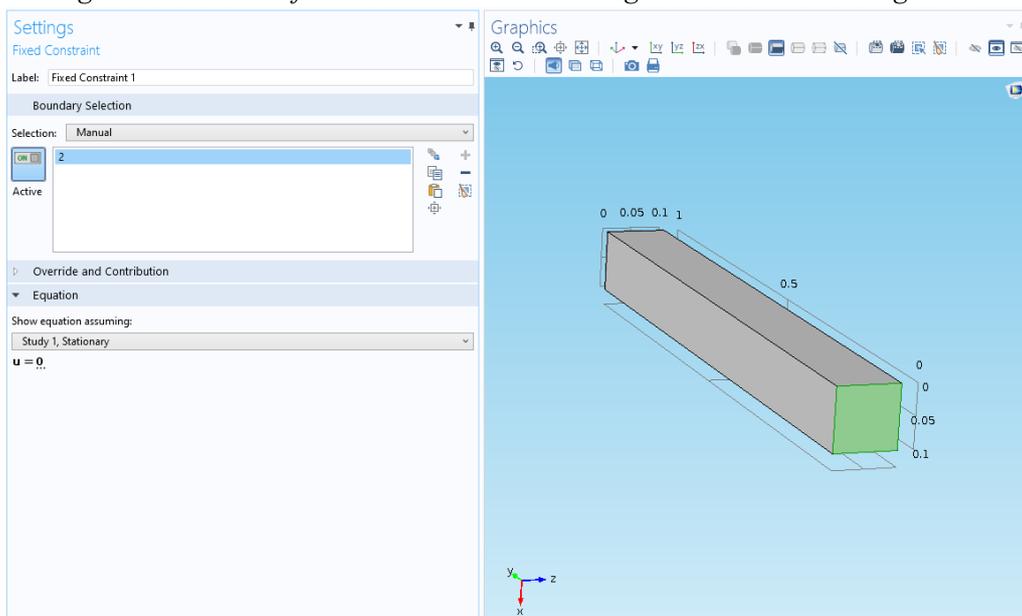


Fig.II.15 : Interface fixée

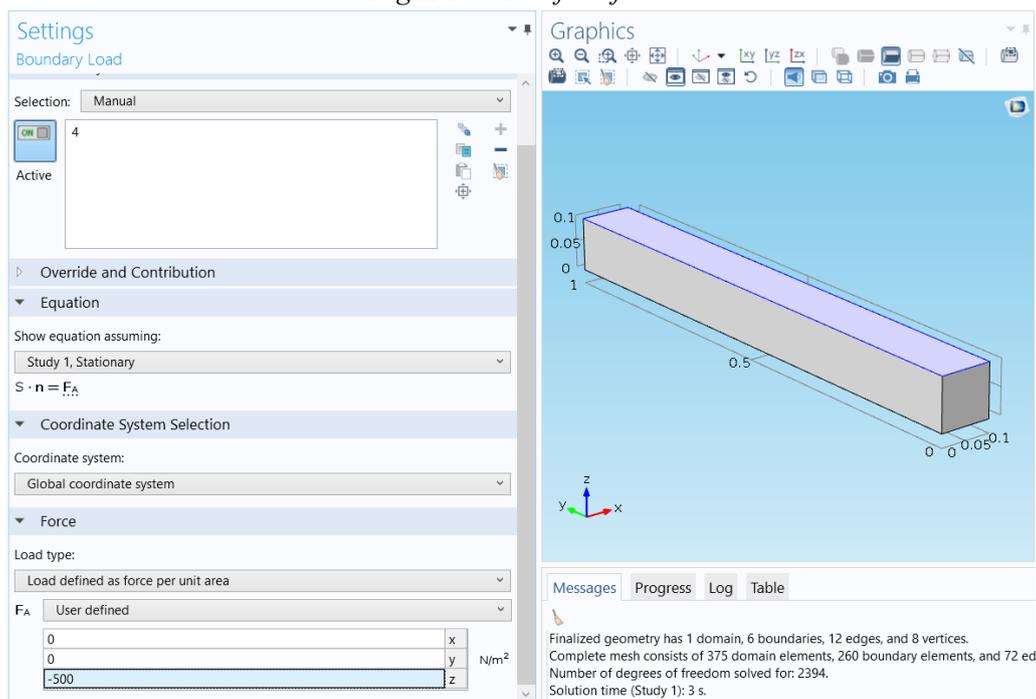


Fig.II.16 : Interface chargée

II-8-9 Choix du maillage

Le maillage et la discrétisation sont des étapes cruciales dans la modélisation numérique avec COMSOL Multiphysics. Le maillage consiste à diviser le domaine géométrique en petits éléments (ou cellules) pour permettre la résolution numérique des équations gouvernantes. La qualité du maillage a un impact direct sur la précision des résultats et le temps de calcul. Nous pouvons créer un maillage libre dans COMSOL Multiphysics en cliquant sur le bouton "Build Mesh" sur la barre d'outils principale. Il peut être utilisé sur tous types de géométrie. Il crée des maillages non structurés qui n'ont pas de restrictions en termes de distribution des éléments. [15]

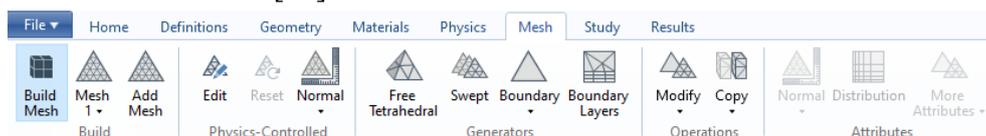


Fig.II.17 : La barre Mesh

COMSOL propose plusieurs types de maillages pour s'adapter à différents types de géométries et de problèmes physiques (maillage structuré, maillage non structuré, maillage hybride, maillage adaptatif)

Pour générer un maillage dans Comsol, on doit suivre les étapes suivantes :

- 1- Préparation de la géométrie : Assurez-vous que la géométrie est propre et sans erreurs.
- 2- Accès à l'interface maillage
- 3- Choix du type de maillage en fonction de la complexité de la géométrie.
- 4- Dans l'arborescence COMSOL, cliquer sur "Maillage" (Mesh).
- 5- Choisir "Générer un maillage" (Build All) ou créer une séquence personnalisée.

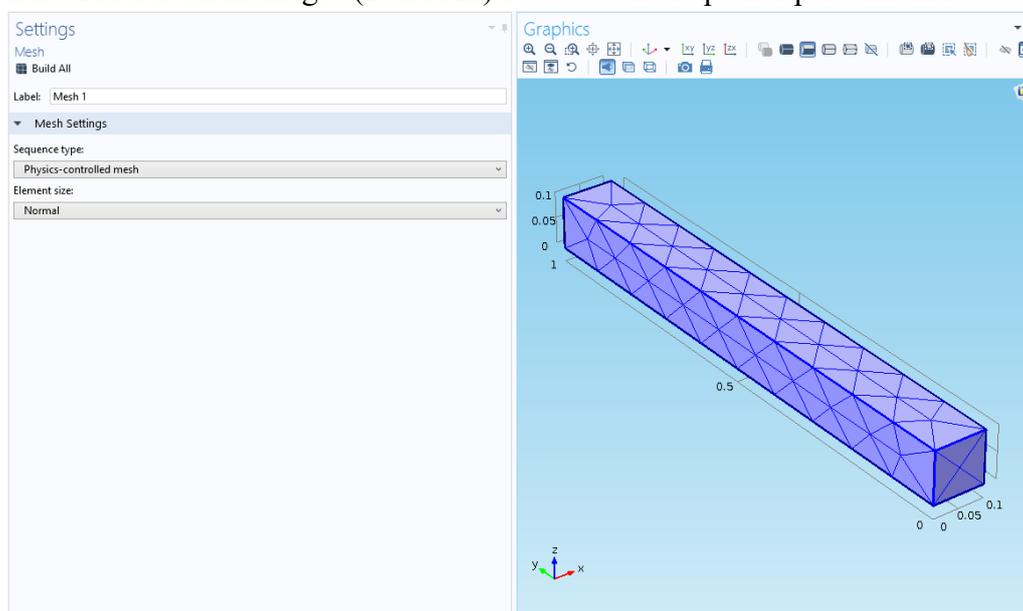


Fig.II.18 : Exemple de maillage d'une géométrie 3D

II-8-10 Discrétisation du modèle

La discrétisation consiste à transformer les équations différentielles continues en un système d'équations algébriques discrètes. COMSOL utilise la méthode des éléments finis (FEM) pour cette étape :

- Fonctions de forme : Des polynômes sont utilisés pour approximer les variables physiques dans chaque élément.
- Intégration numérique : Les équations sont intégrées sur chaque élément pour former un système global.
- Résolution : Le système d'équations est résolu numériquement pour obtenir les valeurs des variables aux nœuds du maillage.

II-8-11 Résolution du problème

Après le choix du maillage, COMSOL lance l'étape de calcul (solve), qui consiste à résoudre numériquement le système d'équations généré.

Lorsqu'on clique sur « Compute » dans COMSOL Multiphysics, le logiciel effectue une série d'étapes pour résoudre le modèle numérique :

Avant même de lancer le calcul, COMSOL vérifie et prépare le modèle :

- Vérification des paramètres :
 - COMSOL s'assure que les conditions aux limites, les propriétés matérielles et les charges sont correctement définies.
 - Il détecte les erreurs (géométrie non maillée, conditions manquantes, etc.) et affiche des avertissements si nécessaire.
- Génération du maillage (si ce n'est pas déjà fait) :
 - Si vous avez modifié la géométrie ou les paramètres de maillage, COMSOL régénère le maillage avant de calculer.
 - La qualité du maillage influence la précision et le temps de calcul.

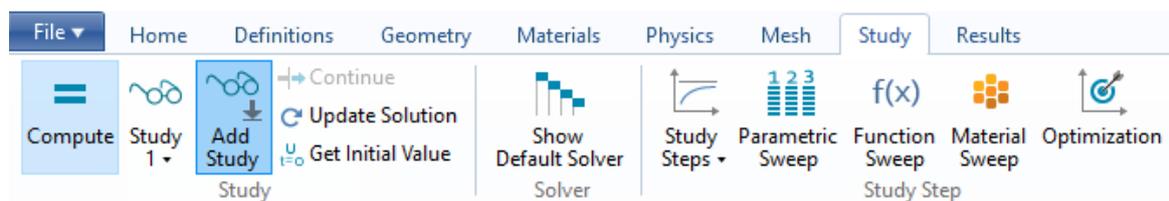


Fig. II.19 : La barre de résolution

II-8-12 Choix du solveur

COMSOL utilise des solveurs numériques adaptés au type de problème :

- Problèmes linéaires (petites déformations, comportement élastique, conduction thermique, etc.) :
- Problèmes non linéaires (grandes déformations, plasticité, écoulements turbulents, etc.) :
- Problèmes dépendants du temps (dynamique, transitoire thermique, etc.) :
- Problèmes fréquentiels (vibrations, ondes électromagnétiques) :

II-8-13 Post-traitement automatique

Une fois la solution obtenue, COMSOL :

- Stocke les résultats dans la mémoire (déplacements, contraintes, températures, champs électriques, etc.).
- Génère des visualisations par défaut (déformation, distribution de température, flux, etc.).

- Calcule les grandeurs dérivées (contraintes de von Mises, flux de chaleur, etc.) si demandé.

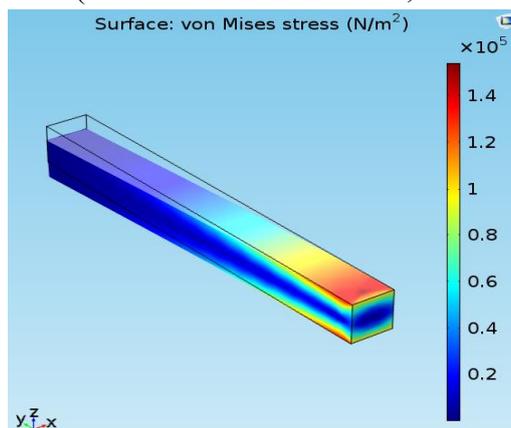


Fig.II.20 : Résultat sur la fenêtre graphique

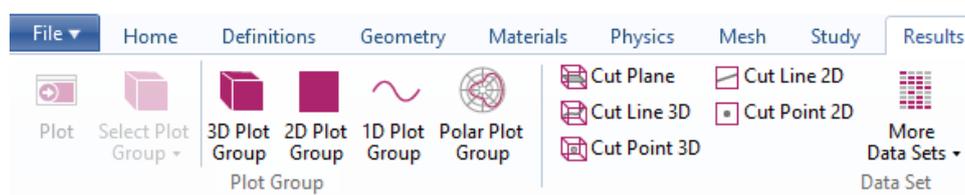


Fig.II.21 : La barre du post traitement des résultats

II-8-14 Analyse des Résultats

L'analyse des résultats permet de visualiser, interpréter et exploiter les données issues des calculs pour comprendre le comportement du système étudié. COMSOL offre une gamme d'outils puissants pour analyser les résultats, allant des visualisations graphiques aux calculs post-traitement avancés (Graphiques 1D, 2D et 3D, Champs scalaires, Champs vectoriels, Iso-surfaces, Iso-valeurs, Plans de coupes et lignes de coupes, Animations, etc).

COMSOL permet d'effectuer des calculs post-traitement pour extraire des informations supplémentaires (Intégration, Dérivées et gradients, Valeurs extrêmes, Transformations de Fourier, Analyse spectrale, etc).

COMSOL permet d'exporter les résultats sous différents formats pour un traitement ultérieur (fichiers image, fichiers de données, Rapports, ...).

II-9 CONCLUSION

Ce chapitre a présenté de manière exhaustive le logiciel COMSOL Multiphysics, un outil puissant et polyvalent pour la simulation numérique par éléments finis. Nous avons exploré ses fonctionnalités clés, notamment sa capacité à traiter des problèmes multiphysiques complexes, son interface intuitive permettant une modélisation complète (de la création géométrique au post-traitement), et sa bibliothèque riche de modules spécialisés couvrant divers domaines d'application. Les étapes de simulation, depuis la sélection des dimensions et de la physique jusqu'à la résolution et l'analyse des résultats, ont été détaillées, mettant en lumière la méthodologie rigoureuse requise pour obtenir des résultats fiables.

COMSOL se distingue par sa flexibilité, sa précision et ses outils avancés d'analyse, ce qui en fait un choix privilégié pour les ingénieurs et chercheurs confrontés à des défis de modélisation complexes.

CHAPITRE III
SIMULATION MÉCANIQUE DU SUPPORT COUDÉ

CHAPITRE III SIMULATION MÉCANIQUE DU SUPPORT COUDÉ

III-1 INTRODUCTION

Aujourd'hui, la simulation numérique est devenue un élément indispensable dans les recherches scientifiques parce qu'elle permet de comprendre et de modéliser le fonctionnement des systèmes réels et de prédire leurs évolutions. Au cours de ce chapitre, nous allons illustrer l'approche numérique suivie pour étudier le comportement mécanique du support coudé. Ensuite nous présentons et interprétons les résultats obtenus. Pour cela, nous utiliserons le module de mécanique des structures du logiciel COMSOL Multiphysics. Plusieurs types d'analyses sont disponibles dans ce module pour prédire les performances mécaniques dans un environnement virtuel.

Dans le cadre de ce chapitre, nous nous sommes intéressés à explorer des applications pratiques sur un élément mécanique à travers l'utilisation avancée de COMSOL Multiphysics. L'objectif principal a été de mettre en lumière les capacités de modélisation et d'analyse de phénomènes mécaniques, en s'appuyant sur des principes fondamentaux et des équations régissant ces domaines.

Ce chapitre propose donc une étude approfondie de l'analyse par éléments finis (FEM) appliquée à un support coudé, un composant mécanique critique dans les systèmes de levage automobile.

À travers une modélisation 3D réalisée avec COMSOL Multiphysics, nous détaillerons une méthodologie complète couvrant :

- 1- la numérisation précise de la géométrie du support coudé,
- 2- la définition des propriétés matériaux, et des conditions aux limites représentatives des charges appliquées pour le régime statique et celui dynamique.
- 3- la stratégie de maillage adaptatif, avec un raffinement localisé au niveau des zones de concentration de contraintes (trous de fixation, changements de section).
- 4- la configuration des solveurs multiphysiques pour les différentes analyses réalisées.
- 5- la présentation des résultats et leurs discussions sous forme de volume, de surface et de courbe 1D pour les différentes analyses mécaniques réalisées.

III-2 PRÉSENTATION ET DIMENSIONNEMENT D'ÉLÉMENT D'ÉTUDE

La pièce sujette de notre étude constitue l'élément maître dans un système mécanique appelé mécanisme de levage ou tout simplement connu par le nom du pont de levage (Figure III.1).

Ainsi, le système montré sur l'image est utilisé dans les garages pour soulever les véhicules et faciliter les travaux de réparation ou d'entretien.

Ce système de levage de type "pont élévateur" utilise un moteur électrique qui transmet le mouvement à une vis via un train d'engrenages. Cette vis, par l'intermédiaire d'un écrou, permet de transformer la rotation en mouvement linéaire vertical des supports de levage coudé (Voir schéma cinématique : Figure III.2).

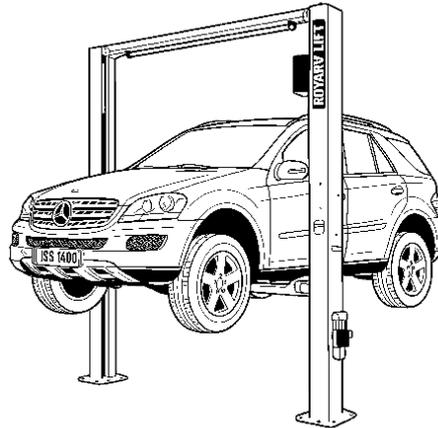


Fig. III.1 : Pont élévateur de voiture à deux colonnes

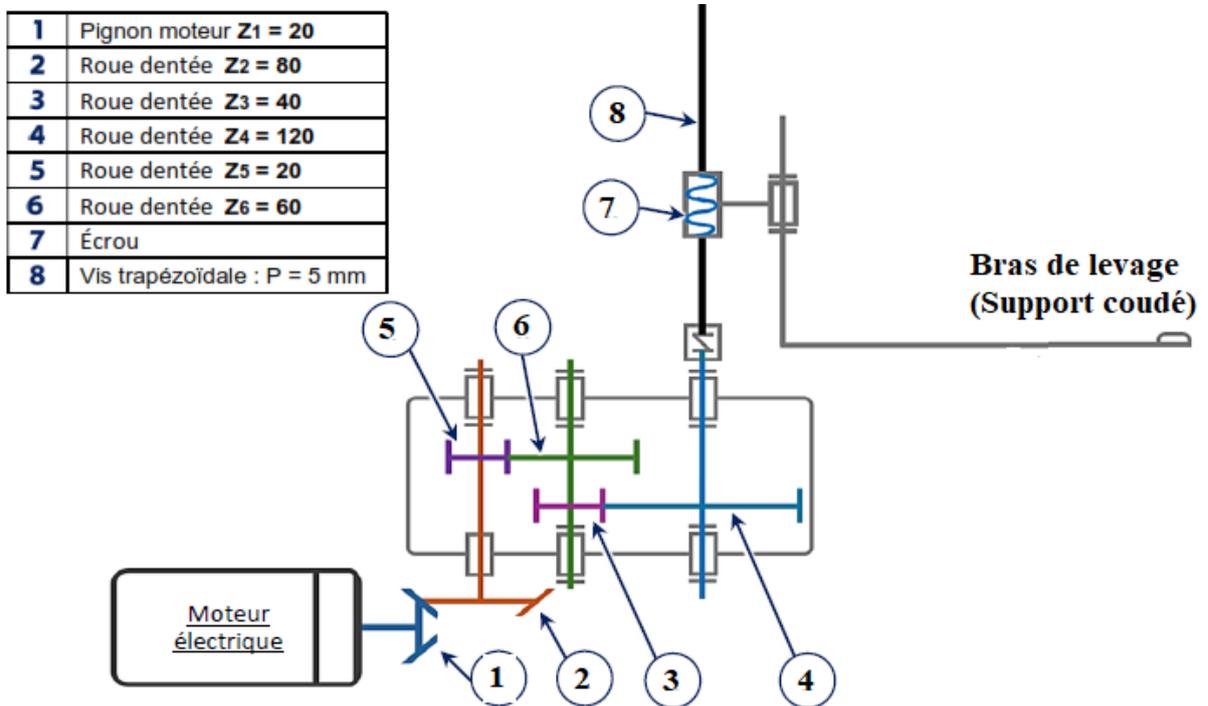


Fig. III.2 : Schéma cinématique du pont élévateur de voiture

Le support de levage sous forme d'un support coudé est sollicité en tant que poutre encastrée d'un côté et libre de l'autre c'est-à-dire nous sommes en présence d'une poutre cantilever et dont le dessin de définition est représenté par la figure III.3.

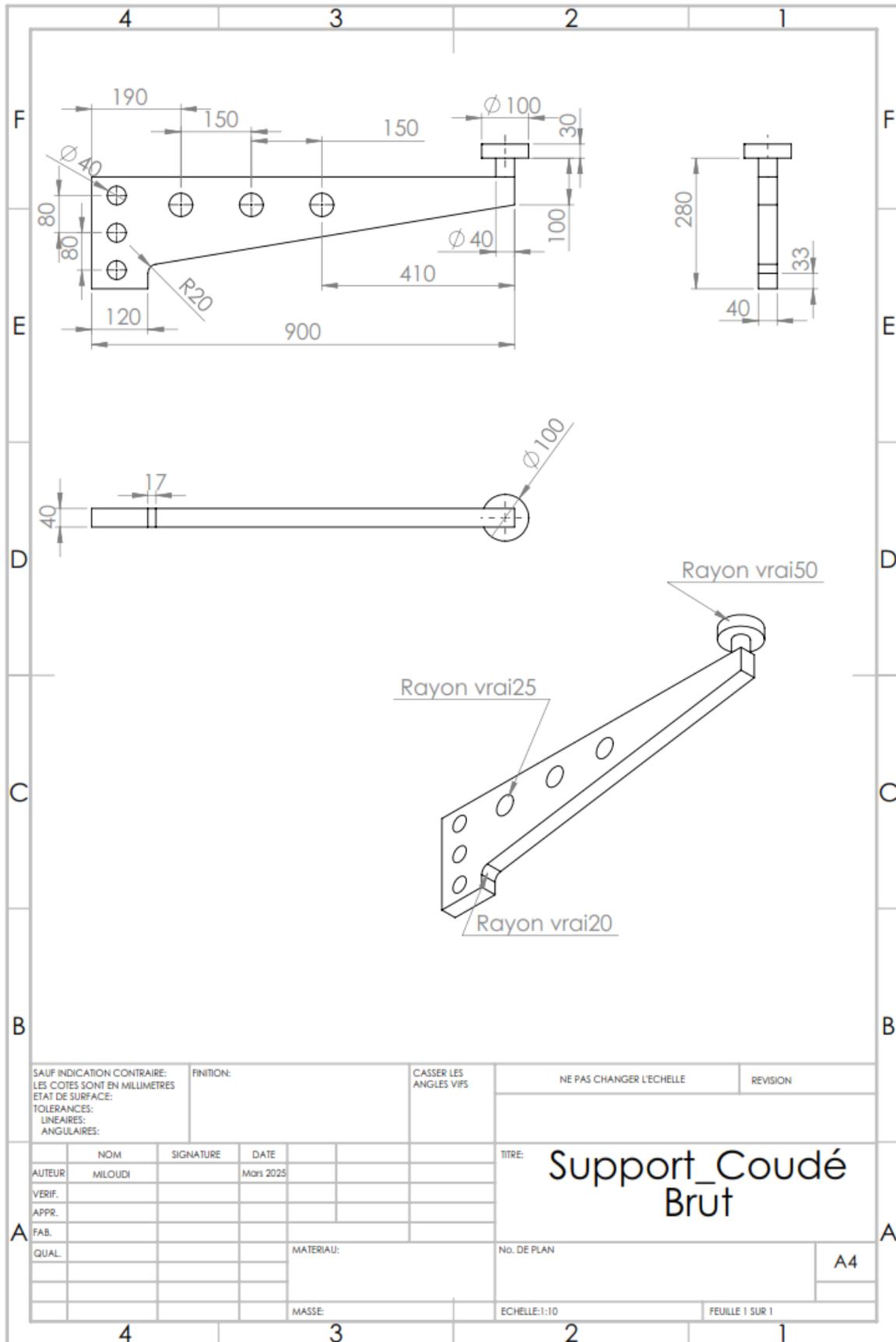


Fig. III.3 : Dessin de définition du support coudé (Support de levage)

III-2-1 Définition Technique

Le support coudé qu'on va étudier est un support en cantilever, c'est un support mécanique angulaire fixé à une extrémité, spécialement conçu pour :

- Soulever et maintenir en l'air des véhicules lors des interventions en atelier.
- Répartir les charges sur sa structure, grâce à une géométrie optimisée pour minimiser les contraintes.

III-2-2 Rôle du Support Coudé en Cantilever (Support de Levage)

Le support coudé en cantilever est un élément clé des systèmes de levage automobile, permettant de soulever et maintenir les véhicules en hauteur pendant les réparations. Son rôle principal est de porter la charge du véhicule en toute sécurité tout en offrant un accès optimal aux mécaniciens.

III-2-3 Description du Modèle

Le support coudé présenté est une pièce mécanique destinée à des applications structurelles, caractérisée par :

-Une géométrie coudée avec des sections variables.

-Des rayons de congé spécifiés :

-Rayon 1 : 25 mm

-Rayon 2 : 20 mm

- Dimensions Principales

Les cotes clés (en mm) sont :

-Longueurs des branches :

Branche verticale : 190 mm

Branche horizontale : 150 mm

-Épaisseurs :

Partie principale : 40 mm

Zones renforcées : 120 mm (base) et 900 mm (section élargie).

-Rayons de courbure :

Zone de coude : 25 mm et 20 mm (pour éviter les concentrations de contraintes).

III-3 Propriétés matériaux

Pour le matériau on a utilisé l'acier de construction (Structural Steel). Ce matériau est un alliage métallique largement utilisé en ingénierie mécanique et civile en raison de ses excellentes propriétés mécaniques et de sa facilité de mise en œuvre. Ses principales caractéristiques, telles que définies dans le tableau, incluent :

Propriétés mécaniques de base :

- Masse volumique (ρ) : 7850 kg/m³, typique des aciers courants.

- Module d'Young (E) : 200 GPa, assurant une rigidité élevée.

- Coefficient de Poisson (ν) : 0.33, indiquant un comportement isotrope sous chargement.

Propriétés thermiques :

- Conductivité thermique (k) : 44.5 W/(m·K), favorable pour les applications nécessitant une dissipation thermique.

- Capacité thermique (C_p) : 475 J/(kg·K), utile pour les analyses thermomécaniques couplées.
- Coefficient de dilatation thermique (α) : $12.3 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$, essentiel pour les études de contraintes thermiques.

Propriétés électromagnétiques :

- Perméabilité relative (μ_r) : 1 (comportement non magnétique standard).
- Conductivité électrique (σ) : $4.032 \times 10^6 \text{ S/m}$, pertinente pour les simulations électromagnétiques.

Paramètres avancés :

- Paramètres de Lamé (λ , μ) : Respectivement 150 GPa et 75 GPa, utilisés pour les modèles élastiques non linéaires.
- Constantes de Murnaghan (l, m, n) : Décrivent les effets élastiques du troisième ordre pour des déformations importantes.

Ces propriétés font de l'acier structural un matériau polyvalent, adapté aux simulations multiphysiques incluant la mécanique, la thermique et l'électromagnétisme. Pour une modélisation réaliste dans COMSOL.

III-4 ANALYSE DU COMPORTEMENT MÉCANIQUE DU SUPPORT COUDÉ

La pièce mécanique sujet de notre modélisation sous COMSOL multiphysics a fait l'objet de quatre types d'analyses à savoir l'analyse statique, l'analyse fréquentielle (fréquence propre), l'analyse dynamique (transitoire) et l'analyse paramétrique.

III-4-1 Analyse statique

III-4-1-1 Objectif

L'analyse statique est utilisée lorsque les variables du champ ne varient pas au fil du temps. C'est une méthode d'évaluation des structures ou des composants mécaniques sans prendre en compte les effets dynamiques. Son objectif principal est de déterminer les contraintes, déformations et déplacements sous l'effet de charges constantes ou quasi-statiques.

III-4-1-2 Théorie

a- Equation de base de l'élasticité linéaire

Les équations de base de l'élasticité linéaire, qui décrivent le comportement des matériaux élastiques soumis à de petites déformations, sont essentielles pour modéliser les phénomènes mécaniques dans divers domaines de l'ingénierie. Elles comprennent la relation contrainte-déformation, l'équation d'équilibre, et les conditions aux limites. Voici une présentation structurée de ces équations :

- Relation contrainte - déformation (Loi de Hooke)

La loi de Hooke relie les contraintes aux déformations dans un matériau élastique linéaire. Pour un matériau isotrope, cette relation est souvent exprimée par :

$$\sigma_{ij} = C_{ijkl} \epsilon_{kl}$$

Où :

σ_{ij} est le tenseur des contraintes,

ϵ_{kl} est le tenseur des déformations,

C_{ijkl} est le tenseur des propriétés élastiques, dépendant des caractéristiques du matériau (module de Young E, coefficient de Poisson ν).

Dans le cas d'un matériau isotrope, la relation se simplifie avec les coefficients de Lamé λ et μ donnant :

$$\sigma_{ij} = \lambda \delta_{ij} Tr(\epsilon) + 2\mu \epsilon_{ij}$$

où :

λ et μ sont les coefficients de Lamé,

$Tr(\epsilon)$ est la trace du tenseur des déformations, représentant la déformation volumétrique.

- Équation d'équilibre

L'équilibre des forces dans un matériau est exprimé par l'équation de Navier-Cauchy :

$$\nabla \sigma + f = 0$$

où :

$\nabla \sigma$ est la divergence du tenseur des contraintes,

f est le vecteur des forces volumiques appliquées.

- Conditions aux limites

Les conditions aux limites spécifient les comportements aux frontières du domaine de la déformation et peuvent être de deux types :

Conditions de Dirichlet : Déplacements imposés sur la frontière ($u = u_{prescrite}$)

Conditions de Neumann : Contraintes ou forces appliquées sur la frontière $\sigma \cdot n = t_{prescrite}$, où n est le vecteur normal à la surface et $t_{prescrite}$ est la contrainte appliquée [22].

b- Analyse et visualisation de contraintes

- Critère de Von Mises

Le critère de Von Mises est largement utilisé pour prédire la plastification dans les matériaux. Il repose sur l'idée que la plastification commence lorsque l'énergie de déformation atteint un seuil critique. La plastification commence lorsque la contrainte de Von Mises atteint la limite d'élasticité du matériau.

Von Mises : Tient compte de l'effet combiné des contraintes normales et de cisaillement. Il est plus précis, surtout pour des charges complexes.

$$\sigma_{von\ mises} = \sqrt{\sigma_x^2 - \sigma_x \sigma_y + \sigma_y^2 + 3\tau_{xy}^2}$$

σ_x et σ_y sont les contraintes normales dans les directions x et y,

τ_{xy} est la contrainte de cisaillement dans le plan xy,

- Critère de Tresca

Le critère de Tresca est plus simple et repose sur l'idée que la plastification commence lorsque la contrainte de cisaillement maximale atteint un seuil critique. Il est donné par :

$$\tau_{max} = \frac{1}{2} |\sigma_1 - \sigma_2| < \frac{\sigma_d}{2}$$

Où :

σ_1 : Contrainte principale maximale

σ_2 : Contrainte principale minimale

σ_d : Limite d'élasticité du matériau en traction simple

- Visualisation des Contraintes

Les cartes de contraintes basées sur le critère de Von Mises ou Tresca peuvent être générées via des outils de simulation numérique (comme la méthode des éléments finis - FEM). Ces cartes montrent les zones où les contraintes sont proches ou dépassent la limite de plastification [23].

III-4-1-3 Simulation sous Comsol

1- Navigateur de modèle

Au démarrage du logiciel, le navigateur de modèle apparaît. C'est lui qui permettra de spécifier le ou les modèles physiques qui seront utilisés. C'est aussi ici que la dimension de l'espace est choisie. Pour chacun des modèles, il est précisé quelles sont les variables propres à ce modèle. En cliquant sur l'assistant de modélisation, une fenêtre est apparue qui contient les principales dimensions de l'espace, nous choisissons la dimension qui correspond à notre étude (3D).

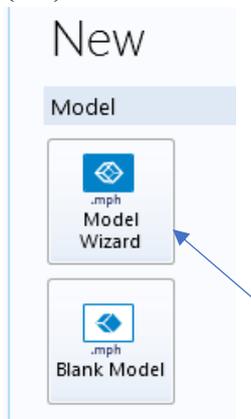


Fig.III.4 : Navigateur de modèle

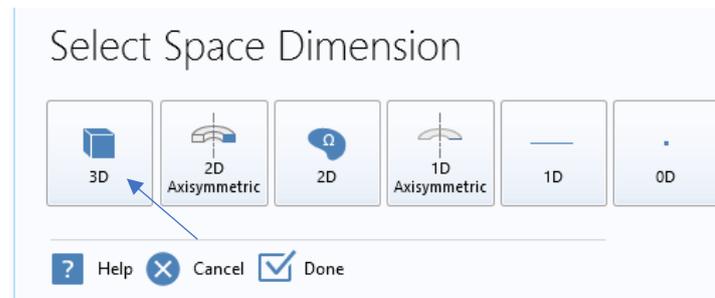


Fig.III.5 : Sélection de la dimension.

On peut configurer un modèle guidé par l'Assistant de modélisation ou commencer à partir d'un modèle vide. Lancer COMSOL puis sélectionner « Model Wizard », après sélectionner la dimension 3D.

2- Choix de la physique

Maintenant, on peut ajouter une ou plusieurs interfaces de physique. Celles-ci sont organisées en plusieurs branches de physique pour faciliter leur localisation. Nous choisissons ensuite un modèle mécanique du solide et plus particulièrement pour commencer une analyse statique,

L'interface Mécanique des solides permet l'analyse structurelle de corps 3D, 2D ou axisymétriques, avec des modèles en contraintes planes ou déformations planes en 2D. Dans ce modèle les variables vont être les déplacements (u , v , w) pour chacun des éléments élémentaires que COMSOL va devoir résoudre en fonction du système que nous allons décrire.

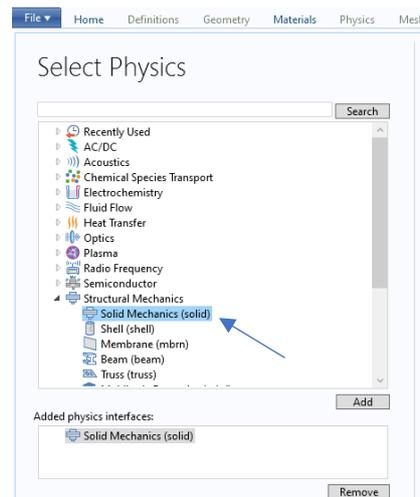


Fig.III.6 : Sélection de physique dans Cosmol Multiphysics.

3- Choix de l'étude :

Après avoir choisi le phénomène physique à étudier on choisit le régime d'étude (dans ce cas, nous choisissons le régime stationnaire). L'étude Stationnaire est utilisée lorsque les variables de champ ne varient pas dans le temps. Il est également possible de calculer plusieurs solutions, comme différents cas de charge, ou de suivre la réponse non linéaire à une charge variant lentement. Les études prédéfinies ont des paramètres de résolution et d'équation adaptés à la physique sélectionnée

Pour choisir le type d'étude on doit cliquer sur « Stationary » sous « Preset studies » puis cliquer sur « Done » une fois terminer. L'interface affiche maintenant l'arborescence du modèle configurée selon les choix que nous avons effectués dans l'Assistant de modélisation.

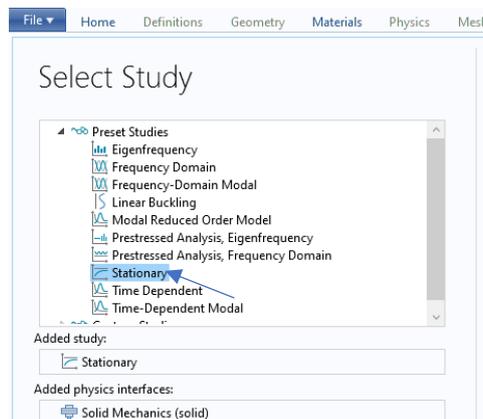


Fig.III.7 : Sélection de l'étude dans COMSOL Multiphysics

4- Géométrie

Une fois le fichier COMSOL est créé avec les équations, IL faut dessiner la géométrie du problème étudié. Le programme contient des fonctions de création assez complètes (domaines, cylindres, blocs, etc.) et d'édition d'ingénierie (opérations logiques). Les opérations effectuées sont organisées dans une arborescence visible dans l'une des fenêtres du programme. Le programme fournit également des fonctionnalités avancées avec un module d'importation

d'ingénierie qui permet de travailler avec des géométries existantes conçues dans d'autres programmes de conception.

Dans notre simulation, nous avons utilisé une géométrie précédemment créée et stockée au format CAO natif COMSOL, mphbin.

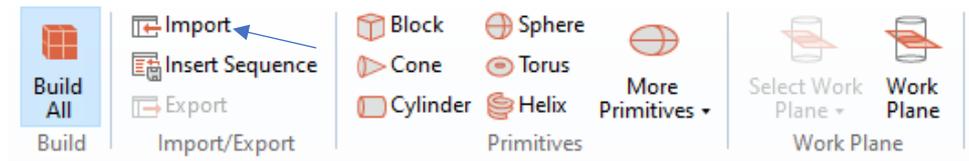
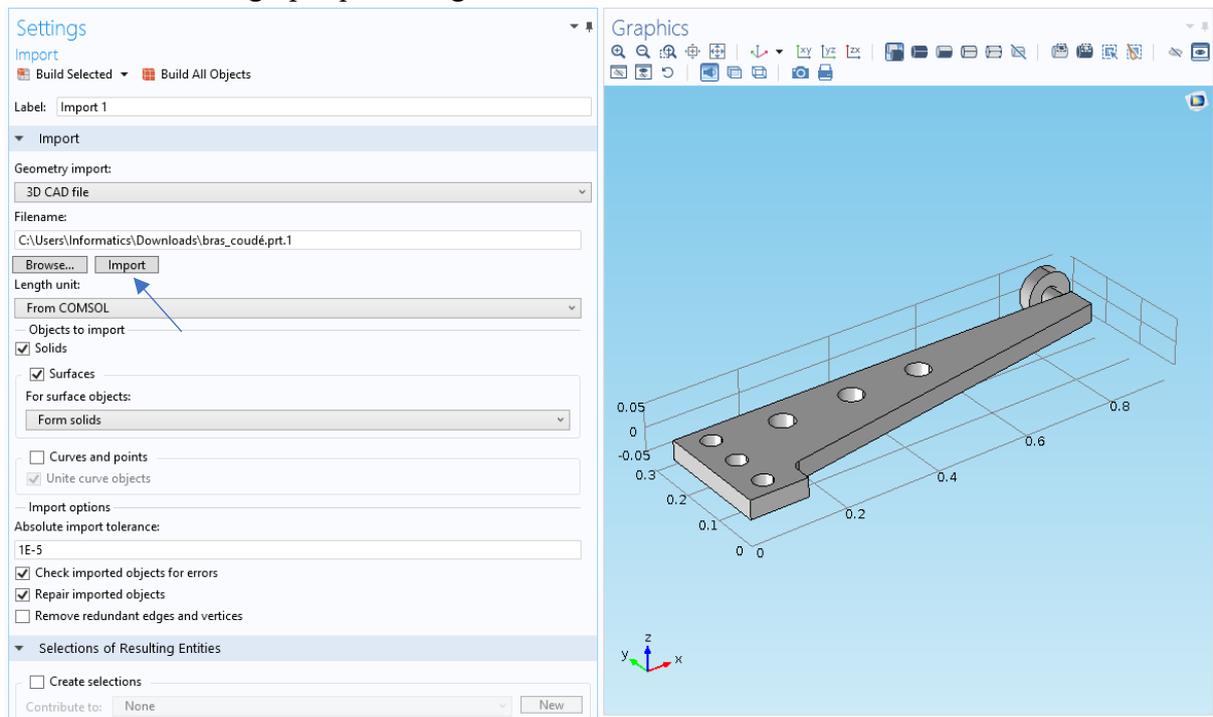


Fig.III.8 : La barre de géométrie

Pour importer une géométrie déjà réalisée dans un autre logiciel CAD, il faut procéder comme suit :

- Cliquez sur « import »
- Clique sur « browser » et sélectionnez votre fichier contenant la géométrie.
- Après importer votre géométrie, en cliquant sur « import ». La géométrie s'affiche alors dans la fenêtre graphique du logiciel.



FigIII.9 : Importation de la géométrie

5- Définition des Propriétés du matériau

La simulation statique demande de connaître les paramètres physiques des matériaux, qui sont nécessaires pour résoudre les différentes équations physiques présentées ultérieurement. COMSOL Multiphysics possède pour cela une base de données contenant un ensemble de valeurs numériques pour les différentes constantes physiques caractérisant les matériaux. On utilise une bibliothèque qui permet de définir simplement toutes les constantes physiques d'une substance. Ici, nous choisirons l'acier de construction (structural steel).

Pour ajouter un matériau à notre composant, il faut ouvrir la fenêtre "add Material". On peut accéder à cette fenêtre de deux manières :

La bibliothèque des matériaux s'ouvre. Il faut faire une recherche du matériau désiré. Les paramètres avec une croix verte sur la gauche impliquent que ce sont uniquement ces paramètres qui sont exploités dans la physique de ce modèle.

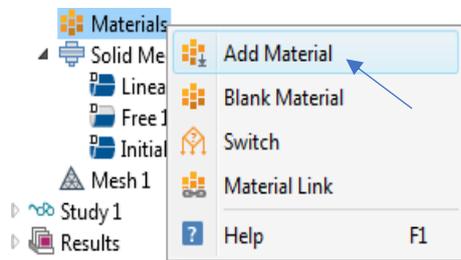


Fig. III.10 : Ajout des matériaux

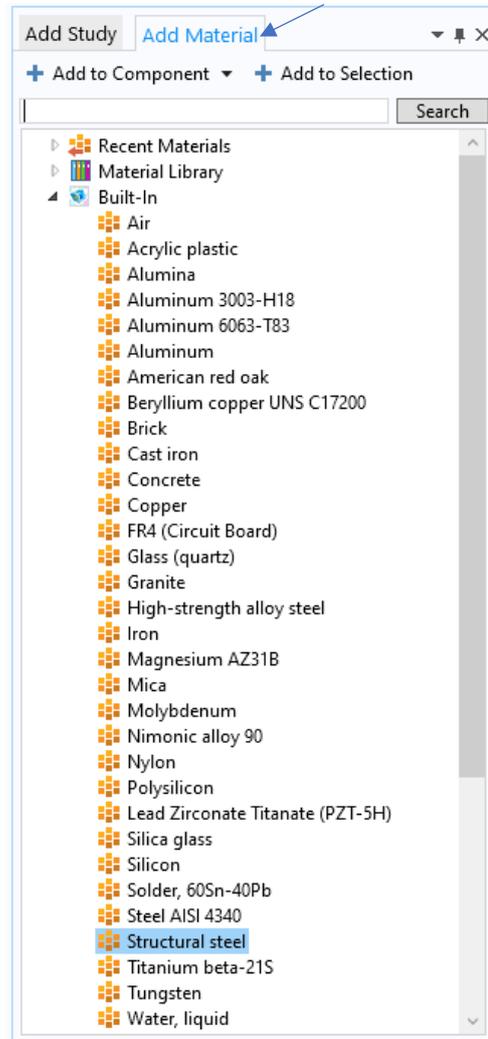


Fig. III.11 : Bibliothèque des matériaux

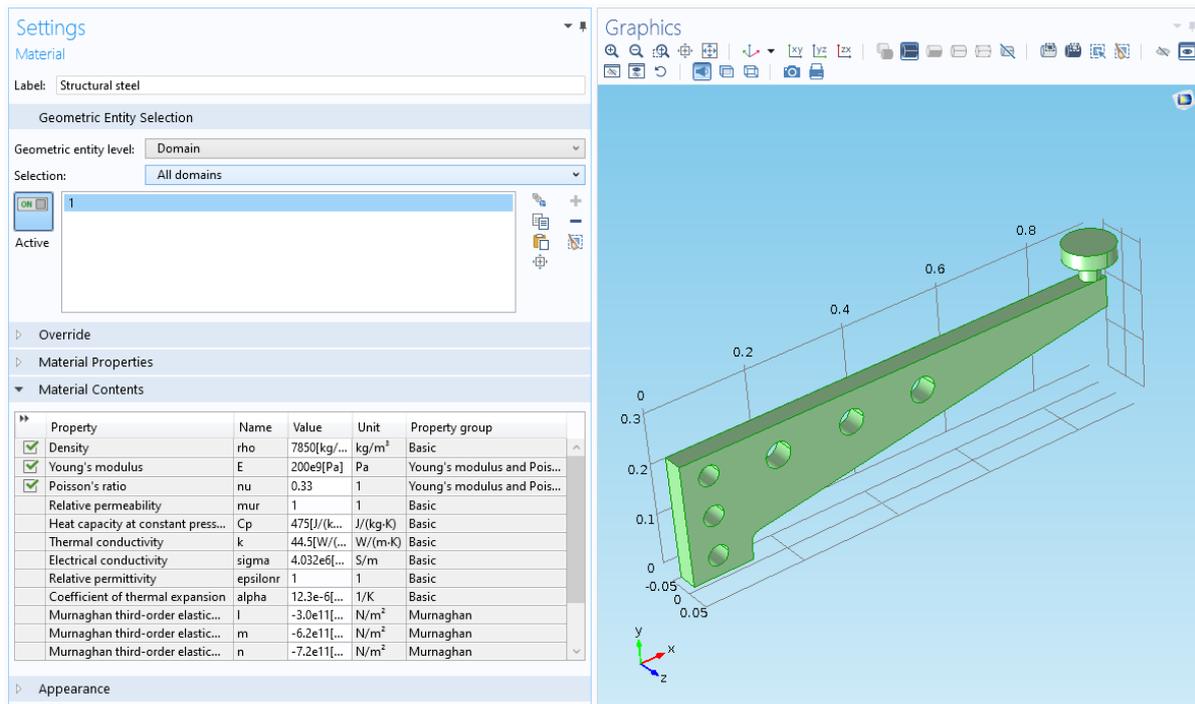


Fig. III.12 : Propriétés du matériau choisi

6- Condition au limites et chargement

Pour résoudre les EDP, il est nécessaire de définir un certain nombre de conditions aux limites cohérentes. A chaque frontière de domaine est associée un segment orienté. Il est possible de donner des valeurs de condition aux limites pour chacun de ces segments. Cette étape importante permet de rendre compte facilement des valeurs connues de variables systèmes spécifiques à des emplacements spécifiques. Par exemple l'imposition de variables dépendantes (comme le déplacement dans un état structurel) ou de type naturel (force qui s'applique dans un état structurel), le programme gère également les conditions de symétrie s'il en existe [30].

Dans le constructeur de modèles, faites un clic droit sur Mécanique des solides et sélectionnez Contrainte fixe. Cette condition bloque le déplacement de chaque point d'une surface frontière à zéro (déplacement nul dans toutes les directions). Les frontières fixées dans notre cas sont celles ayant la numérotation suivante : (1,6,7,8,9,10,11).

Les interfaces (1,6,7,8,9,10,11)		L'interface 28	
Contrainte		Charge	
Condition de contrainte	Fixée	F_y	$-1 \times 10^6 \text{ (N/m}^2\text{)}$

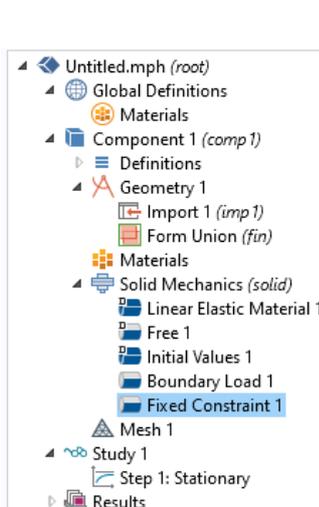


Fig. III.13 : Condition de fixation

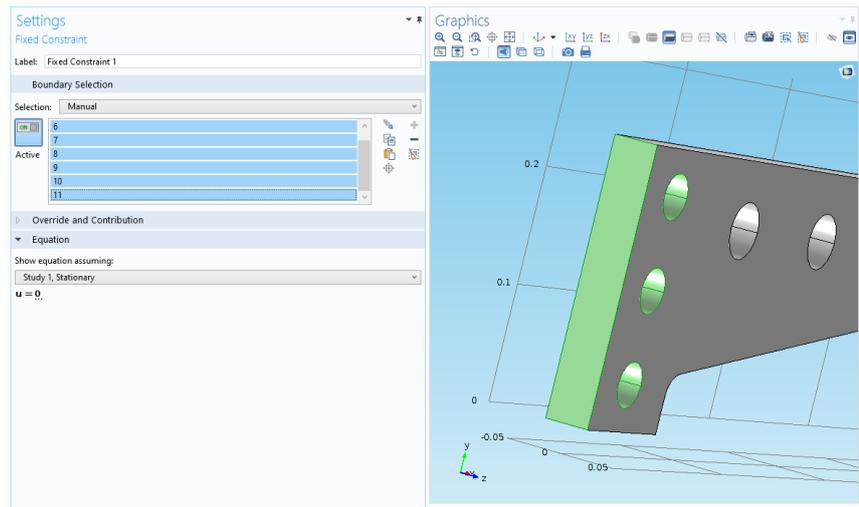


Fig. III.14 : Les interfaces fixées

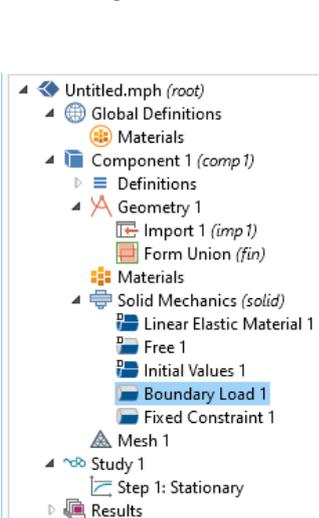


Fig. III.15 : Condition de chargement

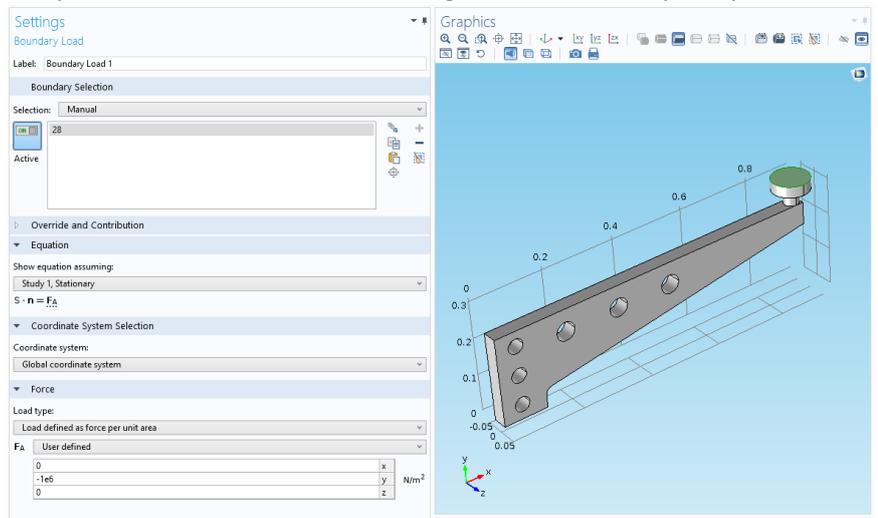


Fig. III.16 : Interface chargée

Nous allons maintenant ajouter un chargement statique à notre structure. Dans le constructeur de modèles, faites un clic droit sur Mécanique des solides et sélectionnez Chargement sur frontière. Un nœud Charge sur frontière est ajouté à la séquence du constructeur de modèles. Dans ce modèle la charge appliquée est de l'ordre 10^6 N/m^2 uniformément répartie sur la face (28) qui apparaît en vert sur la figure III.16.

7- Maillage du modèle

COMSOL propose un maillage adéquat qui est plus dense autour des formes de petite dimension et un maillage moins dense ailleurs. Les dimensions de maillage peuvent aussi être modifiées manuellement selon le choix de l'utilisateur.

L'algorithme par défaut génère automatiquement un maillage tétraédrique pour les solides, et une combinaison maillage tétraédrique-maillage extrudé pour les fluides. Nous choisissons la géométrie triangulaire pour les maillages parce qu'il donne le meilleur résultat de calcul. Dans ce modèle, la géométrie contient de petites arêtes et faces, le maillage choisi est plus fin que celui proposé par défaut. Cela permettra de mieux gérer les variations du champ de contrainte et d'obtenir un résultat plus précis [29].

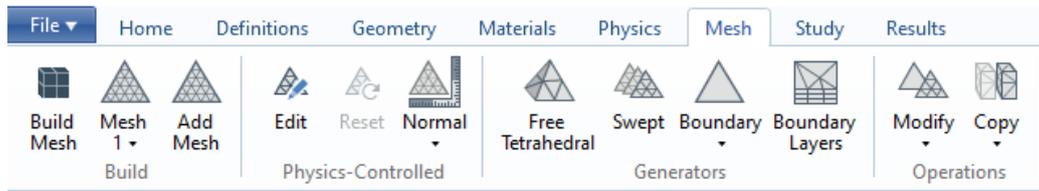


Fig. III.17 : La barre Mesh

Dans cette étude, nous avons utilisé un maillage (ultrafin) qui est une discrétisation extrêmement dense d'un modèle géométrique. Ce type de maillage est essentiel pour les géométries complexes, mais il présente des inconvénients majeurs : temps de calcul prohibitif et besoins élevés en mémoire RAM. Il est souvent employé dans des secteurs exigeants comme l'aérospatial, l'automobile ou la recherche médicale, où une erreur de modélisation aurait des conséquences critiques.

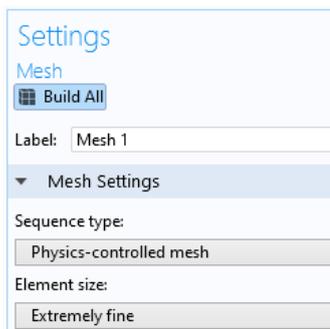


Fig. III.18 : Sélection du type de maillage

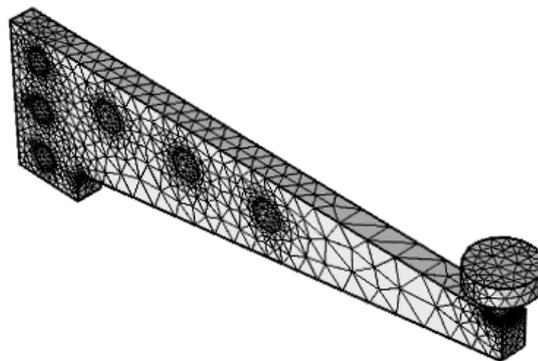


Fig. III.19 : Géométrie maillée

8- Résolution du problème

Au début de la configuration du modèle, nous avons sélectionné une étude stationnaire, ce qui signifie que COMSOL utilisera un solveur stationnaire. La résolution du problème est réalisée à l'aide d'un des différents solveurs : Dans cette étape, on peut régler les paramètres du solveur et lancer les calculs dans le répertoire études.

Les paramètres par défaut du solveur conviennent parfaitement pour cette simulation. Un solveur direct est un type de solveur rapide et très robuste qui nécessite peu ou pas de réglages manuels pour résoudre un large éventail de problèmes de physique.



Fig. III.20 : La barre study

En cliquant sur "Compute", le logiciel effectue une série d'étapes pour résoudre le modèle numérique (préparation du modèle avant le calcul, discrétisation du problème, résolution numérique). La contrainte de Von Mises est affichée dans la fenêtre graphique sous forme de tracé de surface par défaut, le déplacement étant visualisé ainsi que la déformée.

III-4-1-4 Résultats et discussions

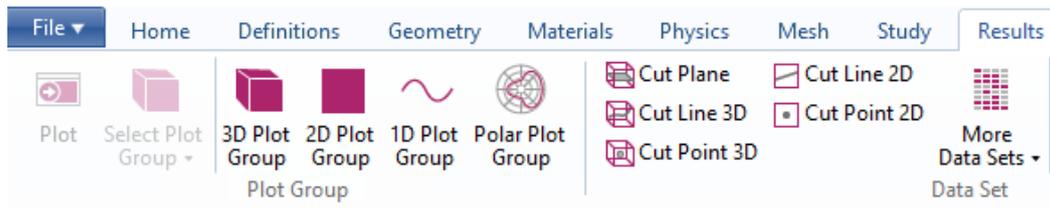


Fig. III.21 : La barre des résultats

COMSOL Multiphysics calcule différents paramètres relatifs à la physique choisie. Ainsi, nous n’avons pas besoin de toujours relancer le calcul pour afficher un résultat sauf si l’on souhaite afficher un résultat particulier tiré d’une fonction donnée. Il suffit alors de choisir ce qu’on appelle dans COMSOL Multiphysics les « group plots » qui peuvent être soit en 1D, 2D ou 3D et afficher le résultat souhaité.

a- Les déplacements

Après exécution de l’étude statique sur ComsolMultiphysics nous avons aboutis aux résultats suivants :

Sur les figures III-22 à 24 nous constatons que la distribution du déplacement total dans le volume est logique puisqu’elle commence par un déplacement nul sur le bord fixe en arrivant à une valeur maximale sur l’extrémité sollicitée par le poids de la voiture dont la valeur maximale est de l’ordre de 0,838 mm (Figure III-22)

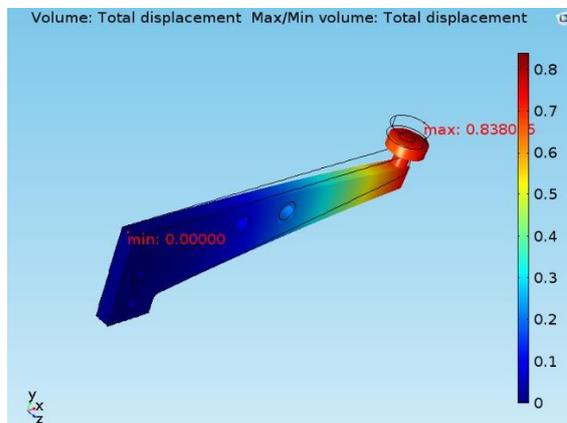


Fig. III.22 : Déplacement total 3D.

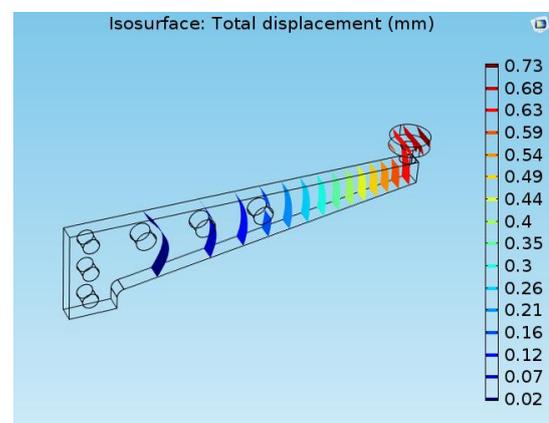


Fig. III.23 : Déplacement total en isosurface.

Dans la figure III-23 nous montrons la distribution du champ de déplacement en isosurface qui confirme les résultats de la distribution en 3D. la représentation de l’orientation de la distribution des différents éléments géométriques, par des flèches (figure III-24), va bien en concordance avec les résultats trouvés précédemment.

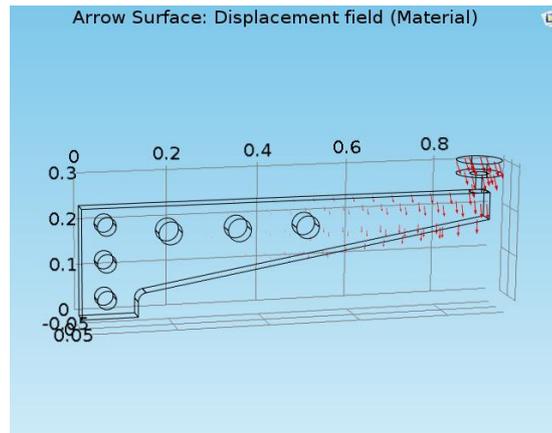


Fig. III.24: Flèches du champ de déplacement .

La figure III-26 illustre le déplacement total selon la longueur du support coudé dont la direction a été déterminé suivant une ligne de coupe qui traverse le long de la pièce (figure III-25). L'évolution de la courbe montre que le déplacement évolue logiquement le long de l'axe x ; en arrivant au déplacement maximal à l'extrémité chargée.

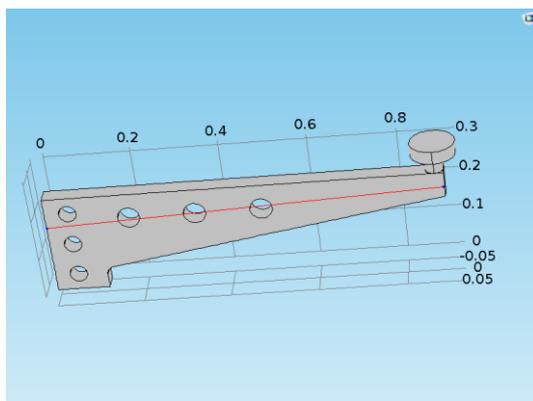


Fig. III.25: Ligne de coupe

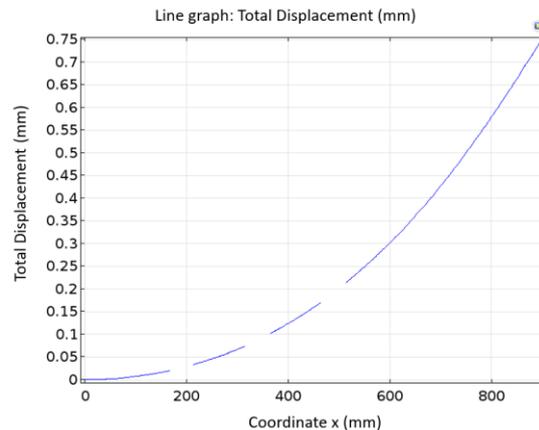


Fig. III.26: Déplacement total selon x .

b- Les contraintes de Von Mises

Les figures III-27 et 28 montrent respectivement la distribution des contraintes de Von Mises dans le volume du support coudé.

Cette représentation nous a permis de localiser les différentes zones de concentration de contraintes.

Ainsi, le calcul du rapport de la limite élastique et la contrainte maximale de Von Mises a abouti à une valeur du coefficient de sécurité minimale acceptable donnant naissance à une rigidité suffisante du support.

Pour une étude du comportement suivant une direction donnée (ligne de coupe : figure III-25), nous avons tracé la courbe qui montre l'évolution de la contrainte de Von Mises selon x à travers la ligne de coupe choisie précédemment.

Cette évolution va bien en concordance avec la représentation volumique puisque les valeurs max ont été enregistrées dans les mêmes zones (figure III-29).

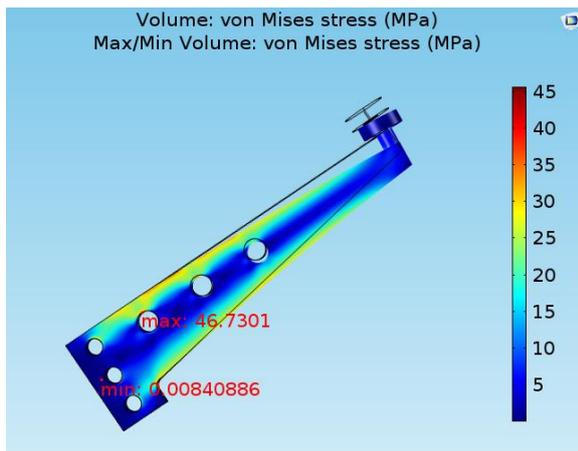


Fig. III.27 : Contrainte de Von Mises 3D.

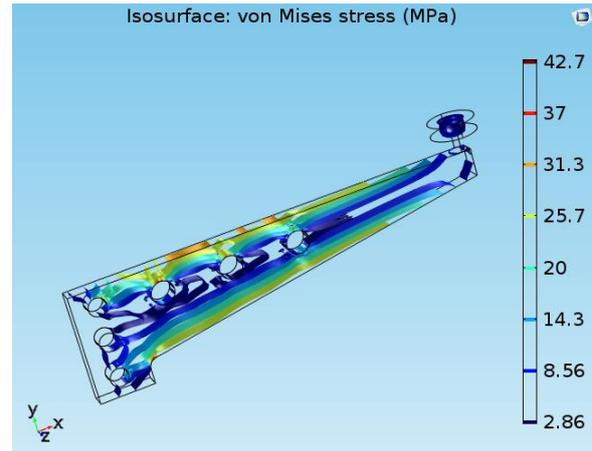


Fig. III.28 : Isosurface de la contrainte de Von mises

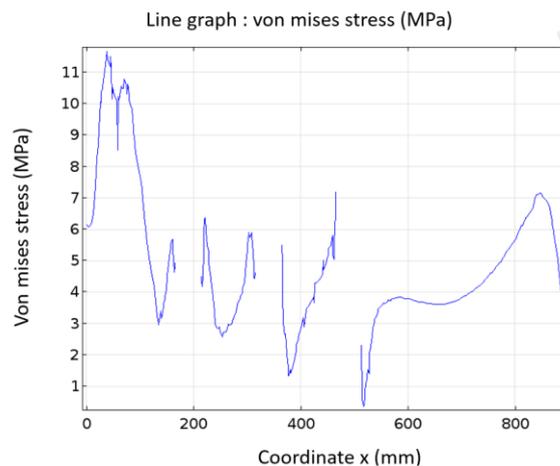


Fig. III.29 : Contrainte de Von Mises selon x

III-4-1-5 Conclusion

Cette analyse statique sous COMSOL a validé la résistance de la structure, avec des contraintes inférieures à la limite élastique et des déplacements conformes aux spécifications. Le maillage adaptatif a assuré des résultats précis en un temps raisonnable, identifiant clairement les zones critiques. Ces résultats offrent une base fiable pour d'éventuelles optimisations ou analyses avancées. L'étude confirme l'utilité de COMSOL pour des simulations statiques rapides et précises en conception mécanique.

III-4-2 Analyse des fréquences propres

III-4-2-1 Objectif

L'objectif principal d'une analyse des fréquences propres (ou analyse modale) est de déterminer les caractéristiques vibratoires naturelles d'une structure, ses fréquences de résonance et ses modes de vibration associés. Cette analyse permet ainsi de prédire et prévenir les risques vibratoires dans des applications allant des structures aérospatiales aux machines industrielles, garantissant la fiabilité et la sécurité des systèmes mécaniques soumis à des sollicitations dynamiques.

Ce type d'analyse permet d'éviter les phénomènes de résonance destructrice, d'optimiser la conception mécanique en éloignant ces fréquences des plages de fonctionnement critiques,

et de servir de base pour des analyses dynamiques plus complexes comme les études de réponse transitoire ou harmonique.

Dans COMSOL Multiphysics, les fréquences propres (ou fréquences naturelles) sont les fréquences auxquelles un système oscille en l'absence de forces externes ou d'amortissement. COMSOL permet de calculer ces fréquences, d'analyser les déformées modales et d'intégrer l'amortissement pour comprendre les effets des vibrations.

III-4-2-2 Théorie

Les fréquences propres et les modes propres sont des concepts fondamentaux pour décrire le comportement vibratoire d'un système physique. Ils sont déterminés par les propriétés du système, telles que sa masse, sa rigidité et ses conditions aux limites.

Les fréquences propres (ω_n) sont les fréquences auxquelles un système oscille librement en l'absence de forces externes ou d'amortissement. Pour un système à un degré de liberté, la fréquence propre est donnée par :

$$\omega_n = \sqrt{\frac{k}{m}}$$

où : ω_n est la fréquence propre (en rad/s),
 k est la constante de raideur du système,
 m est la masse du système.

Pour un système à plusieurs degrés de liberté, les fréquences propres sont obtenues en résolvant l'équation aux valeurs propres :

$$\det(\mathbf{K} - \omega_n^2 \mathbf{M}) = 0$$

où : \mathbf{K} est la matrice de rigidité,
 \mathbf{M} est la matrice de masse.

Les modes propres (ϕ_n) sont les formes spécifiques que prend le système lorsqu'il vibre à une fréquence propre. Ils sont obtenus en résolvant l'équation :

$$(\mathbf{K} - \omega_n^2 \mathbf{M})\phi_n = 0$$

Chaque mode propre ϕ_n est associé à une fréquence propre ω_n [24].

Dans l'analyse des systèmes dynamiques, les valeurs propres et les fréquences propres sont des concepts fondamentaux. Les valeurs propres sont obtenues en résolvant l'équation caractéristique d'une matrice représentant le système, tandis que les fréquences propres correspondent aux taux d'oscillation naturels du système.

Pour un système oscillant linéaire, comme un système masse-ressort ou une structure vibrante, les fréquences propres sont directement dérivées des valeurs propres. Ils sont liés par la relation : $\omega = \sqrt{\lambda}$

III-4-2-3 Simulation sous Comsol

COMSOL utilise un solveur dédié pour calculer les fréquences propres d'une structure. Ces calculs peuvent être effectués avec ou sans amortissement, ce qui permet d'analyser l'évolution des vibrations dans différents contextes. COMSOL est un outil puissant pour l'étude des fréquences propres et des vibrations des structures. Il permet non seulement de calculer ces fréquences et d'analyser les modes de vibration, mais aussi d'optimiser les structures pour améliorer leur comportement mécanique.

Remarque : La physique et la modélisation géométrique ainsi que le matériau associé au composant sont les mêmes que dans l'analyse statique.

1- Sélection de l'étude

Dans cette analyse, on sélectionne « Eigenfrequency » ou fréquences propres comme type d'étude dans le module de mécanique des structures.

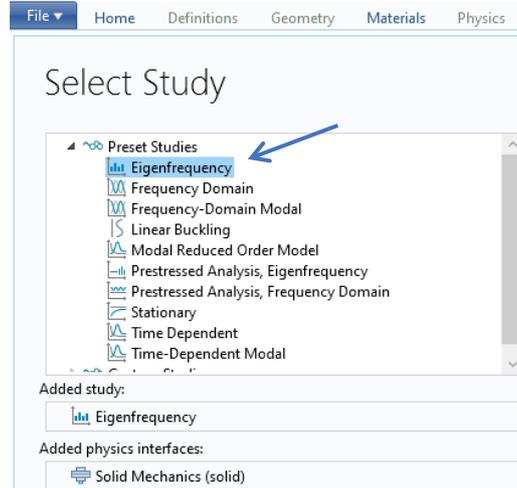


Fig. III.30 : Choix de l'étude.

Le tableau ci-dessous montre les six premières fréquences propres trouvées dans ce modèle.

Fréquences propres	Valeur [Hz]
f_1	51.935
f_2	211.39
f_3	267.2
f_4	503.39
f_5	759.44
f_6	773.62

III-4-2-4 Résultats et discussion

Pour étude plus approfondie du comportement du support coudé qui peut être sollicité en statique ou en dynamique, nous avons représenté les six premières fréquences propres de la pièce et dont les principaux résultats sont illustrés par les figures ci-dessous.

a- Les déplacements

Les figures III-31 à 34 représentent respectivement le déplacement total relatif à la première ainsi que la deuxième fréquence propre.

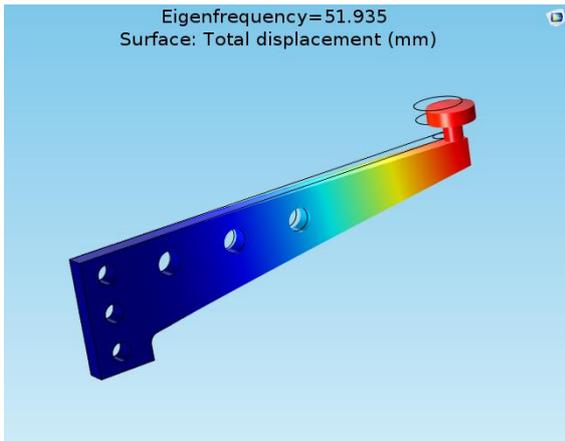


Fig. III.31: Déplacement total 3D .
(1^{ère} fréquence propre)

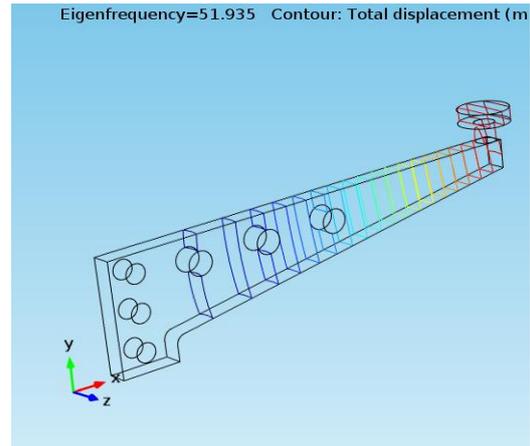


Fig. III.32: Contours du déplacement total
(1^{ère} fréquence propre)

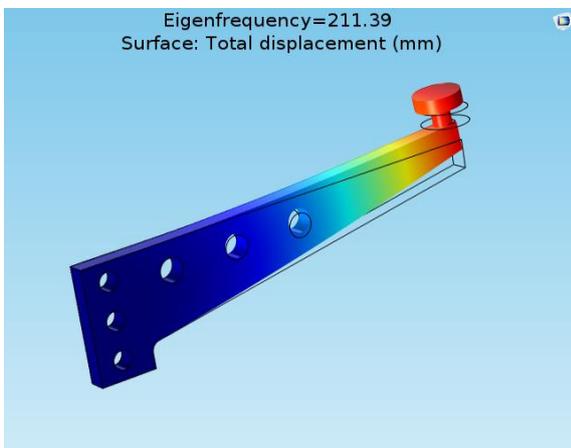


Fig. III.33: Déplacement totale 3D .
(2^{ème} fréquence propre)

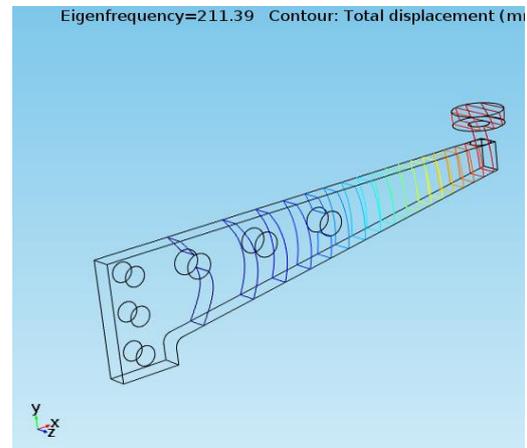


Fig. III.34: Contours du déplacement total
(2^{ème} fréquence propre)

La figure III-35 représente le déplacement total selon x pour les six premières fréquences propres. L'évolution du déplacement pour les deux premières fréquences propres est similaire et très proche de celle obtenue lors de l'étude statique.

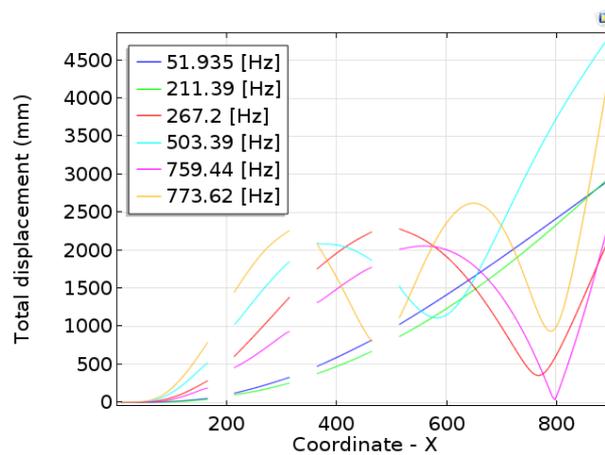


Fig. III.35 : Courbe de déplacement total selon x pour les 6 fréquences propres.

b- Contraintes de Von mises

Les figures III-36 à 39 montrent un comportement semblable à celui de l'étude statique ; étant donné que la concentration des contraintes réside dans les mêmes endroits trouvés lors de l'étude statique.

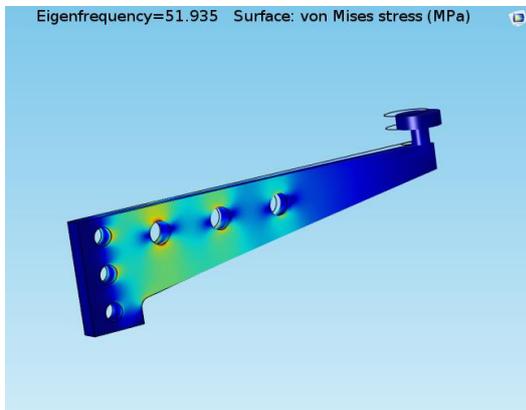


Fig. III.36: Contraintes de von mises 3D .
(1^{ère} fréquence propre)

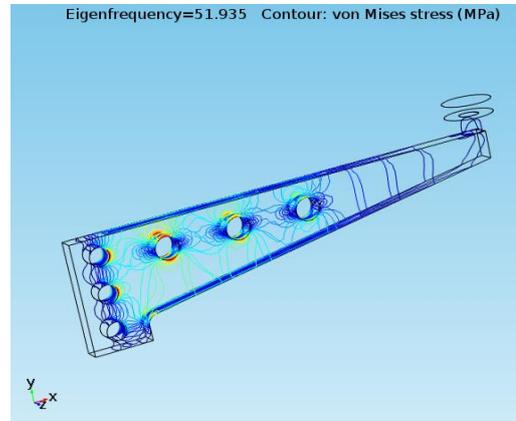


Fig. III.37: Contours de contrainte de Von mises
(1^{ère} fréquence propre)

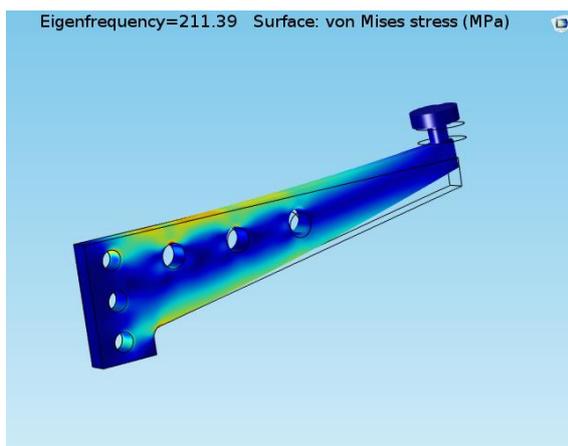


Fig. III.38: Contraintes de von mises 3D .
(2^{ème} fréquence propre)

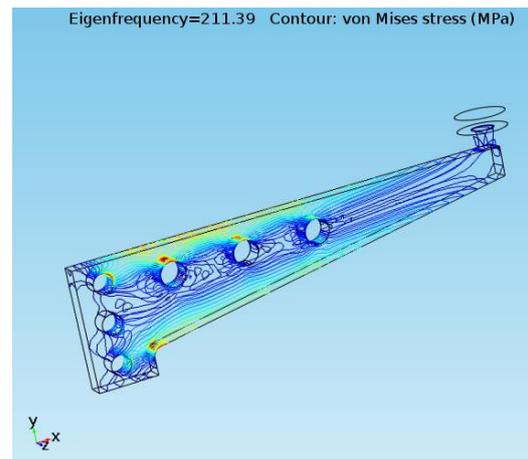


Fig. III.39: Contours de contrainte de Von mises
(2^{ème} fréquence propre)

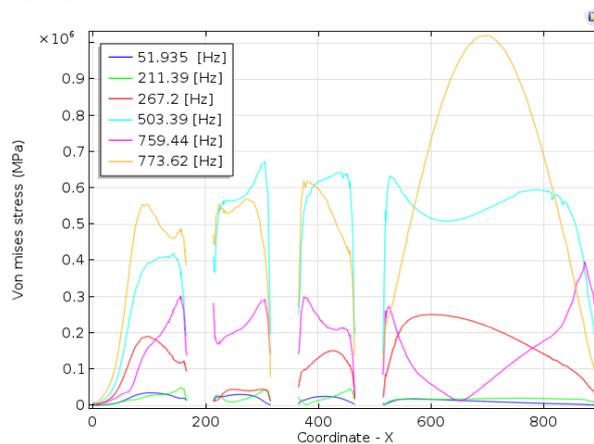


Fig. III.40 : Courbe de contraintes de Von mises selon x
pour les 6 fréquences propres.

Dans la figure III-40, nous avons représenté l'évolution de la concentration de la contrainte de Von Mises selon x et cela pour la ligne de coupe montrée précédemment.

A travers cette représentation graphique on confirme une autre fois que les deux premiers modes sont toujours les plus représentatifs du comportement de la pièce.

III-4-3 Analyse Transitoire

III-4-3-1 Objectif

La simulation du comportement dynamique d'un système mécanique est un atout majeur pour optimiser son dimensionnement. En permettant d'anticiper les risques d'endommagement imputables aux vibrations, elle permet de garantir la durée de vie du produit tout en assurant une bonne intégration du système dans son environnement acoustique, dans le respect des critères de sécurité et de confort fixés par le cahier des charges.

Une analyse transitoire consiste à étudier l'évolution temporelle complète du comportement dynamique d'une structure soumise à des charges variables dans le temps en calculant précisément ses déplacements, contraintes et déformations à chaque instant, afin d'évaluer sa réponse sous des sollicitations réelles, d'identifier les pics de contraintes critiques et d'optimiser sa résistance et sa durabilité face à des chargements transitoires complexes.

Le but de cette analyse est de trouver la réponse transitoire d'une charge harmonique. La fréquence d'excitation est de 211 [Hz], ce qui se situe entre la première et la deuxième fréquence propre trouvée dans l'analyse des fréquences propres.

III-4-3-2 Théorie

a- Equation du mouvement

L'analyse transitoire est une méthode utilisée en ingénierie et en physique pour étudier le comportement d'un système dynamique en fonction du temps, en réponse à des conditions initiales ou à des forces externes variables.

Par exemple, pour un système mécanique à un degré de liberté, l'équation différentielle du mouvement est :

$$mx''(t) + cx'(t) + kx(t) = F(t)$$

où : m : masse du système, c : coefficient d'amortissement,
 k : constante de raideur, $x(t)$: déplacement en fonction du temps,
 $F(t)$: force externe appliquée.

La solution de cette équation donne le comportement transitoire du système, c'est-à-dire comment $x(t)$ évolue dans le temps avant d'atteindre un état stable [25].

b- Chargement Harmonique

Le chargement harmonique est un type de sollicitation appliquée à un système dynamique, où la force externe ou l'excitation varie de manière sinusoïdale dans le temps. Un chargement harmonique est généralement représenté par une fonction sinusoïdale de la forme :

$$F(t) = F_0 \sin(\omega t + \phi)$$

où : $F(t)$: force appliquée en fonction du temps, F_0 : amplitude de la force,
 ω : fréquence angulaire de l'excitation (en rad/s), ϕ : phase initiale (en radians).

Lorsqu'un système est soumis à un chargement harmonique, sa réponse dépend de la fréquence de l'excitation ω par rapport à sa fréquence propre ω_n [26].

c- Amortissement

Les modèles d'amortissement phénoménologiques sont généralement utilisés pour modéliser l'amortissement par frottement intrinsèque présent dans la plupart des matériaux. L'équation de mouvement suivante décrit la dynamique d'un tel système avec amortissement visqueux :

$$Mu''(t)+Cu'(t)+Ku(t)=F(t)$$

Avec :

M : Matrice de masse,

C : Matrice d'amortissement,

K : Matrice de rigidité,

$u(t)$: Déplacement,

$u'(t), u''(t)$: Vitesse et accélération,

$F(t)$: Force extérieure appliquée.

Trois modèles d'amortissement de base sont disponibles dans les interfaces de mécanique des structures pour la modélisation explicite de l'amortissement des matériaux :

- L'amortissement visqueux : énergie dissipée proportionnelle à la vitesse du mouvement,
- L'amortissement hystérétique (dit aussi "amortissement structural") : énergie dissipée proportionnelle au déplacement telle que la force d'amortissement est de signe opposée à celui de la vitesse.

Amortissement de Rayleigh

L'amortissement de Rayleigh est un modèle mathématique utilisé pour représenter l'amortissement dans les systèmes dynamiques. Il est largement employé car il permet de simplifier les calculs tout en restant réaliste pour de nombreux systèmes physiques. Il suppose que la matrice d'amortissement C est une combinaison linéaire de la matrice de masse M et de la matrice de rigidité K . Cela s'exprime par la formule :

$$C=\alpha M+\beta K$$

où :

α : coefficient d'amortissement proportionnel à la masse,

β : coefficient d'amortissement proportionnel à la rigidité.

Cet amortissement est souvent utilisé en dynamique des structures pour plusieurs raisons :

1. Simplicité : Il permet de modéliser l'amortissement sans avoir à déterminer une matrice d'amortissement complète, ce qui serait souvent complexe et coûteux en calculs.
2. Propriétés mathématiques : Il préserve le découplage des modes propres dans les systèmes à plusieurs degrés de liberté, ce qui simplifie l'analyse modale.
3. Flexibilité : Les coefficients α et β peuvent être ajustés pour représenter différents niveaux d'amortissement dans un système [27].

Pour trouver les valeurs de l'amortissement de Rayleigh, vous pouvez utiliser les relations entre le taux d'amortissement critique et les paramètres d'amortissement de Rayleigh. Il est souvent plus facile d'interpréter les taux d'amortissement critique, qui sont donnés par :

$$\xi_i = \frac{\left(\frac{\alpha}{\omega_i} + \beta \cdot \omega_i\right)}{2}$$

où ζ_i est le taux d'amortissement critique à une fréquence angulaire spécifique ω_i . La connaissance de deux paires correspondantes ζ_i et ω_i donne un système d'équations avec les paramètres d'amortissement comme variables inconnues. :

$$\begin{bmatrix} 1 & \omega_1 \\ \frac{1}{(2 \cdot \omega_1)} & \frac{\omega_1}{2} \\ 1 & \omega_2 \\ \frac{1}{(2 \cdot \omega_2)} & \frac{\omega_2}{2} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \alpha \\ \beta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \xi_1 \\ \xi_2 \end{bmatrix}$$

III-4-3-3 Simulation sous COMSOL

1- Choix de l'étude :

Pour cette analyse, nous avons sélectionné l'étude « Time Dependent » dans mécanique des structures.

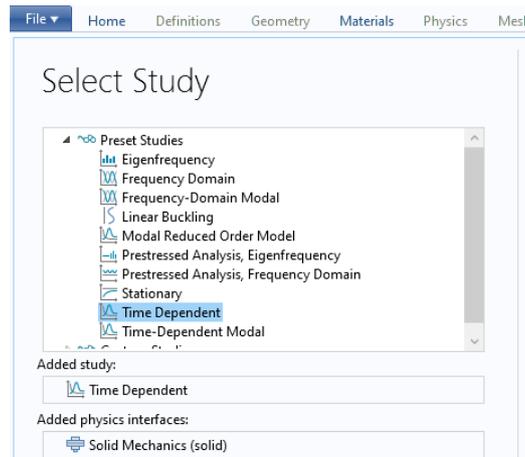


Fig. III.41 : Choix de l'étude.

2- Chargement

Ce modèle utilise une charge harmonique avec une fréquence d'excitation de 211 Hz sur la même face chargée dans l'analyse statique. L'expression de la charge peut s'écrire :

$$F_y = -1.5 \cdot 10^6 \cdot [1 + \sin(2\pi \cdot 211 \cdot t - \pi/2)] \text{ N/m}^2$$

Les interfaces (1,6,7,8,9,10,11)		L'interface 28	
Contrainte		Charge	
Condition de contrainte	Fixée	F_y	$-1.5 \cdot 10^6 \cdot [1 + \sin(2\pi \cdot 211 \cdot t - \pi/2)] \text{ N/m}^2$

Où t désigne le temps en secondes.

La fréquence d'excitation est approximativement égale à la deuxième fréquence propre trouvée dans l'analyse fréquentielle.

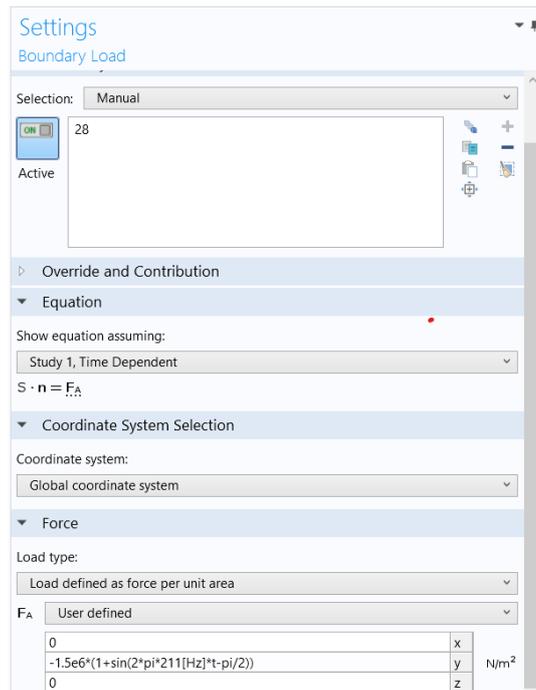


Fig. III.42: Condition de Chargement

3- Introduction des coefficients d’amortissement

Pour une structure ayant un taux d’amortissement constant de 0,1. Sélectionnez deux fréquences proches de la fréquence d’excitation, 100 Hz et 300 Hz,

Pour calculer les paramètres α et β nous avons réalisé le Script suivant dans MATLAB.

$$b = [0.1 ; 0.1];$$

$$A = [1/(2*100*2*pi) \ 2*pi*100/2; 1/(2*300*2*pi) \ 2*pi*300/2];$$

$$damp = A \setminus b ;$$

$$Alpha = damp (1)$$

$$beta = damp (2)$$

Ce qui renvoie les valeurs suivantes : $Alpha = 94.2478$ et $beta = 7.9577e-05$

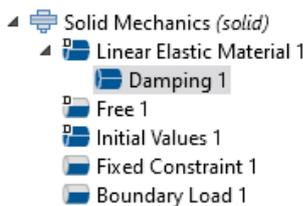


Fig. III. 43 :Application d’amrtissement

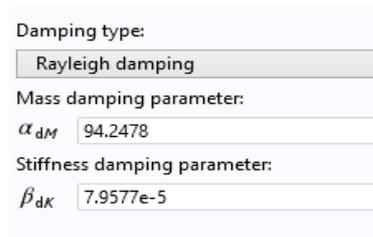


Fig. III.44 : Les valeurs α et β .

4- Résolution du modèle

COMSOL résout les équations de la mécanique des structures pour chaque pas de temps, en calculant les déplacements, les contraintes et les déformations de la structure en fonction du temps. Pour cela un pas de temps doit être choisi.

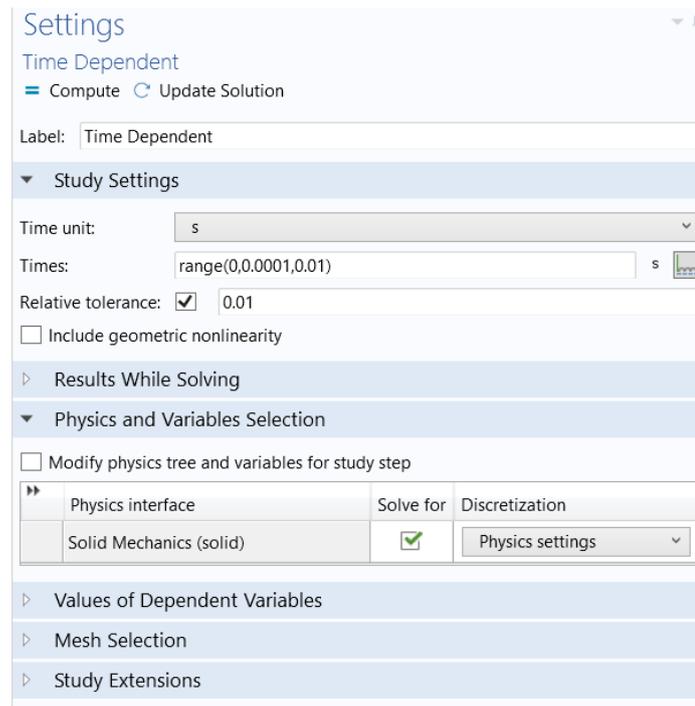


Fig. III.45 : Paramètres de l'étude

III 4-3-4 Résultats et discussion

Afin de mettre en évidence l'effet du temps, une étude transitoire a été faite sur le support coudé.

a- Les déplacements

Comme attendu le déplacement maximal se trouve à l'extrémité chargée et cela comme le montre la figure III-46.

Sur la figure III-47 on représente les trois composantes du champ de déplacement dans les trois directions.

Ainsi, on remarque que la composante du déplacement selon z est nulle c'est-à-dire que le champ de déplacement est bidirectionnel dans le plan xy.

Nous remarquons également que les déplacements selon x et y sont opposés et que ceux obtenus suivant y sont de grandes amplitudes par rapport à ceux suivant x.

Cette dernière déduction montre l'effet du phénomène de la traction-compression dans une poutre cantilever.

Pour un point donné, situé par exemple sur la frontière chargée (figure III-48) il est possible de montrer l'évolution du déplacement correspondant et cela en fonction du temps (figure III-49) dont les valeurs extrêmes se trouvent après chaque pas de temps qui vaut 0,003 s. avec une valeur maximale trouvée à $t=0,009$ s.

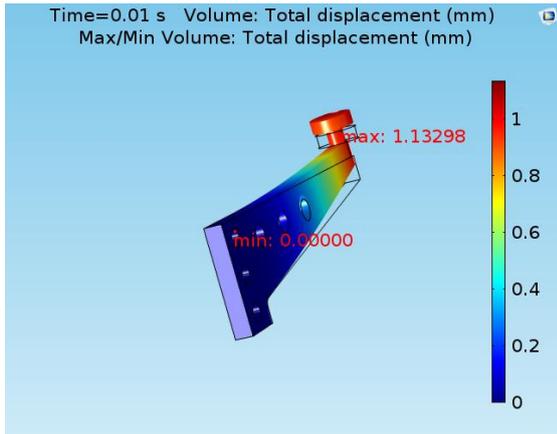


Fig. III. 46 : Déplacement total 3D.

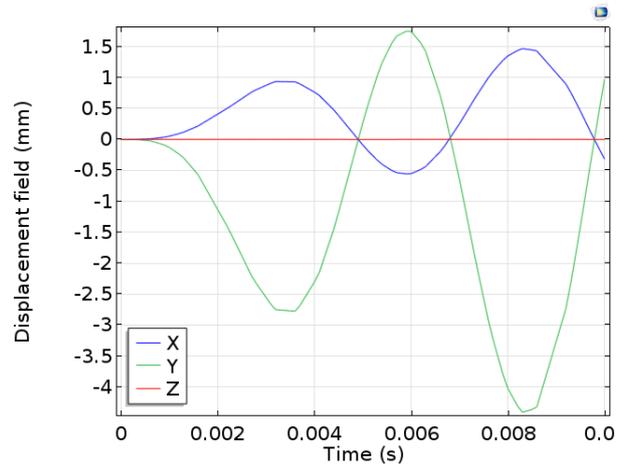


Fig. III.47 : Champ de déplacement dans les 3 directions

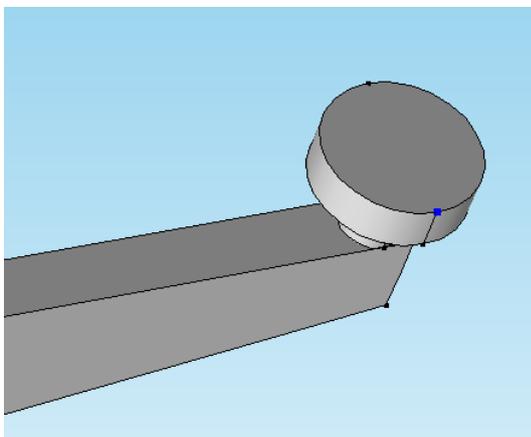


Fig.III.48 : Point choisi .

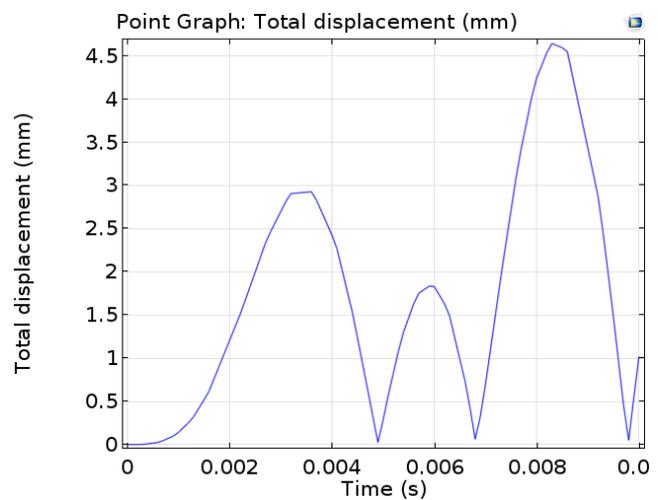


Fig. III.49: Déplacement total .

b- Les contraintes de Von mises

La distribution globale des contraintes ainsi que les valeurs extrêmes sont représentées par la figure III-50. La concentration de la contrainte est observée comme précédemment dans le même endroit avec une valeur importante de contrainte de Von Mises au temps $t = 0,01s$.

La figure III-51, montre la distribution bidirectionnelle des contraintes principales lors de l'analyse transitoire.

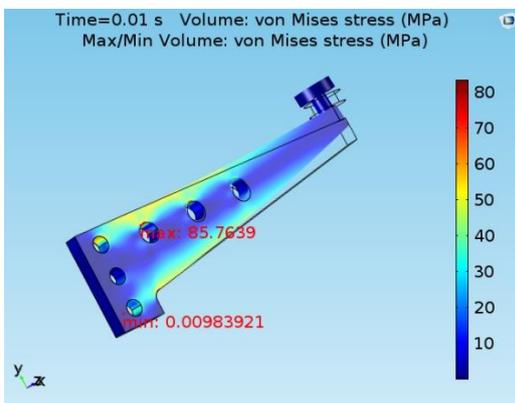


Fig. III.50: Contrainte de Von Mises 3D

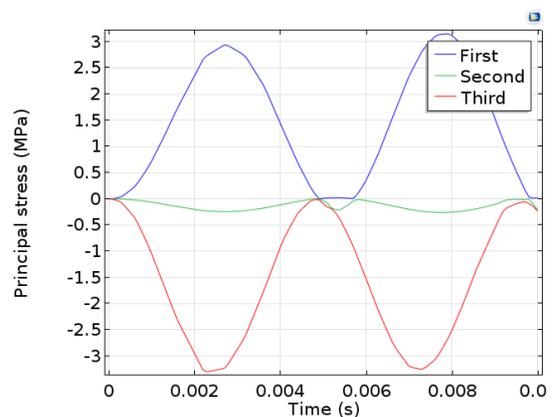


Fig. III.51: Contraintes principales

La principale remarque tirée de cette figure c'est que les amplitudes de la première contrainte ainsi que de la troisième contrainte sont presque identique mais de signe opposé. Par contre la deuxième contrainte principale est presque nulle.

La représentation de la contrainte de Von Mises dans le même point (figure III.48) montre bien la périodicité du comportement transitoire de la structure (figure III-52).

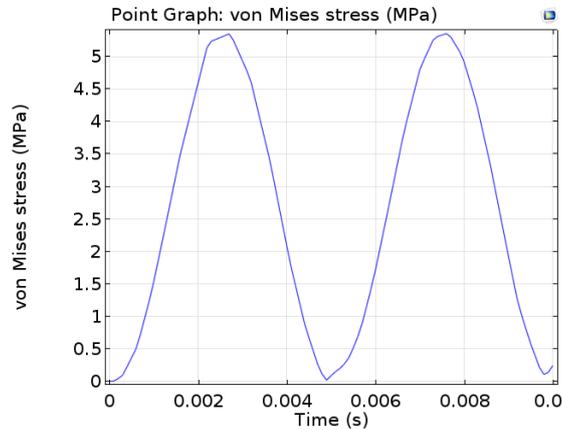


Fig. III. 52 : Contrainte de Von Mises

III-4-4 Analyse Paramétrique

III-4-4-1 Objectif

L'analyse paramétrique est une méthode essentielle pour étudier la sensibilité d'un système physique à ses paramètres caractéristiques. Elle vise à étudier systématiquement l'influence des paramètres clés (géométrie, propriétés matérielles, conditions aux limites, chargement) sur le comportement d'un système physique, permettant d'identifier les paramètres les plus sensibles, d'optimiser les performances, de valider les modèles théoriques, et de réduire les coûts de développement en explorant virtuellement différentes configurations avant la fabrication physique. Cette approche est particulièrement utile pour quantifier les relations entre les paramètres d'entrée et les réponses du système, comme l'effet du module d'Young sur les contraintes mécaniques ou l'impact de la température sur les propriétés thermiques.

Le but de cette partie d'étude est de trouver la réponse statique en fonction de la direction de la force. Cette dernière est appliquée au même bord que dans l'analyse statique.

III-4-4-2 Théorie

L'analyse paramétrique repose sur des principes mathématiques rigoureux :

La réponse R du système est fonction des paramètres P_i :

$R = f(P_1, P_2, \dots, P_n)$ Pour un système mécanique linéaire, cette relation peut s'exprimer par :

$$[K(P)] \{U\} = \{F(P)\}$$

où : $[K]$ est la matrice de rigidité dépendante des paramètres

$\{U\}$ est le vecteur solution

$\{F\}$ est le vecteur de chargement

Les principaux paramètres analysés comprennent :

- Propriétés géométriques (dimensions, angles)
- Caractéristiques matérielles (module d'Young, coefficient de Poisson)

- Conditions environnementales (température, pression)
- Charges appliquées (forces, moments)

L'analyse paramétrique s'appuie sur :

- Balayage unidimensionnel (variation d'un seul paramètre)
- Exploration multidimensionnelle (combinaisons de paramètres)
- Optimisation automatique (recherche de configurations optimales)

III-4-4-3 Simulation sous consol

a- Sélection d'étude

Dans le module de mécanique des structures, on sélectionne l'étude stationnaire « Stationary ». Ensuite, un clic droit sur le bouton « study » et on a choisi « parametric sweep ».

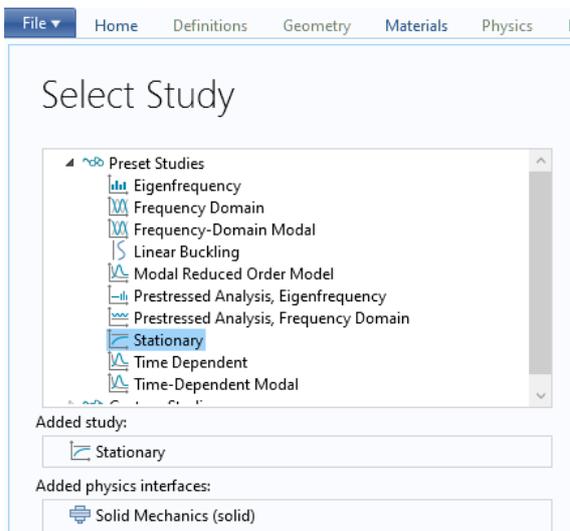


Fig. III.53 : Choix de l'étude

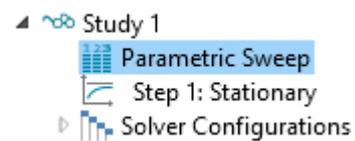


Fig. III.54 : Choix de type d'étude

b- Chargement

Ce modèle utilise une charge statique sur le même bord et avec la même amplitude maximale que dans le modèle statique. La force est libre d'agir dans n'importe quelle direction (en fonction de Alpha (α)).

Les interfaces (1,6,7,8,9,10,11)		L'interface 28	
Contrainte		Charge	
Condition de contrainte	Fixée	Fy	$-1 \times 10^6 \cdot \cos(\text{Alpha} \cdot \pi / 180)$ (N/m ²)

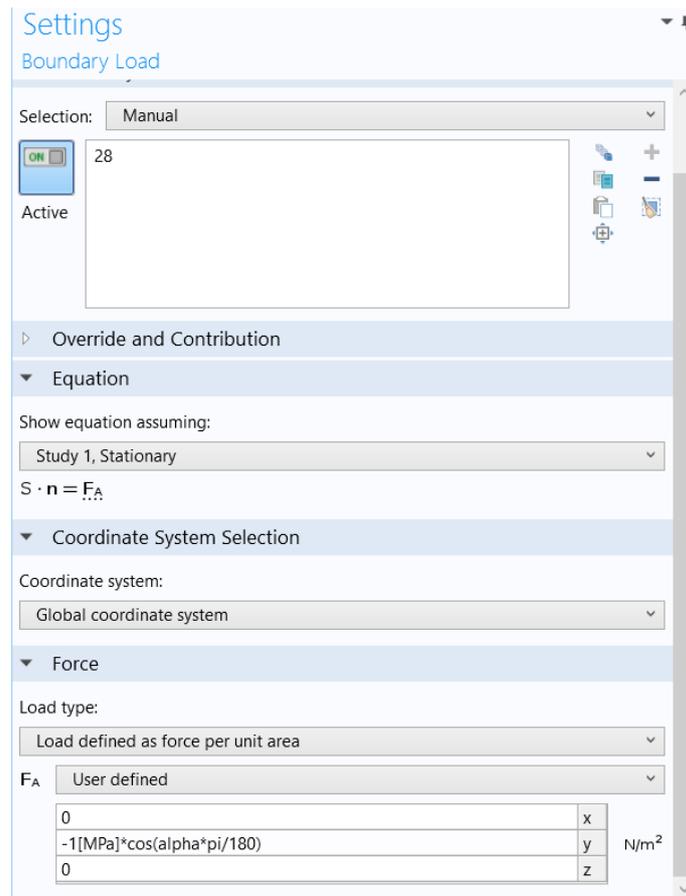


Fig. III.55 : Condition de chargement

c- Paramètres du solveur

La force est en fonction d'un angle Alpha qui varie de -45 à 45 degrés ou on a choisi un pas de 5 degrés.

Dans la boîte de dialogue ci-dessous nous introduisons :

- 1 : Le nom du paramètre à utiliser « Alpha »
- 2 : la valeur initiale, le pas et la valeur maximale du paramètre.

Dans notre cas la valeur de Alpha varie de -45 à 45 par pas de 5 degrés. Pour cela nous écrivons la syntaxe suivante : range (-45,5,45)

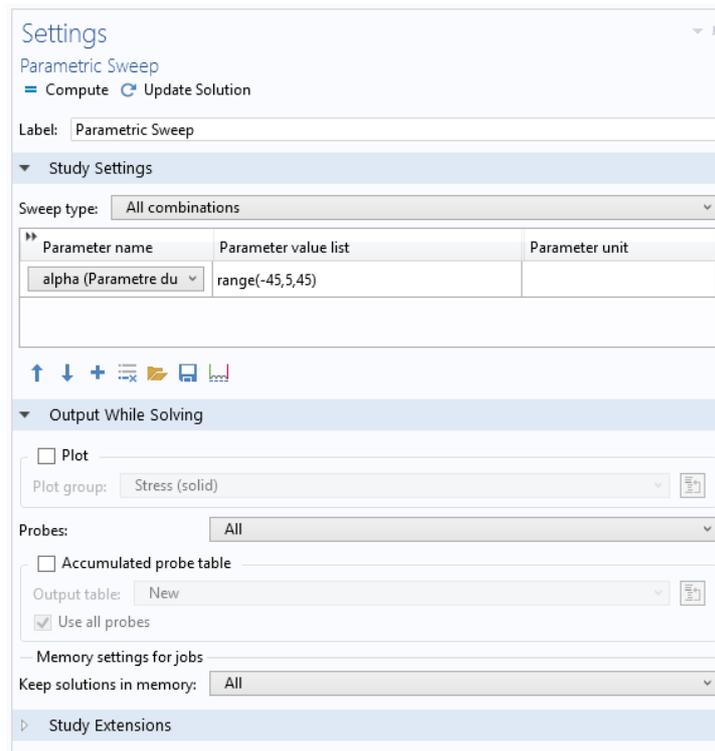


Fig. III.56 : Paramètres du solveur

III-4-4-4 Résultats et discussion

Afin d'étudier l'effet de l'orientation du vecteur chargement sur le comportement statique du support coudé et cela pendant la phase du soulèvement de la voiture, nous avons procédé à une analyse paramétrique où la force (le poids du véhicule) est fonction d'un paramètre α qui varie entre -45 et 45° en passant par $\alpha=0$ (cas de $P=mg$).

a- Les déplacements

A travers les figures III-57 à 59 nous avons représenté le déplacement total dans le volume de la structure pour les différentes valeurs extrêmes de α (-45° et 45°) en passant par $\alpha=0$. Ainsi, nous retrouvons dans le cas où $\alpha=0$ le même déplacement enregistré lors de l'étude statique et des déplacements identiques dans le cas des valeurs extrêmes de α (-45° et 45°).

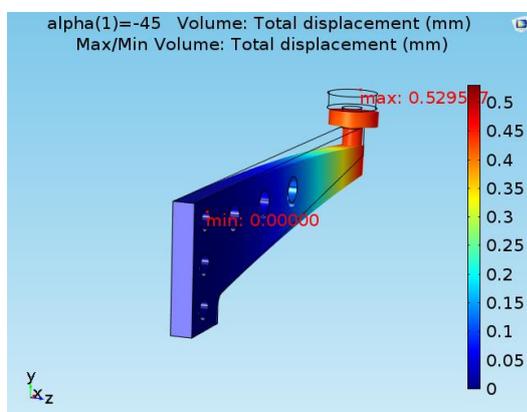


Fig. III.57 : Déplacement total 3D (Alpha=-45°)

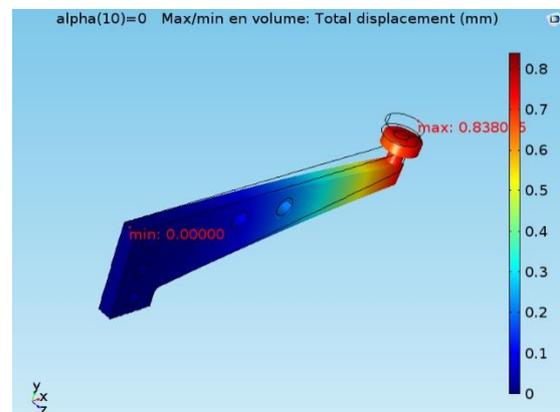


Fig. III.58 : Déplacement total 3D (Alpha=0°)

L'évolution du déplacement en fonction de α est représentée par la figure III-60. Cette dernière montre clairement les résultats suscités du déplacement en fonction de α .

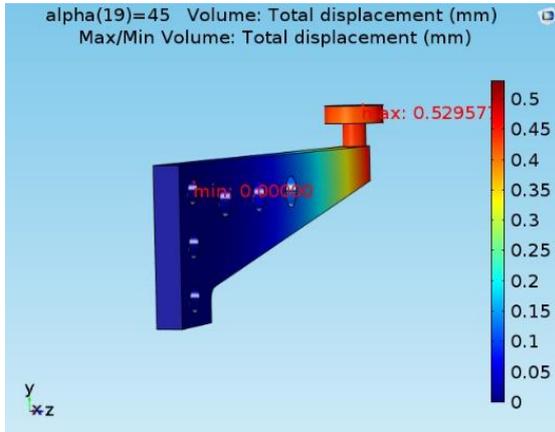


Fig. III.59: Déplacement total (Alpha=45°).

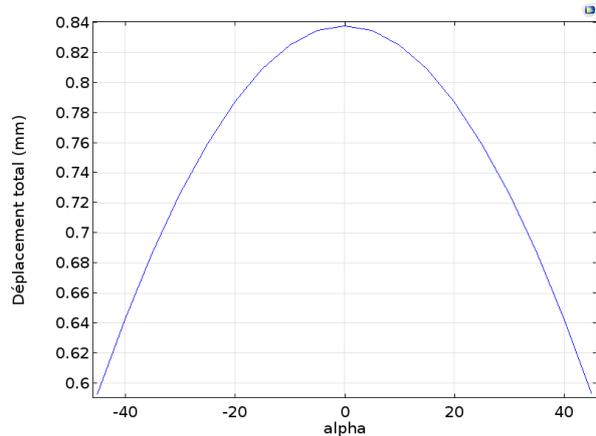


Fig. III.60: Déplacement total en fonction de Alpha.

En prenant comme pas $\Delta\alpha=10^\circ$, nous avons pu tracer l'évolution (figure III-65) des déplacements selon x pour les différentes valeurs de α . Nous constatons ainsi, que l'ensemble des courbes évoluent de la même manière que celles de l'analyse déjà réalisée en statique.

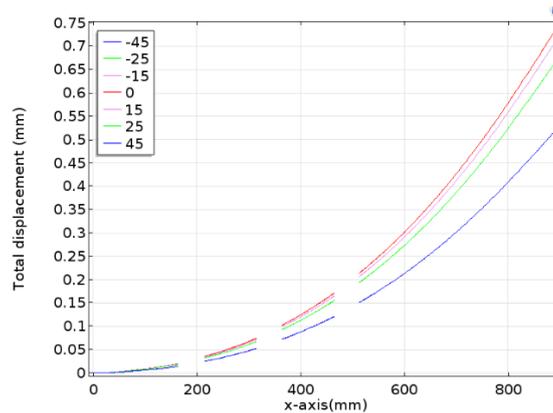


Fig. III.61 : Déplacement total selon x en fonction de Alpha.

b- Les contraintes

De la même manière que dans le cas du déplacement, nous avons représenté la distribution de la contrainte de Von Mises dans le volume de la pièce et cela en fonction de l'angle α (Figure III.62 à 65).

La distribution de contrainte est identique pour les trois valeurs de α (-45°, 45° et 0) avec une concentration toujours localisée aux mêmes endroits que dans l'étude statique.

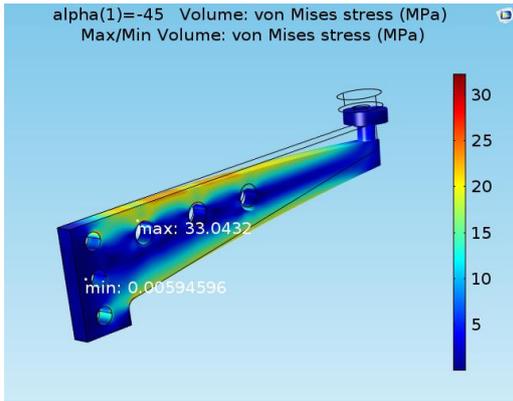


Fig. III.62: Contrainte de Von Mises ($\alpha = -45^\circ$)

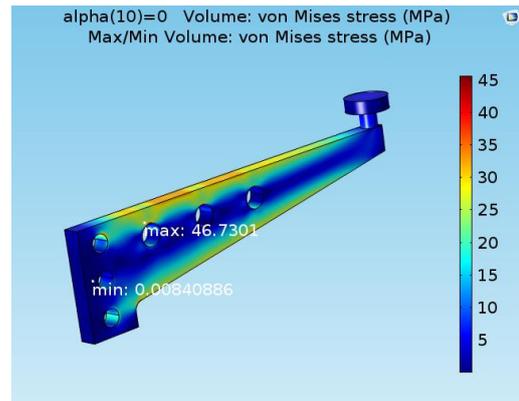


Fig. III.63: Contrainte de Von Mises ($\alpha = 0^\circ$)

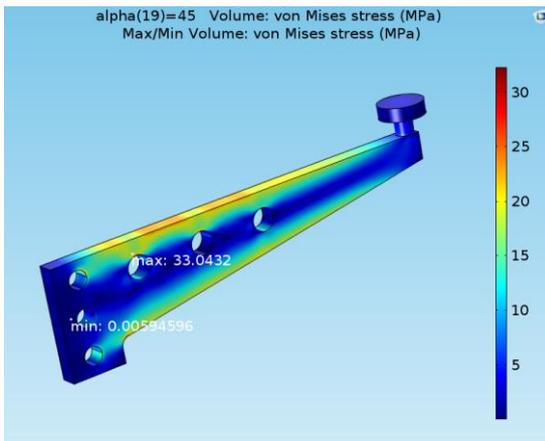


Fig. III.64: Contrainte de Von Mises ($\alpha = 45^\circ$)

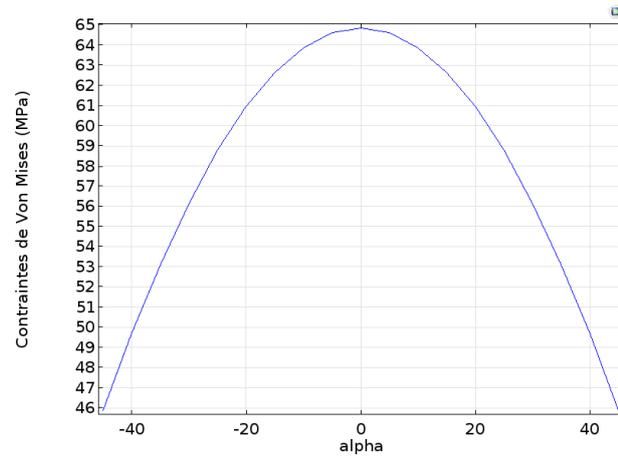


Fig. III.65 : Contrainte de Von Mises en fonction de Alpha

La représentation de la contrainte de Von Mises pour l'ensemble des valeurs de α , est illustrée par la figure III.65. La valeur maximale de la contrainte de Von Mises est obtenue pour $\alpha = 0$.

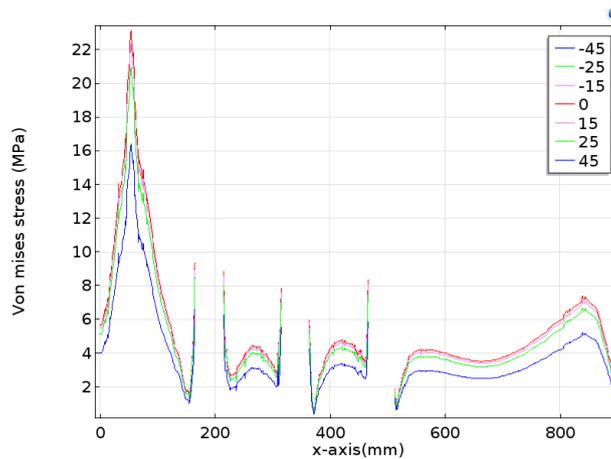


Fig. III.66 : Contrainte de Von Mises en fonction de Alpha

III-5 Conclusion

Ce chapitre avait pour objectif la présentation d'une étude approfondie sur le comportement mécanique d'un support coudé à travers quatre types d'analyses principales : statique, fréquentielle, transitoire et paramétrique, réalisées avec COMSOL Multiphysics. Les résultats ont permis de valider la résistance structurelle sous différentes sollicitations, d'identifier les fréquences propres critiques, et d'analyser la réponse dynamique sous chargement harmonique.

- Points clés :

1-Analyse Statique :

- A confirmé que les contraintes maximales (Von Mises) restent inférieures à la limite élastique de l'acier, avec des déplacements acceptables.

- Les zones critiques (trous de fixation, changements de section) ont été identifiées grâce au maillage adaptatif.

2-Analyse Fréquentielle :

- Les fréquences propres (de 51.935 Hz à 773.62 Hz) ont révélé les risques de résonance, guidant ainsi les choix de conception pour éviter ces plages de fonctionnement.

3-Analyse Transitoire :

- La réponse sous chargement harmonique (211 Hz) a montré des pics de contrainte et de déplacement temporaires, avec une dissipation d'énergie contrôlée par l'amortissement de Rayleigh ($\alpha = 94.25$, $\beta = 7.96 \times 10^{-5}$).

4-Analyse Paramétrique :

- La variation de l'angle de charge ($\alpha = -45^\circ$ à 45° *) a mis en évidence l'influence de la direction de la force sur les contraintes et déplacements, optimisant ainsi l'orientation des chargements.

En synthèse, cette modélisation a démontré l'efficacité de COMSOL pour simuler des systèmes complexes, tout en fournissant des données fiables pour la conception et l'optimisation de structures industrielles. Les méthodes employées pourraient être étendues à d'autres composants mécaniques soumis à des chargements multiaxiaux.

CHAPITRE IV
ETUDE D'OPTIMISATION TOPOLOGIQUE APPLIQUÉE AU SUPPORT COUDÉ

CHAPITRE IV

ETUDE D'OPTIMISATION TOPOLOGIQUE APPLIQUÉE AU SUPPORT COUDÉ

IV-1 INTRODUCTION :

A travers cette partie du projet de fin d'étude, nous allons voir comment concevoir une pièce au forme exceptionnelle et ce très rapidement grâce à la nouveauté de SolidWorks simulation professionnelles apparue depuis 2018. Cette nouveauté s'appelle l'optimisation topologique non paramétrée.

L'optimisation topologique est une méthode de conception avancée qui permet de déterminer la distribution optimale de matière dans un espace de conception donné, tout en respectant des contraintes mécaniques et des objectifs de performance spécifiques.

IV-2 ETUDE TOPOLOGIQUE

Une étude de topologie effectue l'optimisation topologique non paramétrée des pièces. En commençant par un espace de conception maximal (qui représente la taille maximale autorisée pour un composant : Figure IV.1 (a)) et en prenant en compte tous les déplacements imposés appliqués ainsi que toutes les charges et toutes les limites de fabrication imposées appliquées, l'optimisation de la topologie cherche une nouvelle présentation du matériau à l'intérieur des limites de la géométrie maximale autorisée en redistribuant le matériau. Le composant ainsi optimisé satisfait toutes les exigences mécaniques et de fabrication requises (Figure IV.1 (b)).[29]

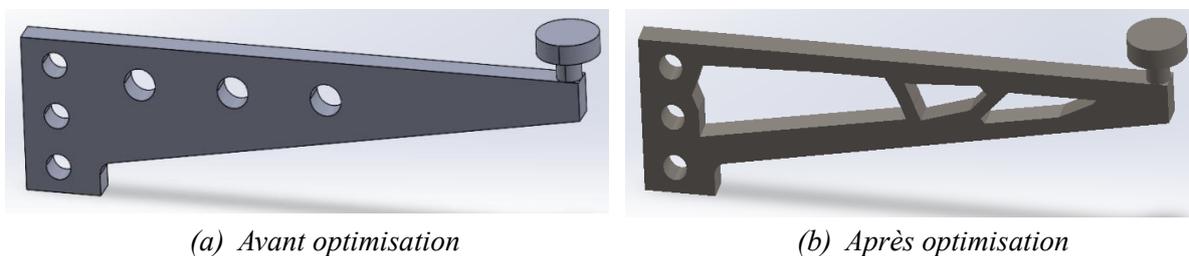


Fig.IV.1 : Support Coudé

Ainsi, sur la figure IV.1 (a) nous trouvons le modèle de base duquel nous partons et sur la figure IV.1 (b) se trouve le résultat final qui provient directement de notre étude de topologie.

Prenons notre modèle de base (support coudé brut) pour lequel on va appliquer cette technique d'optimisation non paramétrée.

Comme nous le savons tous, le designer rêve toujours d'une conception optimale afin de réduire le prix de revient et bien sur tout en augmentant sa durée de vie.

D'une façon générale, la pièce (support coudé) ne doit pas seulement être esthétique mais doit également prendre en compte tous les déplacements imposés ainsi que toutes les charges appliquées.

Pour commencer, nous devons déterminer des limites de la géométrie maximale autorisée, cette géométrie sera l'espace dans lequel l'étude de topologie cherchera à distribuer aux mieux la matière afin d'optimiser la forme et le poids pour répondre aux exigences mécaniques souhaitées et à leurs tête le coefficient de sécurité.

IV-3 CONFIGURATION D'UNE ÉTUDE TOPOLOGIQUE

Pour configurer notre étude topologique, il est impératif de définir les éléments suivants : définissez :

A- Modèle de taille maximum

Sélectionnez un corps unique auquel on va appliquer l'optimisation topologique. La géométrie initiale du corps est désignée sous le nom Modèle de taille maximum.

B- Un objectif

L'objectif d'optimisation entraîne la formulation mathématique de l'algorithme d'optimisation. Dans un arbre d'étude de topologie, cliquer avec le bouton droit de la souris sur Objectifs et limites imposées. Dans le Property Manager Objectifs et limites imposées, sélectionner l'un des objectifs d'optimisation : Raideur optimale par rapport au ratio de poids, Minimiser la masse ou Minimiser le déplacement maximal. Lorsque nous sélectionnons Raideur optimale par rapport au ratio de poids, l'algorithme essaie de minimiser la conformité globale du modèle, qui est une mesure de la flexibilité globale (réciproque de raideur). La conformité est définie par la somme des énergies de déformation de tous les éléments.

C- Limites imposées

Les limites imposées restreignent les solutions d'espace de conception. Elles appliquent des limites aux éléments suivants : pourcentage de masse à supprimer, objectifs de performance pour les contraintes (Coefficient de sécurité), déplacements ou fréquences propres observés dans notre modèle. Nous définissons les limites imposées d'optimisation dans le Property-Manager Objectifs et limites imposées. L'interface utilisateur filtre le type de limites imposées que nous pouvons appliquer en fonction de l'objectif sélectionné.

D- Régions préservées

Il s'agit de zones du modèle qui sont exclues du processus d'optimisation et préservées dans la forme finale. Les entités géométriques où nous appliquons les chargements et déplacements imposés sont conservées par défaut. Pour sélectionner les régions à exclure de l'optimisation, allez dans Topologie > Options > Paramètres de région conservée (bloquée). Pour sélectionner des faces supplémentaires à conserver, cliquez avec le bouton droit de la souris sur Contrôle de fabrication et sélectionnez Ajouter une région conservée.

E- Contrôles de fabrication

Les contraintes géométriques appliquées par les processus de fabrication garantissent le moyen de fabrication de la pièce optimisée. Cliquez avec le bouton droit de la souris sur Contrôles de fabrication et définissez les contrôles souhaités comme Direction de démoulage, Contrôle d'épaisseur ou Contrôle de symétrie. Dans le Property Manager Direction de démoulage, vous pouvez également appliquer une limite imposée d'estampage pour créer des perçages dans l'épaisseur d'une pièce. Avec le Contrôle de symétrie, vous appliquez la moitié, le quart ou un huitième de la symétrie à la forme optimisée du composant.

En fonction des paramètres de l'objectif d'optimisation, des contrôles de fabrication, du maillage, des charges et des conditions aux limites, le processus d'optimisation produit une conception acceptable dérivée de l'espace de conception maximal initial.

IV-3-1 OBJECTIFS ET LIMITES IMPOSEES

Dans le Property-Manager Objectifs et limites imposées, spécifier l'objectif d'optimisation et les limites imposées qui entraînent la formulation mathématique de l'algorithme d'optimisation.

Pour accéder au Property-Manager Objectifs et limites imposées:

Dans un arbre d'étude de topologie, cliquez avec le bouton droit de la souris sur Objectifs et limites imposées, puis sélectionnez l'un des trois objectifs d'optimisation : Raideur optimale par rapport au ratio de poids, Minimiser la masse ou Minimiser le déplacement maximal.

IV-3-1-1 Sélectionner un objectif :

1- Raideur optimale par rapport au ratio de poids (par défaut)

L'algorithme d'optimisation produit la forme d'un composant ayant la plus grande raideur, compte tenu de la masse donnée qui sera retirée de l'espace de conception maximal initial. Lorsque vous sélectionnez Raideur optimale par rapport au ratio de poids comme objectif, l'algorithme cherche à minimiser la conformité globale du modèle qui est une mesure de la flexibilité globale (réciproque de raideur). La conformité est définie par la somme des énergies de déformation de tous les éléments.

2- Minimiser le déplacement maximal

L'algorithme d'optimisation produit une forme qui minimise le déplacement maximal sur un seul nœud (calculé à partir d'une étude statique). Avec un pourcentage donné de matériau à enlever de la pièce, l'optimisation produit la conception la plus raide qui pèse moins que la conception initiale et minimise le déplacement maximal observé.

3- Minimiser la masse avec une limite imposée de déplacement

L'algorithme d'optimisation produit une forme qui pèse moins que le modèle de taille maximum et qui n'enfreint pas la cible donnée pour la limite imposée de déplacement. L'algorithme vise à réduire la masse de la pièce tout en limitant le déplacement (valeur maximale observée du composant ou définie par l'utilisateur sur un seul nœud) sous une certaine limite.

IV-3-1-2 Limites imposées

Les limites imposées restreignent les solutions d'espace de conception en appliquant des limites sur la masse donnée pouvant être réduite ainsi que des objectifs de performance pour le modèle optimisé. L'interface utilisateur filtre le type de limites imposées que nous pouvons appliquer en fonction de l'objectif d'optimisation sélectionné. Ainsi, nous pouvons spécifier des limites imposées de masse, déplacement, fréquence ou contrainte.

a- Limite imposée de masse

Spécifiez la masse cible qui sera déduite de la pièce lors de l'optimisation. Sélectionnez l'une des options suivantes :

a-1 Réduire la masse de (pourcentage)

Saisissez le pourcentage cible de réduction de la masse.

a-2 Réduire la masse de (valeur absolue)

Saisissez la valeur exacte de la masse à supprimer de l'espace de conception maximal de la pièce. L'algorithme d'optimisation essaiera d'atteindre la réduction de masse cible pour la forme finale à l'aide d'un processus itératif.

b- : Limite imposée de déplacement

Spécifiez la limite supérieure pour la composante de déplacement sélectionnée. Dans **Composant**, sélectionnez la variable de déplacement requise. Sélectionnez l'une des options suivantes :

b-1 Valeur spécifiée

Saisissez la valeur cible pour la variable de déplacement sélectionnée et spécifiez les unités nécessaires dans Unités.

b-2 Facteur spécifié

Saisissez un facteur pour multiplier le déplacement maximal calculé à partir d'une étude statique.

Sélectionnez l'une des options suivantes comme emplacement d'un sommet de référence pour la limite imposée de déplacement :

b-3 Automatique (point max. unique)

Le programme sélectionne par défaut le sommet de déplacement maximal observé dans le modèle.

b-4 Défini par l'utilisateur

Sélectionnez dans la zone graphique le sommet de référence pour la limite imposée de déplacement.

c- Limite imposée de contrainte/coefficient de sécurité**c-1 Limite imposée de contrainte**

Sélectionnez Valeur spécifiée pour entrer la contrainte de Von Mises maximale acceptable pour la géométrie optimisée. Sélectionnez Pourcentage spécifié pour saisir la contrainte de Von Mises maximale acceptable sous forme de pourcentage de la limite d'élasticité du matériau.

c-2 Limite imposée du coefficient de sécurité

Entrez le coefficient de sécurité minimal pour la géométrie optimisée. Le critère de ruine par défaut est la contrainte de Von Mises maximale.

IV-3-1-3 Contrôles de fabrication

Le processus d'optimisation crée une présentation de matériau qui satisfait l'objectif d'optimisation et toute limite géométrique imposée que vous définissez. Cependant, la conception peut être impossible à créer à l'aide des techniques de fabrication standard, comme le moulage et la forge.

L'application de contrôles géométriques appropriés empêche la formation des contre-dépouilles et pièces creuses. Les restrictions de fabrication garantissent que la forme optimisée peut être extraite d'un moule ou estampée avec un outillage.

IV-4 ETAPES POUR RÉALISER UNE « ETUDE DE TOPOLOGIE »

IV-4-1 Objectifs et limites imposées

IV-4-2 Contrôles de fabrication

- 2-1 : Régions conservées,
- 2-2 : Contrôle de démoulage,
- 2-3 : contrôle de symétrie,
- 2-4 : Contrôle d'épaisseur,

IV-4-3 Masse de matériau

Au cours d'une optimisation de la topologie, le programme débute avec un espace physique maximal donné pour un composant, qui inclut tous les éléments. Il détermine ensuite, à l'aide d'un processus itératif, une nouvelle distribution du matériau qui aboutit à une forme plus légère, mais raide.

Une fois le processus d'optimisation itératif terminé, vous pouvez afficher la forme optimisée du composant dans un tracé de Masse du matériau.

Pour ouvrir un tracé de Masse de matériau :

-Dans un arbre d'étude de topologie, sous Résultats, double-cliquez sur Masse de matériau.

Les éléments avec une densité de masse relative faible (inférieure à 0,3) sont considérés comme des éléments souples. Ces éléments ne contribuent pas à la rigidité globale du composant et peuvent être supprimés. Les éléments avec une densité de masse relative élevée (supérieure à 0,7) sont considérés comme des éléments solides. Ces éléments contribuent fortement à la rigidité globale du composant (mesure de la capacité de résistance) et demeurent intacts dans la conception finale. Un curseur iso valeur ajuste l'intégration des éléments dans le tracé de Masse du matériau en fonction de leurs valeurs de densité de masse relative.

IV-4-4 Exporter le maillage lissé

Options de topologie

Enregistrer des résultats de topologie intermédiaires

IV-5 MÉTHODE SIMP D'OPTIMISATION DE LA TOPOLOGIE

L'optimisation de la topologie est le type d'optimisation structurelle le plus courant. Elle est utilisée dans la phase initiale de la conception pour prédire la distribution optimale de matériau dans un espace de conception initial donné d'une structure, et prend en compte les spécifications fonctionnelles ainsi que les limites de fabrication imposées.[29]

La méthode mathématique la plus utilisée pour l'optimisation de la topologie est la méthode **SIMP** (Solid Isotropic Material with Penalization). Ce sont Bendsoe et Kikuchi (1988)

et Rozvany et Zhou (1992) qui ont initialement proposé la méthode SIMP. La méthode SIMP prédit la distribution optimale de matériau dans un espace de conception déterminé pour des éléments donnés : cas de chargement, conditions aux limites, limites de fabrication imposées et exigences en matière de performances.

Selon Bendsoe (1989), « l'optimisation de forme dans sa définition la plus générale doit consister à déterminer pour chaque point de l'espace la présence ou non de matériau à ce point. » L'approche traditionnelle en termes d'optimisation de la topologie est la discrétisation d'un domaine en une grille d'éléments finis appelés microstructures solides isotropiques. Chaque élément est rempli par du matériau pour les régions qui en nécessitent, ou vidé du matériau pour les régions dans lesquelles vous pouvez en enlever (représentant des vides). La distribution des densités de matériau dans un domaine de conception, ρ , est discrète, et une valeur binaire est affectée à chaque élément :

$P(e)=1$: matériau requis (noir)

$P(e) = 0$: matériau enlevé (blanc)

Par exemple, l'image de la figure IV.2 affiche une présentation optimisée du matériau d'une poutre chargée. Les éléments volumiques pourvus des densités $\rho_{(e)}=1$ sont noirs tandis que les éléments vides avec les densités $\rho_{(e)} = 0$ sont blancs.

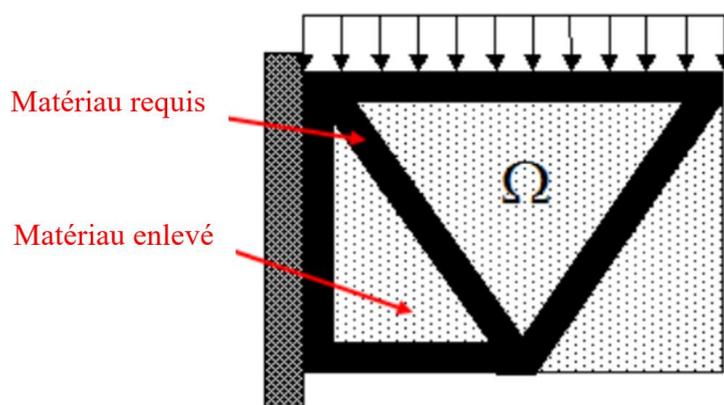


Fig.IV.2 : Domaine discrétisé lors de l'optimisation. [29]

L'introduction d'une fonction de distribution des densités relative continue évite la nature binaire du problème. Pour chaque élément, la densité relative affectée peut varier entre une valeur minimale ρ_{\min} et 1 , ce qui permet d'affecter des densités intermédiaires aux éléments (considérés comme des éléments poreux) : ρ_{\min} est la valeur minimale de densité relative autorisée pour les éléments vides supérieurs à zéro. Cette valeur de densité assure la stabilité numérique de l'analyse par éléments finis.

Comme la densité relative du matériau peut varier en continu, le module de Young du matériau au niveau de chaque élément peut également varier de manière continue. Pour chaque élément 'e', la relation entre le facteur de densité relative du matériau ρ_e et le module d'élasticité de Young du modèle de matériau isotropique affecté E_0 est calculée d'après la loi de puissance : $E(\rho_e) = \rho_e^p E_0$ (Figure IV.3).

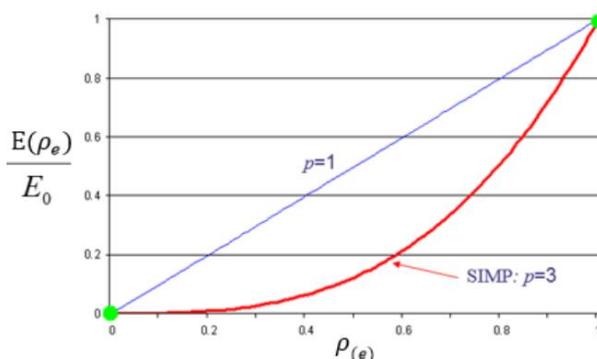


Fig.IV.3 : Loi de puissance appliquée lors de l'optimisation

Le facteur de pénalité p diminue la contribution des éléments pourvus de densités intermédiaires (éléments grisés) à la raideur totale. Le facteur de pénalité oriente la solution d'optimisation vers les éléments volumiques noirs ($\rho_e = 1$) ou vides blancs ($\rho_e = \rho_{\min}$). Les essais numériques indiquent qu'un facteur de pénalité de valeur $p = 3$ est approprié.

Une réduction du module d'élasticité du matériau d'un élément conduit à la réduction de la raideur de l'élément. Selon la méthode SIMP, la raideur globale est modulée en fonction de :

$$K_{\text{SIMP}(\rho)} = \sum_{e=1}^N [\rho_{\min} + (1 - \rho_{\min}) \rho_e^p] K_e$$

Où K_e est la matrice de raideur des éléments, ρ_{\min} la densité relative minimale, ρ_e la densité relative des éléments, p le facteur de pénalité, et N le nombre d'éléments contenus dans le domaine de conception.

Exemple : pour un élément auquel une densité relative $\rho_e = 0,5$, un facteur de pénalité = 3 et une densité relative minimale $\rho_{\min} = 0,001$ sont affectés, la matrice de raideur globale est mise à l'échelle par le facteur $(0,001 + (1 - 0,001) * 0,5^3) = 0,12587$.

IV-5-1 Objectif : maximisation de la rigidité

Un objectif d'optimisation courant consiste à maximiser la rigidité globale d'une structure ou à en minimiser la conformité compte tenu d'une masse donnée qui sera enlevée. La conformité est une mesure de la flexibilité ou de la souplesse globale d'une structure. Elle est la réciproque de la raideur. La conformité globale est égale à la somme des énergies de déformation ou élastiques de l'élément. La réduction de la conformité globale (C) est équivalente à la maximisation de la raideur globale. L'algorithme d'optimisation tente, par le biais d'un processus itératif, de résoudre les densités de l'élément (qui correspondent aux variables de conception d'optimisation) qui réduisent la conformité globale de la structure.

$$\min C(\{p\}) = \sum_{e=1}^N (\rho_e)^p [u_e]^T [K_e] [u_e]$$

$[u_e]$ correspond au vecteur de déplacement nodal de l'élément e , $[K_e]$ désigne la raideur de l'élément e et le vecteur $\{\rho\}$ contient les densités relatives des éléments ρ_e .

Au cours de chaque itération d'optimisation, la limite imposée de masse cible, l'équilibre force-raideur global et les limites imposées fonctionnelles requises doivent être satisfaits :

$$\sum_{e=1}^N \{v_e\}^T \rho_e \leq M_{target}$$

' V_E ' correspond au volume de l'élément, tandis que M_{target} désigne la masse cible de l'optimisation.

IV-6 OPTIMISATION TOPOLOGIQUE DU SUPPORT COUDÉ

IV-6-1 Introduction

L'optimisation topologique est une méthode mathématique qui optimise la distribution des matériaux dans un domaine prédéfini sous un ensemble donné de charges de conditions limites et de contraintes.

Différents outils sont utilisés pour l'optimisation topologique.

Parmi ces outils, SolidWorks dispose d'un outil puissant pour l'optimisation topologique.

Dans cette partie d'étude, nous nous concentrons principalement sur le facteur d'optimiser la topologie dans SolidWorks.

A cet effet le complément SolidWorks Simulation sera utilisé pour optimiser le bras coudé qui a été étudié et modélisé sur COMSOL Multiphysics sous sa forme brute.

La figure III.3 (chapitre III) montre la forme initiale du support coudé, utilisé dans la conception d'un modèle de pont pour soulever les voitures dans les ateliers de maintenance.

La technique d'optimisation topologique sera utilisée pour minimiser l'utilisation de matériaux dans la conception du support coudé fixé par trois trous sur une barre verticale.

Lors de l'optimisation ces dernières garantissent que la contrainte maximale ne dépasse pas le 1/3 de la limite élastique.

Pour assurer une grande résistance aux différentes sollicitations, la pièce sera fabriquée par emboutissage.

La simulation par élément finis « SolidWorks Simulation » dans le cas d'un chargement statique nous aidera à tracer la contrainte maximale qu'il ne faut pas excéder.

IV-6-2 Etude de topologie du support coudé sous un chargement statique

Sur la figure IV.4 on montre on les endroits et les zones de mise en place de la pièce lors du montage sur le pont ainsi que les différentes surfaces de chargements.

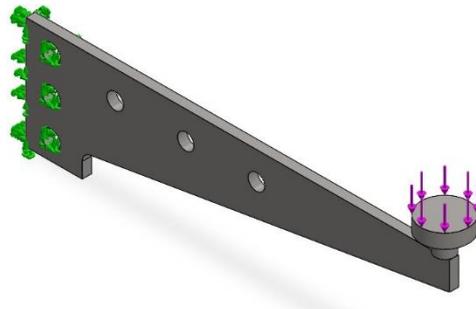


Fig.IV.4 : Présentation des déplacements et chargement imposés sur le support

Après avoir lancer SolidWorks, on clique sur simulation (Figure IV.5). Ensuite, on choisit le type d'étude : **Etude de topologie**.

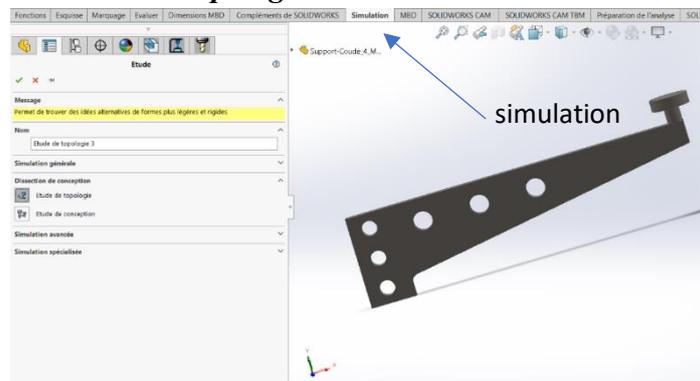


Fig.IV.5 : Lancement d'une étude de topologie à partir du complément Simulation

Au moyen du bouton droit de la souris, nous cliquons sur le nom de la géométrie tout en choisissant (Appliquer/ éditer matériau : Figure IV.6).

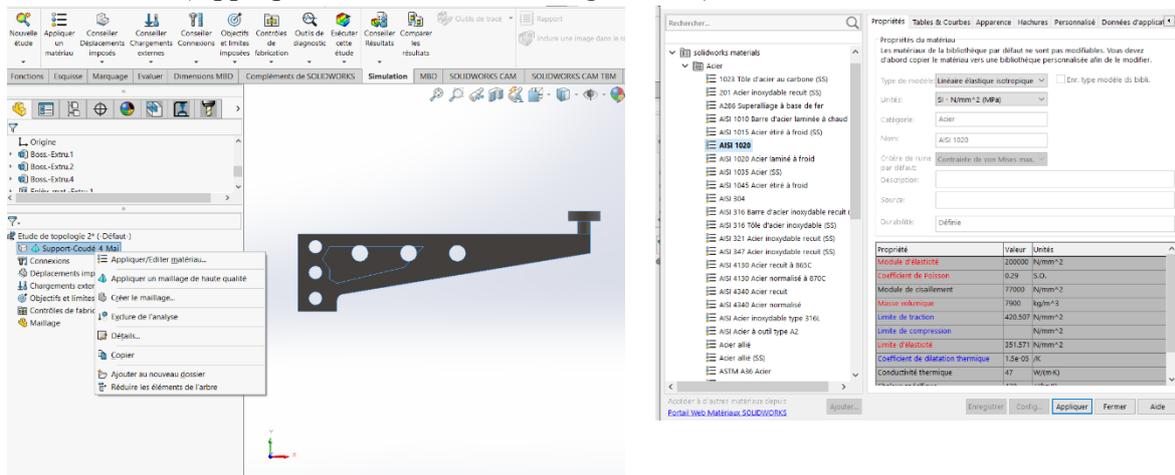


Fig.IV.6 : Choix du type de matériaux

Une fois le matériaux a été choisit, nous passons directement à l'identification des endroits qui seront utilisés pour la fixation du support coudé sur le pont (connue sous le nom de géométrie fixe : Figure IV.7).

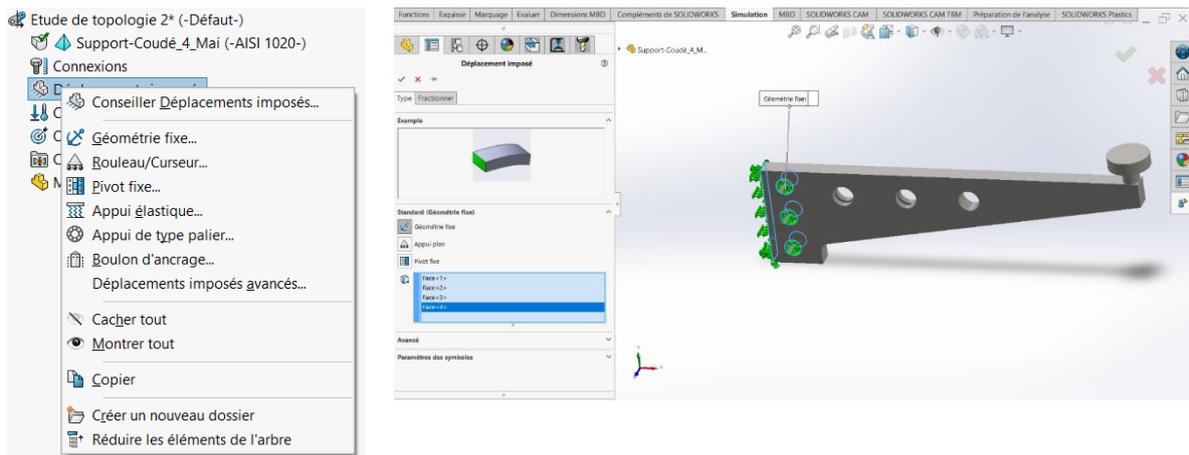


Fig.IV.7 : Choix des déplacements imposés (Géométrie fixe)

L'étape qui suit sera l'identification des zones de sollicitations (endroits de chargement externes : Figure IV.8).

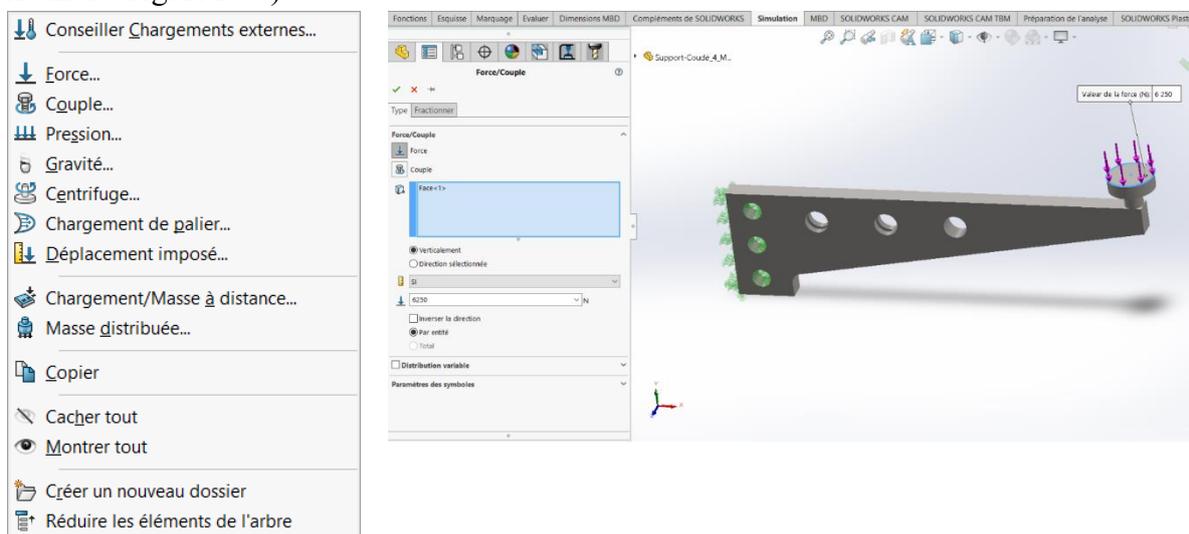


Fig.IV.8 : Introduction du chargement externe (Quart du poids de la voiture)

Une fois les paramètres de l'étude statique ont été introduit, nous procédons directement à la saisie des différents outils qui seront utilisé lors de l'étude de topologie du support coudé.

A- Premier élément (optimisation):

A partir de : **Objectifs et limites imposées** (Figure IV.9), on choisit (Raideur optimale par rapport au ratio de poids).

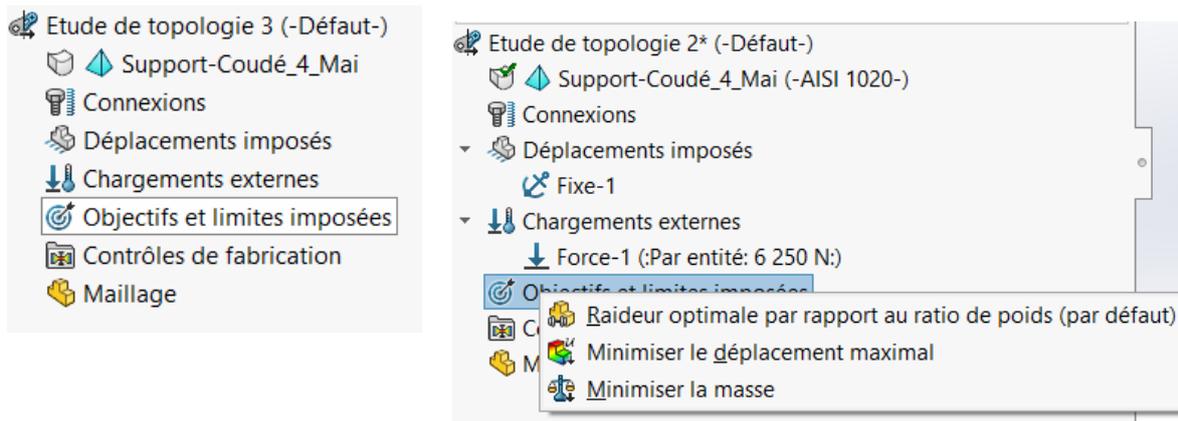


Fig.IV.9 : Objectifs et limites imposées

Comme objectif principal nous comptons à réduire la masse du support coudé de 40 %, tout en travaillant dans le premier tiers de la zone élastique du matériaux c'est-à-dire avec un coefficient de sécurité minimum de 3 (Figure IV.10).

Le critère de ruine utilisé dans l'optimisation topologique correspond dans notre à la contrainte pratique maximale (contrainte de Von Mises maximale) et qui vaut :

$$\sigma_{max} = \frac{\sigma_e}{Coef. \text{ sécurité } (CS)}$$

Etant donné que le coefficient de sécurité (CS) exigé est de trois (03) dans ce cas la valeur maximale de la contrainte qu'il ne faut pas dépasser est de : $\sigma_{max} \approx 117$ MPa. (cette valeur dépend de la limite élastique c'est-à-dire du type de matériaux).

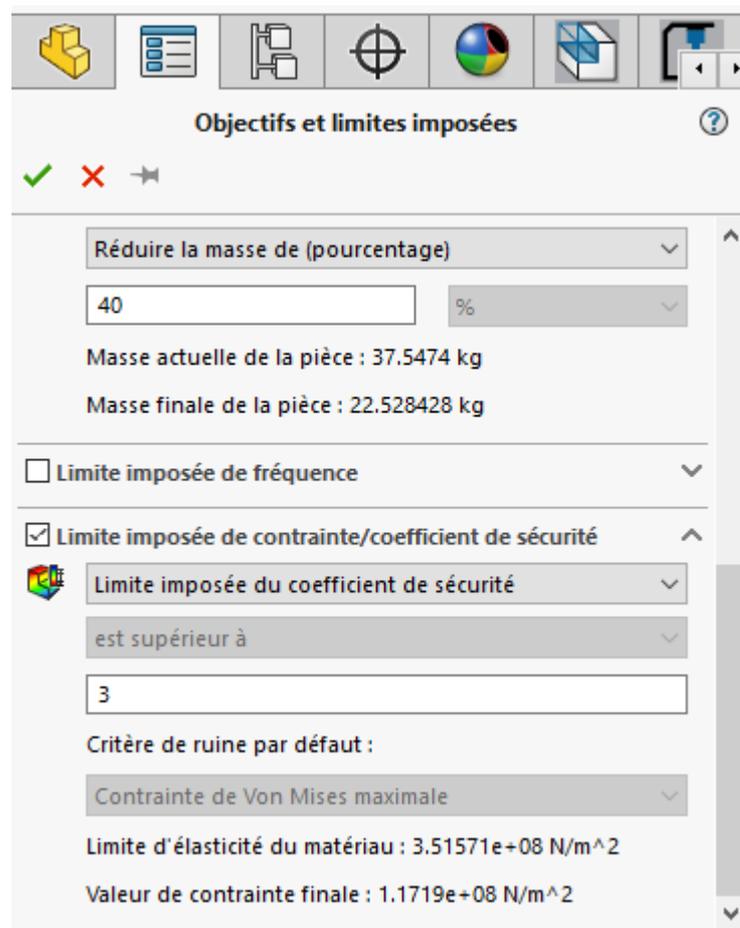


Fig.IV.10 : Réduction de masse et limite imposée du coefficient de sécurité

A cet effet, l'étude topologique aura pour but de proposer une nouvelle géométrie dont le volume pèse environ 22,528428 kg (après une réduction de 40% de la masse initiale qui est de 37,5474 kg).

B- Deuxième élément (Contrôles de fabrication):

L'étude topologique, en plus des limites et objectifs imposée, prend en considération le mode d'élaboration ainsi que les techniques de fabrication lors de l'étude d'optimisation.

A cet effet et pour que la nouvelle configuration proposée soit réalisable, un certain nombre de conditions de fabrication doit prendre en considération la géométrie de la nouvelle pièce et cela à partir d'un choix judicieux des moyens et les techniques existants.

Ce deuxième éléments d'étude s'appelle (Contrôles de Fabrication : FigureIV.11).

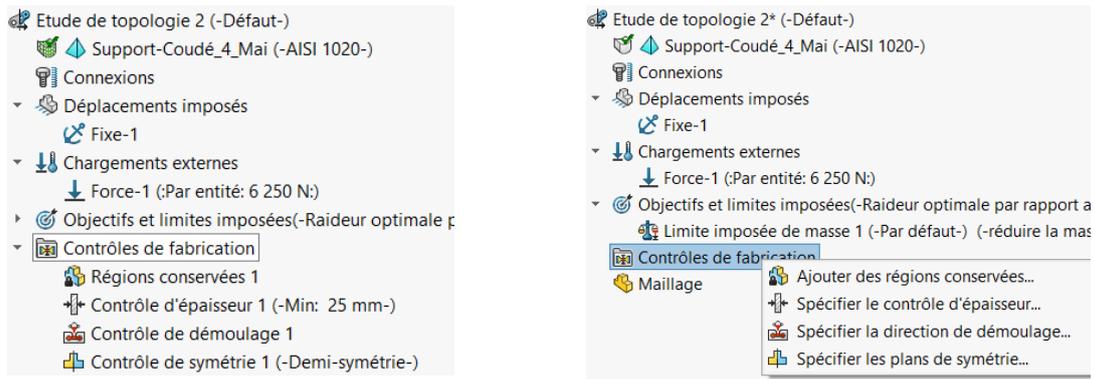


Fig.IV.11 : Contrôles de Fabrication

B-1- Régions à conserver

Les zones de montage (mise en place de la pièce sur le socle) ainsi que les surfaces et endroits de chargement doivent être conservé. A cet effet une première étape dans cette partie d'étude ça va consister l'identification des zones et endroits qui seront intouchables par l'étude topologique tout en introduisant la valeur de l'épaisseur de cette interdiction.

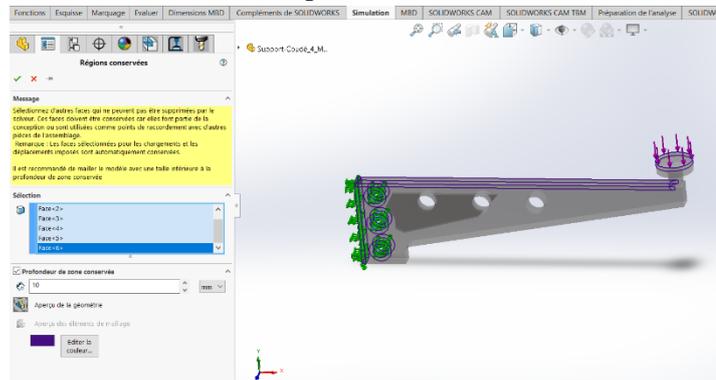


Fig.IV.12 : Régions conservées

B-2- Contrôle d'épaisseur

Une fois les régions à conserver ont été identifiées avec leur épaisseur adéquate, nous passons à l'introduction de la valeur de l'épaisseur minimale qu'il ne faut pas dépasser.

Pour ce faire nous restons toujours sur la boîte Contrôles de Fabrication et nous cliquons sur spécifier sur Contrôle d'épaisseur (Figure IV.13).

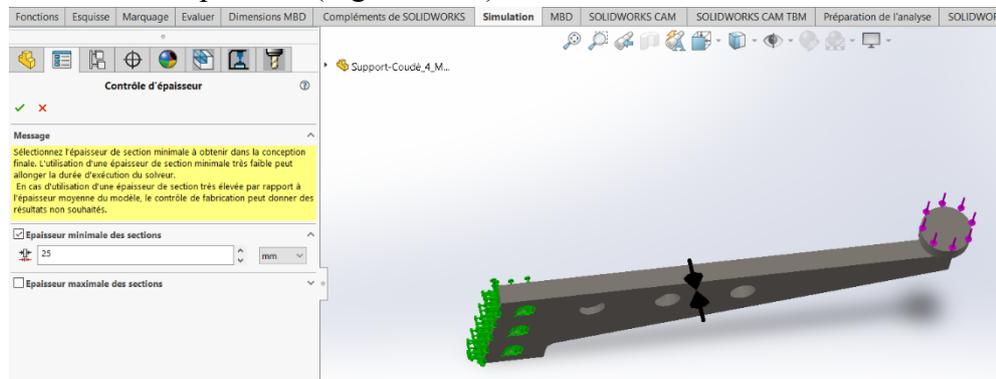


Fig.IV.13 : Contrôle d'épaisseur

B-3- Contrôle de démoulage

L'objectif dans l'ajout du contrôle de démoulage est de s'assurer et garantir que la conception optimisée peut être moulée et extraite d'un moule.

A partir d'une arête (Figure IV.14) appartenant à la pièce, il est facile de choisir la direction d'ouverture des moules (matrices) qui sera utilisé comme une restriction de moulage (éventuellement démoulage) garantissant ainsi une forme qui peut être fabriquée réellement.

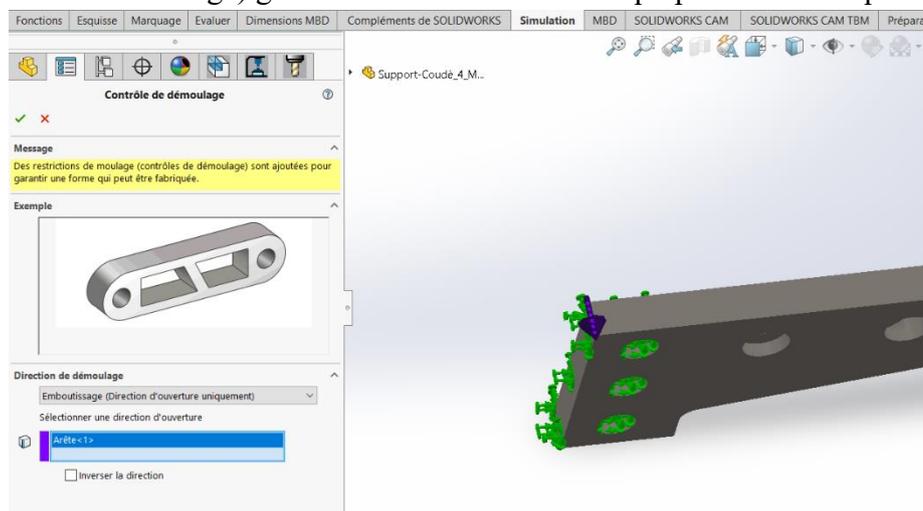


Fig.IV.14 : Contrôle de démoulage

B-4 Contrôle de symétrie

L'une des propriétés importantes du complément SolidWorks Simulation c'est la prise en considération de la symétrie qui peut exister dans une pièce.

A cet effet et pour accélérer et réduire le temps de calcul lors de l'étude topologique, SolidWorks prend en considération l'effet de toute symétrie qui peut exister dans la pièce et cela à travers l'identification des différents éléments de symétrie (plan, axe ou autres).

C'est pourquoi l'étape suivante sera réservée à l'introduction du plan de symétrie existant de notre pièce (figure IV.15).

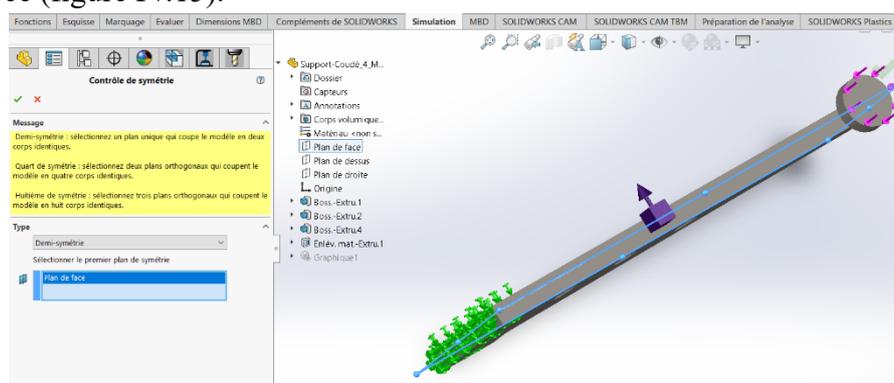


Fig.IV.15 : Contrôle de symétrie

Une fois l'ensemble des paramètres de contrôle ont été déterminés et choisis, c'est l'étape suivante sera la discrétisation en éléments finis de notre pièce (le Maillage contrôlé) ou bien le lancement de l'exécution de l'étude dont le maillage se fera d'une façon automatique via le solveur (Figure IV.16).

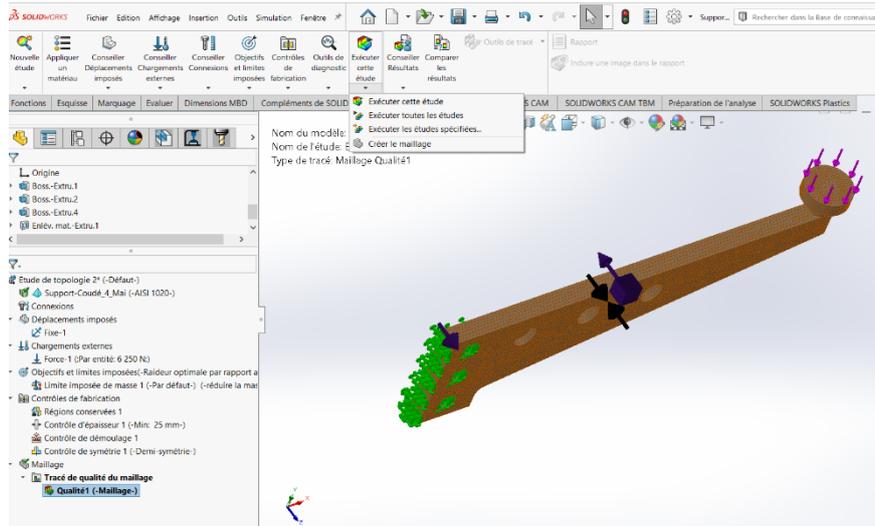


Fig.IV.16 : Création du maillage et exécution de l'étude

C-Troisième élément : estimation du taux de matière à enlever (Dissection de conception):

Cette partie d'étude a pour objectif la détermination des différentes zones qui ne participent pas à la rigidité de la structure c'est-à-dire les zones qui peuvent être enlevées de la pièce sans nuire aux éléments de résistance.

A cet effet, le complément SolidWorks Simulation possède un outil appelé *Dissection de Conception*, ce dernier va nous permettre de détecter les endroits du support coudé que nous pouvons supprimer. Cette partie de simulation doit être réalisée sous les mêmes conditions de sollicitation que la pièce entière.

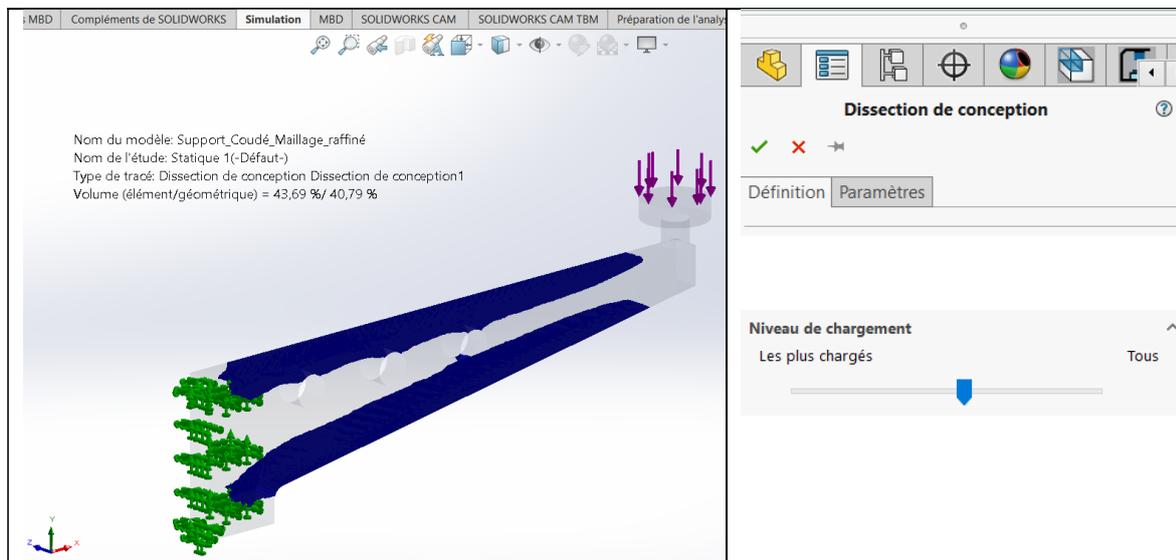


Fig.IV.17 : Pourcentage d'enlèvement de matière

Les parties transparentes du tracé de dissection participent moins à la tenue du chargement appliqué que les portions opaques.

Ces zones peuvent être supprimées dans le but de réduire le poids de la conception.

Ainsi et suite a cette étude de conception, le taux de matière que nous pouvons ôter est de l'ordre de **40%**.

Enfin, il est recommandé de vérifier la résistance de la nouvelle conception en effectuant une nouvelle étude de simulation.

IV-6-3 Résultats et Analyses

IV-6-3-1 Analyse du diagramme de convergence

L'objectif principal que nous avons tracé est de réduire la masse de 40% c'est-à-dire d'atteindre une masse de 22,528428 kg en partant d'une masse initiale de 37,5474 kg.

Ainsi la figure IV.18 montre le diagramme du processus itérativeintermédiaire d'optimisation (après 14 itérations).

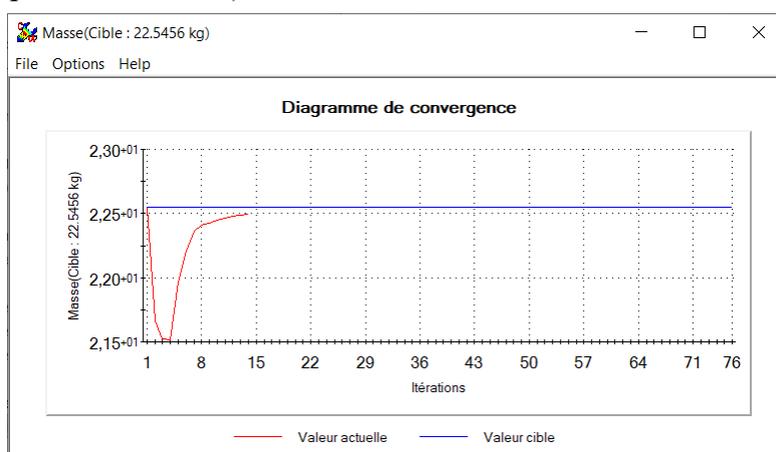


Fig.IV.18 : Etape intermédiaire de calcul (début de convergence)

La figure IV.19 montre clairement que la convergence du processus itératif a eu lieu à partir de la 32^{ème} itération.

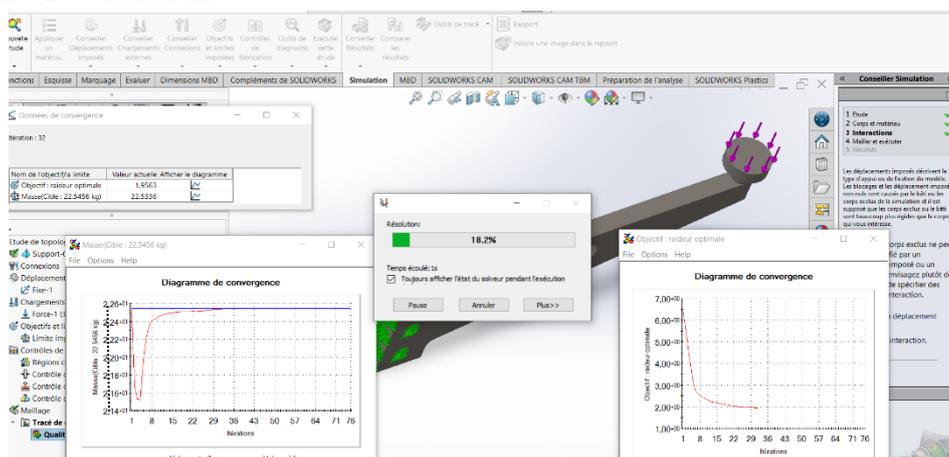


Fig.IV.19 : Convergence du processus itératif (après la 32^{ème} Itération)

IV-6-3-2 : Extraction du maillage de la nouvelle configuration

Une fois l'étude d'optimisation terminée (résultat final : figure IV.20), on procède à l'extraction du maillage de la nouvelle configuration (figure IV.21). Cette dernière étape a pour

rôle la reconnaissance et l'identification des différents éléments a gardé ou a enlevé de la pièce et cela suite au critère de minimisation (objectif) du support coudé.

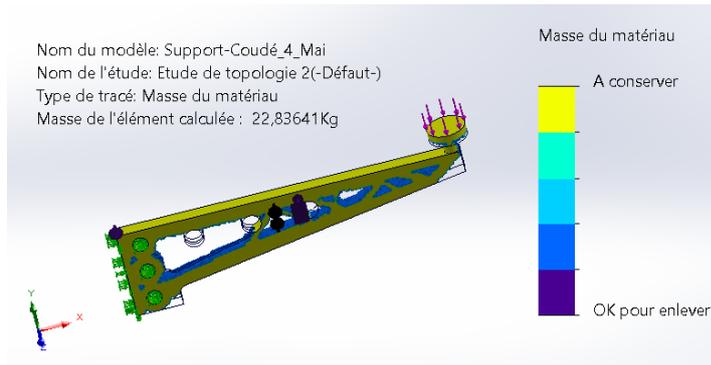


Fig.IV.20 : Masse du matériau après optimisation

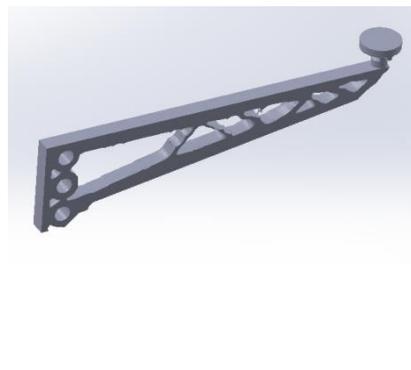


Fig.IV.21 : Extraction du maillage de la nouvelle configuration après optimisation

La connaissance des éléments finis constituant la nouvelle pièce va nous aider à tracer, au moyen de l'outil esquisse de SolidWorks, les zones susceptibles d'être enlevées (à partir de l'espace maximal introduit) et cela suite à cette étude de topologie (figure IV.20).

Ainsi et après enlèvement des différentes zones, de l'espace maximal de la pièce initiale (figure IV.20), qui n'ont pas d'effet sur les différents éléments de résistance ; la nouvelle configuration géométrique optimisée sera donnée par la figure IV.22.

La masse finale obtenue est de 22,83641 kg et compte tenu de la masse objective qui est de 22,528428 (après une réduction de 40% de la masse initiale) l'erreur relative commise lors de l'optimisation est de 1,3%.

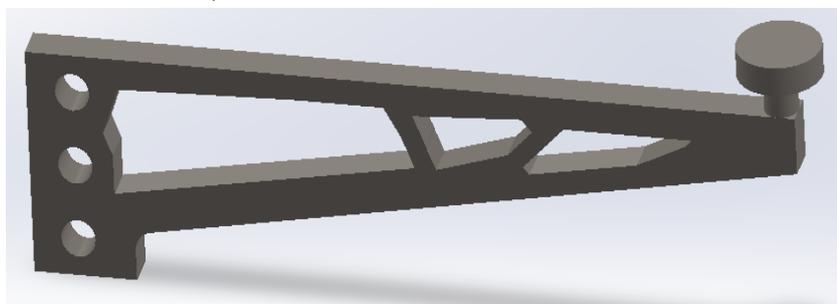


Fig.IV.22 : Nouvelle configuration du support coudé

IV-7 ANALYSE STATIQUE ET ÉTUDE COMPARATIVE DES DEUX CONFIGURATIONS

IV-7-1 Déplacement maximal

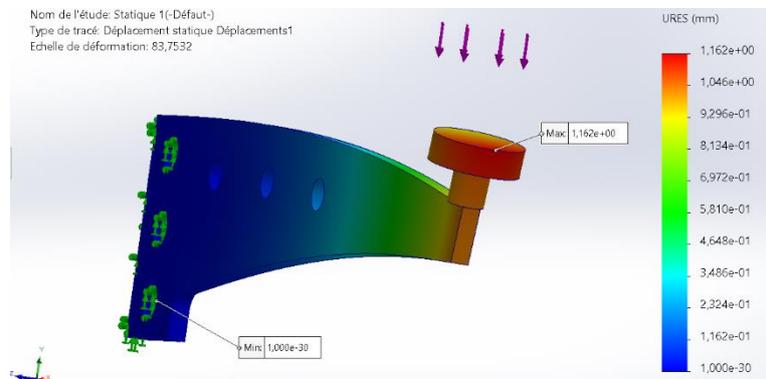


Fig.IV.23 (a) : Déplacement du support coudé initial

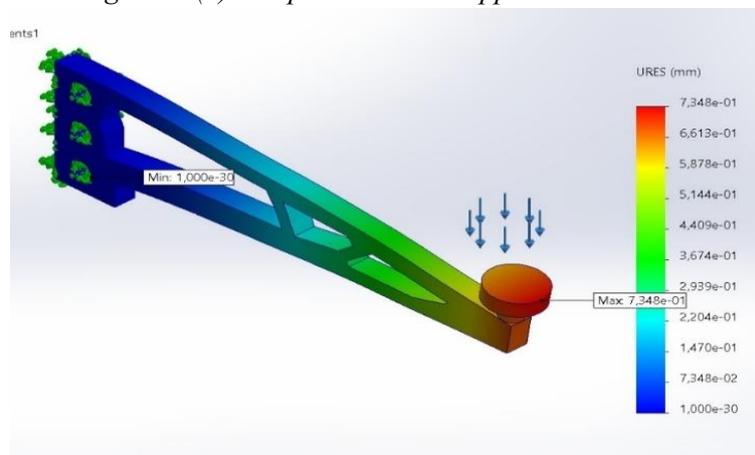


Fig.IV.23 (b) : Déplacement du support coudé optimisé

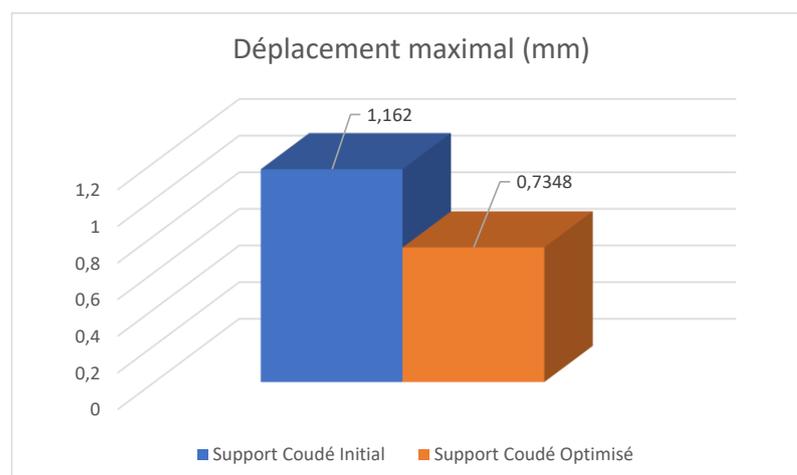


Fig.IV.24 : Déplacements sous chargement statique du support coudé

Déplacement (mm)	Support Initial		Support Optimisé	
	Min	Max	Min	Max
	$1*10^{-30}$	1.162	$1*10^{-30}$	0.7348

La comparaison des déplacements max, sous chargement statique, entre les deux configurations, est donnée par les figures IV.23 (a et b) et IV.24. Ainsi le déplacement maximal enregistré sur le support coudé initial est 1,162 mm alors que celui enregistré sur la pièce optimisée est 0,7348 mm soit une réduction de 37%. Il est à signaler que les déplacements max ont été enregistrés au même endroit pour les deux pièces. Cette réduction de déplacement max montre bien que le support coudé optimisé est plus rigide.

IV-7-2 Déformation maximale

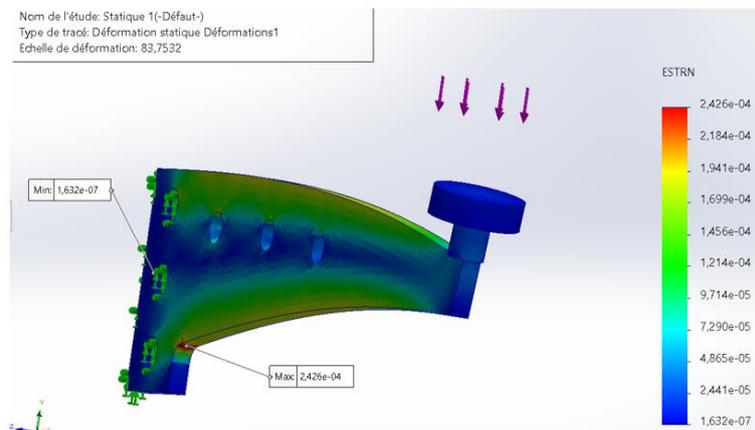


Fig.IV.25 (a) : Déformation du support coudé initial

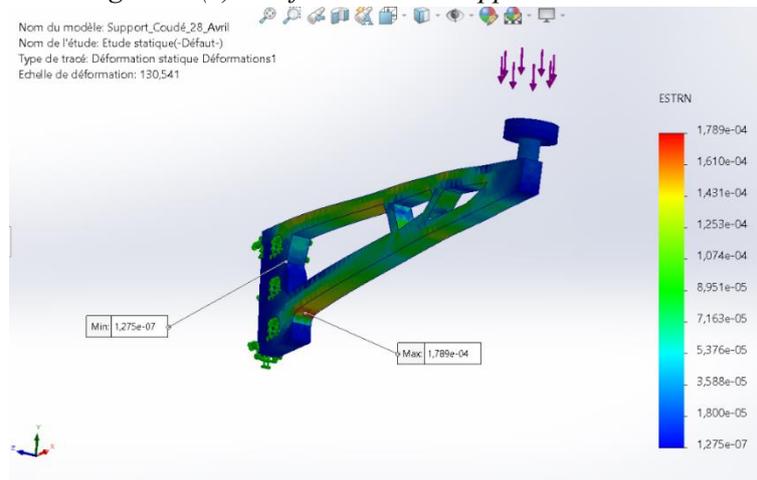


Fig.IV.25 (b) : Déformation du support coudé optimisé

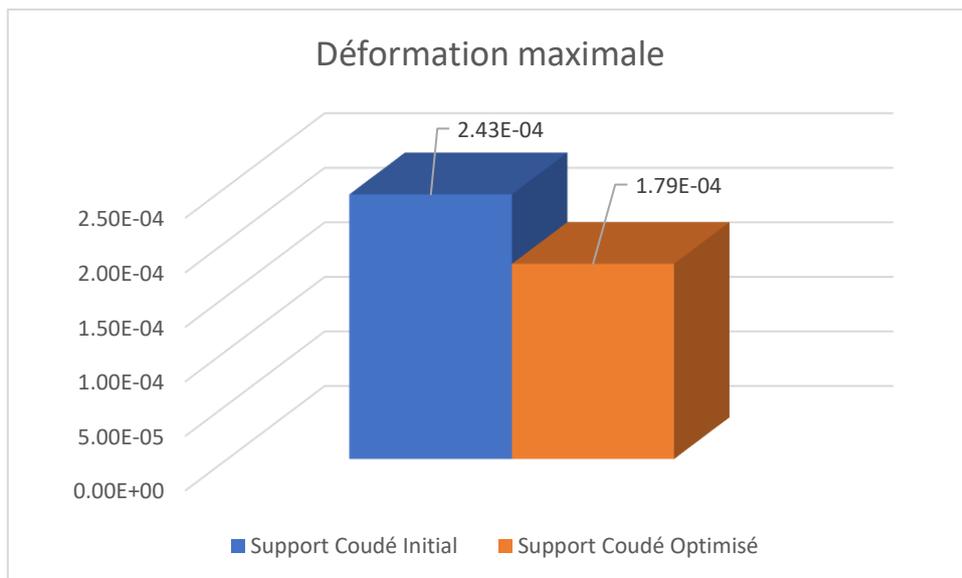


Fig.IV.26 : Déformation maximale sous chargement statique du support coudé

Déformation	Support Initial		Support Optimisé	
	Min	Max	Min	Max
	$1.632 \cdot 10^{-7}$	$2.427 \cdot 10^{-4}$	$1.275 \cdot 10^{-7}$	$1.789 \cdot 10^{-4}$

La comparaison des déformations max, sous chargement statique, entre les deux configurations, est donnée par les figures IV.25 (a et b) et IV.26. Ainsi la déformation maximale enregistré sur le support coudé initial est $2,427 \cdot 10^{-4}$ alors que celle enregistrée sur la pièce optimisée est $1,789 \cdot 10^{-4}$ soit une réduction de 26%. Il est a signalé que les déformations max ont été enregistrés au même endroit pour les deux pièces. Cette réduction de déformation max confirme encore la rigidité de la pièce optimisée.

IV-7-3 Contrainte maximale

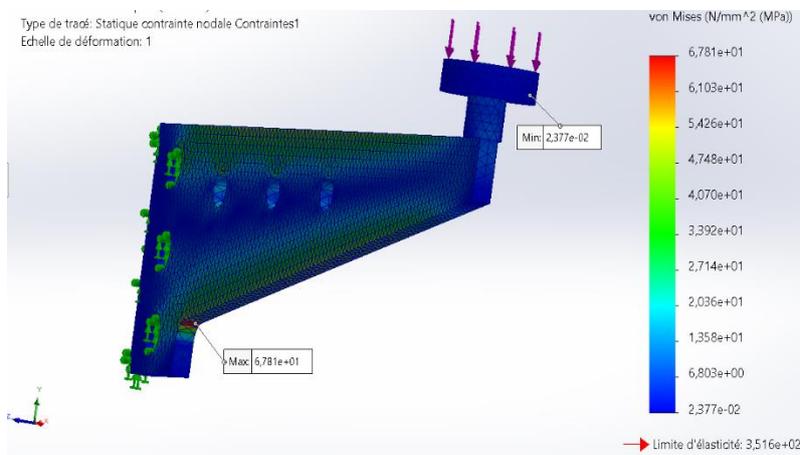


Fig.IV.27 (a) : Contraintes du support coudé initial

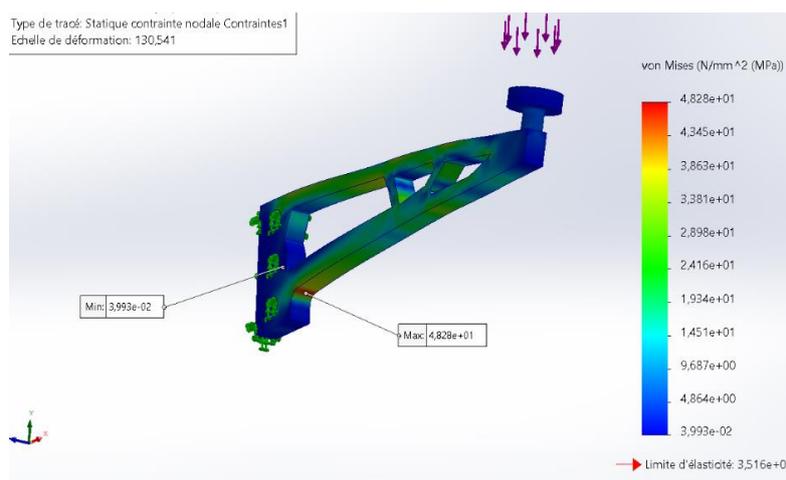


Fig.IV.27 (b) : Contraintes du support coudé optimisé

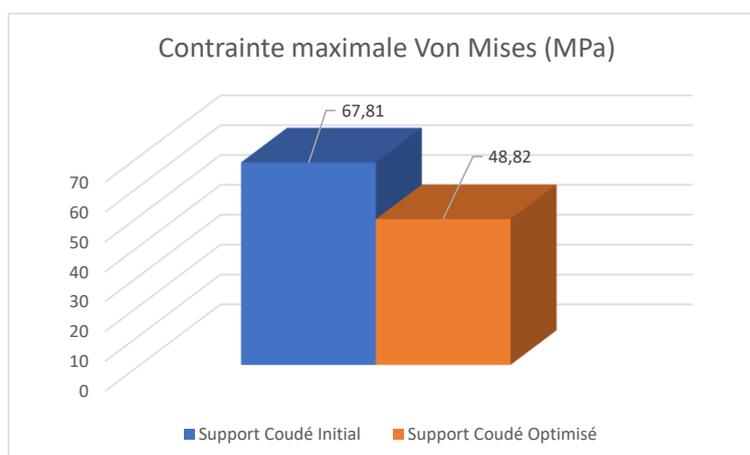


Fig.IV.28 : Contraite maximale sous chargement statique du support coudé

Contraite Von Mises	Support Initial		Support Optimisé	
	Min	Max	Min	Max
MPa	$2.373 \cdot 10^{-2}$	67.82	$3.992 \cdot 10^{-2}$	48.82

La comparaison des contraintes max de Von Mises, sous chargement statique, entre les deux configurations, est donnée par les figures IV.27 (a et b) et IV.28. Nous continuons toujours a enregistré des réductions des valeurs extrêmes mais cette fois ci au détriment de la rigidité.

Ainsi, nous avons enregistré une réduction de 28% de la contrainte maximale de Von Mises puisque la valeur de cette dernière a passé de 67,81 MPa dans le support initial à 48,82 MPa pour la configuration optimisée. Il est a signalé que ces valeurs extrêmes ont été enregistrées dans le même endroit pour les deux pièces.

Cette réduction va nous pousser à vérifier la rigidité de la nouvelle pièce à travers le coefficient de sécurité minimal.

IV-7-4 Coefficient de sécurité

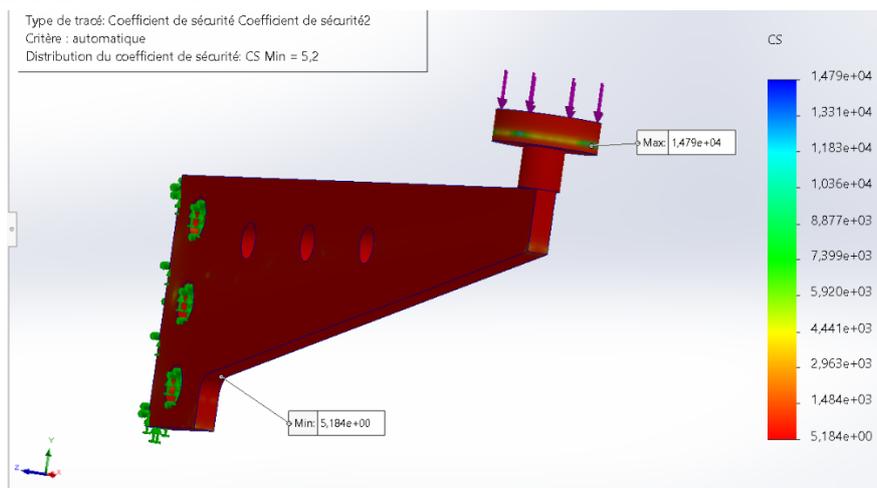


Fig.IV.29 (a) : Coefficient de sécurité du support coudé initial

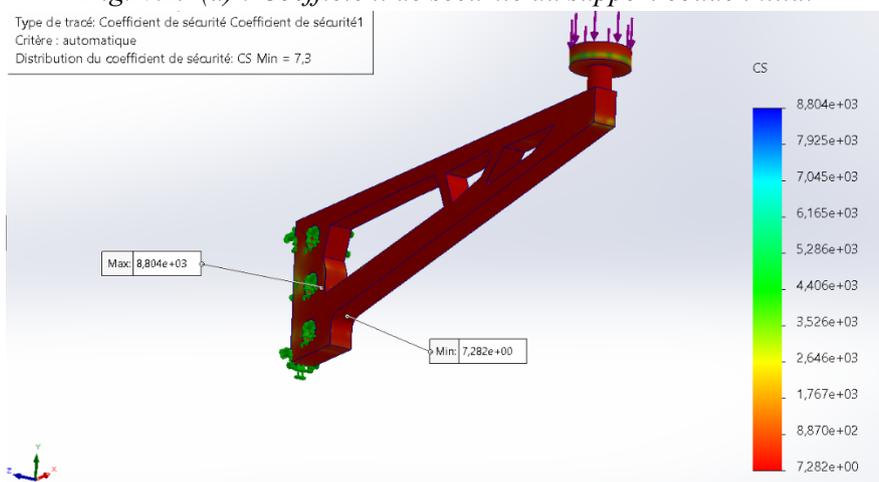


Fig.IV.29 (b) : Coefficient de sécurité du support coudé optimisé

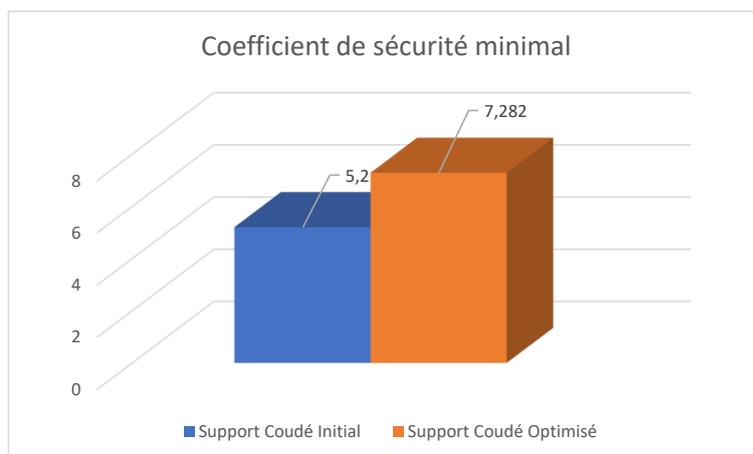


Fig.IV.30 : Coefficient de sécurité sous chargement statique du support coudé

Coefficient de sécurité	Support Initial		Support Optimisé	
	Min	Max	Min	Max
	5.2	14790	7.282	8804

La comparaison des coefficients de sécurité, qui caractérise le rapport entre la contrainte maximale et la limite élastique du matériau, sous chargement statique, entre les deux configurations, est donnée par les figures IV.29 (a et b) et IV.30.

Contrairement à ce que nous attendions, après avoir enregistré une réduction au niveau des contraintes maximales, nous avons enregistré une augmentation de 40% dans la valeur minimale du coefficient de sécurité.

L'augmentation ainsi enregistrée se concorde très bien avec l'effet de changement de la géométrie sur les valeurs extrêmes des déplacements et des déformations. Ce dernier résultat confirme la rigidité de la nouvelle pièce surtout dans les zones de concentration de contraintes.

En conclusion, la réduction de 40% de masse a abouti à une augmentation équivalente en termes de rigidité.

IV-8 CONCLUSION

L'optimisation topologique est optimisation de forme non paramétrique qui commence avec un espace de conception maximal à partir duquel on cherche à trouver une forme optimale avec comme objectif de trouver une raideur optimale par rapport au poids tout en minimisant la masse ainsi que le déplacement.

En partant de notre géométrie initiale (espace maxi) et en appliquant les conditions de chargement dans les mêmes endroits, nous avons aboutis, tout en réduisant de 40% la masse initiale, à une augmentation de la rigidité de la nouvelle configuration.

Cette rigidité est caractérisée, en premier lieu, par une réduction de 37% dans le déplacement maximal et de 26% dans la déformation maximale et en second lieu par une augmentation considérable dans la valeur minimale du coefficient de sécurité d'environ 40%.

Il est à signaler l'ensemble des valeurs extrêmes ont été trouvés dans les mêmes endroits.

CONCLUSION GÉNÉRALE

Ce mémoire a exploré en détail la simulation par éléments finis (MEF) et son application à l'analyse mécanique d'un support coudé utilisé dans un système de levage automobile. À travers une démarche méthodique, nous avons abordé les aspects théoriques, pratiques et numériques de la MEF, en mettant en lumière ses avantages et ses domaines d'application. L'utilisation du logiciel COMSOL Multiphysics a permis de réaliser des simulations précises, incluant des analyses statiques, fréquentielles, dynamiques et paramétriques, pour évaluer le comportement mécanique du support coudé sous différentes sollicitations.

Les résultats obtenus ont confirmé la robustesse de la structure, avec des contraintes maximales inférieures à la limite élastique du matériau et des déplacements conformes aux attentes. L'analyse fréquentielle a identifié les modes propres de vibration, essentiels pour éviter les phénomènes de résonance, tandis que l'analyse dynamique a mis en évidence la réponse transitoire de la structure sous chargement harmonique. L'étude paramétrique a quant à elle permis d'optimiser la direction des charges appliquées.

En complément, une optimisation topologique a été réalisée pour réduire la masse du support coudé de 40 %, tout en améliorant sa rigidité et en garantissant un coefficient de sécurité minimal supérieur à 3. Cette optimisation a démontré l'efficacité des outils modernes de simulation pour concevoir des structures à la fois légères et performantes.

En conclusion, ce travail souligne l'importance de la simulation numérique dans les processus de conception et de validation en ingénierie mécanique. La MEF, couplée à des logiciels puissants comme COMSOL Multiphysics, offre des solutions fiables et économiques pour prédire le comportement des structures, optimiser leurs performances et réduire les coûts de développement. Les perspectives futures pourraient inclure l'intégration de l'intelligence artificielle et du calcul haute performance pour traiter des systèmes encore plus complexes, tout en poursuivant l'objectif d'innovation et d'efficacité dans la conception mécanique.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] Ferdinand P. Beer, « Résistance des matériaux »- (Mechanics of Materials), 10^e édition
- [2] <https://www.futura-sciences.com/sciences/definitions/sciences-modelisation-11321/>
- [3] S. S. Rao, «Finite Element Method» A Practical Course", chapitre 1.
- [4] Simulation and Modeling in Engineering, Springer Science & Business Media, 2020.
- [5] Hervé Oudin :(Méthode des éléments finis). Engineering school. Ecole Centrale de Nantes, 2008, pp.63.
- [6] Kada Abdelhak « Méthode des éléments finis » , Université Hassiba Benbouali de Chlef
- [7] Zemri Amine :« Méthode des éléments finis », Cours et exercices corrigés, Université de Relizane.
- [8] Seddik Merakeb, « Éléments de base et application aux structures mécaniques »,cours sur la méthode des éléments finis, Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou.
- [9] Nadir ingenia,« Introduction aux Eléments Finis ».
- [10] Bellagh kamel, « Calcul du facteur de concentration de contraintes dans les jonctions tubulaires soudées soumises des chargements combinés », thèse, Université Mentouri Constantine.
- [11] Souadkia Lazhar et Ghemam Amara Miloud, « Etude thermo-hydraulique d'un dissipateur thermique en mousse d'aluminium », Mémoire de fin d'étude, Université Echahid Hamma Lakhdar d'El-Oued, 2022.
- [12] Nasser Fekiri , « Transferts de chaleur dans des éléments micro et nano structurés : simulation et expérimentation par thermographie infrarouge et microscopie SThM », Génie des procédés. 2013. hal 01862200
- [13] https://e-tech.show/wp-content/uploads/LogoNews_Comsol_600x300.jpg
- [14] COMSOL Official Website: <https://www.comsol.com>
- [15] Boukhelkhal Nourelhouda et Safieldine Hayet, « Etude et simulation d'une antenne Patch par le logiciel COMSOL MULTIPHYSICS », Mémoire de Fin d'Etudes.Université Dr. Yahia Farés de MEDEA2018.
- [16] William B. J. S. and Andrew S. R., «COMSOL Multiphysics: Finite Element Modeling for Engineers».
- [17] Brahmia Houcem, « Modélisation et optimisation du processus de frittage »,Mémoire de Fin D'étude,Université 8 mai 1945 Guelma, 2019.

- [18] COMSOL, Inc. (2023). COMSOL Multiphysics User's Guide sur le site web officiel de COMSOL.
- [19] Ba Oumar Alassane, « Simulation numérique d'un problème d'interaction Fluide-Solide », Mémoire de fin d'étude, Université du 8 mai 1945 Guelma, 2020.
- [20] Beneddine Tayeb et Benanteur Youssef, « Etude et modélisation d'un moteur linéaire à aimant permanent par les logiciels COMSOL/FEMM », Mémoire de fin d'étude, Université D'Oran 2 Mohamed Ben Ahmed, 2021.
- [21] web site, <https://www.comsol.fr/structural-mechanics-module>
- [22] Salençon, J., « Mécanique des Milieux Continus », Tome 1 : Concepts généraux. Éditions de l'École Polytechnique, 2005.
- [23] R.M. Jones, « Résistance des matériaux » p. 287, 2000.
- [24] J.P. Den Hartog: « Mechanical Vibrations », 4^{ème} Edition, Dover Publications, 1985.
- [25] Hayt, W. H., Kemmerly, J. E., & Durbin, S. M., « Engineering Circuit Analysis », 8^{ème} édition, McGraw-Hill Education, 2012.
- [26] Rao, S. S., « Mechanical Vibrations », 5^{ème} édition. Pearson Education, 2011.
- [27] Chopra, A. K., « Dynamics of Structures: Theory and Applications to Earthquake Engineering », 5^{ème} édition, Pearson Education, 2017.
- [28] « Parametric Sweep and Optimization Studies » in COMSOL Multiphysics v6.1, Documentation officielle de l'aide COMSOL.
- [29] SolidWorks officiel website: <https://help.solidworks.com> le 03/05/2025