

CHAPITRE 2

PRESENTATION DU SYSTEME ETUDIE : LE BOGIE DE TRAIN

La technique d'analyse statique exposée au chapitre 1 a été appliquée à un bogie moteur complet. Ce mécanisme est complexe par le nombre de ses composants et par son architecture. Dans ce chapitre, la première partie décrit tout d'abord le mécanisme du point de vue purement fonctionnel. Ensuite, l'hyperstaticité du mécanisme est analysée : chaque composant est inclus dans une ou plusieurs boucles de charge dont certaines sont pré-chargées. Il s'agit de comprendre en quoi le mécanisme, de par son architecture, répond à la problématique posée au chapitre 1.

La deuxième partie du chapitre présente les modèles des éléments de structure au comportement linéaire. Les types d'éléments finis et les techniques de maillages y sont exposés.

Enfin, la troisième partie traite des modèles des éléments spécifiques du bogie : il s'agit des ressorts, éléments de structure souples pré-chargés dont le traitement se fait d'après la technique définie au chapitre 1 et des éléments de liaison (roulements, engrenages et zones de contact). La connexion de ceux-ci aux éléments de structure est exposée.

1. CONSTITUTION DU MECANISME ET PROBLEMATIQUE

1.1 Objectif de l'étude

Le modèle et les logiciels développés permettent d'obtenir comme résultat, les grandeurs suivantes dans divers cas de sollicitation :

- les champs de déplacements et de contraintes dans les éléments de structures,
- les efforts transmis par les composants de liaison du mécanisme : zones de contact avec jeux, liaisons pivots par paliers à roulements,
- la répartition locale du chargement au sein des paliers à roulements,
- l'état des zones de contact (ouvertes ou fermées) et les valeurs des jeux sous charge,
- les désalignements au niveau des engrenages.

L'objectif est d'utiliser ces résultats pour apporter une interprétation sur les interactions entre les différents éléments du mécanisme. Il s'agit de comprendre l'influence de chaque paramètre, aussi bien de manière qualitative que quantitative.

Plus précisément, les points suivants sont étudiés :

- le comportement des ressorts et les mécanismes à l'origine de l'effort de chasse,
- l'influence de l'effort de chasse sur le bogie,
- l'influence des pré-charges et jeux dans les roulements coniques, à un niveau local, sur les liaisons pivots qu'ils constituent et, à un niveau global, sur le mécanisme entier,
- l'interaction locale entre les déformations des carters et le chargement local des corps roulants dans les roulements de réducteurs et de boîtes d'essieux.

1.2 Décomposition fonctionnelle du mécanisme

Le mécanisme étudié comprend tous les composants d'un bogie de train qui contribuent à la transmission du couple des moteurs jusqu'aux roues et à la transmission des efforts exercés par la caisse jusqu'aux roues. D'un point de vue fonctionnel, les organes qui constituent le mécanisme sont les suivants (cf. figure 2.1) :

- le châssis,
- les 2 ensembles « essieu + roues »,
- les 4 ensembles « ressorts + boîtes d'essieux + roulements coniques + articulation élastique »,
- les 2 ensembles « réducteur + bielle »,
- les 2 moteurs.

Le réducteur est constitué des éléments suivants :

- un carter,
- trois engrenages cylindriques hélicoïdaux montés sur des arbres (l'essieu, l'arbre intermédiaire et l'arbre moteur),
- deux paires de roulements coniques et une paire de roulements cylindriques.

La bielle est reliée au châssis par une rotule lisse étanche (liaison rotule avec des souplesses en translation) et au carter par une rotule élastique (liaison d'encastrement élastique avec des souplesses en translation et rotation).

Le moteur est lié au réducteur par un accouplement flexible qui est supposé ne transmettre que le couple de torsion.

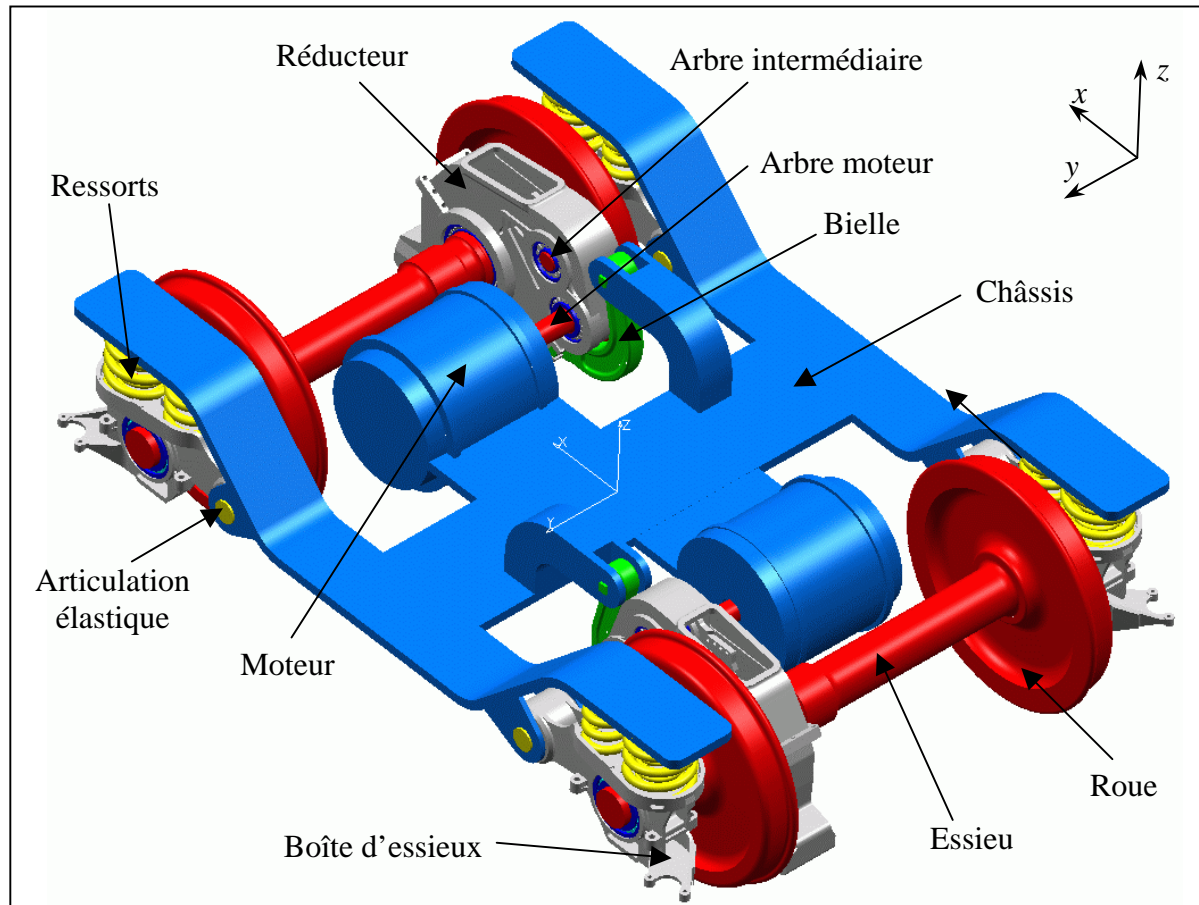


Figure 2.1 : Mécanisme étudié

Du point de vue théorique, les composants du bogie se répartissent en trois catégories : les éléments de structure à comportement linéaire, les éléments de structures à comportement géométriquement non linéaire pré-chargés et les éléments de liaison. Les composants sont décrits dans les parties 2 et 3.

1.3 Mise en évidence des boucles de charges

1.3.1 Analyse cinématique des liaisons

Du point de vue du comportement, nous distinguons trois sous-systèmes dans le mécanisme : les deux réducteurs et le reste du bogie.

Les deux réducteurs sont composés d'éléments de rigidité importante, à architecture globalement isostatique, bien que localement hyperstatique au niveau des montages de paliers à roulements.

Le reste du mécanisme est constitué d'éléments souples (articulations élastiques, ressorts) dont l'architecture, globalement hyperstatique, contribue à augmenter la rigidité de l'ensemble sans pour autant entraîner d'effort supplémentaire important par rapport aux efforts de fonctionnement.

Chaque réducteur est monté en liaison pivot sur un des essieux et le degré de liberté en rotation restant est supprimé par la bielle. Le montage du réducteur serait isostatique si la bielle était fixée par deux liaisons rotules. La liaison avec le réducteur étant faite par une articulation élastique, le montage est légèrement hyperstatique.

A l'intérieur de chaque sous-système les efforts transmis sont fortement couplés aux déformations à cause des montages hyperstatiques. Par contre les déformations au sein d'un réducteur n'influent pratiquement pas sur le reste du bogie, et réciproquement.

Les montages hyperstatiques se caractérisent par des éléments montés en boucle. On peut distinguer deux niveaux de boucles hyperstatiques : les boucles locales pré-chargées, et les boucles globales.

1.3.2 Les boucles locales pré-chargées

Les paires de roulements coniques suivantes, dont la fonction est d'assurer des liaisons pivots, forment des boucles hyperstatiques :

- liaison « essieu / boîte d'essieux » : montage en « O »,
- liaison « essieu / carter de réducteur » : montage en « X »,
- liaison « arbre moteur / carter de réducteur » : montage en « O ».

Ces sous-systèmes peuvent être montés avec des pré-charges axiales ou des jeux par une modification légère de la position des bagues intérieures sur les arbres par rapport à leur position nominale.

Par contre, la liaison pivot « carter de réducteur / arbre intermédiaire » est assurée par deux roulements à rouleaux cylindriques dont l'un possède deux épaulements et l'autre quatre. Cette liaison est isostatique dans le sens axial et ne peut donc pas être pré-chargée.

La liaison « boîte d'essieux / châssis » est assurée par une articulation élastique et trois ressorts qui transmettent les efforts en parallèle. L'articulation élastique est une liaison pivot qui est serrée au montage du bogie dans une position axiale donnée pour supprimer le degré de liberté en rotation. Dans la position axiale de serrage (celle pour laquelle le couple transmis est nul) les surfaces d'appui des ressorts (parties planes des boîtes et des longerons) sont parallèles et les ressorts sont pré-chargés : les longueurs imposées sont inférieures aux longueurs à vide respectives. Dans le modèle numérique, les ressorts sont maillés par éléments finis en position déformée et des efforts ponctuels de pré-charge sont appliqués sur les nœuds du maillage en utilisant la théorie développée au paragraphe 3.3 du chapitre 1 pour les éléments de structures géométriquement non linéaires et pré-chargés.

Plusieurs boucles locales existent entre l'articulation élastique et les ressorts, et une partie de la pré-charge des ressorts est reprise par ces boucles. Une autre partie est reprise à un niveau plus global (cf. paragraphe suivant).

Lorsqu'une pré-charge est introduite dans une boucle locale (entre deux roulements coniques par exemple), elle modifie notablement le chargement à l'intérieur de la boucle. Par contre, les conséquences sur les éléments extérieurs à la boucle pré-chargée sont à priori faibles.

Un autre niveau, encore plus local, existe : à l'intérieur des paliers à roulements, les efforts sont transmis entre les deux bagues par une multitude de corps roulants qui travaillent en parallèle. Pour cette raison, lorsque les roulements sont montés dans des carters déformables (comme les carters des réducteurs), les déformations des carters interagissent avec les chargements individuels des corps roulants.

1.3.3 Les boucles globales

Les efforts entre un essieu et le châssis sont transmis simultanément par les ensembles :

- « boîtes d'essieux + roulements coniques + ressorts + articulations élastiques »,
- « réducteurs + moteurs »,
- « réducteurs + bielles ».

Le premier ensemble est pré-chargé par les ressorts. Le deuxième par les moteurs : chaque moteur applique un couple de son stator sur son arbre de sortie. Ce couple est un effort interne, décomposable en deux couples extérieurs opposés, l'un appliqué sur le rotor et l'autre sur le stator du moteur.

Tous les éléments du mécanisme sont inclus dans une ou plusieurs boucles globales.

1.4 Sollicitations étudiées

1.4.1 Paramètres de fonctionnement étudiés

Les sollicitations qui ont été étudiées sont les suivantes :

- une force verticale dirigée vers le bas et appliquée au milieu du châssis. Il s'agit du poids de la caisse du train,
- une force latérale, correspondant à l'inertie de la caisse dans une courbe,
- le couple moteur : les modes de marche avant et arrière du bogie ont été étudiés. Les deux réducteurs ont un fonctionnement dissymétrique pour provoquer la rotation des deux essieux dans le même sens (cf. figure 2.2).

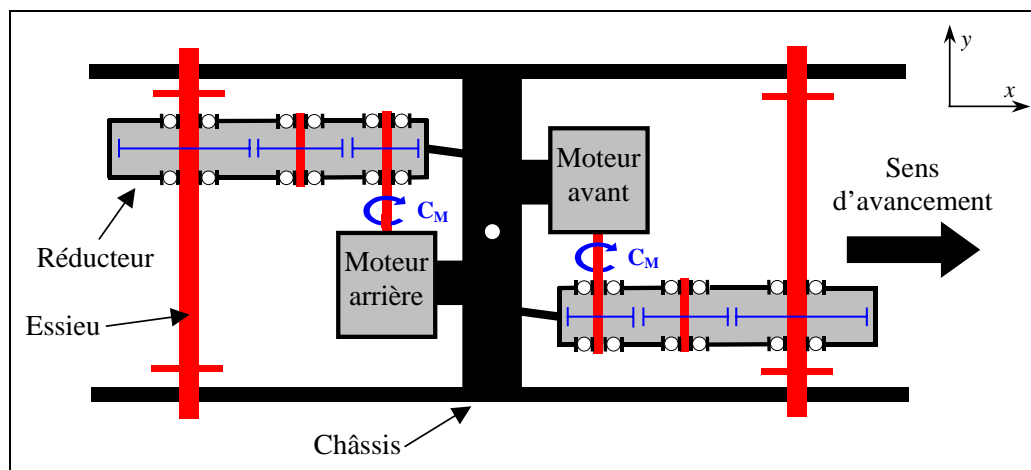


Figure 2.2 : Couples moteurs

Le couple moteur est un effort interne entre l'arbre et le stator du moteur. La liaison entre le moteur et le réducteur est supposée réalisée par un accouplement flexible qui ne transmet que le couple. Le stator du moteur n'intervient donc que par son action sur le châssis. Ainsi, l'effort interne est décomposé en un couple extérieur appliqué sur l'arbre moteur et un couple extérieur opposé appliqué au point central du bogie.

En plus de ces sollicitations, l'influence des conditions de montage suivantes a été étudiée :

- jeux ou pré-charges dans les roulements à rouleaux coniques de boîte d'essieux,
- position des ressorts entre les boîtes d'essieux et le châssis : les ressorts, lorsqu'ils sont comprimés verticalement, exercent un effort latéral (effort de chasse) sur les éléments qui les maintiennent ; plusieurs positions angulaires ont été étudiées pour minimiser ou maximiser l'effet de l'effort de chasse sur le comportement du bogie. Le chapitre 3 est une étude préliminaire des ressorts seuls. Le but est de mettre en évidence l'importance de cet effort de chasse,
- gauche de voie : dans un virage, les rails s'inclinent pour compenser l'accélération centrifuge. Les essieux passent donc de la position horizontale, à une position légèrement inclinée. Comme, à l'entrée dans une courbe l'essieu avant s'incline plus tôt que l'essieu arrière, les deux essieux ne se trouvent plus dans le même plan. Ce phénomène peut également être dû à des irrégularités de voies. Il est simulé par un déplacement de quelques centimètres vers le haut imposé à l'une des roues.

1.4.2 Conditions aux limites en déplacement

Le couple moteur est un effort interne au bogie, transformé par le mécanisme en une force motrice dirigée vers l'avant du train. Cette force est une pré-charge reprise au niveau des points de contact roues / rails d'une part, et au niveau de la fixation bogie / caisse du train, située au point central du châssis, d'autre part. Ce sont en ces points, situés sur la frontière du mécanisme que seront appliquées les conditions aux limites en déplacement.

La translation selon x du point central du châssis est bloquée pour remplacer l'action de la caisse du train.

Dans le modèle, les roues sont simulées par des poutres très rigides qui relient les essieux aux points de contact roues / rails. En ces points, les translations selon x et z sont bloquées (cf. figure 2.3).

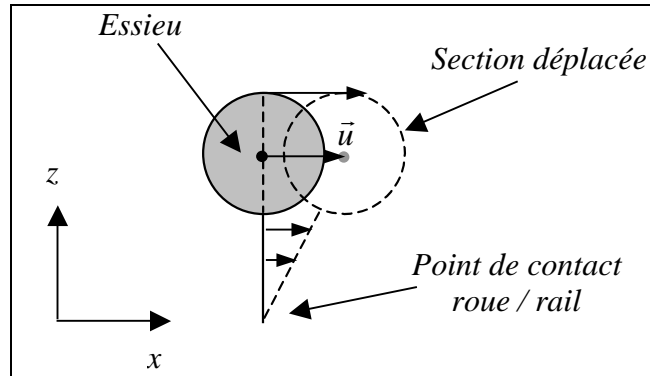


Figure 2.3 : Point de contact et déformation sous charge de l'essieu

Ces conditions aux limites sont justifiées. En effet, le modèle éléments finis de l'essieu et des roues suppose de petits déplacements. La relation efforts-déplacements est linéaire dans cette partie du mécanisme. Lorsque l'essieu subit, sous charge, une rotation autour du point de contact, les nœuds situés à la verticale du point de contact sont soumis à un champ de déplacement \vec{u} dirigé purement selon x (cf. figure 2.3). Ainsi, le centre de l'essieu se déplace comme si la roue avait roulé sans glisser sur le rail et que le point de contact s'était déplacé vers l'avant. Les efforts sont, en revanche, transmis aux rails.

Dans les simulations où les couples moteurs sont nuls, les roues sont libres de tourner pour suivre un éventuel écartement des essieux dû à une déformation du mécanisme. Aucun effort n'est repris par les rails dans la direction x . Le blocage des points de contact roue / rail selon x est alors supprimé.

Lorsqu'un effort latéral est appliqué sur le châssis, un seul des deux rails reprend l'effort (sur son bord intérieur). Nous avons fixé que les efforts latéraux étudiés sont dirigés vers la gauche. Seuls les points de contact avec le rail gauche sont bloqués en translation selon y .

2. LES MODELES DES ELEMENTS LINEAIRES DE STRUCTURES

2.1 Les types d'éléments finis utilisés

Les éléments de structures sont discrétisés en sous-domaines par des éléments finis, connectés à des nœuds. Les éléments finis utilisés sont de quatre types :

- les éléments finis volumiques : ils caractérisent le comportement d'un milieu continu tridimensionnel, dans lequel les inconnues (DDL) sont les 3 composantes du vecteur déplacement,
- les éléments finis de coques : ils caractérisent le comportement d'une structure bidimensionnelle (fine), dans laquelle les déplacements en tous points de la structure sont exprimés en fonction des déplacements d'une surface neutre et des rotations des sections normales à cette surface. Les inconnues évaluées aux nœuds sont au nombre de 6,
- les éléments finis de poutres : ils caractérisent le comportement d'une structure unidimensionnelle, dans laquelle les déplacements en tous points de la structure sont exprimés en fonction des déplacements d'une fibre neutre et des rotations des sections normales à cette fibre. Les inconnues évaluées aux nœuds sont au nombre de 6,
- les éléments de type cinématique : ils n'ont pas de matrice de rigidité mais ils contribuent à la résolution des relations efforts-déplacements par un ensemble de relations linéaires supplémentaires entre les déplacements des nœuds.

Les déplacements $\{u\}$ des n DDL d'un composant linéaire sont liés aux efforts nodaux extérieurs à la structure $\{F\}$ par une relation $[K]\{u\} = \{F\}$, où $[K]$ est la matrice de rigidité, de dimension $n \times n$. Les m relations linéaires supplémentaires, introduites par les éléments de type cinématique, forment un système $[C]\{u\} = \{0\}$, où $[C]$ est une matrice de dimension $m \times n$. Lors de l'étape de condensation statique, les matrices $[K]$ et $[C]$ sont prises en compte pour calculer la matrice de rigidité réduite. Aucune relation supplémentaire n'est nécessaire pour décrire le comportement du système réduit.

Les deux principaux éléments de ce type sont les poutres rigides et les éléments d'interpolation. Ces derniers sont utilisés pour faire la jonction entre deux types de maillage incompatibles, tels que des poutres et un maillage volumique (cf. figure 2.4). Les 6 DDL de translation et rotation des nœuds des éléments de poutres sont interpolés à partir des 3 DDL de translation des nœuds des éléments volumiques. Les fonctions de forme associées aux faces des éléments volumiques sont utilisées.

Les modèles des différents composants linéaires qui constituent le mécanisme sont décrits dans les paragraphes qui suivent. Par commodité, certains composants sont groupés au sein d'un modèle unique qui, après condensation, donnera un seul super-élément. Ainsi, les bagues de roulements sont maillées avec les carters sur lesquels elles sont montées.

Ces modèles sont, par hypothèse, supposés représenter correctement le comportement statique des composants. Ils ne seront donc pas remis en question.

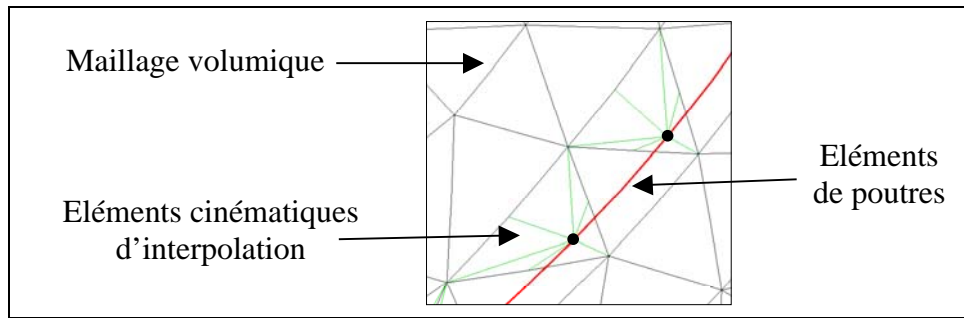


Figure 2.4 : Jonction entre maillages incompatibles par éléments cinématiques

2.2 Les modèles des boîtes d'essieux

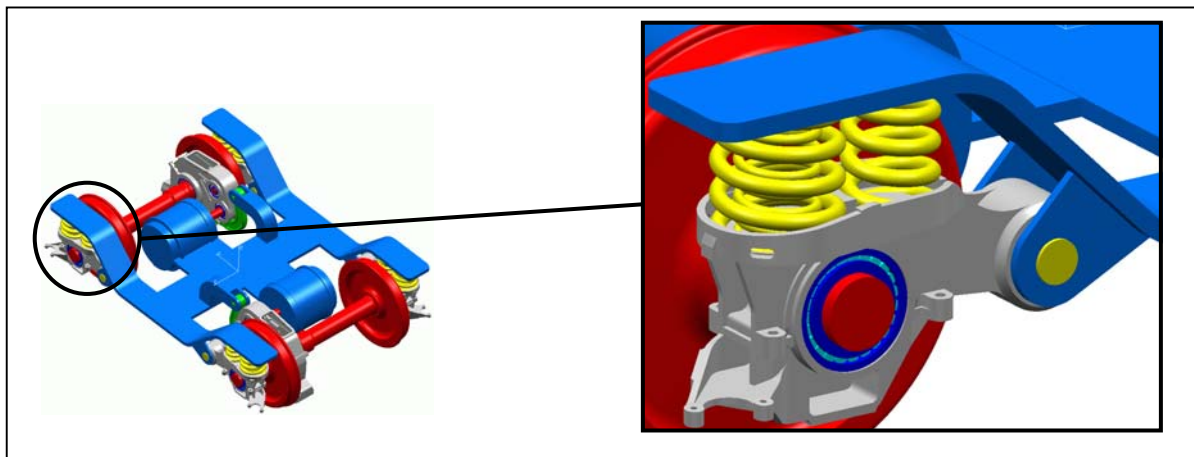


Figure 2.5 : Les boîtes d'essieux

Etant donnée la complexité géométrique de la pièce, un maillage automatique en éléments finis tétraédriques à 10 nœuds a été utilisé. Le logiciel utilisé, CATIA, s'appuie sur un modèle CAO de la pièce. Les avantages de cette technique sont :

- la rapidité de réalisation,
- la possibilité d'épouser la géométrie complexe de la pièce,
- la possibilité d'affiner localement le maillage dans les zones de sur-contraintes intéressantes pour l'étude.

Le modèle comprend également le maillage de l'articulation élastique, ainsi celui des bagues extérieures des roulements à rouleaux coniques de boîtes d'essieux. Ces maillages sont décrits plus en détail dans les paragraphes suivants.

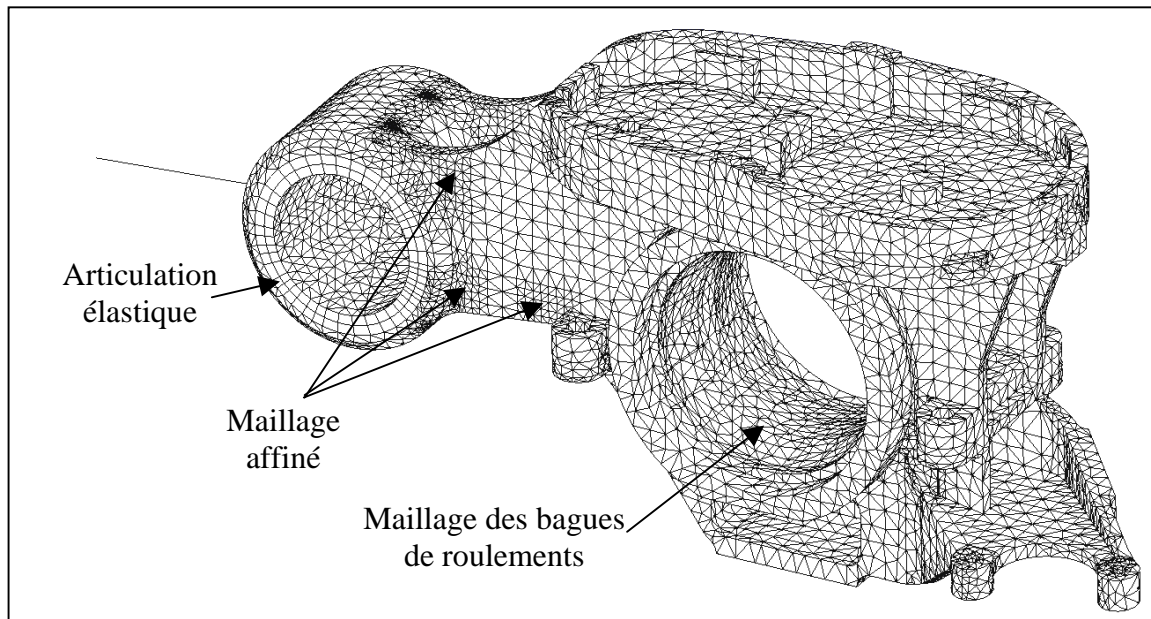


Figure 2.6 : Maillage éléments finis de la boîte d'essieux

2.3 Les modèles des articulations élastiques de boîtes d'essieux

Les articulations élastiques sont constituées de caoutchouc et de parties métalliques. Elles sont divisées dans leur plan médian en deux parties, pré-chargées l'une contre l'autre. Le cœur de l'articulation est un axe massif en métal supposé peu déformable.

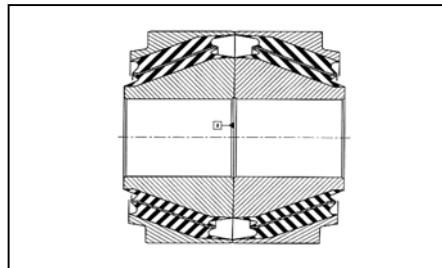


Figure 2.7 : Coupe de l'articulation élastique

Dans les spécifications techniques des constructeurs, seules les raideurs globales sont données. Le comportement en raideur est légèrement non linéaire. Un modèle numérique a été établi à partir de ces seules spécifications, en considérant que les raideurs n'évoluent pas avec les déformations et sont les suivantes :

- raideur axiale : 15000 N/mm
- raideur radiale : 50000 N/mm
- raideur de torsion : 125 m.N/deg
- raideur conique : 1000 m.N/deg

Comme la zone de la boîte d'essieux voisine de l'articulation élastique est importante pour l'étude, il convenait d'adopter un modèle respectant au mieux les conditions réelles de transmission des efforts à l'interface. En l'absence d'information plus précise, nous avons supposé que les efforts sont transmis de manière homogène sur toute la surface de contact caoutchouc / métal.

Le modèle suivant a été adopté :

- un noyau cylindrique très rigide est composé d'éléments de coques et d'éléments cinématiques de poutres rigides,
- l'espace entre ce noyau rigide et l'alésage de la boîte est occupé par des éléments finis volumiques dont les propriétés sont voisines de celles du caoutchouc,
- une rigidité ponctuelle relie le noyau cylindrique rigide au châssis ; les valeurs de rigidité ont été ajustées pour retrouver les rigidités globales de l'articulation données ci-dessus.

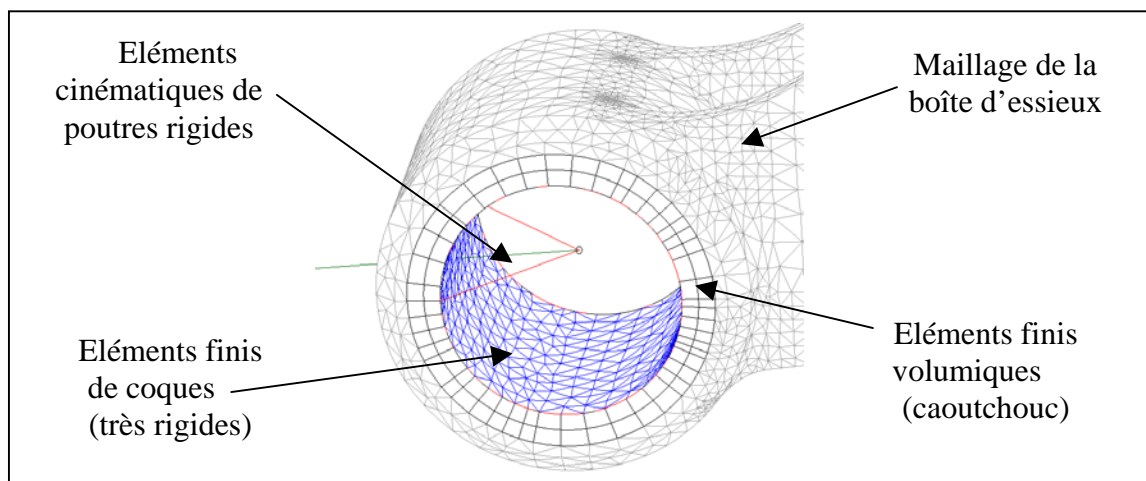


Figure 2.8 : Modèle éléments finis de l'articulation élastique

Faute d'information précise, ce modèle fait des hypothèses simplificatrices arbitraires. Cependant, étant donné qu'il respecte les raideurs globales de l'articulation et que l'interface assure une transmission homogène des efforts, les erreurs induites par ces simplifications sont faibles. Le modèle ne sera pas remis en question dans la suite de l'étude.

2.4 Le modèle du châssis

Le châssis est une pièce de géométrie complexe. La figure 2.9 en est une vue très simplifiée dans laquelle n'apparaissent que les éléments indispensables à l'étude : les points d'attache des articulations élastiques, des moteurs et des bielles de réducteurs. Le but n'est pas d'étudier les déformations et contraintes sous charge du châssis. Son comportement nous intéresse seulement dans la mesure où il interagit avec le reste du mécanisme.

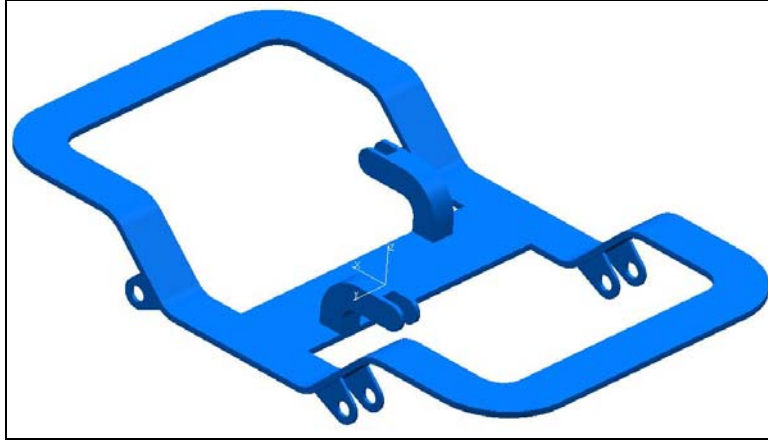


Figure 2.9 : Modèle CAO simplifié du châssis

Le châssis est constitué de deux longerons reliés par une traverse (cf. figure 2.10). Sa rigidité globale a été mesurée expérimentalement. Pour cette mesure une des roues du bogie a été soulevée, ce qui a pour conséquence de vriller le châssis. Les grandeurs mesurées sont :

- les efforts F_i appliqués par le reste du bogie sur le châssis, au dessus de la roue i ,
- les déplacements d_i du châssis depuis l'état non déformé, au dessus de la roue i .

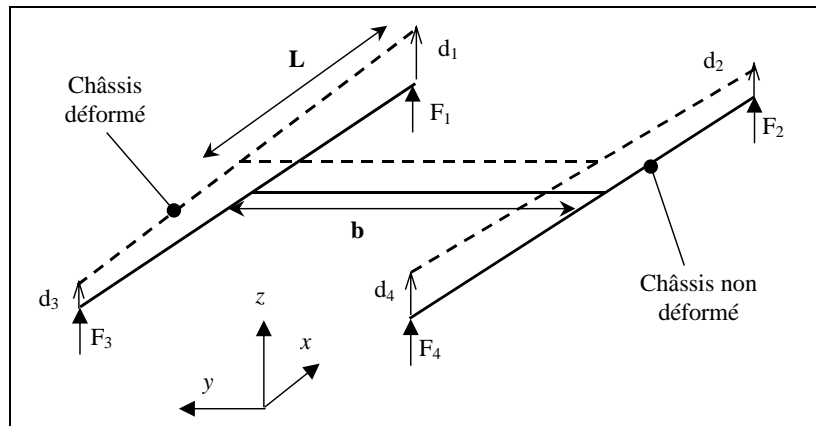


Figure 2.10 : Géométrie et mesure expérimentale de la rigidité du châssis

La rigidité torsionnelle du châssis $K_{\theta Y}$ est le rapport entre le couple de torsion sur la traverse et l'angle entre les deux longerons. Elle est déterminée, à partir des valeurs expérimentales, par la relation :

$$K_{\theta Y} = \frac{(F_2 - F_1 + F_3 - F_4)L/2}{\arctan\left(\frac{d_3 - d_1}{2L}\right) - \arctan\left(\frac{d_4 - d_2}{2L}\right)}$$

Le modèle numérique développé à partir d'éléments de poutres et de coques illustré par la figure 2.11 a été conçu pour être simple, pratique et assurer la liaison entre les différents composants du mécanisme avec les rigidités adéquates. Des éléments finis de coques, très rigides, sont utilisés pour les surfaces planes d'appui des ressorts. Pour le reste des longerons et la traverse, des éléments cinématiques de poutres rigides sont utilisés. Les déformations sous charge de ces différentes parties sont négligeables.

La jonction entre la traverse et les longerons est assurée par deux rigidités ponctuelles de valeur $2K_{0y}$ en torsion selon y . Les rigidités dans les autres directions sont suffisamment élevées pour rendre les déplacements relatifs négligeables dans ces directions.

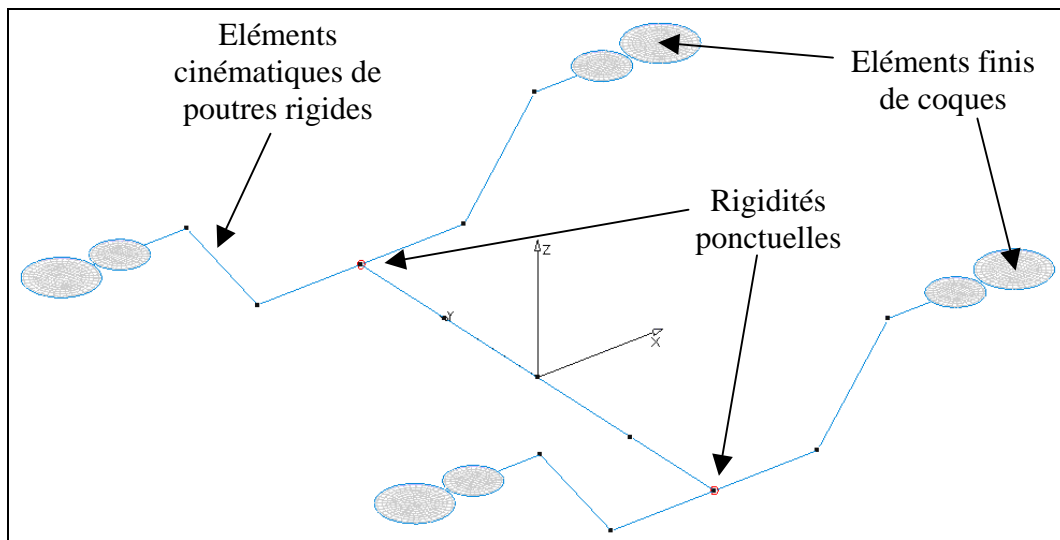


Figure 2.11 : Modèle éléments finis du châssis

2.5 Les modèles des essieux et des roues

Un maillage en éléments finis tétraédriques à 10 nœuds a été réalisé à partir d'un modèle CAO de l'essieu.

La flexibilité des roues est supposée ne pas avoir de répercussion sur le chargement du mécanisme. Elles ne sont donc pas modélisées en tant qu'éléments flexibles. Des éléments de poutres rigides sont utilisés pour rigidifier trois sections de l'essieu :

- aux positions des roues : un nœud de chaque bague est relié par une poutre rigide au point de contact roue / rail correspondant,
- au niveau de l'engrenage principal du réducteur : un nœud de cette bague est relié par un élément de poutre rigide à un nœud sur l'axe de l'essieu. Ce nœud est utilisé pour connecter un élément d'engrenage.

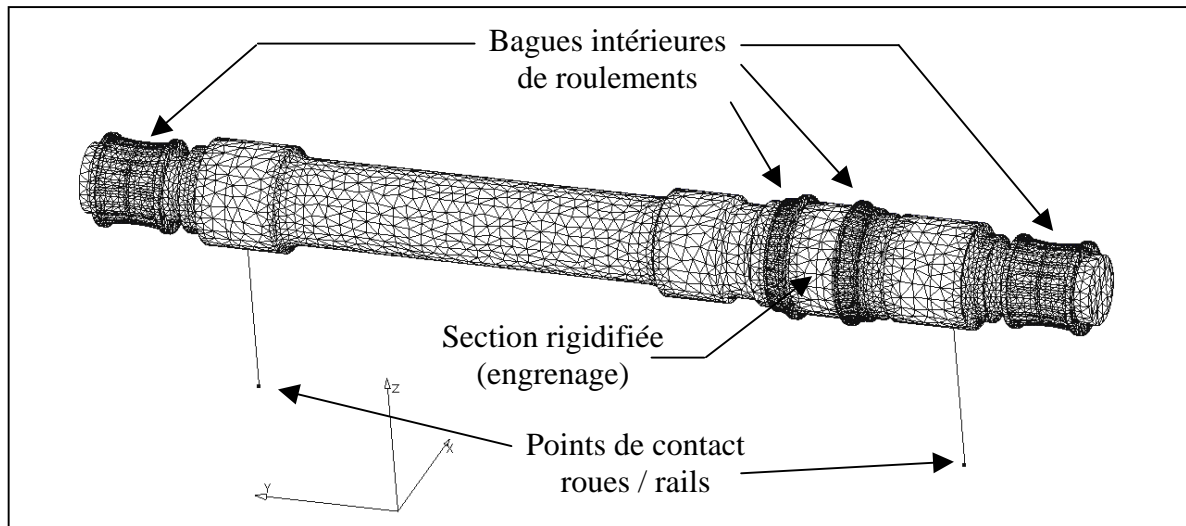


Figure 2.12 : Modèle éléments finis de l'arbre et des roues

2.6 Les modèles des carters de réducteur, des arbres et des bielles

Le carter de réducteur a été maillé en éléments tétraédriques à 10 nœuds, à partir d'un modèle CAO. Le modèle de la bielle est réalisé en éléments finis de poutres. Ce modèle est assez approximatif, mais les déformations éventuelles de la bielle sont faibles et ne modifient pas le chargement du mécanisme.

L'articulation élastique et la rotule élastique qui la relie respectivement au carter de réducteur et au châssis sont simulées par des rigidités ponctuelles de valeurs conformes aux spécifications techniques. La potence qui relie la bielle à la traverse du châssis est modélisée par un élément cinématique de poutre rigide, encastré sur la traverse.

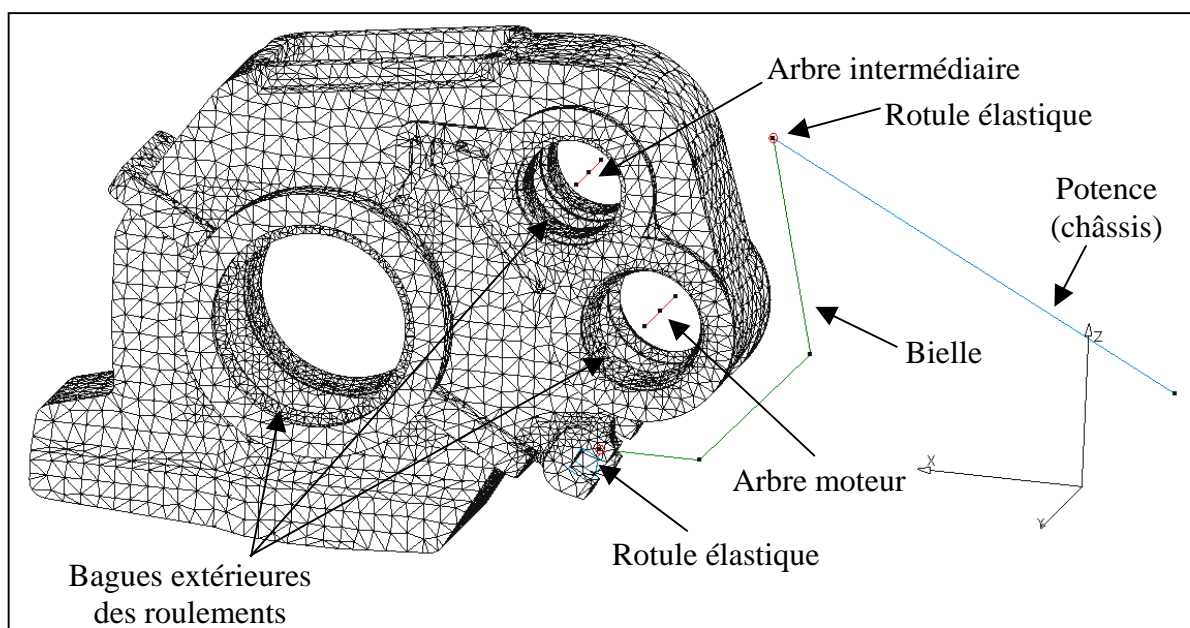


Figure 2.13 : Modèle éléments finis du carter de réducteur, des arbres et de la bielle de maintien

Des éléments finis de poutres, avec des inerties adéquates, ont été utilisés pour l'arbre intermédiaire et l'arbre moteur car ils sont massifs et leurs déformations et leurs contraintes sous charge ont peu d'intérêt pour l'étude. Ce modèle implique que les bagues intérieures des roulements montés sur ces arbres soient considérées comme parfaitement rigides. En effet, tous les éléments de corps roulants du roulement seront connectés au même nœud de la poutre.

Des plans des réducteurs sont donnés en annexe C.

3. MODELES DES ELEMENTS SPECIFIQUES DU BOGIE

3.1 Les modèles des éléments de structures pré-chargés : les ressorts

Des modèles CAO des corps de ressorts à vide ont été réalisés à partir de mesures sur les ressorts réels (cf. chapitre 3 pour plus de précisions). Ces modèles ont été utilisés pour réaliser des maillages éléments finis volumiques.

Les ressorts subissent des déformations sous charge importantes (de l'ordre de 10 cm). Ils ont donc un comportement géométriquement non linéaire, à cause des grands déplacements (cf. paragraphe 3.3 du chapitre 1). Ils sont montés sur les boîtes d'essieux par groupes de trois et chaque ressort a une longueur à vide différente. Ils doivent donc nécessairement être introduits dans le modèle global dans un état déformé, compatible avec les contraintes de montage dans le mécanisme. Dans le cas de notre étude, leurs faces d'appui doivent être parallèles et distantes de 262 mm .

Ce changement d'état de référence pour la mesure des déplacements a, en outre, l'avantage de linéariser le comportement au voisinage d'un état proche de l'état d'équilibre statique.

Conformément à la méthode exposée dans le paragraphe 3.3 du chapitre 1, un nouvel état de référence pour le calcul des déplacements est défini par un premier calcul linéaire, à déplacement imposé, effectué sur le modèle éléments finis du ressort à vide. Lors de ce calcul, les conditions aux limites sont :

- blocage dans les trois directions des nœuds de la surface plane du bas du ressort,
- blocage dans les deux directions horizontales et déplacement vertical imposé vers le bas des nœuds de la surface plane du haut du ressort, pour que la hauteur déformée soit de 262 mm .

Le résultat de ce calcul est le vecteur de déplacement de référence $\{u_r\}$. Les nœuds du maillage initial sont déplacés d'une quantité $\{u_r\}$ et la matrice de rigidité $[K_r]$ dans l'état de référence est évaluée à partir du maillage éléments finis déformé. Le modèle final, utilisé dans l'assemblage global est obtenu en appliquant sur les nœuds de ce maillage un effort nodal $-[K_r]\{u_r\}$.

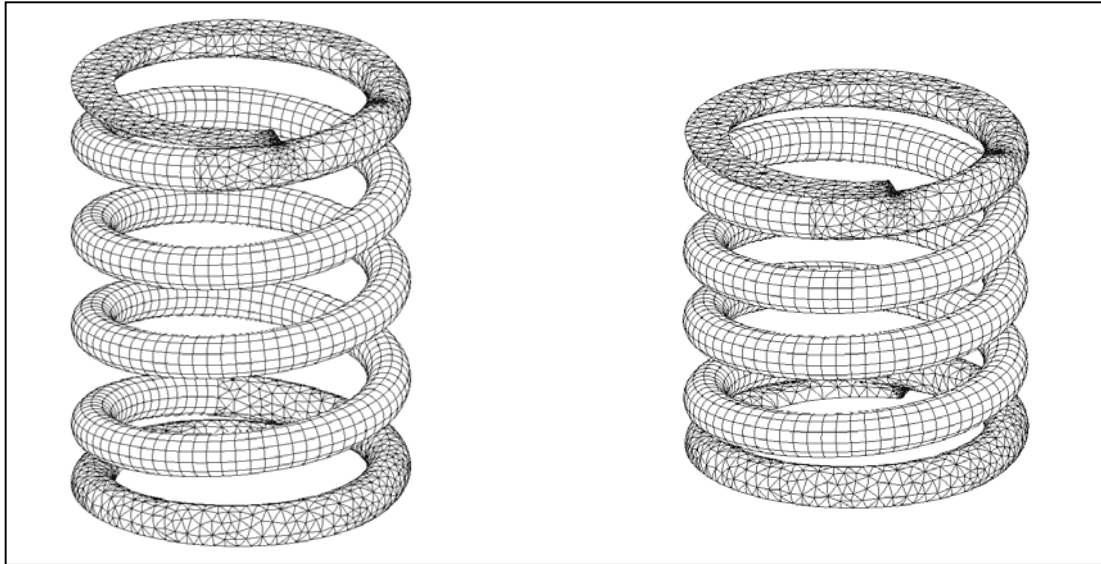


Figure 2.14 : Modèle éléments finis d'un ressort avant et après la pré-charge

3.2 Les modèles des éléments de liaison

3.2.1 Les paliers à roulements

Le modèle numérique des paliers à roulements, comprend une partie linéaire, les bagues de roulements, intégrée aux éléments de structures, et une partie non linéaire simulant le contact entre les bagues et les corps roulants. Cette partie est modélisée par des éléments de liaison non linéaires, associés à chaque corps roulant et décrits dans le paragraphe 5.3 du chapitre 1.

La modélisation par corps roulants faisant l'hypothèse que les sections droites de bagues restent planes après déformation, trois approches peuvent être envisagées :

- simuler les bagues par des éléments finis volumiques. Dans ce cas, les sections droites de bagues, au niveau des corps roulants, doivent être rigidifiées. Des éléments cinématiques de poutres rigides, sont utilisés pour cela. Un nœud quelconque de la section rigidifiée est utilisé comme nœud d'attache de l'élément de liaison « corps roulant »,
- simuler les bagues par des éléments finis de poutres rectilignes dont les inerties de section sont celles des bagues réelles. Le nombre de poutres doit être suffisamment élevé pour approcher au mieux la courbure de la bague. Les nœuds d'attache des éléments de liaison sont des nœuds, ayant 6 DDL, appartenant aux éléments de poutres,
- faire l'hypothèse qu'une bague est totalement indéformable. C'est le cas d'une bague intérieure montée sur un arbre massif. Dans ce cas, tous les éléments de corps roulants sont connectés à un nœud unique, associés à 6 DDL, qui caractérise les translations et rotations rigides de la section de bague.

Dans notre étude, les bagues intérieures montées sur les arbres moteurs et intermédiaires des réducteurs sont supposées indéformables. En effet, elles sont montées sur des arbres massifs. Les corps roulants sont connectés directement sur les nœuds des poutres qui représentent les arbres.

Toutes les autres bagues de roulement du bogie ont été modélisées par des éléments finis volumiques avec des sections de bagues rigidifiées (cf. figure 2.15), à l'exception des bagues intérieures des roulements montés sur les arbres moteurs et intermédiaires des réducteurs : étant montées sur des arbres massifs, elles sont supposées indéformables et les corps roulants sont connectés directement sur les nœuds des poutres qui représentent les arbres. Cette approche est la meilleure pour obtenir des niveaux de contraintes réalistes, dans les carters, au voisinage des bagues de roulements.

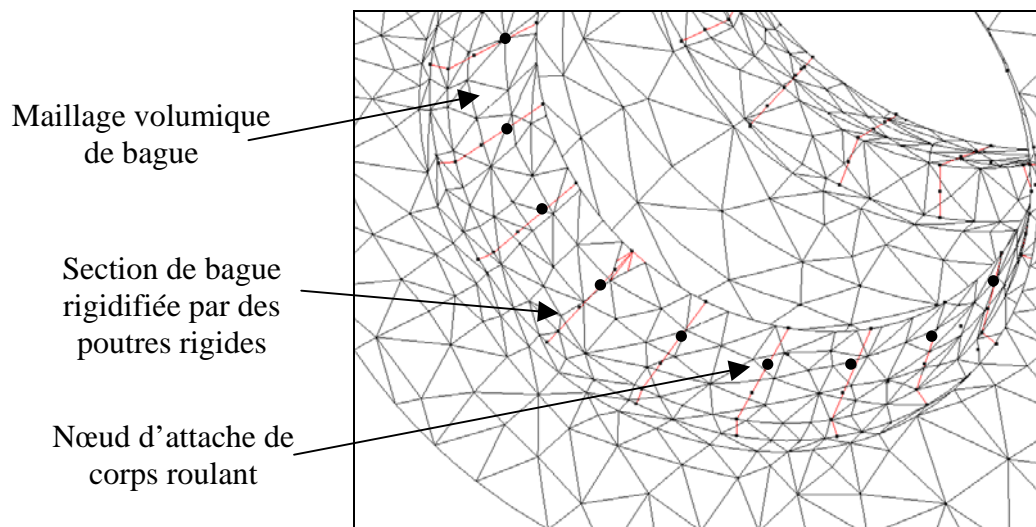


Figure 2.15 : Maillage éléments finis des bagues de roulements

Les éléments de poutres sont connectés sur le maillage volumique par des éléments cinématiques d'interpolation.

3.2.2 Les engrenages

Les engrenages hélicoïdaux des réducteurs sont modélisés par les éléments de liaison décrits dans le paragraphe 4.2 du chapitre 1. Ils caractérisent l'engrènement entre deux arbres, et permettent de déterminer automatiquement les flancs actifs.

L'élément d'engrenages entre le pignon moteur et la roue intermédiaire relie les nœuds des éléments de poutres qui modélisent ces arbres.

L'élément d'engrenages entre la roue intermédiaire et la roue principale relie un nœud de poutre de l'arbre intermédiaire à un nœud, placé sur l'axe de révolution de l'essieu. L'essieu étant modélisé par des éléments volumiques, une section de celui-ci, rigidifiée à sa périphérie par des éléments cinématiques de poutres rigides, est lié à ce nœud.

3.2.3 Les zones de contact avec jeux des ressorts

Les ressorts de bogie sont en liaison appui-plan sur les boîtes d'essieux d'une part et les longerons d'autre part. Cette liaison ne peut être représentée par une liaison d'encastrement, car le fil d'un ressort subit une torsion qui provoque une distorsion des faces, initialement planes. Le contact ne reste plus homogène : des jeux apparaissent dans certaines zones, tandis que l'effort de contact est transmis sur de petites zones, linéiques, ou presque ponctuelles.

La liaison doit donc nécessairement permettre l'apparition d'un jeu dans la direction normale au contact, tout en transmettant les efforts de contact là où le jeu est fermé. De plus, le glissement des ressorts est empêché, en partie par un phénomène de frottement sur la zone de contact et en partie par des dispositifs de coupelles qui maintiennent latéralement les extrémités des ressorts. Le chapitre 3 fait une étude comparative de plusieurs façons de prendre en compte ce blocage latéral dans le modèle.

La solution adoptée pour la simulation du bogie complet est simple à mettre en œuvre et donne des résultats réalistes. Elle fait usage des éléments de contacts avec jeux décrits au paragraphe 4.1 du chapitre 1. Des éléments sont disposés de manière régulière sur le contour des faces planes d'appui au nombre de 25 par faces. La liaison dans la direction normale au contact est faite avec un jeu initial nul. Les liaisons dans le plan de contact sont de type rigide.

Lors de la compression des ressorts, les spires peuvent devenir jointives. Ce phénomène, joue un grand rôle sur la direction de l'effort de chasse, effort latéral généré par la compression et étudié au chapitre 3. Des éléments de contacts avec jeux ont donc été ajoutés, entre les spires, aux extrémités des ressorts. La liaison dans la direction verticale est faite avec un jeu initial égal à la distance entre les nœuds. Les deux autres DDL sont laissés libres.

Les nœuds de connexion des éléments de contact sont définis sur 3 DDL et ont été placés sur les maillages volumiques ou surfaciques à des positions imposées. Des éléments cinématiques d'interpolation lient les déplacements de ces nœuds à ceux des faces d'éléments finis surfaciques ou volumique les plus proches.

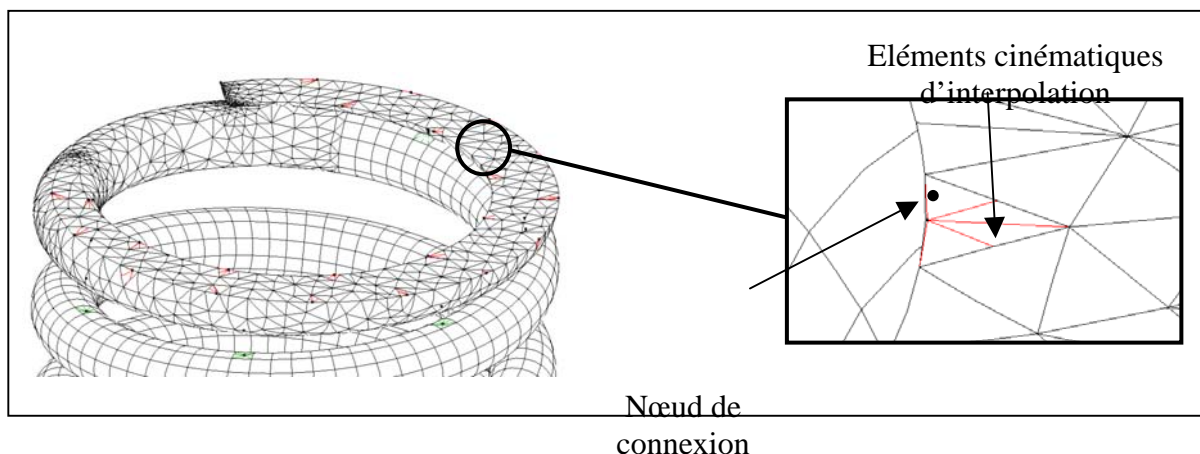


Figure 2.16 : Nœuds de connexion et éléments d'interpolation

4. CONCLUSION

Le bogie de train est un mécanisme complexe dont l'architecture et les caractéristiques rendent indispensable l'utilisation de la méthode globale développée dans le chapitre 1 pour les raisons suivantes :

- le mécanisme est hyperstatique à plusieurs échelles,
- il comporte des ressorts qui de par leurs souplesses subissent de grandes modifications de géométrie et, de plus, sont inclus dans des boucles pré-chargées,
- le nombre de constituants élevé justifie l'utilisation de la sous-structuration statique,
- tous les types d'éléments de liaison non linéaires sont présents : roulements, zones de contact avec jeux et engrenages.

Des modèles éléments finis de tous les éléments de structure ont été créés en utilisant les techniques de maillage automatique d'un logiciel de calcul moderne : CATIA (module ELFINI). Les éléments de liaison sont modélisés par des éléments non linéaires spécifiques dont les nœuds d'attache ont été créés dans les modèles des éléments de structure. Après condensation des éléments linéaires et assemblage, un modèle numérique global unique est obtenu.

Par la suite les ressorts du bogie feront l'objet d'une étude préliminaire au chapitre 3. En effet, leur comportement est fortement non linéaire, à cause des grandes déformations associées à la pré-charge, et à cause des contacts avec jeux aux interfaces avec l'environnement. La validité des modèles développés y est discutée et les paramètres qui influencent leur comportement sont étudiés.

A l'issue de cette étude, le bogie lui-même sera étudié sous diverses sollicitations. C'est l'objet des chapitres 4 et 5.

