

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la recherche scientifique



UNIVERSITE Abderrahmane MIRA BEJAIA

Faculté de Technologie

Département de Génie Mécanique

MEMOIRE

Présenté pour l'obtention du diplôme académique de

MASTER

Filière : Génie Mécanique

Spécialité : Fabrication Mécanique et Productique

Par :

BEKTACHE Yacine

BOUZABAL Larbi

Thème

Etude et Conception d'un Système de Suspension d'un Véhicule

Soutenu le 02 – 07 – 2023 devant le jury composé de :

Mr. Mohand Akli SAHALI Président

Mme. Noura ADJOUADI Rapporteur

Mr. OURARI Examineur

Année Universitaire 2022-2023

Remerciements

Nous tenons d'abord à remercier Dieu le tout puissant de nous avoir donné la force, le courage et la volonté afin de réaliser ce travail.

Nous remercions encore notre promoteur Mme Noura ADJOUADI pour avoir bien voulu nous encadrer et pour ses conseils et ses orientations.

Nous tenons également à remercier les membres de jury pour leur présence et leur acceptation d'examiner notre travail.

Nos remerciements vont également à nos deux chères familles, particulièrement nos parents qui ont vivement contribué par tous les moyens à la réussite de notre travail.

Nos remerciements vont encore aux enseignants, responsables et personnels du département de génie mécanique.

Nous tenons à remercier nos camarades, amis, proches et tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à réaliser et faire aboutir ce travail.

Dédicaces

Nous profitons bien de cette occasion unique pour dédier ce travail à nos familles :

A nos mères et nos pères en particulier

A nos frères et sœurs

A tous nos proches

A tous les collègues, amis et personnes qui nous ont soutenu jusqu'au bout

B. Yacine

B. Larbi

Sommaire

Introduction générale.....	1
Chapitre I : Généralités sur les systèmes de suspension.....	3
I.1. Introduction.....	4
I.2. Principes et fonctionnement d'un système de suspension	4
I.2.1 Définition d'un système de suspension	4
I.2.2 Fonctionnement d'un système de suspension	4
I.3. Les différents composants d'un système de suspension	5
I.3.1 Ressorts	5
I.3.2 Amortisseurs	6
I.3.3 barre stabilisatrice	6
I.3.4 bras de contrôle	7
I.3.5 Rotules.....	7
I.3.6 Fusée d'essieu	8
I.4. Types de suspension	8
I.4.1 Suspension indépendante	8
I.4.2 Suspension à essieu rigide – non indépendante	13
I.4.3 Suspension hydropneumatique.....	16
I.4.4 Suspension à l'air	19
I.5. Conclusion	22
Chapitre II : systèmes de suspension-suspension à lames de ressorts	23
II.1. Introduction	24
II.2. Définition générale de la suspension à lame de ressort	24
II.3. Présentation du ressort à lames	24
II.3.1 Les parties essentielles d'un ressort à lames	25
II.4. Les différents types de ressorts à lames	28
II.5. Les différentes charges	36

II.6. Propriétés des ressorts à lames	37
II.7. Gamme de fabrication	39
II.9. Conclusion.....	40
Chapitre III : Modélisation et simulation de ressorts à lames	42
III.1. Introduction	43
III.2. Calcul théorique des ressorts à lames	43
III.2.1 Ressorts à lames simples.....	43
III.2.2 Ressorts à lames multiples	46
III.3. Modélisation et simulation des ressorts à lames	49
III.3.1 Analyse de lames de ressorts en acier allié	52
III.3.2 Analyse de lames de ressorts en 1023 tôle d'acier au carbone (SS)	55
III.3.3 Discussion des résultats	58
III.4. Conclusion	58
Conclusion générale	60
Références bibliographiques	61

Tables des figures

Figure I.1 : Les trois principaux types de ressorts	6
Figure I.2 : Dessin schématique d'un amortisseur	6
Figure I.3 : Dessin schématique d'une barre stabilisatrice	7
Figure I.4 : Dessin schématique d'un bras de contrôle inférieur	7
Figure I.5 : Dessin représentant la rotule de direction	7
Figure I.6 : Dessin montrant l'ensemble d'une fusée d'essieu	8
Figure I.7 : Système de suspension type McPherson.....	9
Figure I.8 : Système de suspension type double triangulation.....	10
Figure I.9 : Système de suspension multibras.....	11
Figure I.10 : Système de suspension à barre de torsion	12
Figure I.11 : Suspension à ressorts à lames d'un essieu rigide arrière.....	13
Figure I.12 : Suspension à ressorts hélicoïdaux d'un essieu rigide	14
Figure I.13 : Suspension à ressorts pneumatiques sur un essieu rigide	15
Figure I.14 : Dessin schématique d'un système de suspension hydropneumatique simple....	17
Figure I.15 : Dessin schématique montrant la suspension hydropneumatique à réglage automatique de la hauteur.....	18
Figure I.16 : Système de suspension hydropneumatique à nivellement	19
Figure I.17 : Ensemble d'un système de suspension pneumatique simple	20
Figure I.18 : L'ensemble d'un schéma montrant le fonctionnement d'une suspension pneumatique à nivellement.....	21
Figure I.19 : Schéma représentant le système d'une suspension pneumatique à réglage automatique de la hauteur.....	21

Figure II-1 : Ressort à lames des véhicules routiers	24
Figure II.2 : Lame maitresse	25
Figure II.3 : Lame sous-maitresse.....	25
Figure II.4 : L'étoquiau en montage avec les brides.....	26
Figure II.5 : L'œil d'une lame maitresse	27
Figure II.6 : Les étriers en montage sur les ressorts à lames	27
Figure II.7 : Jumelle assemblée à l'œil d'une lame maitresse	28
Figure II.8 : Lame simple	29
Figure II.9 : Ressort à lames égales	30
Figure II.10 : Ressort à lames multiples	31
Figure II.11 : Ressort triangulaire.....	31
Figure II.12 : Ressort pincette	32
Figure II.13 : Ressort transversal.....	33
Figure II.14 : Caractéristiques de charge des ressorts à flexibilité variable	34
Figure II.15 : Compensateur et ressort principal	34
Figure II.16 : Ressort à plusieurs faisceaux.....	35
Figure II.17 : Ressort progressif	36
Figure II.18 : Ressort à flexibilité variable à sabot et glissoir	36
Figure III.1 : Ressorts à lame simple	44
Figure III.2 : Ressorts à lames multiples avec une fixation au centre	47
Figure III.3 : Ressort à lames multiples.....	51
Figure III.4 : La contrainte équivalente dans un ressort à lames en acier allié soumis à une charge de 7125 N.....	52

Figure III.5 : Le déplacement résultant du ressort à lames en acier allié sous une charge de 7125 N.....	53
Figure III.6 : La déformation équivalente dans un ressort à lames en acier allié soumis à une charge de 7125 N.....	53
Figure III.7 : L'analyse statique basée sur le coefficient de sécurité du logiciel.....	54
Figure III.8 : La contrainte équivalente dans un ressort à lames en 1023 tôle d'acier au carbone (SS) soumis à une charge de 7125	55
Figure III.9 : Le déplacement résultant du ressort à lames en 1023 tôle d'acier au carbone (SS) sous une charge de 7125 N.....	56
Figure III.10 : La déformation équivalente pour l'acier au carbone (SS).....	56
Figure III.11 : L'analyse statique basée sur le coefficient de sécurité du logiciel pour l'acier au carbone (SS)	57

Liste des tableaux

Tableau III.1 : Résistance des matériaux de ressorts à lame simple	45
Tableau III.2 : Propriétés mécaniques de l'acier allié	49
Tableau III.3 : résultats statiques basés sur SolidWorks pour les ressorts à lames en acier allié	54
Tableau III.4 : propriétés mécaniques de 1023 tôle d'acier au carbone (SS).....	55
Tableau III.5 : Résultats d'analyse statique sur la tôle d'acier au carbone (SS)	57
Tableau III.6 : comparaison des résultats entre les deux matériaux.....	57

Introduction générale

La suspension joue un rôle essentiel dans le domaine de l'ingénierie automobile, offrant confort, sécurité et stabilité aux véhicules. Elle assure la liaison entre les roues et la carrosserie, atténuant les vibrations et les chocs rencontrés sur les routes irrégulières. La compréhension approfondie des systèmes de suspension est donc cruciale pour améliorer les performances globales des véhicules.

Dans ce mémoire, nous nous concentrons sur l'étude et la conception d'un système de suspension de véhicule, en mettant l'accent sur un type spécifique de suspension : la suspension à lames de ressorts. Nous commençons par fournir une vue d'ensemble des systèmes de suspension, en définissant les termes clés, en présentant les composants principaux et en discutant de l'utilité de ces systèmes dans le contexte automobile.

Le premier chapitre est consacré aux généralités sur les systèmes de suspension. Nous explorons les définitions et les concepts fondamentaux liés aux systèmes de suspension, en mettant en évidence leur importance dans l'amélioration du confort de conduite, de la tenue de route et de la sécurité des véhicules. Nous examinons également les différents types de systèmes de suspension existants, en soulignant leurs caractéristiques distinctives et leurs applications spécifiques.

Dans le deuxième chapitre, nous approfondissons l'étude de la suspension à lames de ressorts. Nous analysons son fonctionnement, en identifiant les principales parties constitutives et en expliquant leur rôle dans la transmission des forces entre la roue et la carrosserie du véhicule. Nous examinons également les différents types de lames de ressorts utilisés, en mettant en évidence leurs propriétés spécifiques et leurs avantages respectifs. De plus, nous abordons la conception assistée par ordinateur (CAO) des ressorts à lames, en soulignant les considérations importantes lors de leur fabrication.

Le troisième chapitre se concentre sur la modélisation et la simulation des ressorts à lames. Nous présentons tout d'abord des calculs théoriques relatifs aux deux types de ressorts à lames qui supportent la flexion, en démontrant leur comportement sous différentes charges et contraintes. Ensuite, nous procédons à la simulation des ressorts à lames en utilisant trois matériaux distincts : l'acier allié, l'acier type tôle au carbone (SS). Nous réalisons des analyses statiques approfondies à l'aide du logiciel "SolidWorks", afin de déterminer les performances et les caractéristiques de chaque configuration.

Enfin, dans la discussion des résultats, nous comparons les chiffres obtenus lors des simulations et mettons en évidence les avantages des matériaux sélectionnés (acier allié + tôle d'acier au carbone (SS)) pour la conception et la fabrication des ressorts à lames de suspension.

En résumé, ce mémoire vise à approfondir notre compréhension des systèmes de suspension de véhicules, en se concentrant sur la suspension à lames de ressorts. Nous explorons les aspects théoriques, la modélisation et la simulation des ressorts à lames, et proposons une analyse comparative des performances des matériaux utilisés. Les résultats de cette étude contribueront à l'amélioration continue des systèmes de suspension et à l'optimisation des performances des véhicules sur les routes d'aujourd'hui.

Chapitre 01

Généralités sur les systèmes de suspension

I.1. Introduction

Les systèmes de suspension sont une partie essentielle de tout véhicule automobile. Le rôle principal est de fournir une liaison entre les roues d'un véhicule et le châssis ou la carrosserie. Ils sont conçus pour offrir une conduite en douceur, confortable et sécurisée en absorbant les chocs et les vibrations causés par les irrégularités de la route et de maintenir le contact des roues avec le sol en tous temps afin d'assurer une conduite stable et contrôlée, ce qui améliore la sécurité des passagers. Les systèmes de suspension sont composés de plusieurs éléments, chacun jouant un rôle important dans le fonctionnement global du système. [1]

I.2. Principes et fonctionnement d'un système de suspension

I.2.1 Définition générale d'un système de suspension

Un ensemble de composants et de mécanismes conçus pour supporter et réguler les mouvements d'un véhicule par rapport à sa surface de roulement. Il est principalement utilisé pour améliorer le confort des passagers, assurer une tenue de route stable et optimiser la sécurité lors de la conduite. [1]

I.2.2 Fonctionnement d'un système de suspension

La suspension des véhicules a pour but d'assurer que les roues restent en contact avec le sol et que la voiture aussi reste stable. Elle permet de maintenir l'adhérence du véhicule à la route, malgré les irrégularités du terrain. Sachant que sans les suspensions, le véhicule serait incontrôlable.

D'abord, il faut savoir que la suspension est la partie qui relie les roues avec le châssis, elle se compose de trois éléments : le pneu, le ressort et l'amortisseur, bien sûr que ces éléments dépendent du type de suspension. Globalement, elle fonctionne selon la manière suivante [2] :

- Les ressorts : ce sont les éléments principaux de la suspension, ils absorbent les chocs de la route et maintiennent la hauteur du véhicule. Les ressorts peuvent être hélicoïdaux, à lames ou pneumatiques.

- Les amortisseurs : sont des dispositifs qui fonctionnent avec les ressorts pour absorber les vibrations causées par les irrégularités de la route. Ils réduisent l'oscillation des ressorts en comprimant le fluide hydraulique ou pneumatique qui est à l'intérieur.
- Les bras de suspension : Ils relient la roue à la carrosserie du véhicule. Ils permettent une amplitude de mouvement suffisante pour que la roue puisse suivre les imperfections de la route.
- Les barres stabilisatrices : aident à maintenir la stabilité du véhicule en réduisant l'effet de roulis lors de virages serrés.
- Les buissons de suspension : Sont des éléments en caoutchouc ou en polyuréthane qui se trouvent entre les différentes pièces de suspension. Ils agissent comme des tampons pour réduire les bruits, les vibrations et les secousses.

En résumé, le système de suspension d'un véhicule est un regroupement complexe de pièces qui travaillent ensemble pour offrir une conduite confortable et une tenue de route stable.

Les ressorts absorbent les chocs de la route, les amortisseurs réduisent les vibrations, les bras de suspension permettent aux roues de suivre les imperfections de la route, les barres stabilisatrices maintiennent la stabilité du véhicule et les buissons de suspensions réduisent les bruits et les secousses. [2]

I.3. Les différents composants d'un système de suspension

La suspension comme toute autre partie d'un véhicule, est un mécanisme qui comporte plusieurs éléments qui sont indispensables pour le fonctionnement correct du système à la route.

Les composants de ce système de suspension sont regroupés ensemble selon le type de suspension, et généralement sont les suivants [2] :

I.3.1 Ressorts : Les ressorts sont des éléments principaux de la suspension, ils sont généralement fabriqués en acier et sont conçus pour absorber les chocs et les vibrations de la route. Ils sont disponibles dans une variété de types, ce sont les ressorts hélicoïdaux, les ressorts à lames, les ressorts pneumatiques et les ressorts à torsion. [2]



Figure I.1 : Les trois principaux types de ressorts

I.3.2 Amortisseurs : Sont également appelés absorbeurs de chocs, sont des dispositifs qui contrôlent les mouvements du ressort pour éliminer les grandes amplitudes de ce dernier. Les amortisseurs sont conçus pour absorber les oscillations du ressort et maintenir les roues en contact avec le sol. Ils peuvent être hydrauliques, pneumatiques ou électroniques qui sont particulièrement basés sur des capteurs électroniques. [2]

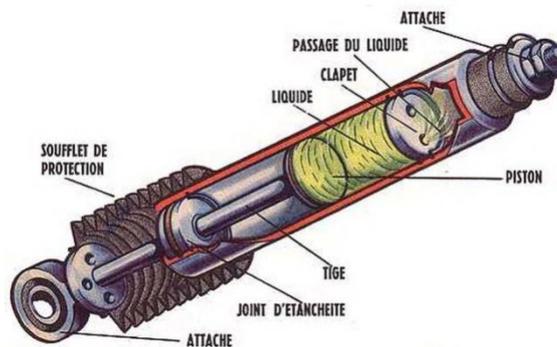


Figure I.2 : Dessin schématique d'un amortisseur

I.3.3 Barre stabilisatrice : Une barre stabilisatrice est un composant qui relie les deux roues d'un essieu et aide à réduire le roulis du véhicule dans les virages. La barre stabilisatrice est souvent reliée aux bras de suspension à l'aide de biellettes. [2]

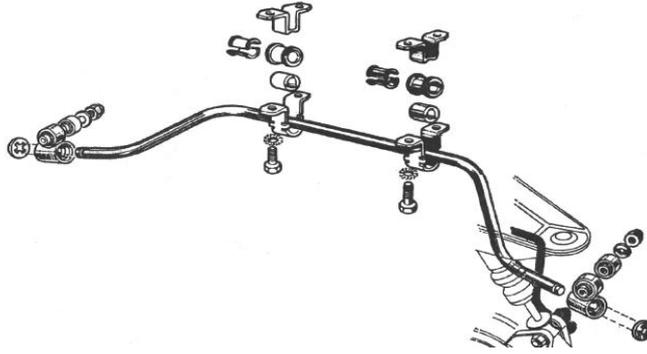


Figure I.3 : Dessin schématique d'une barre stabilisatrice

I.3.4 Bras de contrôle (suspension) : Les bras de suspension sont des pièces qui relient le moyeu de la roue à la carrosserie du véhicule. Ils peuvent être fabriqués à partir de différents matériaux, notamment l'acier, l'aluminium et la fibre de carbone. [2]

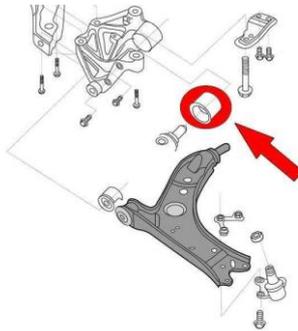


Figure I.4 : Dessin schématique d'un bras de contrôle inférieur

I.3.5 Rotules : Les rotules sont des dispositifs de pivotement qui permettent au bras de suspension de se déplacer librement, et ça rentre aussi dans le rôle de direction. Les rotules sont souvent utilisées dans les joints à rotule et les joints à rotule en forme de boule. [2]

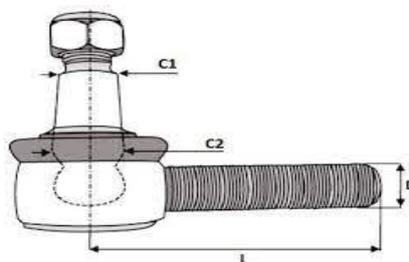


Figure I.5 : Dessin représentant la rotule de direction

I.3.6 Fusée d'essieu : Est une pièce en forme de tige qui est fixée à l'essieu et qui sert de support pour le moyeu de la roue, qui est responsable de maintenir les roues en place

et de permettre leur rotation. La fusée d'essieu est souvent équipée d'un moyeu de roue, qui est fixé à la fusée à l'aide de boulons. La qualité de la fusée d'essieu est importante pour la performance et la sécurité du système de suspension, car une fusée d'essieu défectueuse peut entraîner une usure prématurée des pneus, des bruits et des vibrations excessives. [2]

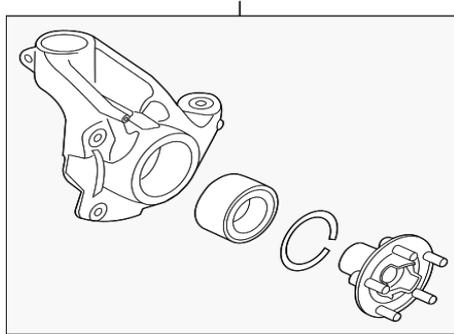


Figure I.6 : Dessin montrant l'ensemble d'une fusée d'essieu

I.4. Types de suspension

Il existe plusieurs types de systèmes de suspension pour les véhicules, chacun ayant ses avantages et ses inconvénients. Voici une liste des types de systèmes de suspension, ainsi que leurs sous-types [3] :

I.4.1 Suspension indépendante : La suspension indépendante permet à chaque roue de se déplacer de manière indépendante, ce qui améliore la tenue de route, la stabilité et le confort de conduite. La suspension indépendante comprend aussi des sous-types ou bien des modèles qui sont [3] :

I.4.1.1 Suspension McPherson : Le type McPherson est attribué au nom de l'ingénieur américain Earle S. McPherson. Il est le plus utilisé de nos jours, notamment sur les berlines compactes et les citadines. Principalement il s'agit d'un système simple et peu coûteux. La suspension McPherson est réputée car elle prend peu de place sur le plan transversal, en revanche elle nécessite un espace important sur le plan vertical. On peut faire comme remarque qu'elle est rarement utilisée sur les essieux arrière, où elle diminuerait le volume de coffre. Elle comporte un bras de suspension unique et une barre stabilisatrice appelée * barre antiroulis* permettant de guider l'ensemble. Les jambes de force (terme

désignant le système ressort-amortisseur) sont rigides et fixées aux porte-fusées, et elles jouent le rôle de pivot de direction.

La suspension pseudo-McPherson, plus récente comporte un triangle appelé * triangle inférieur* à la place du bras de suspension. Dans ce système, la barre antiroulis n'est pas nécessaire : c'est le triangle inférieur qui assure la fonction de guidage. [3]

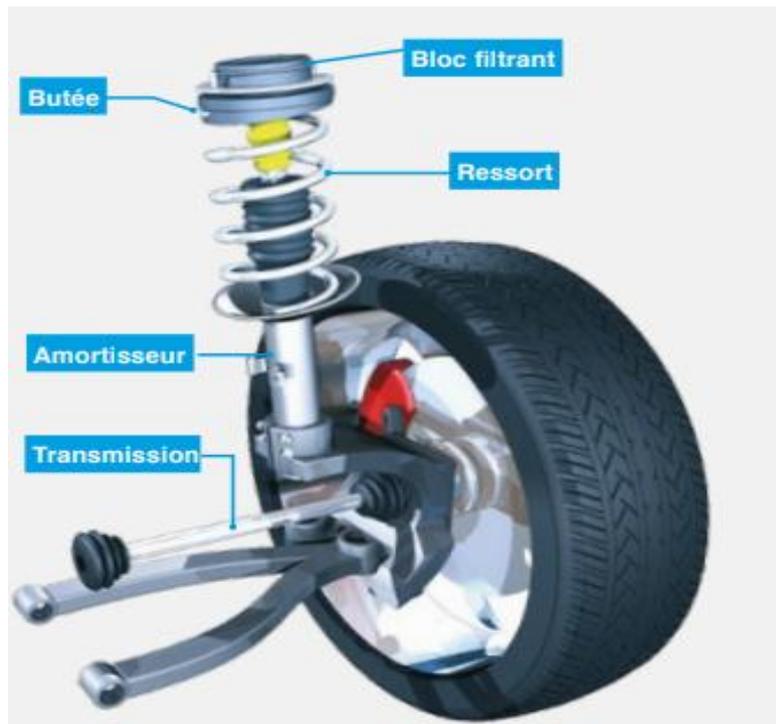


Figure I.7 : Système de suspension type McPherson

✚ Avantages :

- Cout, la conception est relativement simple
- Poids, légère, ce qui améliore l'efficacité énergétique
- Espace, compacte, donc elle diminue l'encombrement
- Réglage facile

✚ Inconvénients :

- Manque de confort
- Difficulté de contrôle, moins précise que d'autres suspensions
- Durabilité, elle a tendance à subir plus de stress sur certaines parties

- Stabilité, risques de perte de contrôle et d'accidents dans les virages

I.4.1.2 Suspension à double triangulation : est appelée ainsi grâce à ses deux triangles, le triangle supérieur et inférieur. Elle est très utilisée sur les citadines, le système de suspension à double triangulation été progressivement remplacé par celle de type McPherson. Aujourd'hui, on le retrouve plus souvent sur les voitures haut de gamme ou les sportives (notamment les voitures de courses).

La suspension à double triangulation comprend comme son nom l'indique deux triangles, l'un est supérieur et l'autre inférieur. Ces deux triangles sont rattachés aux porte-fusées par des rotules.

L'ensemble ressort-amortisseur est fixé à l'un des triangles (le triangle inférieur dans la plupart des cas). Comme sur la suspension McPherson, il est aussi possible d'ajouter une barre anti-roulis pour assurer un meilleur guidage de l'ensemble. [3]



Figure I.8 : Système de suspension type double triangulation

✚ Avantages :

- Meilleure tenue de route, stable et plus facile à contrôler
- Confort de conduite, plus douce et plus confortables que les autres suspensions
- Meilleure maniabilité, le véhicule est plus agile et plus réactif dans les virages

✚ Inconvénients :

- Le cout élevé, plus couteuse à fabriquer et à entretenir

- Entretien, nécessite un entretien régulier pour maintenir les performances
- Poids, généralement plus lourde que les autres types, affecte la consommation du carburant

I.4.1.3 Suspension multibras : La suspension multibras est le système le plus complexe et le plus difficile à fabriquer et à assembler. On l'utilise à l'avant comme à l'arrière des berlines, ce système est proche de la double triangulation, mais à la place des deux triangles on trouve quatre ou cinq bras qui prennent moins de place et permettent de réduire l'encombrement de l'ensemble.

La présence de plusieurs bras permet également d'affiner le guidage pour améliorer les performances du véhicule.

Les quatre bras se positionnent de manière transversale tandis que le cinquième (on le trouve généralement sur les trains arrière mais jamais à l'avant) est longitudinal (*bras tiré*). Son rôle est d'empêcher l'arrière de la voiture de se relever lors du freinage. [3]

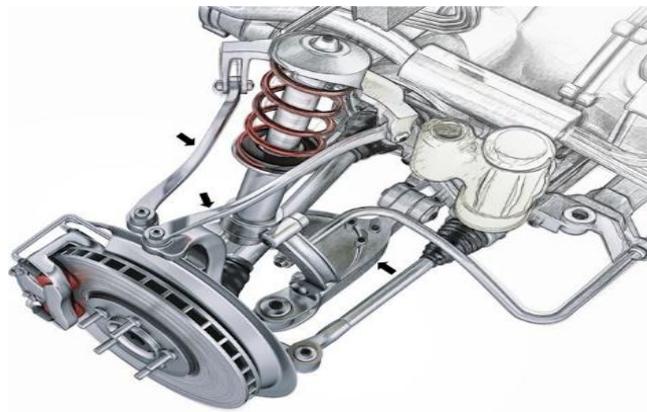


Figure I.9 : Système de suspension multibras

✚ Avantages :

- Permet une meilleure tenue de route, en particulier dans les virages serrés et les changements de direction rapide
- Offre un meilleur confort de conduite sur les routes accidentées ou bosselées
- Contrôle de la hauteur, utile pour ajuster la garde au sol en fonction des conditions de conduite

✚ Inconvénients :

- Plus coûteuse à produire et à installer que les autres types
- Plus complexe que les autres suspensions, ce qui rend la maintenance plus difficile
- Relativement plus lourde et occupe trop d'espace

I.4.1.4 Suspension à barre de torsion : ou bien bras de torsion, est le système le plus économique, ou on le retrouve beaucoup sur les citadines économiques des années 1990. Il garantit une conduite souple et confortable, on voit aussi qu'aujourd'hui est délaissé au profit de la suspension McPherson.

La particularité de ce système de suspension est qu'il n'utilise pas de ressorts pour maintenir la voiture. A la place du ressort, on retrouve une barre en acier dont les deux extrémités sont fixées, d'une part au *bras tiré* maintenant la roue et d'autre part au châssis. Grâce à la chaleur produite à l'intérieur du système de suspension, la barre est capable de se tordre à la manière d'un ressort.[3]



Figure I.10 : Système de suspension à barre de torsion

✚ Avantages :

- Plus légère, ce qui permet d'économiser du poids et d'améliorer la consommation de carburant
- Elle offre une bonne capacité de charge, ce qui la rend adaptée aux véhicules de travail tels que les camions
- Plus simple à entretenir, car elle ne nécessite pas de changement régulier des amortisseurs

- Une conduite plus stable sur les routes lisses et plates
- **⚠ Inconvénients :**
- Souvent moins confortable, en particulier sur les routes cahoteuses
- Elle est plus difficile à ajuster et à personnaliser, ce qui peut limiter les possibilités de réglage pour les amateurs de voitures
- Elle peut avoir des problèmes de torsion de barres, en particulier si le véhicule est utilisé pour des charges lourdes ou des terrains accidentés
- Elle peut être plus coûteuse à réparer ou remplacer en cas de dommages ou de défauts

I.4.2 Suspension à essieu rigide – non indépendante : La suspension à essieu rigide ou pont rigide utilise un seul essieu pour relier les deux roues, ce qui est moins cher à fabriquer et à assembler mais offre une tenue de route moins stable et un confort de conduite inférieur. Ce type aussi comprend des sous-types qui sont [4] :

I.4.2.1 Suspension à essieu rigide avec ressorts à lames : Egalement connus sous le nom de ressorts à lames de suspension, sont des composants mécaniques couramment utilisés dans les véhicules à charges élevées comme les camions et les véhicules utilitaires pour absorber les chocs et les vibrations de la route. Ils sont constitués de plusieurs lames minces en acier superposées les unes sur les autres et fixées à chaque extrémité à un support ou à une fixation. Les ressorts à lames sont utilisés dans les essieux arrière et avant des véhicules, ainsi que dans les systèmes de suspension des remorques. [4]

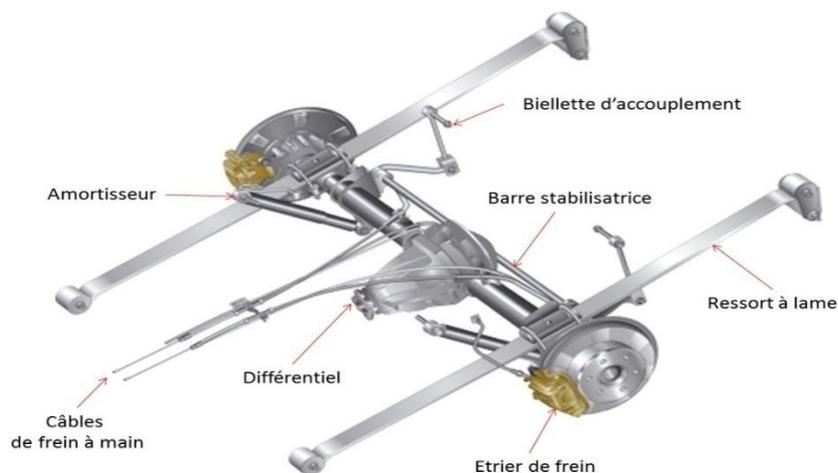


Figure I.11 : Suspension à ressorts à lames d'un essieu rigide arrière

✚ Avantages :

- Robustesse.
- Capacité de charge.
- Facilité de réparation.
- Hauteur de caisse.

✚ Inconvénients :

- Pas de confort
- Faible tenue de route
- Cout élevé
- Poids élevé

I.4.2.2 Suspension à essieu rigide avec ressorts hélicoïdaux : sont des ressorts sous une forme hélicoïdale, c'est un type de suspension utilisé dans de nombreux véhicules, notamment les voitures, les camions et les motos. Elle est composée de ressorts en forme de spirale, qui sont montés autour d'un axe central pour absorber les chocs et les vibrations de la route.

Les ressorts hélicoïdaux sont souvent utilisés dans les véhicules en raison de leur durabilité et de leur capacité à supporter des charges importantes. Ils peuvent également être ajustés pour offrir une suspension plus ferme ou plus souple, selon les besoins du conducteur. Elle est également appréciée pour sa simplicité, sa fiabilité et sa facilité d'entretien. [4]



Figure I.12 : Suspension à ressorts hélicoïdaux d'un essieu rigide

✚ Avantages :

- Légers, durables et relativement peu coûteux.
- Conduite confortable, et supporte une forte charge.
- Fabrication dans une grande variété de taille et de forme.
- Longue durée de vie et nécessitent pas trop d'entretien.

✚ Inconvénients :

- Manque de confort
- La capacité d'absorber les chocs et les vibrations.
- Provoque une perte de traction.
- Peuvent être bruyants.

I.4.2.3 Suspension à essieu rigide avec ressorts pneumatiques : Est un système de suspension utilisé dans les véhicules automobiles pour offrir une conduite plus souple et plus confortable. Ce système utilise un pont rigide qui est monté sur des ressorts pneumatiques. Les ressorts sont remplis d'air comprimé pour fournir un support de charge et ajuster la hauteur du véhicule. Elle offre une meilleure stabilité en virage et une meilleure traction, ce qui la rend adaptée pour les véhicules lourds et les véhicules tout-terrain. De plus, les ressorts pneumatiques peuvent être ajustés pour s'adapter à différentes charges et conditions de conduite. [4]



Figure I.13 : Suspension à ressorts pneumatiques sur un essieu rigide

Avantages :

- Confort de conduite
- Capacité de charge
- Réduction de la consommation du carburant
- Durée de vie des pneus

Inconvénients :

- Cout élevé
- Le cout de maintenance élevée
- Manque de fiabilité
- Réactivité

I.4.3 Suspension hydropneumatique : Est un système de suspension pour les véhicules automobiles qui utilise un liquide hydraulique sous pression plutôt que de l'air comme la suspension pneumatique pour supporter le poids de la voiture et absorber les chocs. Ce système utilise une combinaison de liquide hydraulique et d'air comprimé pour fournir une suspension plus confortable et réactive.

L'hydropneumatique a été développée dans les années 1950 par la société française Citroën et est restée un élément de conception distinctif pour les véhicules Citroën, d'autres constructeurs automobiles ont adopté des variantes de cette technologie.

L'une des caractéristiques les plus distinctives de la suspension hydropneumatique est son système de niveau régulation automatique qui ajuste automatiquement la hauteur de la voiture en fonction de la charge qu'elle transporte. [5]

I.4.3.1 Suspension hydropneumatique simple : Est un type de suspension utilisé dans les véhicules qui fonctionnent par un système hydraulique pour contrôler la suspension, contrairement à la suspension hydropneumatique à double circuit qui est plus complexe et coûteuse, la suspension hydropneumatique simple utilise un seul circuit hydraulique pour supporter le poids de la voiture.

Un exemple de voiture équipée d'une suspension hydropneumatique simple est la Citroën DS, lancée pour la première fois en 1955. Elle est

considérée à cette époque comme l'un des éléments de conception les plus innovants de la DS. [5]

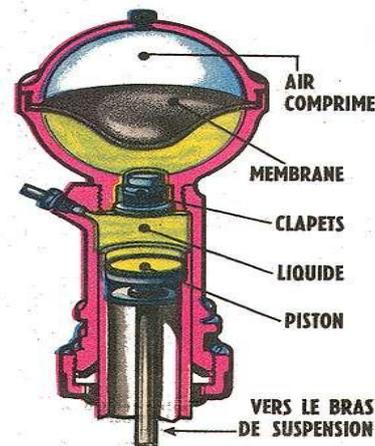


Figure I.14 : Dessin schématique d'un système de suspension hydropneumatique simple

I.4.3.2 Suspension hydropneumatique à réglage automatique de la hauteur :

Est un système qui utilise des vérins hydrauliques pour ajuster la hauteur de la voiture en fonction de la charge et des conditions de conduite. Ce système est souvent utilisé sur les voitures haut de gamme et les véhicules tout-terrain.

Le système de suspension hydropneumatique à réglage automatique de la hauteur a été développé pour la première fois par la société française Citroën dans les années 1950. Citroën a utilisé ce système sur plusieurs modèles, notamment la légendaire Citroën DS.

Les vérins sont reliés à une unité de contrôle qui mesure la hauteur de la voiture et ajuste la pression hydraulique en conséquence pour maintenir une hauteur constante, cela permet à la voiture de rester stable et de maintenir une position de conduite optimale dans toutes les conditions. [5]

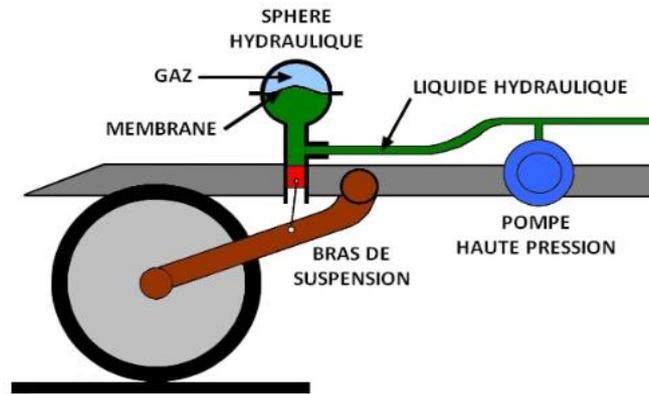


Figure I.15 : Dessin schématique montrant la suspension hydropneumatique à réglage automatique de la hauteur

I.4.3.3 Suspension hydropneumatique avec système de nivellement : Est une technologie de suspension pour les véhicules automobiles qui utilise un liquide hydraulique sous pression pour maintenir automatiquement la hauteur de la voiture, quel que soit le poids qu'elle transporte.

Ce système utilise des capteurs pour mesurer la hauteur de la voiture par rapport au sol et un système de régulation électronique pour ajuster la pression du liquide hydraulique dans les sphères de suspension, afin de maintenir une hauteur de conduite constante.

De plus, le système de suspension hydropneumatique avec système de nivellement peut également ajuster la hauteur de conduite en fonction de la vitesse. Par exemple, la voiture peut être abaissée à grande vitesse pour améliorer l'aérodynamique et augmenter la stabilité. [5]

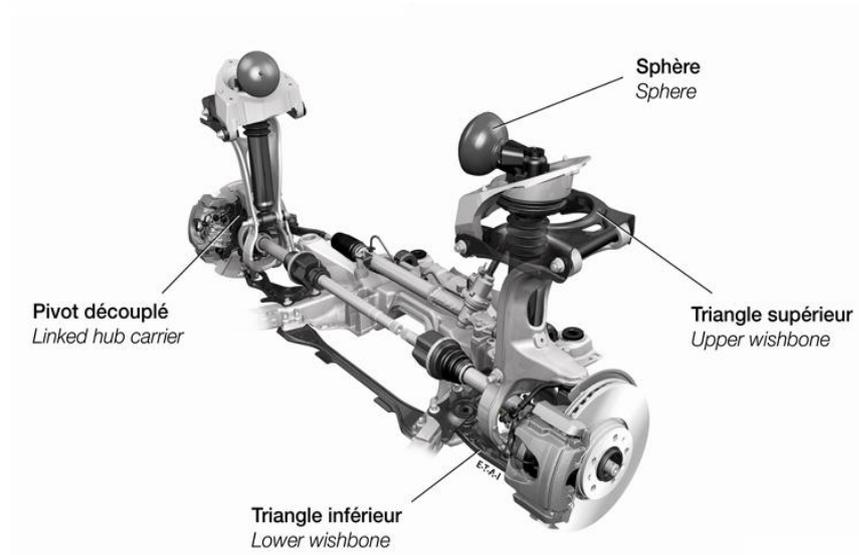


Figure I.16 : Système de suspension hydro-pneumatique à nivellement

✚ Avantages :

- Confort de conduite
- Réglage de la hauteur
- Meilleure tenue de route
- Durée de vie

✚ Inconvénients :

- Cout élevé
- Maintenance
- Complexité
- Sensibilité aux fuites

I.4.4 Suspension à l'air : Egalement appelée suspension pneumatique, est un système de suspension pour les véhicules automobiles qui utilise de l'air comprimé pour supporter le poids de la voiture et absorber les chocs. Ce système est utilisé principalement dans les camions, les autobus et les voitures haut de gamme.

Le fonctionnement de la suspension à air repose sur des sacs d'air qui sont gonflés ou dégonflés en fonction des conditions de conduite. Les sacs d'air sont connectés à un système de compresseur d'air et de soupapes qui permettent de réguler la pression dans les sacs d'air. Cette régulation de la pression permet d'ajuster la hauteur

de la voiture et offrir une conduite plus stable. Ce système comprend trois modèles qui sont [6] :

I.4.4.1 Suspension à air simple : Elle est appelée *simple* car elle utilise un seul sac d'air pour chaque essieu, plutôt que deux ou plus comme dans les systèmes de suspension à air plus complexes. Lorsqu'un véhicule équipé d'une suspension à air simple est chargé, l'air comprimé est envoyé dans le sac d'air approprié pour augmenter la hauteur de caisse et maintenir une hauteur constante par rapport à la route. En revanche, si le poids est retiré, l'air est relâché et la hauteur de caisse diminue. Elles sont souvent utilisées dans les camions les véhicules de transport en commun et les véhicules tout-terrain. [6]



Figure I.17 : Ensemble d'un système de suspension pneumatique simple

I.4.4.2 Suspension à air avec système de nivellement : Elle est généralement utilisée dans les camions, les véhicules tout-terrains et les voitures de luxe. Le système de nivellement permet de maintenir la hauteur de la suspension du véhicule, même lorsque celui-ci transporte une charge importante ou lorsque la route est accidentée.

Le système utilise des capteurs qui mesurent la hauteur de la suspension et ajustent automatiquement la pression d'air dans les sacs pour maintenir une hauteur constante. En plus d'offrir une meilleure stabilité, une suspension à air avec système de nivellement peut également améliorer l'efficacité énergétique du véhicule en réduisant la résistance au roulement. [6]

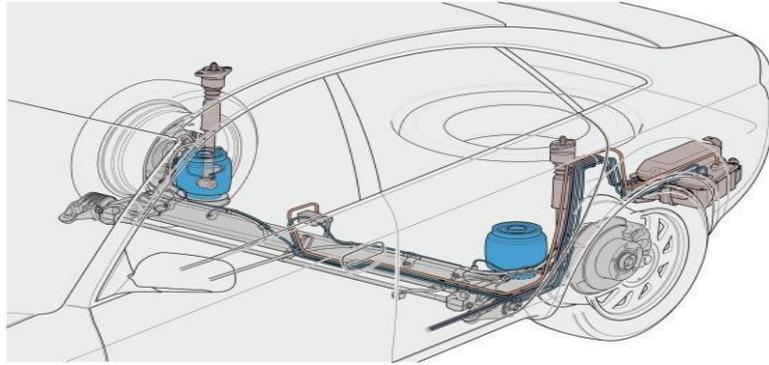


Figure I.18 : L'ensemble d'un schéma montrant le fonctionnement d'une suspension pneumatique à nivellement

I.4.4.3 Suspension à air avec système de réglage automatique de la hauteur :

Utilise des sacs gonflables remplis d'air pour soutenir la charge du véhicule et régler sa hauteur de conduite.

Ce système fonctionne par des capteurs pour surveiller la hauteur de conduite du véhicule et ajuste automatiquement la pression d'air dans les sacs pour maintenir une hauteur de conduite constante, quelle que soit la charge du véhicule. Elle est souvent utilisée sur les camions, les bus et les remorques, ainsi que sur les véhicules tout-terrains pour améliorer leur capacité de franchissement. [6]

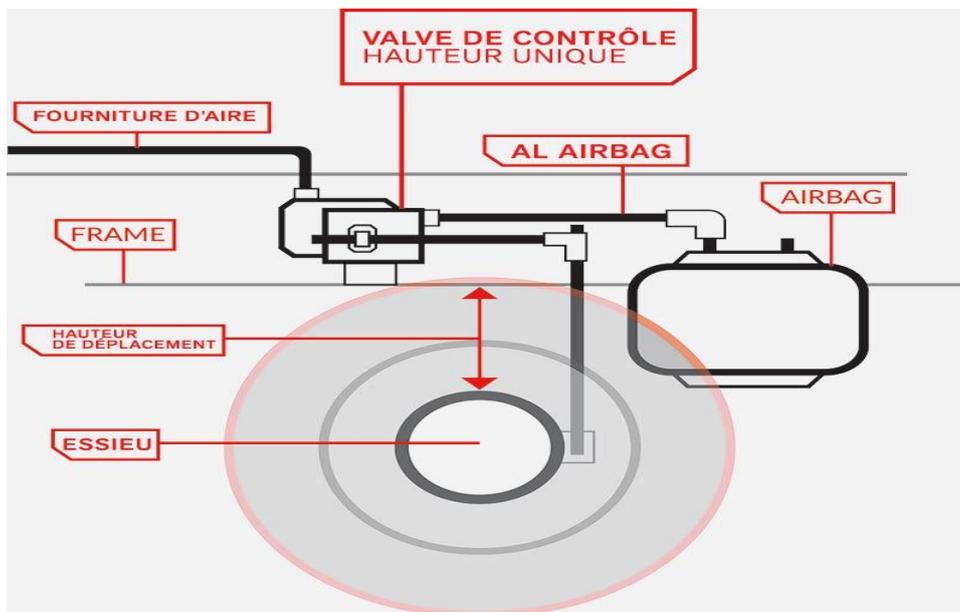


Figure I.19 : Schéma représentant le système d'une suspension pneumatique à réglage automatique de la hauteur

Avantages :

- Une conduite souple et plus douce
- Réglage automatique de la hauteur de conduite
- Capacité de charge élevée
- Durabilité

Inconvénients :

- Cout élevé
- Complexité lors des réparations et plus couteuse en cas de panne
- Fiabilité, en ce qui concerne les fuites
- Entretien, nécessite un entretien régulier

I.5. Conclusion

Les systèmes de suspension sont une partie indispensable pour le fonctionnement de tout véhicule automobile. Ils offrent une conduite confortable, stable et sécurisée en absorbant les chocs et les vibrations de la route. Les systèmes de suspension sont composés de plusieurs éléments, chacun jouant un rôle important dans le processus global du système.

Ils existent plusieurs types de systèmes de suspension, chacun ayant ses avantages et ses inconvénients en fonction de l'utilisation prévue. En effet, pour concevoir et fabriquer un système de suspension précis, il suffit juste de baser sur plusieurs critères qu'un ingénieur concepteur doit conclure de l'ensemble des études faites sur les différents aspects de recherche afin de réaliser un système de suspension qui convient à tous les besoins.

Chapitre 02

Systemes de suspension – Suspension à lames de ressorts

II.1. Introduction

La suspension à lame de ressort est un système de suspension mécanique couramment utilisé sur les véhicules tels que les camions, les camionnettes et les bus. [7]

II.2. Définition générale de la suspension à lame de ressort

La suspension à lame de ressort est un système de suspension utilise pour absorber les chocs et les vibrations d'un véhicule. Les lames sont fixées à la fois à la carrosserie et e l'essieu du véhicule, créant ainsi une distance constante entre la carrosserie et les roues. Lorsque le véhicule roule sur une surface inégale, les lames de ressort fléchissent pour absorber l'énergie cinétique, ce qui réduit la quantité de mouvement transférée à la carrosserie et à l'habitacle. [7]

II.3. Présentation du ressort à lames

De nombreux véhicules sur route, en particulier les plus lourds, utilisent des ressorts à lames placés sur deux points d'appui. Ces ressorts sont généralement constitués de lames de longueurs différentes pour se rapprocher autant que possible d'un corps solide de résistance équivalente.

La lame principale, appelée lame maîtresse, peut avoir un œil à chaque extrémité pour la fixation aux jumelles de suspension du châssis. [8]

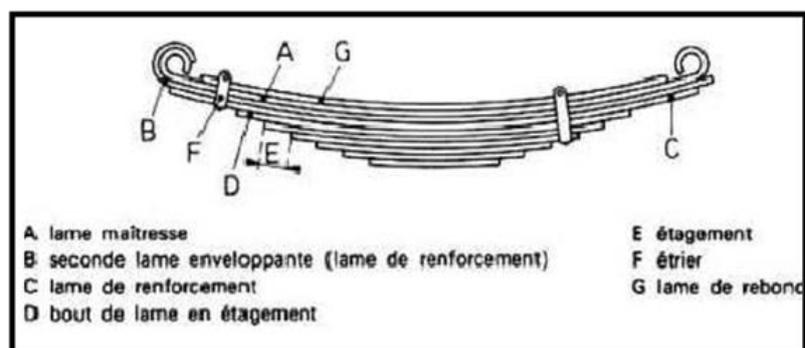


Figure II-1 : Ressort à lames des véhicules routiers

I.3.1 Les parties essentielles d'un ressort à lames

- a. -La lame maîtresse, ou feuille principale, est la pièce centrale qui assure la connexion avec le véhicule. Elle transfère tous les efforts et les couples générés par les charges, les accélérations, les freinages et les irrégularités de la route. [9]

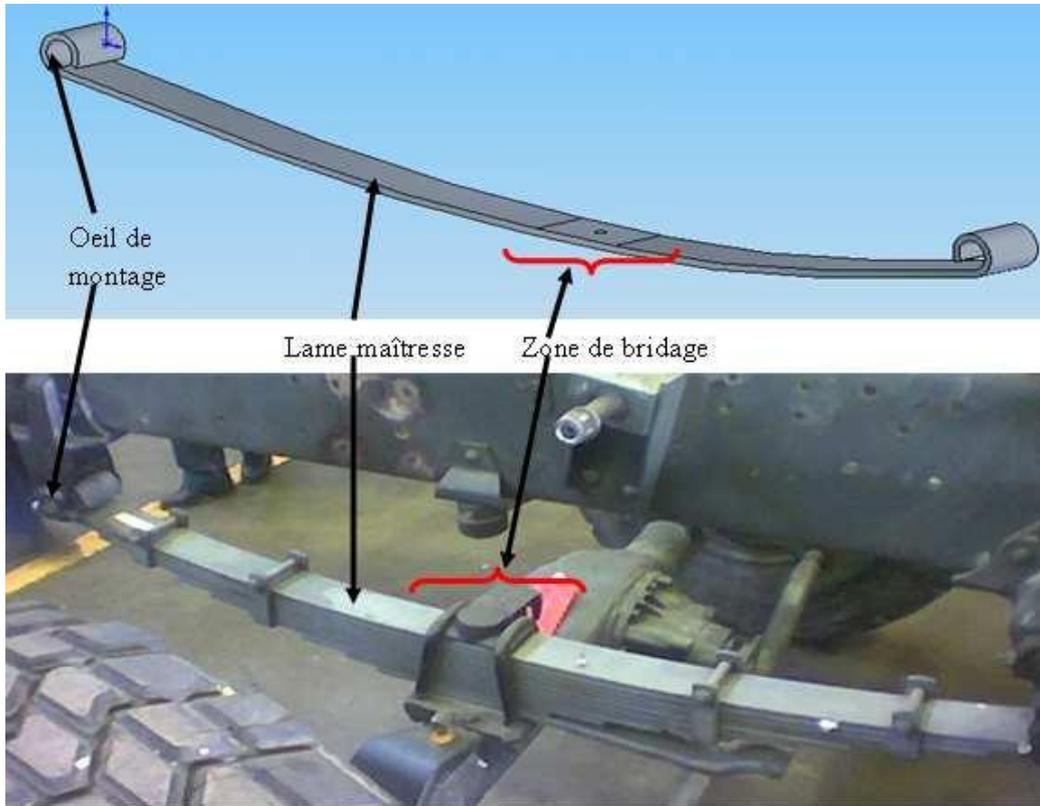


Figure II.2 : Lame maitresse

- b. -La lame sous-maîtresse est une feuille de renforcement de même longueur que la lame maîtresse, située juste en dessous et tout aussi active. [9]

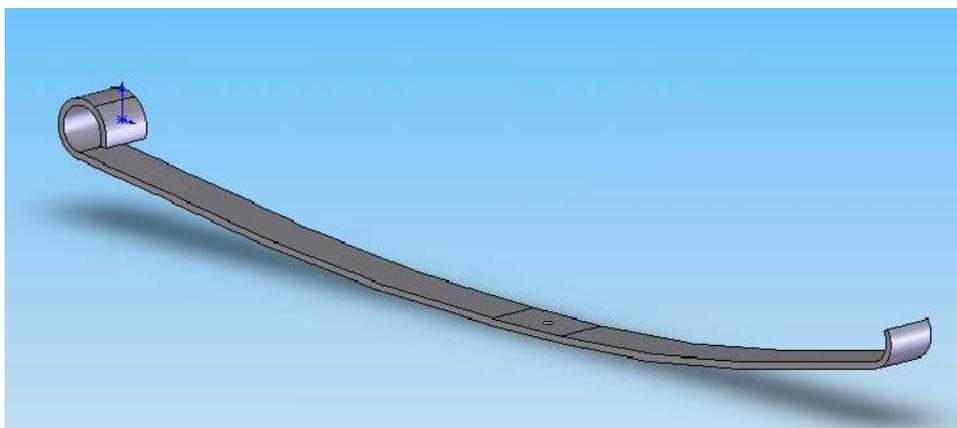


Figure II.3 : Lame sous-maitresse

c. -La contre-lame est une courte feuille qui travaille avec un étrier pour renforcer un œil fortement sollicité. Elle réduit les contraintes subies par la lame maîtresse à proximité de l'œil, mais n'affecte pas les autres contraintes ni la rigidité du ressort.[9]

d. -La lame de rebond est placée contre la face tendue (généralement concave) de la lame maîtresse, à l'opposé des autres lames. Elle est principalement utilisée sur les ressorts des véhicules tout-terrains pour renforcer la lame maîtresse qui doit supporter l'essieu lorsque le véhicule rebondit et est soumise à la torsion lorsqu'il y a une grande différence de niveau entre les deux roues d'un même essieu. [9]

e. -L'étoquiau, ou boulon central, traverse tous les trous percés dans les feuilles et maintient l'ensemble assemblé. Les feuilles sont empilées les unes sur les autres sur toute leur longueur, et la tête cylindrique du boulon central sert à positionner le ressort par rapport à l'essieu du véhicule. Elle s'appuie sur la plus petite feuille lorsque le ressort est placé au-dessus de l'essieu et sur la lame maîtresse lorsqu'il est placé en dessous de l'essieu. [9]

f. -La bride est un élément qui assure la liaison permanente du ressort avec son support. Elle se compose généralement de plaques maintenues par des boulons droits ou en U qui serrent fermement le ressort sur son support pour réduire les contraintes autour du boulon central. [9]

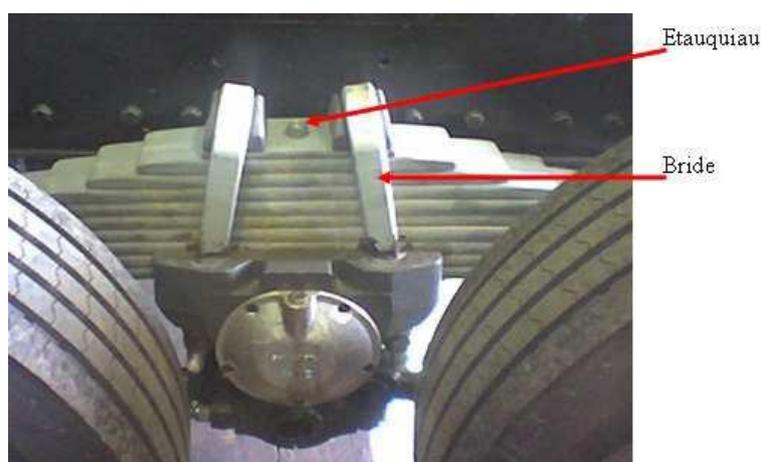


Figure II.4 : L'étoquiau en montage avec les brides

g. -L'œil est l'extrémité enroulée de la lame maîtresse, parfois également présent sur une autre feuille. [9]

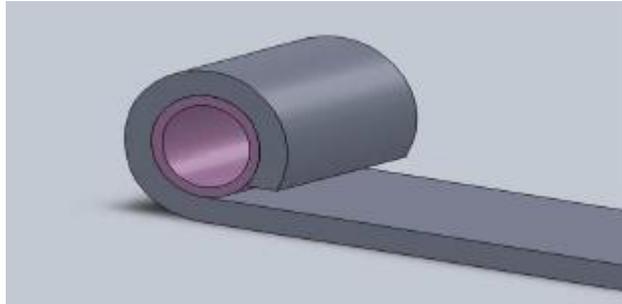


Figure II.5 : L'œil d'une lame maîtresse

h. -Les étriers maintiennent plusieurs feuilles du ressort ensemble et empêchent leur écartement en éventail lorsque le ressort est soumis à des efforts latéraux ou lorsque la zone de la bride est soumise à un couple de déroulement dû aux accélérations ou freinages. [9]

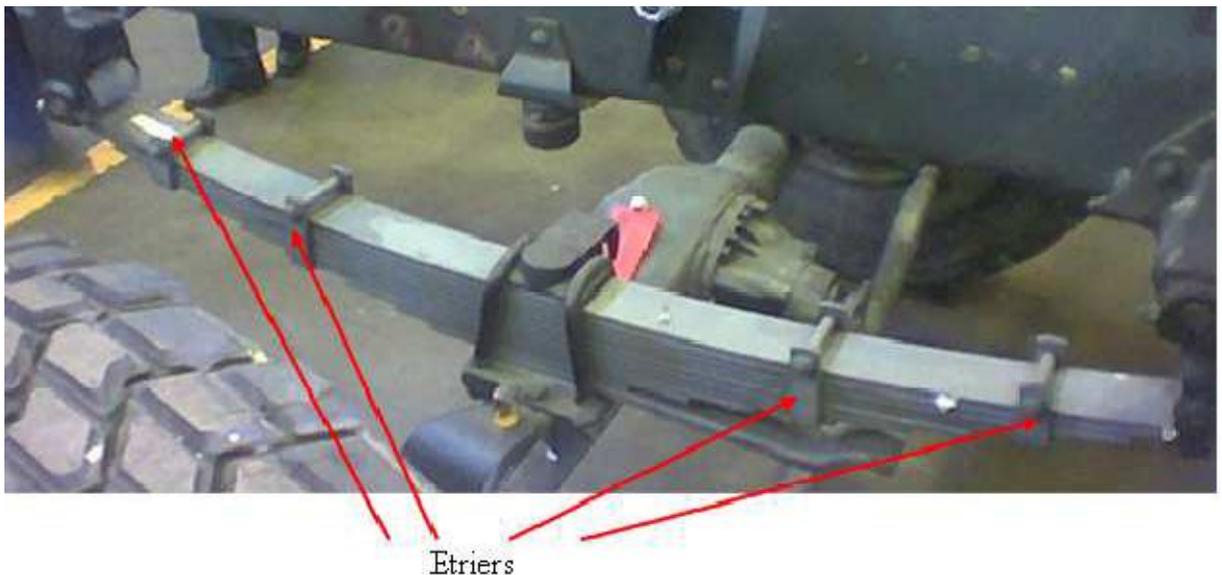


Figure II.6 : Les étriers en montage sur les ressorts à lames

i. -Les jumelles sont des articulations qui relient les extrémités des ressorts aux longerons du châssis et leur permettent de s'allonger sous l'effet d'un choc ou d'une surcharge. [9]

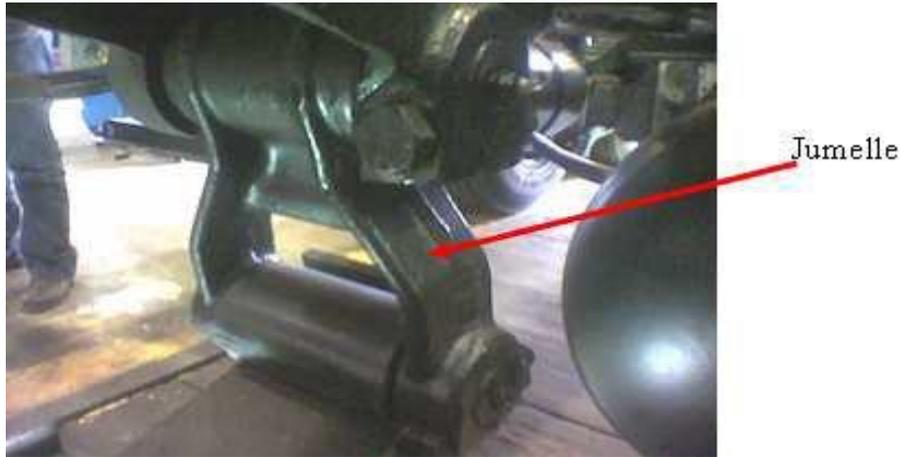


Figure II.7 : Jumelle assemblée à l'œil d'une lame maitresse

II.4. Les différents types de ressorts à lames

a) Ressorts à lame simple

- Lame simple

La configuration d'une lame chargée reposant sur deux appuis peut être vue comme l'assemblage de deux bras flexibles reliés entre eux (illustré dans la figure II.2). Un bras, de longueur déterminée, supporte une charge P_1 , équivalente à la réaction de l'un des appuis, tandis que l'autre bras, de longueur différente, supporte la charge P_2 équivalente à la réaction de l'autre appui. [10]

La charge Q portée par l'ensemble est égale et opposée à la somme des deux réactions :

$$Q = P_1 + P_2 \quad (1)$$

La longueur entre appuis est la somme des longueurs est :

$$L = l_1 + l_2 \quad (2)$$

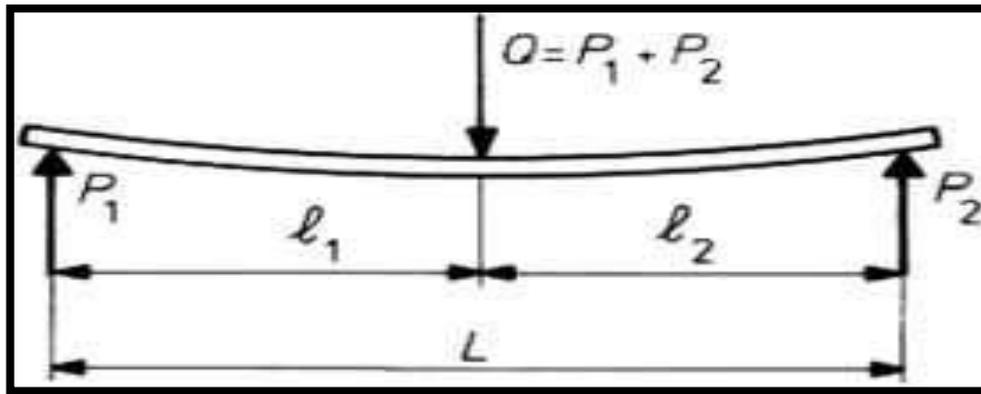


Figure II.8 : Lame simple

Connaissant la charge Q et les longueurs, les réactions sont données par les relations :

$$P_1 = \frac{Ql_2}{L} \quad (3)$$

$$P_2 = \frac{Ql_1}{L} \quad (4)$$

Lorsque les deux bras sont symétriques par rapport à la charge, on a :

$$l_1 = l_2 \quad \text{alors} \quad L = 2l \quad \text{ou} \quad l = L/2$$

$$P_1 = P_2 = P \quad \text{alors} \quad Q = 2P \quad \text{ou} \quad P = Q/2$$

La déformée est symétrique au point d'application de la charge Q , la tangente est horizontale ;

Donc on peut appliquer les formules des bras en remplaçant l par $L/2$ et P par $Q/2$.

- Lames égales

Le ressort à lames égales se compose :

Soit d'une lame simple, Soit d'un faisceau de lames égales appuyées sur les mêmes appuis et réunies entre elles vers leur milieu par une bride de liaison avec l'essieu du véhicule. [10]

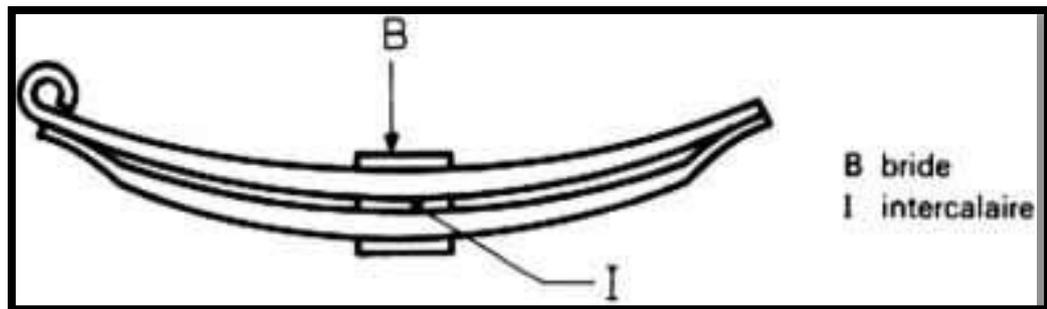


Figure II.9 : Ressort à lames égales

- Lames dissymétriques

En présence d'une lame dissymétrique, il est possible de calculer individuellement les déflexions f_1 et f_2 . Toutefois, étant donné que ces déflexions ne sont pas égales pour une lame à deux bras de même forme, le siège de la lame subit une inclinaison progressive sous charge. Afin de maintenir le siège perpendiculaire à la charge, il est nécessaire de modifier la découpe ou le profil des bras de manière à ce que f_1 soit égal à f_2 . [10]

b) Ressorts à lames multiples

Les ressorts à lames égales sont fabriqués avec des lames paraboliques ou trapézoïdales, ce qui leur permet d'avoir un coefficient d'utilisation de la matière élevé et d'être donc légers. Cependant, leur fabrication nécessite des outillages coûteux, ce qui limite leur utilisation aux grandes séries de production. Pour les petites séries, on utilise des ressorts à lames multiples ou semi-elliptiques qui sont constitués de lames empilées en faisceau et d'épaisseur uniforme. Dans un faisceau de lames, toutes les lames ont en principe la même déformation circulaire. [10]

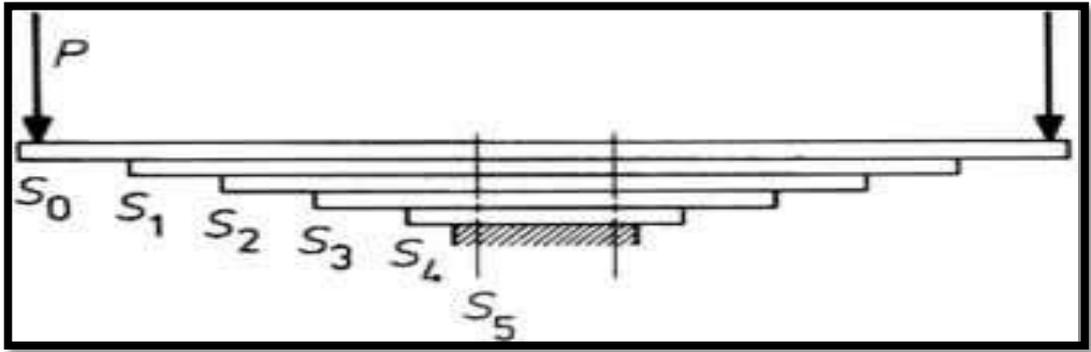


Figure II.10 : Ressort à lames multiples

- Ressort triangulaire

En première approximation, le ressort à lames multiples peut être considéré comme équivalent à une lame en losange composée de deux bras triangulaires.

L'application directe d'une telle lame n'est pas possible, notamment à cause de sa trop grande largeur maximale B . On envisage alors la découpe de cette lame en $2N$ bandes de largeur $B/2N$ parallèles à la droite qui réunit les sommets des bras triangulaires.

La réunion deux à deux des bandes symétriques et leur empilement suivant la forme un ressort feuilleté de N lames de largeur $b = B/N$. [10]

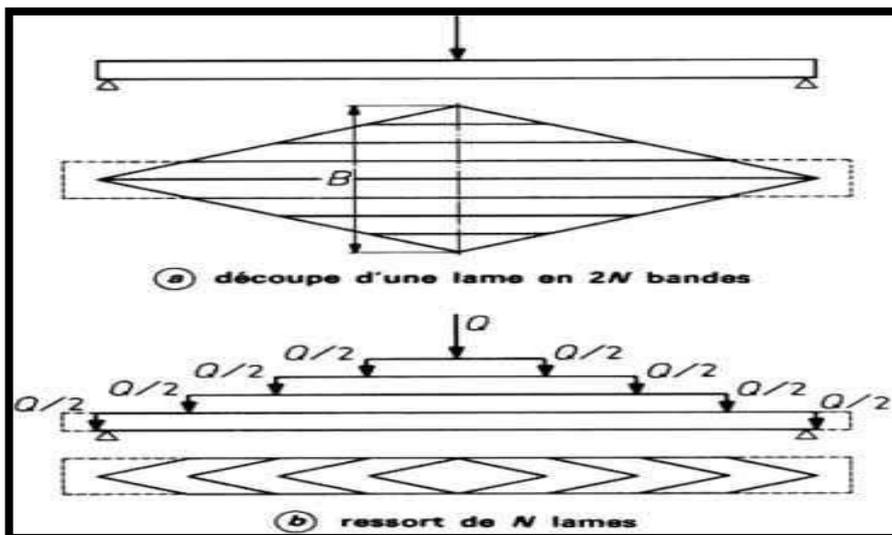


Figure II.11 : Ressort triangulaire

- Ressort pincette

Certains bogies sont équipés de ressorts pincettes dans leur système de suspension pour assurer leur propre amortissement. Le ressort pincette est constitué d'une ou plusieurs paires de ressorts à lames multiples, assemblées en opposition. Les paires de ressorts sont placées parallèlement et reliées par deux mains en acier moulé. Les extrémités des lames maîtresses, qui ont généralement une forme en crochet, sont enclenchées dans ces mains en acier. [10]

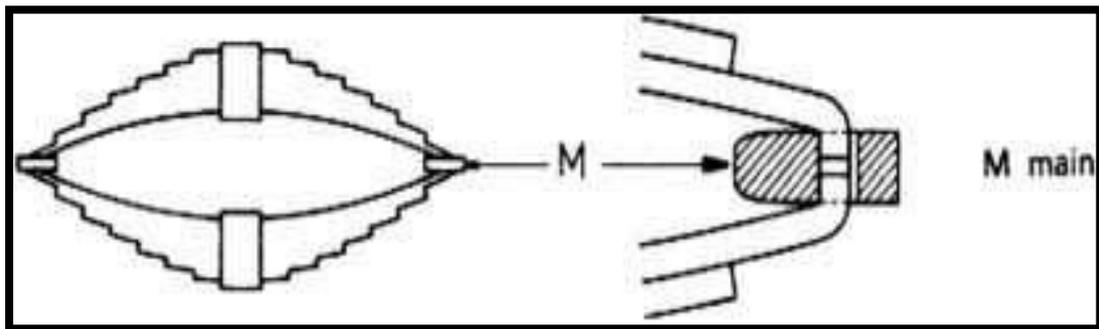


Figure II.12 : Ressort pincette

- Ressort transversal

Certains véhicules utilisent un ressort transversal pour leur suspension. Ce ressort est articulé sur deux paliers solidaires du châssis et permet de répartir uniformément le poids du véhicule sur les deux roues. L'utilisation des deux paliers permet une déflexion similaire à chaque extrémité du ressort, ce qui améliore la répartition des charges sur les roues et contribue à la stabilité du véhicule. La partie centrale du ressort, située entre les deux paliers, a une section uniforme et subit un moment constant. Les deux parties situées à l'extérieur des paliers ont une section variable, soit en forme de ressort triangulaire, soit en forme de profil parabolique. [10]

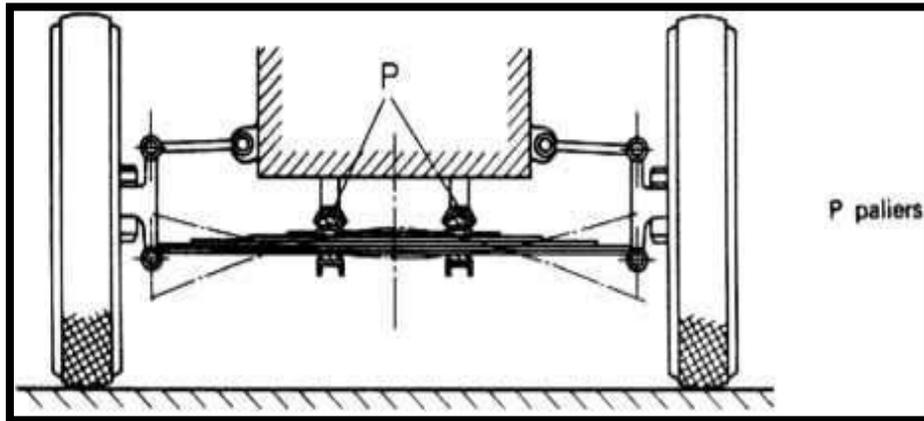


Figure II.13 : Ressort transversal

c) Ressorts à flexibilité variable

Les ressorts à flexibilité variable s'appliquent aux fortes variations de charge. D'abord appliqués aux autobus et à la suspension arrière des camions, ils s'étendent de plus en plus aux véhicules légers, à mesure que l'on en réduit la charge à vide.

La caractéristique de charge (P en fonction de f la flexibilité) de ces ressorts n'est plus une droite. Elle est dite progressive quand la raideur $R = P / f$ est croissante et dégressive quand la raideur est décroissante. [10]

La variation de flexibilité peut être obtenue de plusieurs façons que l'on peut combiner :

- Compensateur
- Faisceaux auxiliaires ou sabot.
- On peut faire également varier la flexibilité à l'aide des jumelles

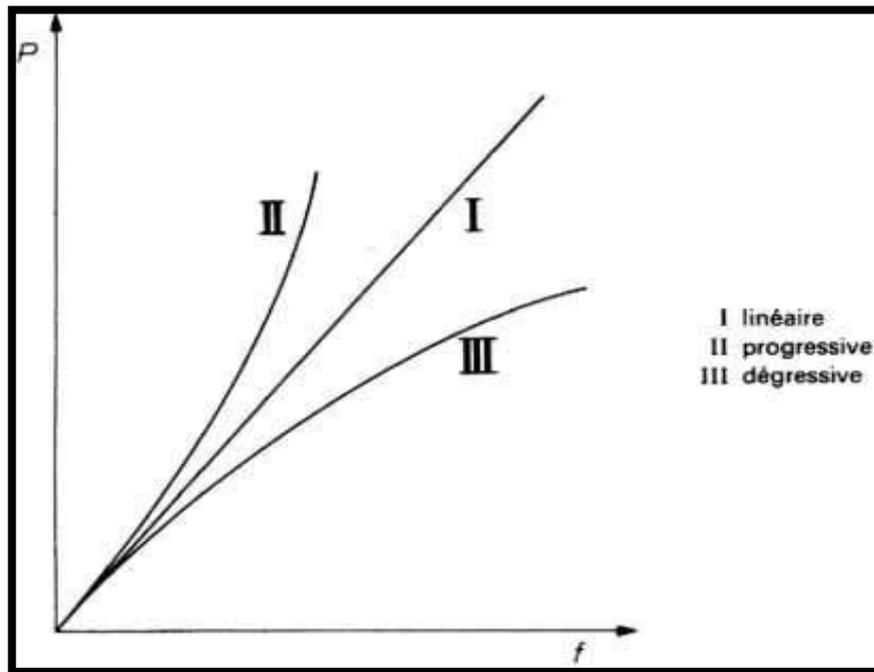


Figure II.14 : Caractéristiques de charge des ressorts à flexibilité variable

- Compensateur

Le dispositif décrit consiste en un ressort à lames à deux glissoirs qui agit en tandem avec un ressort principal, auquel il est fixé par un même bridage. Les deux glissoirs sont en contact avec des sabots situés à une certaine distance, et n'entrent en contact qu'à partir d'une certaine charge du véhicule. Cette suspension devient alors brusquement plus ferme. Le compensateur est généralement plus court et plus ferme que le ressort principal. Ce type de dispositif est principalement utilisé pour les véhicules lourds qui voyagent soit à vide, soit à pleine charge. [10]

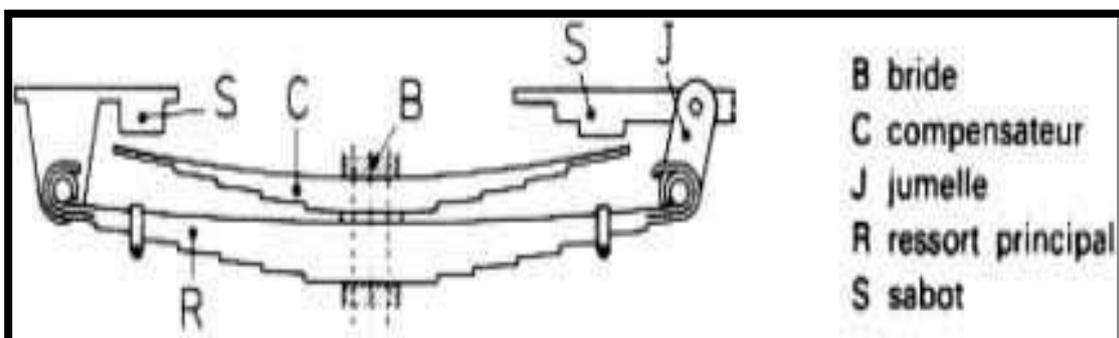


Figure II.15 : Compensateur et ressort principal

- Faisceaux auxiliaires

Les lames d'un ressort peuvent être séparées en plusieurs faisceaux qui, non chargés, ne sont réunis que par le bridage. Quand le ressort est chargé et à mesure que la charge augmente, les faisceaux de lames s'appliquent les uns sur les autres et la raideur du ressort augmente.

Le premier faisceau qui comporte la lame maîtresse fléchit aux plus faibles charges ; il s'appelle faisceau primaire ou principal. Tous les autres faisceaux sont des faisceaux auxiliaires et n'interviennent qu'à partir de charges d'autant plus élevées qu'ils sont plus éloignés du faisceau primaire. Le faisceau primaire fléchit beaucoup plus et doit être fait de lames relativement minces. Celles des autres faisceaux seront de plus en plus épaisses à mesure que la flexion diminue. [10]

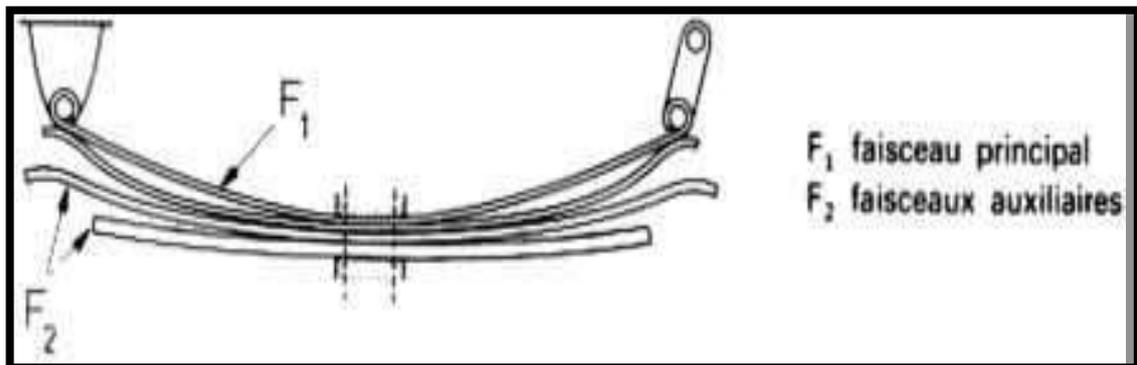


Figure II.16 : Ressort à plusieurs faisceaux

- Ressorts progressif

Ensemble formé d'un seul paquet de lames dont les plus petites de courbure moindre, ne s'appuient sur les précédentes que progressivement, à partir d'une charge. [10]

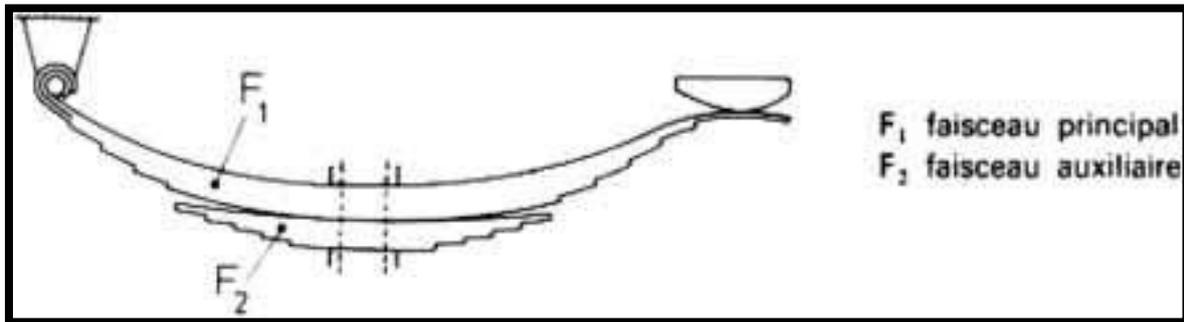


Figure II.17 : Ressort progressif

- Ressorts à sabot et glissoir

Le sabot associé au glissoir d'une lame maîtresse peut être relativement long. Sa forme peut être déterminée de façon que la lame maîtresse, à faible charge, appuie l'extrémité la plus éloignée et que le contact entre la lame maîtresse et le sabot se déplace à mesure que la charge augmente. La longueur utile du ressort diminue avec la charge ; la raideur du ressort est progressive.

Une détermination judicieuse du sabot permet d'obtenir toutes les caractéristiques de charge souhaitées. Il n'est pas utile de faire intervenir un sabot flexible comme on l'a parfois proposé. [10]

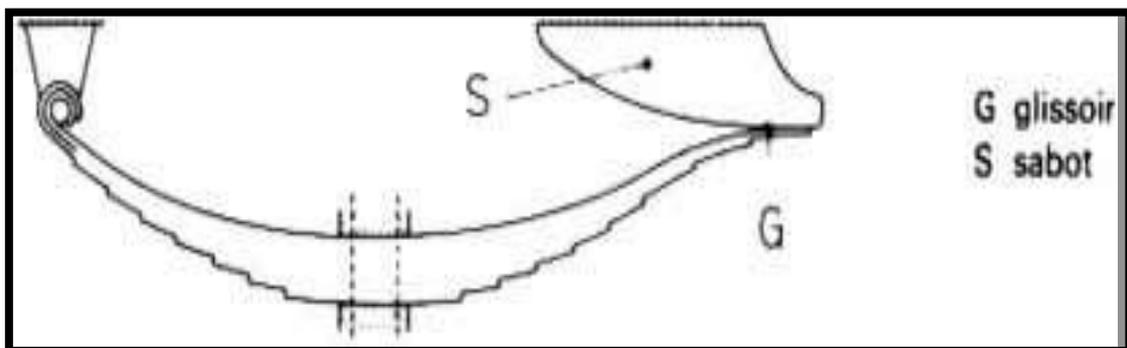


Figure II.18 : Ressort à flexibilité variable à sabot et glissoir

II.5. Les différentes charges

a. Charge à vide

Poids mort supporté par le ressort (châssis en ordre de marche et la carrosserie).

[11]

b. Charge maximale autorisée

Poids supporté par le ressort quand le véhicule atteint son poids total en charge (à vide et charge utile maximale (marchandise et voyageurs). [11]

c. Charge en butée

Poids supporté par le ressort fléchi au maximum représentant la limite supérieure que l'on ne dépassera jamais. [11]

d. Surcharge

Charge dépassant la charge maximale autorisée. Il s'agit de toute la force exercée sur le ressort, et non pas seulement de la différence entre la charge considérée et la charge maximale autorisée. Elle se mesure en kilogramme (kg). [11]

II.6. Propriétés des ressorts à lames

a) La flèche

Distance entre le centre du poinçonnage de la lame maîtresse et la tangente commune inférieure aux bagues des deux yeux. La flèche est nulle, si la lame maîtresse est rectiligne, elle est positive si la lame maîtresse est située au-dessous de la position rectiligne et elle est négative dans le cas contraire ; On l'appelle alors contre flèche. On l'évalue en millimètre (mm). [12]

b) Flexion

Différence entre la flèche sans charge et une flèche quelconque. Elle est positive pour un accroissement de la charge ; on l'évalue en millimètre (mm).[12]

c) Flexibilité

Flexion du ressort pour 100 kg de charge. Si le ressort est simple, la flexibilité est une constante ; s'il est complexe, la flexibilité est variable, généralement décroissante quand la charge augmente. Elle se mesure en millimètre (mm) par 100 kilogrammes (kg). On distingue : [12]

➤ **La flexibilité nominale**

C'est celle des lames composant le ressort, sans tenir compte de l'influence de la jumelle ou des patins. [12]

➤ **La flexibilité réelle**

Tient compte de l'influence du montage (jumelle ou patin). [12]

d) Raideur

C'est l'inverse de la flexibilité. C'est la charge en kilogramme (kg) produisant une flexion d'un (01) millimètre (mm). [12]

e) Contrainte

Force par unité de surface agissant dans une direction déterminée ; on l'exprime en Newton par mm² (N/mm²) ; on distingue : [12]

➤ **La contrainte de flexion**

S'exerce sur toute la longueur du ressort, elle est due à la charge elle-même. C'est la contrainte principale du ressort. Au moment de l'accélération ou du freinage, le ressort encaisse le couple d'accélération ou de freinage qui se traduit par une contrainte supplémentaire : [12]

➤ **La contrainte de traction ou compression**

S'exerce sur les axes des yeux, au moment des virages par exemple. [12]

➤ **La contrainte de torsion**

S'exerce sur les axes des yeux, au moment des virages. [12]

➤ **La contrainte de cisaillement**

S'exerce sur les extrémités des lames à l'extrémité des patins. [12]

f) Butée

Se produit lorsqu'une partie rigide de l'essieu prend appui sur une partie rigide du châssis. [12]

II.7. Gamme de fabrication

Dans cette section, nous allons aborder la méthode de fabrication industrielle utilisée dans les ateliers équipés de technologies modernes. Tout d'abord, nous décrirons les différentes étapes de production dans l'ordre chronologique, en les détaillant successivement comme suit : [13]

1- Choix de l'acier :

On choisit un acier dont la limite élastique (R_e) et la résistance à la rupture (R_r) sont satisfaisants pour le niveau de contraintes qui agissent sur les ressorts à lames, et qui ont été déterminée par calcul. [13]

2- Découpage des lames :

Les bandes d'aciers sont découpées en longueurs appropriées pour former les lames du ressort. Ce procédé peut être fait à l'aide de techniques de découpe, telles que la découpe au laser ou la découpe à l'eau sous pression. [13]

3- Chauffage et trempe :

La bande d'acier peut être chauffée pour la rendre plus souple et faciliter le processus de formage. Ensuite, elle est généralement trempée pour améliorer ses propriétés mécaniques, notamment la résistance et la durabilité. [13]

4- Formage des lames :

Les lames sont déjà chauffées auparavant, ensuite elles seront formées en utilisant différentes méthodes, telles que le martelage, le pliage ou le laminage. Les lames sont façonnées de manière à obtenir la courbure et la forme désirée pour le ressort. [13]

5- Refroidissement et revenu :

On fait refroidir les lames après le formage, pour durcir le métal. Ensuite, elles peuvent être soumises à un processus de revenu, qui consiste à les chauffer à une température contrôlée pour éliminer les tensions internes et augmenter leur résistance. [13]

6- Assemblage :

Chaque lame individuelle sera assemblée l'une avec l'autre en utilisant des boulons, des rivets ou d'autres méthodes d'assemblage. L'assemblage peut impliquer le perçage de trous dans les lames pour permettre la fixation des boulons ou des rivets. [13]

7- Traitement thermique final :

Le ressort assemblé peut subir un traitement thermique final pour améliorer ses propriétés mécaniques, telles que sa résistance et sa durabilité. Ce traitement peut inclure le revenu, la trempe ou d'autres procédés spécifiques. [13]

8- Finition :

Les ressorts à lames sont soumis à une étape de finition, qui peut comprendre le meulage, le polissage, le grenailage ou le revêtement de surface pour améliorer leur apparence, enlever les bavures, lisser les surfaces et appliquer une protection contre la corrosion, tel que le revêtement galvanisé ou une peinture. [13]

II.9. Conclusion

Après avoir étudié les ressorts à lames, il est évident que ces systèmes jouent un rôle crucial dans le domaine de la mécanique automobile. Les ressorts à lames offrent des avantages significatifs en termes de capacité de charge, de stabilité, de durabilité et de coût, ce qui en fait une option attrayante pour diverses applications.

Nous avons pu observer que les ressorts à lames présentent une capacité de charge élevée, permettant de supporter des charges lourdes tout en maintenant une bonne stabilité du véhicule. En effet, ils se sont révélés être des composants durables et résistants, capable de supporter les contraintes mécaniques et les conditions de fonctionnement les plus exigeantes. Leur conception relativement simple facilite encore leur fabrication et leur entretien, ce qui en fait des solutions économiques pour les fabricants et les utilisateurs.

En général, il faut accepter que le principal inconvénient réside dans leur rigidité relative, ce qui peut entraîner un confort de conduite moindre sur des surfaces irrégulières.

Mais ils demeurent une solution robuste et fiable pour les suspensions de véhicules, offrant une stabilité satisfaisante et une durabilité avérée. Cependant, il est recommandé d'abord d'envisager leur utilisation en fonction des besoins spécifiques du véhicule et des conditions de conduite, en tenant compte des compromis entre la capacité de charge, confort de conduite et l'adaptation aux surfaces routières.

Chapitre 03

Modélisation et simulation de ressorts à lames

III.1. Introduction

Dans cette partie, notre étude est consacrée sur l'aspect théorique et analytique des ressorts à lames, où nous allons étudier d'abord la partie théorique en calculant les différents paramètres basés sur la résistance des matériaux. Ensuite, nous allons faire des simulations analytiques sur le logiciel SolidWorks spécialisé dans le domaine de l'ingénierie mécanique, pour voir le comportement final des ressorts à lames sous les différents chargements et d'autres conditions, et discuter les résultats obtenus.

III.2. Calcul théorique des ressorts à lames

Nous trouvons deux types principaux de ressorts qui supportent la flexion :

- Les ressorts à lames simples.
- Les ressorts à lames multiples. [14]

III.2.1 Ressorts à lame simple :

La modélisation des ressorts à lames simples consiste à considérer une lame fixée à une extrémité et supportant la charge à l'autre extrémité. En utilisant les principes de la résistance des matériaux, il est possible de calculer la flexion de l'extrémité de la lame sous l'effet de la charge F. [14]

Selon la résistance des matériaux on peut calculer la flexion de l'extrémité sous la charge F. La flèche est :

$$f = \frac{F.L^3}{3.E.I} \quad (5)$$

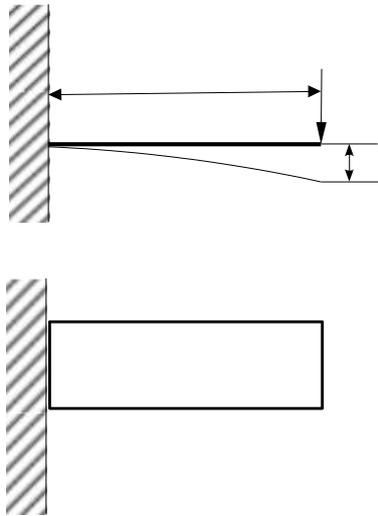


Figure III.1 : Ressorts à lame simple

Sachant que :

E : Module d'élasticité longitudinale en N/mm²

I : Moment d'inertie par rapport à l'axe de flexion en mm⁴

L : Longueur de lame

F : Charge appuyé sur l'extrémité de la lame

Avec la raideur de cette lame qui est : $K = \frac{3EI}{L^3}$, alors l'élasticité d'un ressort à lame simple de section constante est linéaire.

Dans le tableau suivant nous décrirons les cas de fixation de lame et leur résistance des matériaux :

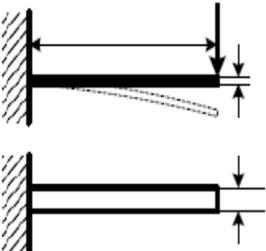
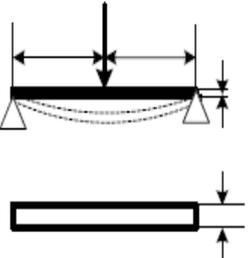
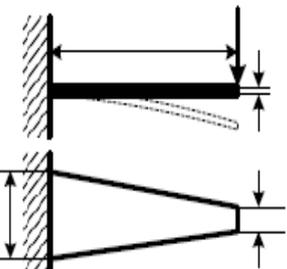
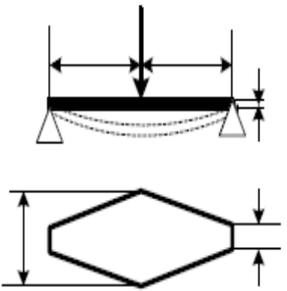
	Fleche f en mm	Raideur K en N/mm	Contrainte maximum σ_{max} en N/mm ²	Energie de déformation E_f en N.mm
Cas 1 Lame de ressort rectangulaire encastrée une extrémité et l'autre extrémité libre. 	$f = \frac{F \cdot L^3}{3 \cdot E \cdot I}$	$K = \frac{3 \cdot E \cdot I}{L^3}$	$\sigma_{max} = \frac{6 \cdot F \cdot L}{b \cdot h^2}$	$E_f = \frac{F^2 \cdot L^3}{6 \cdot E \cdot I}$
Cas 2 Lame rectangulaire de ressort en appui sur ses deux extrémités 	$f = \frac{F \cdot L^3}{3 \cdot E \cdot I}$	$K = \frac{6 \cdot E \cdot I}{L^3}$	$\sigma_{max} = \frac{6 \cdot F \cdot L}{b \cdot h^2}$	$E_f = \frac{F^2 \cdot L^3}{3 \cdot E \cdot I}$
Cas 3 Lame de ressort trapézoïdale encastrée à une extrémité et libre à l'autre extrémité. 	$f = \frac{k_1 \cdot F \cdot L^3}{3 \cdot E \cdot I_1}$	$K = \frac{3 \cdot E \cdot I_1}{k_1 L^3}$	$\sigma_{max} = \frac{6 \cdot F \cdot L}{b \cdot h^2}$	$E_f = \frac{k_1 F^2 \cdot L^3}{6 \cdot E \cdot I_1}$
<p>b largeur d'une section dangée E module d'élasticité longitudinale en N/mm² I_1 moment d'inertie par rapport l'axe de flexion en mm⁴ k_1 coefficient de forme de ressort</p> <p>$I_1 = \frac{b_2 h^3}{12}$; $k_1 = \frac{3}{(1-\eta)^3} \left[\frac{1}{2} - 2\eta + \eta^2 \left(\frac{3}{2} - \eta \right) \right]$; $\eta = \frac{b_1}{b_2}$</p>				
Cas 4 Lame de ressort trapézoïdale en appui sur ses deux extrémités 	$f = \frac{k_1 \cdot F \cdot L^3}{3 \cdot E \cdot I}$	$K = \frac{6 \cdot E \cdot I_1}{k_1 L^3}$	$\sigma_{max} = \frac{6 \cdot F \cdot L}{b \cdot h^2}$	$E_f = \frac{k_1 \cdot F^2 \cdot L^3}{3 \cdot E \cdot I}$
<p>b largeur d'une section dangée E module d'élasticité longitudinale en N/mm² I_1 moment d'inertie par rapport l'axe de flexion en mm⁴ k_1 coefficient de forme de ressort</p> <p>$I_1 = \frac{b_2 h^3}{12}$; $k_1 = \frac{3}{(1-\eta)^3} \left[\frac{1}{2} - 2\eta + \eta^2 \left(\frac{3}{2} - \eta \right) \right]$; $\eta = \frac{b_1}{b_2}$</p>				

Tableau III.1 : Résistance des matériaux de ressorts à lame simple

III.2.2 Ressorts à lames multiples

Les normes NF R 17-201/202 définissent les ressorts à lames multiples. Ces ressorts sont constitués de plusieurs lames superposées. Lorsqu'une charge est appliquée sur le ressort, les lames glissent les unes sur les autres, ce qui entraîne un frottement. Ce glissement combiné au frottement permet d'absorber de l'énergie. Ainsi, ces ressorts jouent également le rôle d'amortisseurs et sont utilisés comme suspensions pour les véhicules. [14]

1. Méthode de « Poutre équivalente » pour calculer la résistance des matériaux :

On utilise la méthode de « Poutre équivalente » pour calculer la résistance des matériaux comme suit :

a. Les lames de ressorts ont la même largeur et même épaisseur :

Nous prenons en compte les caractéristiques dimensionnelles de chaque lame et supposons que les lames du ressort entrent en contact sur toute leur longueur.

Le ressort peut être fixé soit par des vis, soit par des anneaux. Nous modélisons la poutre équivalente en utilisant deux demi-largeurs de lames, disposées symétriquement par rapport à la jonction entre les demi-lames qui forme la première lame. En général, toutes les lames du ressort ont la même largeur b et la même épaisseur e . La largeur de la poutre équivalente est obtenue en additionnant les largeurs de toutes les lames du ressort. Son épaisseur e est identique à l'épaisseur d'une lame. [14]

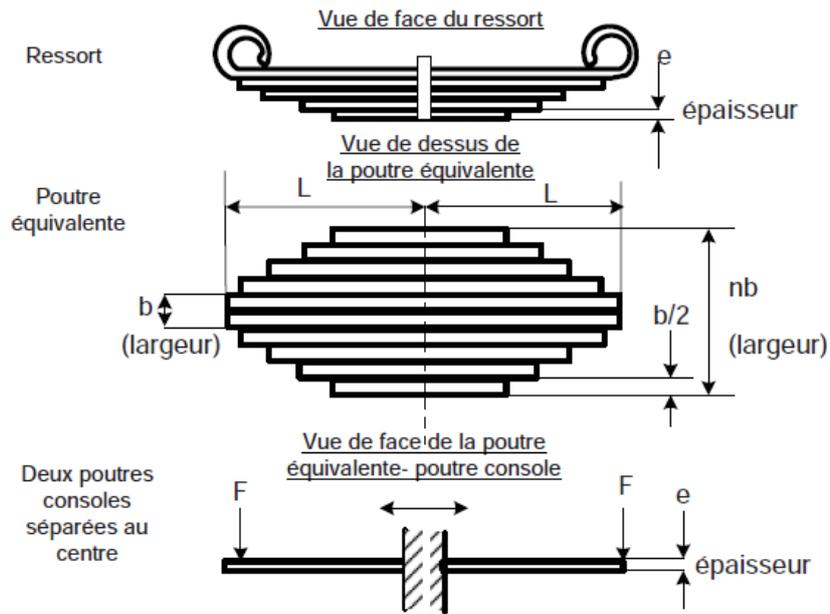


Figure III.2 : Ressorts à lames multiples avec une fixation au centre

- **Flèche du ressort :**

$$f = \frac{F.L^3.k_1}{3E.I} \quad (6)$$

- **Raideur du ressort :**

$$K = \frac{2F}{f} = \frac{6.E.I}{k_1.L^3} \quad (7)$$

- **Contrainte maximale :**

$$\sigma_{max} = \frac{6.F.L}{n.b.e^2} = \frac{3E.e.f}{2.k_1.L^2} \quad (8)$$

Avec :

n : Nombre de lames

E : Module d'élasticité longitudinale en MPa (N/mm²)

I : Moment d'inertie d'une lame $I = \frac{b.e^3}{12}$ en mm⁴

k₁ : Coefficient de forme

$$k_1 = \frac{1}{n} + \sum_{l=1}^{n-1} \frac{(1-\lambda_l)^3}{(n-l)(n-l+1)} \quad (9)$$

λ_i : Rapport de la longueur i ère lame $\lambda_i = \frac{L_i}{L}$

$2L$: Longueur de la lame la plus longue (première lame en mm)

L_i : Longueur de la i ème lame en mm

b : Largeur d'une lame en mm

e : Epaisseur d'une lame (hauteur d'une lame) en mm

b. Les lames de ressort ont la même largeur, mais chaque lame à une épaisseur différente (hauteur) :

- Flèche du ressort :

$$f = \frac{F.L^3.k_1}{3.E.I_1} \quad (10)$$

- Raideur du ressort :

$$K = \frac{2F}{f} = \frac{6.E.I_1}{k^1.L_1^3} \quad (11)$$

- Contrainte du i ème lame :

$$\sigma_i = \frac{M_i \cdot e_i}{2 \cdot I_i} = \frac{M \cdot e_i}{2 \cdot \sum_{i=1}^n I_i} = \frac{6F \cdot I_1 \cdot e_i}{b \cdot \sum_{i=1}^n e_i^3} \quad (12)$$

Avec :

M_i : Moment de flexion de i ème lame en N.mm

M : Moment de flexion au milieu du ressort en N.mm

$$M_i = \frac{MI_1}{\sum_{l=1}^n I_l} \quad (13)$$

n : Nombre de lames

E : Module d'élasticité longitudinale en MPa (N/mm²)

I_i : Moment d'inertie du i ème lame

$$I_i = \frac{b \cdot e_i^3}{12} \text{ en mm}^4 \quad (14)$$

k₁ : Coefficient de forme

$$k_1 = \frac{1}{n} + \sum_{i=1}^{n-1} \frac{(1-\lambda_i)^3}{(n-i)(n-i+1)} \quad (15)$$

L_i : Rapport de la longueur du i ème lame $\lambda_i = \frac{L_i}{L}$

2L : Longueur de la lame la plus longue (première lame) en mm

L_i : Longueur de la i ème lame en mm

b : Largeur d'une lame en mm

e : Epaisseur d'une lame (hauteur d'une lame) en mm

III.3. Modélisation et simulation de lames de ressorts

1- Acier allié : est l'alliage de fer généralement le plus utile dans le secteur industriel, connu par sa composition de fer + 0.15% à 2% de carbone, il est parmi les matériaux utilisés pour la fabrication des ressorts à lames.

- **Type de modèle** : linéaire élastique isotropique

Paramètres	Valeurs
Module de young (Pa)	210000
Coefficient de Poisson	0.28
Résistance à la traction (Pa)	723.83
Limite d'élasticité (Pa)	620.42
Module de cisaillement (Pa)	79000
Masse volumique (kg/m ³)	7700

Tableau III.2 : Propriétés mécaniques de l'acier allié

- **Données de base du véhicule :**

- Poids de véhicule en charge : 2850 KG = 28500 N
- La charge agissant sur chaque lame de ressort :

$$2w = 28500/4 = 7125 \text{ N}$$

- Calcule les dimensions de lame de ressort :

On a :

- La longueur du ressort à lame (d'un œil à l'autre) $L = 1250 \text{ mm}$
- La longueur ineffective du ressort à lame $L_{\text{eff}} = 110 \text{ mm}$
- Nombre des lames : $n = 6$ lames ; 2 lames de pleine longueur et 4 lames graduées
- L'épaisseur de la lame est $e = 7 \text{ mm}$
- La largeur des lames est $b = 60 \text{ mm}$

On détermine la longueur des lames graduée :

Longueur de lame (i) = ((longueur effective * i) / (nombre de lame - 1)) + la longueur ineffective

AN :

$$L1 = ((1250 * 1) / (6 - 1)) + 110 = 360 \text{ mm}$$

$$L2 = ((1250 * 2) / (6 - 1)) + 110 = 610 \text{ mm}$$

$$L3 = ((1250 * 3) / (6 - 1)) + 110 = 860 \text{ mm}$$

$$L4 = ((1250 * 4) / (6 - 1)) + 110 = 1110 \text{ mm}$$

$$L5 = 1250 \text{ mm}$$

$$L6 = 1250 \text{ mm}$$

On détermine le poids de chaque lame :

- Poids de la lame = densité * volume * la gravité

AN :

$$L1 = 0.00000786 * 360 * 60 * 7 * 10 = 11.9 \text{ N}$$

$$L2 = 0.00000786 * 610 * 60 * 7 * 10 = 20.1 \text{ N}$$

$$L3 = 0.00000786 * 860 * 60 * 7 * 10 = 28.4 \text{ N}$$

$$L4 = 0.00000786 * 1110 * 60 * 7 * 10 = 36.6 \text{ N}$$

$$L5 = 0.00000786 * 1250 * 60 * 7 * 10 = 41.3 \text{ N}$$

$$L6 = 0.00000786 * 1250 * 60 * 7 * 10 = 41.3 \text{ N}$$

- Poids total des ressort a lames = L1+L2+L3+L4+L5+L6

$$\text{AN: } 11.9+20.1+28.4+36.6+41.3+41.3=179.6 \text{ N} = 17.96 \text{ KG}$$



Figure III.3 : Ressort à lames multiples

- Calcule de la contrainte de flexion :

$$\sigma_{\max} = 6W (L/2) / nbe^2$$

AN:

$$\sigma_{\max} = 6*3562.5*625/6*60*7^2$$

$$\sigma_{\max} = 757.334 \text{ N/mm}^2$$

- Calcule de la flexion :

$$y_{\max} = WL^3 / nEI = 12W (L/2)^3 / nEbe^3$$

AN :

$$y_{\max} = 12*3562.5*625^3 / (2*3+4*2) * 200000*7^3$$

$$y_{\max} = 181.12 \text{ mm}$$

D'après l'analyse théorique, nous avons obtenu une contrainte maximale de 757,334 MPA, qui est inférieure à la contrainte admissible (1800 MPA), donc notre conception est sécurisée et fiable.

III.3.1 Analyse de lames de ressorts en acier allié

Dans le cadre de cette recherche, on a choisi d'utiliser le logiciel SolidWorks pour réaliser les simulations qui vont viser à analyser les lames de ressorts. SolidWorks est un puissant logiciel d'ingénierie et de simulation largement reconnu et utilisé dans le domaine de la mécanique et de la conception. L'objectif principal de notre étude est d'analyser les propriétés mécaniques des ressorts à lames, tels que leur résistance, leur déformation et leur durabilité. Grâce à cette approche de simulation, on pourra obtenir des informations essentielles sur le comportement des ressorts à lames dans différentes conditions de chargement. Ces résultats permettront de mieux comprendre les facteurs qui influent sur la performance des ressorts à lames et d'optimiser leur conception et leur fonctionnement.

- Le matériau : acier allié linéaire élastique isotropique

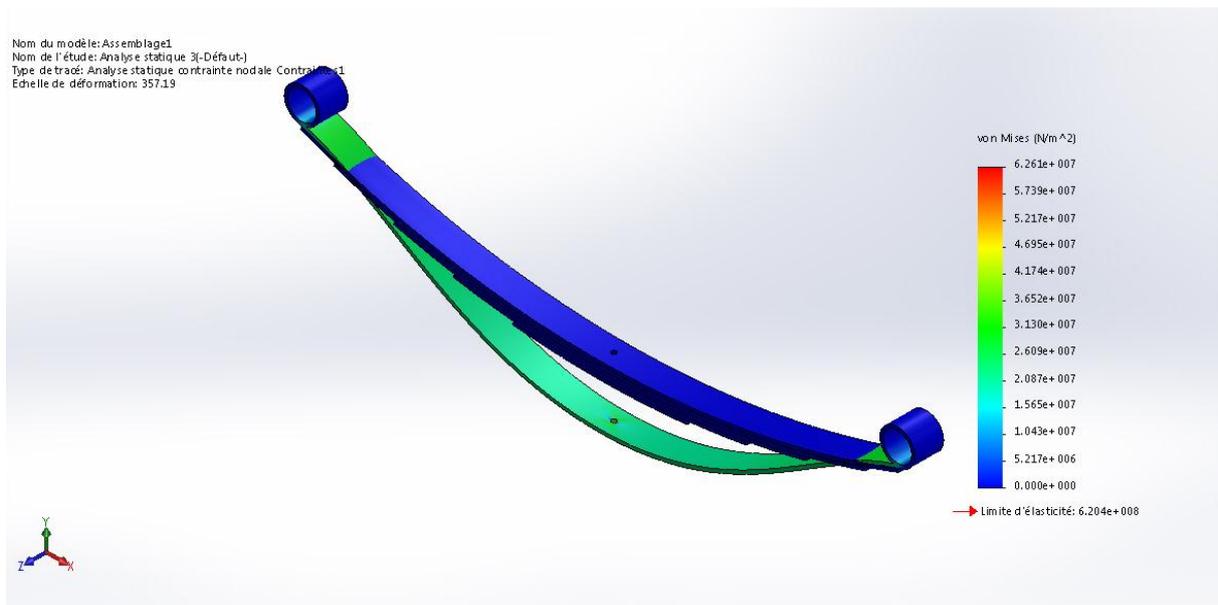


Figure III.4 : La contrainte équivalente dans un ressort à lames en acier soumis à une charge de 7125 N

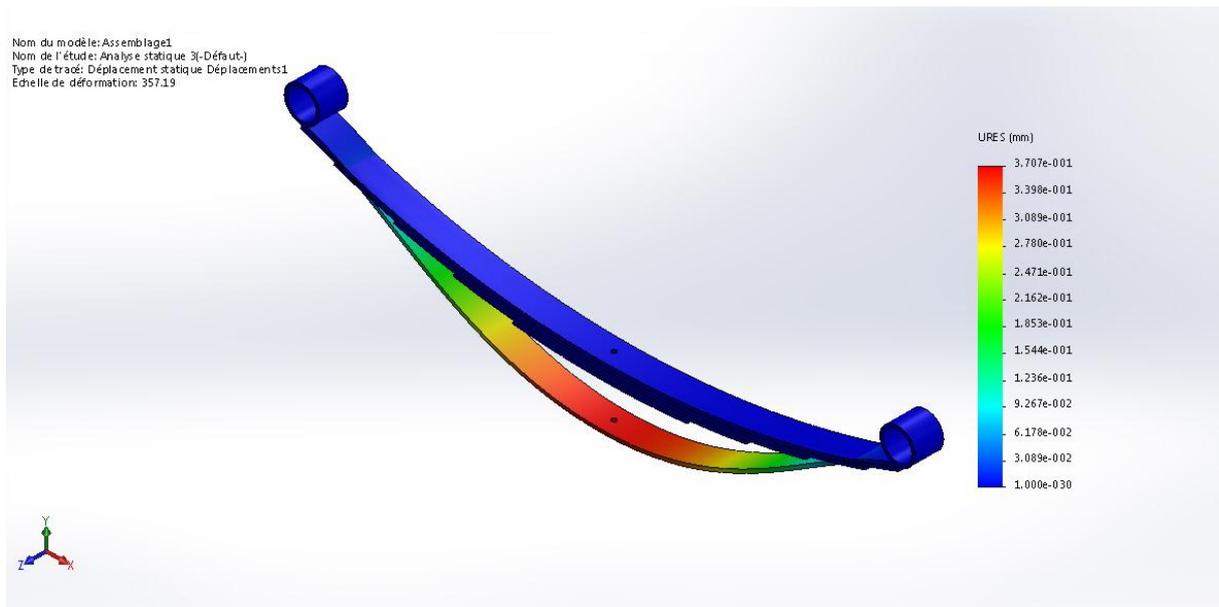


Figure III.5 : Le déplacement résultant du ressort à lames en acier sous une charge de 7125 N

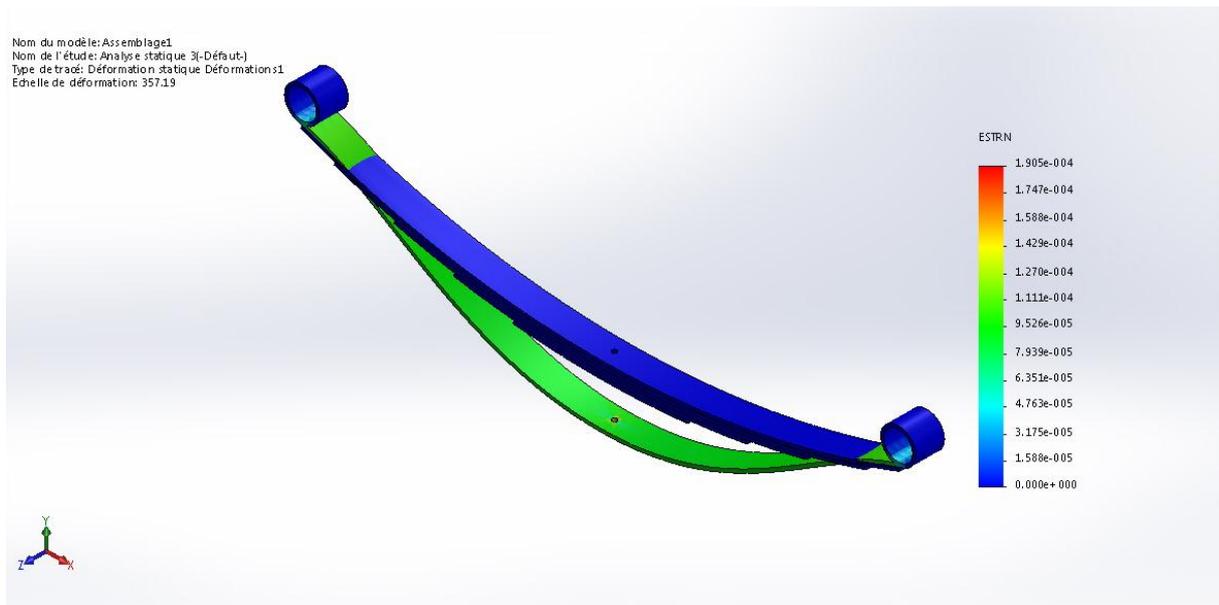


Figure III.6 : La déformation équivalente

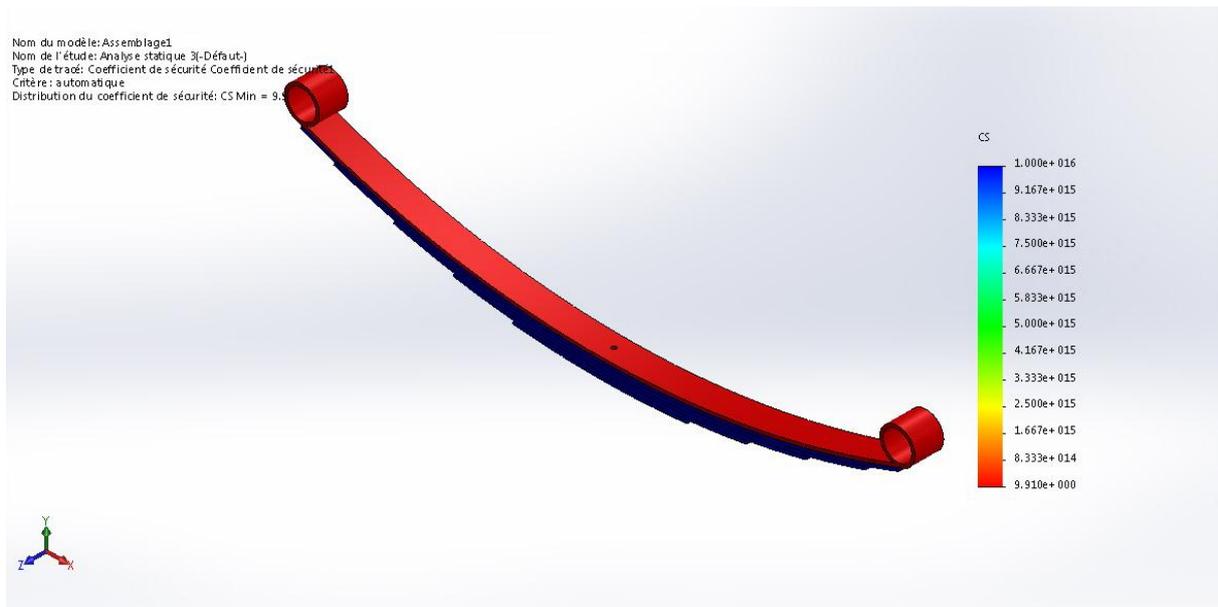


Figure III.7 : L'analyse statique basée sur le coefficient de sécurité du logiciel

Voici un tableau de résultats pour l'analyse statique basé sur SolidWorks pour les ressorts à lames en acier allié :

Paramètres	Résultats de l'analyse statique
Contrainte maximale (Pa)	$6261 \cdot 10^4$
Déplacement maximal (mm)	$3.707 \cdot 10^{-1}$
Déformation équivalente	$1.905 \cdot 10^{-4}$

Tableau III.3 : résultats statiques basés sur SolidWorks pour les ressorts à lames en acier allié

2- 1023 Tôle d'acier au carbone (SS) : un matériau dont le chiffre 1023 indique que c'est un acier au carbone non allié, et le "SS" signifie " steel sheet" en anglais. Cela veut dire qu'il s'agit d'un acier au carbone non allié souvent utilisée dans la construction et l'industrie automobile.

III.3.2 Analyse de lames de ressorts sur 1023 tôle d'acier au carbone (SS)

- **Type du modèle** : linéaire élastique isotropique

Paramètres	Valeurs
Module de Young (Pa)	$205 \cdot 10^9$
Coefficient de Poisson	0.29
Résistance à la traction (Pa)	$425 \cdot 10^6$
Limite d'élasticité (Pa)	$282.68 \cdot 10^6$
Module de cisaillement (Pa)	$8 \cdot 10^{10}$
Masse volumique (kg/m^3)	7858

Tableau III.4 : propriétés mécaniques de 1023 tôle d'acier au carbone (SS)

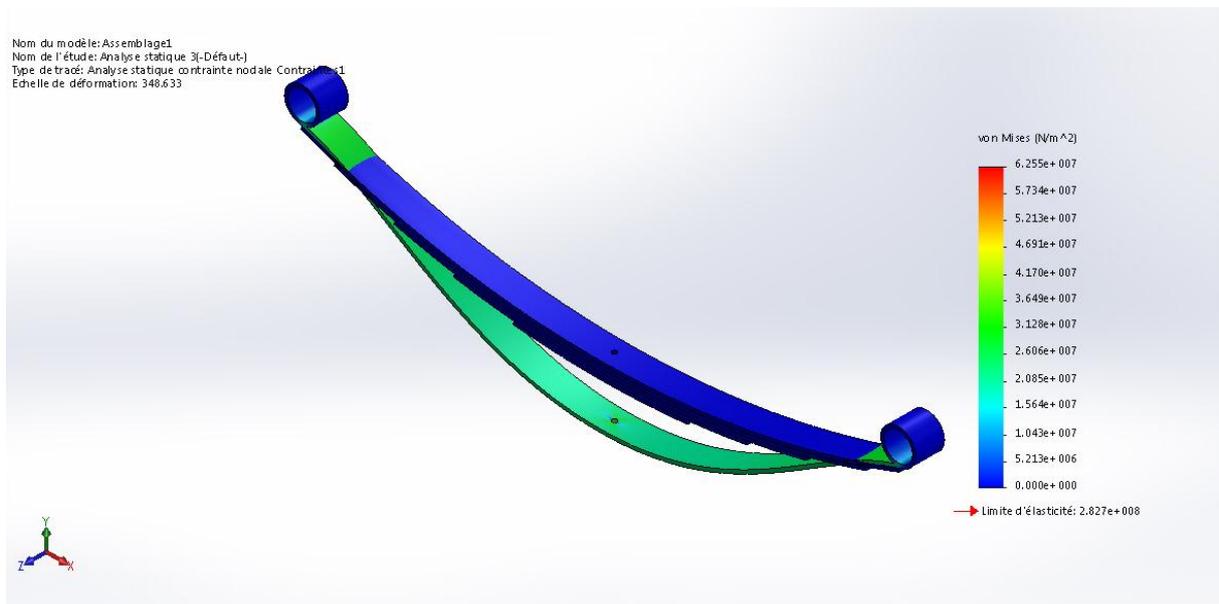


Figure III.8 : La contrainte équivalente dans un ressort à lames en 1023 tôle d'acier au carbone (SS) soumis à une charge de 7125 N

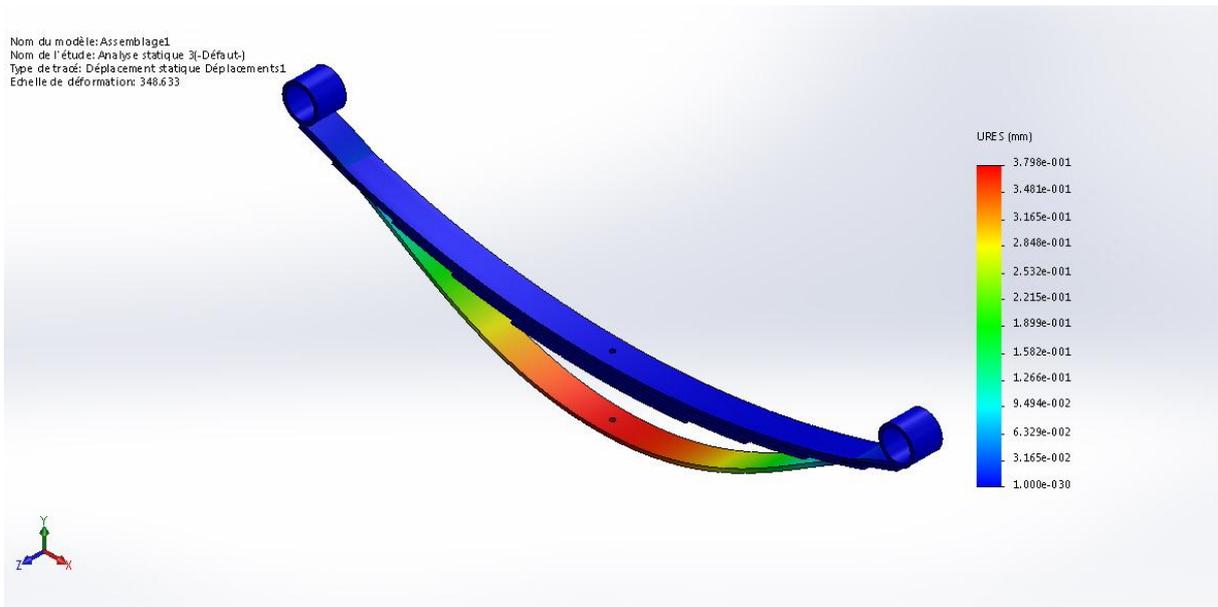


Figure III.9 : Le déplacement résultant du ressort à lames en 1023 tôle d'acier au carbone (SS) sous une charge de 7125 N

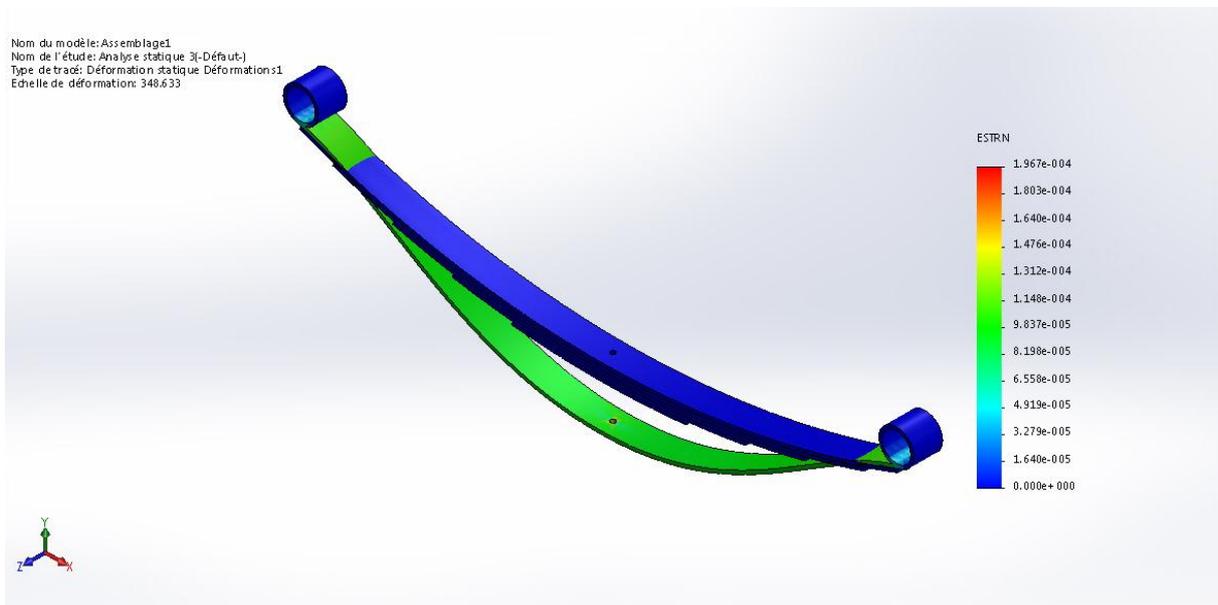


Figure III.10 : La déformation équivalente pour l'acier au carbone (SS)

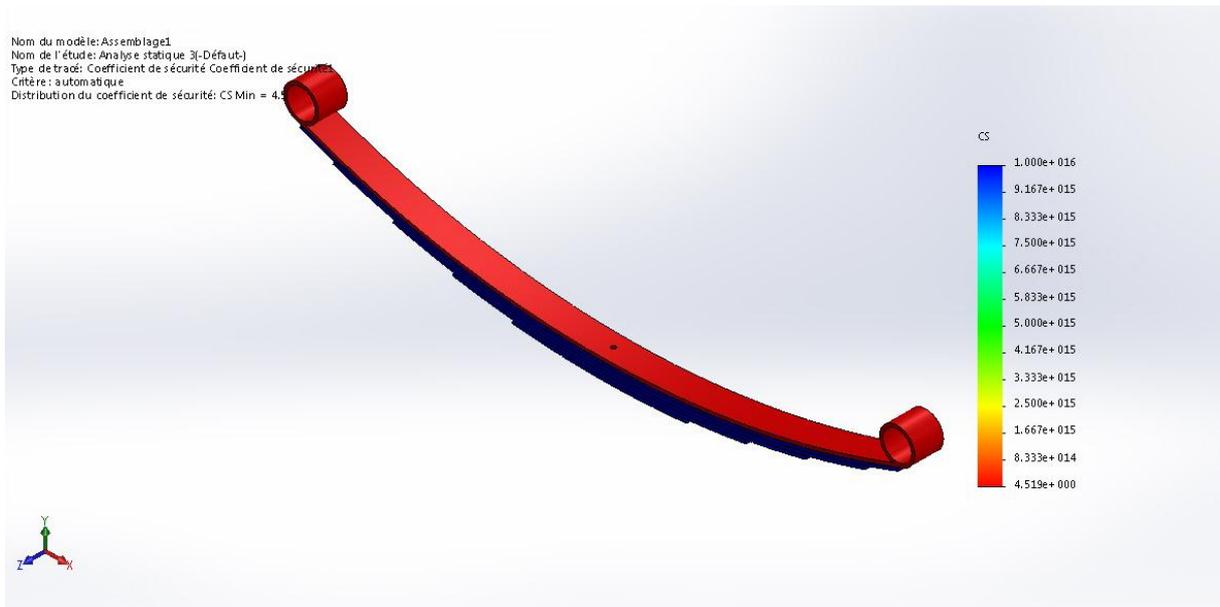


Figure III.11 : L'analyse statique basée sur le coefficient de sécurité du logiciel pour l'acier au carbone (SS)

Voici le tableau de résultats pour l'analyse statique du logiciel sur les ressorts à lames en tôle d'acier au carbone (SS) :

Paramètres	Résultats de l'analyse statique
Contrainte maximale (Pa)	$6255 \cdot 10^4$
Déplacement maximal (mm)	$3.798 \cdot 10^{-1}$
Déformation équivalente	$1.967 \cdot 10^{-4}$

Tableau III.5 : résultats d'analyse statique sur la tôle d'acier au carbone (SS)

Le tableau ci-dessous représente la comparaison des résultats statiques de l'acier allié et 1023 tôle d'acier au carbone (SS) :

Matériaux	Contrainte maximale (Pa)	Déplacement maximal (mm)	Déformation équivalente
Acier allié	$6261 \cdot 10^4$	$3.707 \cdot 10^{-1}$	$1.905 \cdot 10^{-4}$
1023 tôle d'acier au carbone (SS)	$6255 \cdot 10^4$	$3.798 \cdot 10^{-1}$	$1.967 \cdot 10^{-4}$

Tableau III.6 : comparaison des résultats entre les deux matériaux

III.3.3 Discussion des résultats

Cette recherche a été faite dans le contexte de découvrir la résistance et la fiabilité des ressorts à lames en utilisant l'acier allié, le 1023 tôle d'acier au carbone (SS).

D'abord, en faisant l'analyse sur l'acier allié on voit que ce dernier résiste bien à une charge de 7125 N avec une contrainte de 62.61 Mpa. En revanche, il est faiblement sensible à la déformation avec une valeur de 0.3707 mm pour un poids total de 18.331 kg.

En utilisant le 1023 tôle d'acier au carbone (SS) pour la même étude, on remarque que ce dernier répond juste un peu moins que l'acier allié en ce qui concerne la résistance à la charge, mais un peu plus pour la déformation, pour le poids total qui est 3.74 kg.

Finalement, après avoir réalisé cette étude nous avons arrivé à découvrir les caractéristiques de ces deux matériaux grâce à l'étude simulatoire du logiciel SolidWorks, bien que nous avons observé que l'acier allié a fait ses preuves en ce qui concerne la résistance aux contraintes et sa déformation qui est relativement acceptable par rapport à la tôle d'acier au carbone (SS), alors que ce dernier est un peu moins résistant que l'acier allié, ce qui nous mène à valider ce dernier comme choix préférable pour la construction et la fabrication des ressorts à lames, tandis que la tôle d'acier au carbone est plus probablement recommandé pour les parties légères et fines dans l'industrie automobile.

III.4. Conclusion

Après avoir réalisé cette étude analytique sur les ressorts à lames en tenant compte leur matériau, il s'avère que nous avons des progrès significatifs en ce qui concerne la réduction du poids et de l'amélioration de la capacité de charge lorsqu'on applique un acier allié.

D'après les résultats de l'analyse, nous constatons que les aciers alliés donnent de meilleurs résultats par rapport aux ressorts à lames en acier conventionnels, au moment

où si nous utilisons les ressorts à lames en acier allié, la déflexion sera assez élevée par rapport aux ressorts à lames en tôle d'acier au carbone. Donc il est plus recommandable d'utiliser cet acier allié pour faire diminuer les contraintes, les déflexions et la déformation des ressorts à lames, ce qui est un bon choix sur le plan économique et la diminution du poids.

Par conséquent, nous pouvons conclure que les matériaux composites sont de meilleurs remplacements pour les ressorts à lames en aciers. Et puis nous avons une toute nouvelle combinaison de ressorts à lames en acier et en composite (ressorts à lames hybrides), qui est utilisée et soumise à la même charge statique. En sachant que les matériaux composites sont coûteux par rapport à l'acier, en tous les cas ça reste possible de suggérer l'utilisation de ressorts à lames hybrides.

Conclusion générale

L'étude globale de ce thème, nous a fait explorer les généralités et les différentes composantes des systèmes de suspension de véhicule, en mettant l'accent sur la suspension à lames de ressorts. Nous avons examiné en détail le fonctionnement, les parties principales, les types, les propriétés, la conception CAO et la fabrication des ressorts à lames.

Dans le cadre de la modélisation et de la simulation des ressorts à lames, nous avons réalisé des calculs théoriques pour évaluer les performances de deux types de ressorts à lames soumis à une charge fixe. Nous avons ensuite procédé à des simulations en utilisant deux matériaux différents : l'acier allié, les 1023 tôles d'acier au carbone (SS). Ces simulations ont été effectuées à l'aide du logiciel de l'ingénierie mécanique "SolidWorks".

Les résultats obtenus ont révélé que l'acier allié, était un choix vivement abordable pour la conception et la fabrication des ressorts à lames. Ce matériau a démontré des performances supérieures en termes de robustesse, de résistance et de durabilité, ce qui en fait une option prometteuse sur le plan économique, industriel et maintenance pour la suspension de véhicule.

En conclusion, cette étude a permis d'approfondir nos connaissances sur les systèmes de suspension de véhicule, en mettant en évidence les avantages de la suspension à lames de ressorts par l'acier allié et en proposant une approche innovante basée sur l'utilisation d'un matériau composite. Les résultats obtenus ouvrent la voie à de nouvelles perspectives dans le domaine de la conception et de la fabrication des systèmes de suspension, en offrant des solutions plus efficaces, plus légères et plus durables.

Références bibliographiques

Références bibliographiques

- [1] – “How car suspension system work “de how stuff works: auto.howstuffworks.com/car-suspension.
- [2] – “carparts.com/blog/suspension-system-components/ “, “driving-tests.org/beginner-drivers/car-suspension/ “et “monroe.com/en-us/education-center/ride-control-academy/suspension-system-components/ “.
- [3] – “popularmechanics.com/cars/how-to/a3108/independent-suspension-types/ “, “carbibles.com/independent-suspension-types/ “et “ntn-snr.com/doc_raplaqsuspension_fc_fb_web.pdf “.
- [4] – Les types de suspension de “<https://www.avatacar.com/blog/mecanique-auto/types-suspension-automobile/> “, “autobytel.com/car-ownership/maintenance-repair/understanding-the-different-types-of-suspensions/ “et “auto.howstuffworks.com/car-driving-safety/safety-regulatory-devices/types-of-car-suspension.htm “.
- [5] – Colin CAMPBELL. La suspension automobile du livre “AUTOMOBILE SUSPENSIONS “, Springer New York, NY, 978-1-4613-3391-3Published: 02 October 2011, 214 pages “carbibles.com/hydropneumatic-suspension/ “, suspensionsecrets.co.uk/hydropneumatic-suspension/ “et “carsguide.com.au/car-advice/how-does-hydropneumatic-suspension-work-76502“.
- [6] – Colin CAMPBELL. Livre de suspension “AUTOMOBILE SUSPENSIONS “, Springer New York, NY, 978-1-4613-3391-3Published: 02 October 2011, 214 pages “airbagit.com/air-suspension-FAQ-s/213.htm “, “arnottindustries.com/blog/air-suspension-systems-basic-understanding-air-suspension-systems/ “, “caradisiac.com/suspension-pneumatique-fonctionnement-et-entretien-2860.htm “.
- [7] – Don KNOWLES. Introduction, définition générale. Technique d’ingenierie automobile intitule “Automotive Suspension and Steering System“ 978-0827361850, Delmar Publishers, First Edition (January 1, 1995), 443 pages.
- [8] – Michel DUCHEMIN Présentation du ressort à lame. Ressorts subissant des contraintes de flexion / Technique de l’ingénieur / l’article B5430 Ressorts – Généralités rédigé en 1984 vol. B5432.

- [9] – TAIBI Kahina, HAMROUNI Farroudja Les parties essentielles d'un ressort à lame, caractérisation et comportement des ressorts à lames. Mémoire d'ingénieur UMMTO 2012.
- [10] – HAMROUNI Farroudja, Différents types de ressorts à lames.
- [11] – HAMROUNI Farroudja, Les différentes charges des ressorts à lames.
- [12] – M. DJOUABI, Sedik KHODJA, mémoire d'ingénieur UAMB 2001- contribution à l'étude des ressorts à lames. Propriétés des ressorts à lames.
- [13] – MESBAHI Mohamed, Gamme de fabrication. "Optimisation des ressorts à lames d'un camion k66" UMMTO 2011.
- [14] – Youde XIONG (EYROLLES), Formulaire de mécanique – pièce de constructions, 18/05/2006, 378 pages.