

Chapitre 2

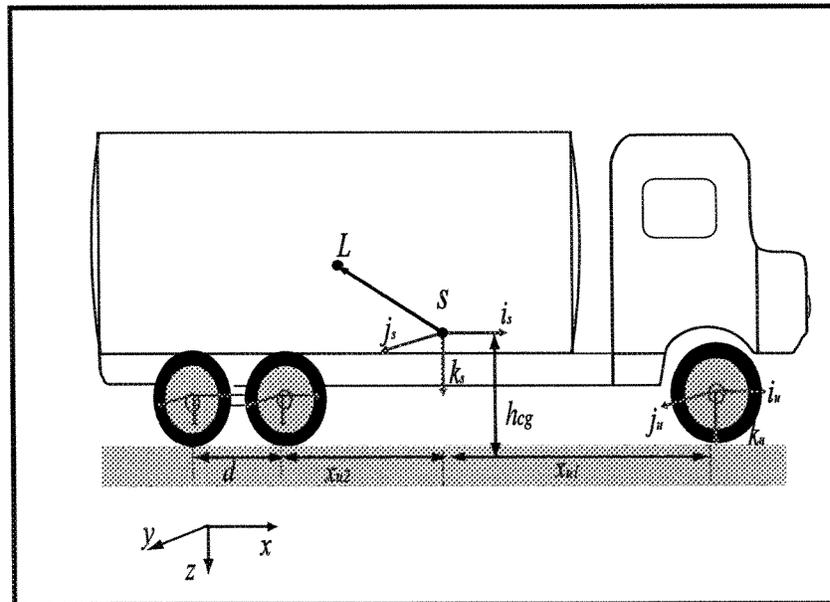
Revue de littérature

2.1 Facteurs affectant la stabilité des véhicules lourds

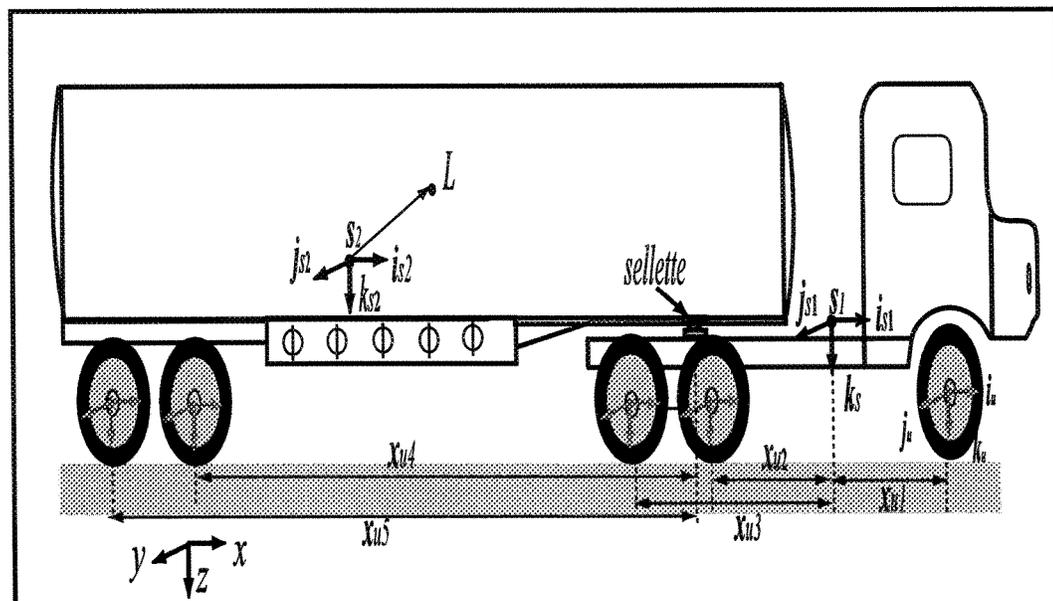
Cette section présente une courte description des facteurs les plus importants qui affectent la réponse du comportement dynamique des véhicules lourds en particulier, les véhicules d'unité et articulé représentés par la figure (2.1).

2.1.1 Effet de la vitesse

Le comportement des véhicules est sensiblement influencé par la vitesse. La réponse dynamique des véhicules lourds, telle que l'accélération latérale, pour un angle de direction donné et la performance de freinage, dépend directement de la vitesse. C'est un facteur important pour caractériser le comportement dynamique des véhicules. En outre, la variation de la vitesse est influencée par le poids, les dimensions du véhicule, et l'état de la géométrie de la route. Donc, la manipulation et les caractéristiques de stabilité seront différentes selon le type du véhicule. Le seuil de renversement de la majorité des véhicules touristiques en terme d'accélération latérale est supérieur à $a_y = 1.5 g$ (g : accélération de la pesanteur) [8]. Pour les camions légers et les mini fourgonnettes, le seuil se situe entre $0.8 g$ et $1.2 g$ [9, 10]. Pour les véhicules lourds, la limite est moins que $0.5 g$. Cependant, pour les camions citerne, cette limite est



a) Type unité



b) Type articulé

Figure 2.1: Types de camions citernes.

inférieure. Le seuil dépend de plusieurs facteurs tels que la forme de la citerne et le taux de remplissage. D'ailleurs, en connaissant les amplitudes des accélérations latérales maximales et les vitesses auxquelles elles se produisent, nous pourrions déterminer les limites de la stabilité de renversement. Ceci nous permet de fixer les limites de vitesse pour des réservoirs de sections connues.

2.1.2 Position du centre de masse

La position du centre de masse a un effet significatif sur le comportement dynamique des véhicules, car les forces et les moments produits dépendent fortement de la position du centre de masse par rapport aux axes du véhicule. Dans le cas des véhicules lourds l'analyse est plus compliquée lorsqu'on ajoute les combinaisons des remorques. Quand une remorque est attachée à l'unité de remorquage, les forces transmises par le point d'articulation doivent être supportées par le châssis et les pneus du tracteur. Ainsi, le décalage de la sellette produit des forces et des moments supplémentaires. Le transfert dynamique de la charge influence directement la performance du système de freinage [11, 12, 13, 14]. Pour un véhicule ayant son centre de masse plus près de l'axe avant, l'effet d'une force latérale agissant au centre de masse génère une force de réaction plus grande qu'aux roues arrières. Puis, les angles de glissement des roues avants seront plus grands que la réaction des roues arrières, et par conséquent le véhicule tournera autour de l'axe de lacet Z . Dans ce cas, la force centrifuge opposée à la force latérale contribue à la stabilisation du véhicule lorsque la force latérale cesse d'agir en réduisant les angles de glissement des roues avants. Par contre, si le centre de masse est situé plus près de l'axe arrière, sous l'action d'une force latérale au centre de masse, les forces produites aux roues arrières sont plus grandes qu'aux roues avants; en outre, les angles de glissement seront plus grands aux roues arrières. Dans ce cas, si l'effet de la force latérale est terminée, la force centrifuge créée demeurera dans la même direction que

la force latérale causant l'instabilité du véhicule. La combinaison de ces effets avec la répartition de la charge et la vitesse du véhicule ont une influence significative sur la stabilité latérale des véhicules lourds. En outre, la fixation d'une unité de remorquage au tracteur complique l'analyse de la stabilité latérale des camions lourds, puisque d'autres forces et des moments seront produits au point d'articulation entre le tracteur et la remorque. Dans le cas des véhicules lourds où le centre de masse est plus élevé comparativement aux voitures de tourisme, le seuil de renversement est extrêmement sensible à la hauteur du centre de masse. D'autre part, si le centre de masse n'est pas sur la ligne centrale du véhicule, comme c'est le cas dans les véhicules spécialisés, nous aurons le renversement d'un côté du véhicule. La même condition pourrait se produire pour des véhicules supportant des charges non uniformes, où le transfert de charge produit des forces et des moments affectant le seuil de renversement du véhicule tel que le mouvement du ballonnement du liquide dans les camions citernes. Donc, le centre de masse a une influence primordiale sur la stabilité de roulis et de lacet et son emplacement avant/arrière est un paramètre très important lié à la distribution de la masse du véhicule et à la position de la charge transportée. Il détermine les charges transférées aux roues. Ces charges ont une influence importante sur les forces latérales et longitudinales. Une autre question importante est que l'effet de la hauteur du centre de masse est plus important dans le cas du mouvement du roulis que le mouvement du tangage [15]. C'est principalement à cause que les camions de combinaison sont habituellement beaucoup plus longs et sont moins larges. Les études développées sur cet aspect ont démontré que plus la hauteur du centre de masse est élevée plus la stabilité de roulis diminue et ceci pourrait être nuisible à la stabilité de lacet [16]. D'ailleurs, le transfert de la charge d'un côté à un autre est un facteur considérable qui affecte également la stabilité latérale.

2.1.3 L'emplacement du point d'articulation

La sellette est l'un des mécanismes le plus utilisé pour connecter le tracteur et l'unité de remorquage. Par ce mécanisme, les forces et les moments du tracteur sont transmis à la remorque et vice versa. Pour des véhicules avec la sellette plus près du centre de masse du tracteur, le moment du lacet généré quand la remorque pousse le tracteur devient plus petit ; ayant pour résultat une augmentation de la limite de stabilité. La position de la sellette par rapport à l'essieu arrière du tracteur peut également générer différents cas d'instabilité tel que l'anti-tonneau (quand la sellette est placée en avant de la ligne centrale de l'essieu arrière) et le dérapage des roues avants (quand la sellette est déplacée derrière la position normale). La position de la sellette influence également l'effort de direction exigé pour maintenir la stabilité directionnelle [17]. Par exemple, le placement de la sellette plus en avant augmente la limite de stabilité. Cependant, ceci provoque une augmentation de la charge sur les roues avants du tracteur ce qui demande un grand effort du chauffeur pour exécuter une manoeuvre de direction. La hauteur de la sellette affecte également la stabilité statique du roulis. Lors d'une manoeuvre de rotation proche du seuil de renversement, un moment de roulis élevé est transmis à travers la sellette. Dans une telle situation, un jeu libre va se créer entre la connexion de la remorque et la sellette qui représente un angle de l'ordre de 2 à 3 degrés. La hauteur de la sellette détermine l'altitude à laquelle ce jeu libre apparaît. Ainsi, il influence la quantité de mouvement latéral au centre de masse de la remorque [17]. Parmi les facteurs affectant directement la stabilité du véhicule, citons le nombre de points d'articulation et la longueur de la remorque. Le type de raccordement utilisé pour la deuxième remorque qui suit un véhicule de combinaison ne génère pas le même degré de stabilité comparativement aux véhicules conventionnels tracteur semi-remorque.

2.1.4 Distribution de la charge

La charge du véhicule exerce une grande influence sur la stabilité de roulis et de lacet. La combinaison du poids avec l'emplacement du centre de masse détermine l'importance des charges sur chaque roue. En conséquence, les forces produites par les pneus et les caractéristiques de l'interaction pneu-route peuvent déterminer la valeur et l'effet des forces sur chaque roue, ainsi, la réponse dynamique peut être différente en fonction de la répartition des charges sur les axes. Pour cette raison, la manière avec laquelle un véhicule est chargé joue un rôle important dans le comportement dynamique du véhicule. La répartition de la charge à l'intérieur et entre les remorques ainsi que l'emplacement du centre de masse de la charge est un autre aspect qui détermine l'importance des forces d'inertie et des moments produits. Ainsi, la réponse de roulis, de tangage ou de lacet du véhicule varie et dépend de la répartition des charges entre les axes et l'emplacement du centre de masse. En outre, la diversité des mouvements exerce une influence marquante sur le comportement dynamique du véhicule. Par exemple, sur une route de niveau ou sur une pente, le taux d'accélération dans de telles conditions et la pente de la route affectent également le rapport de transfert de la charge entre les axes. Ce rapport, influence d'une façon significative le contrôle et la stabilité du véhicule.

2.1.5 Caractéristiques de la suspension et du pneu

Les propriétés de la suspension sont les facteurs le plus importants pour caractériser le comportement dynamique des véhicules. La suspension joue un rôle important en distribuant les charges dynamiques aux axes et aux pneus et en absorbant les irrégularités de la route [18]. Bien que la rigidité totale du roulis soit importante pour la stabilité du véhicule, sa distribution par rapport aux suspensions a une influence importante sur la stabilité. Cette distribution détermine la façon avec laquelle le transfert latéral de la

charge est distribuée sur les axes. La situation idéale serait que la rigidité du roulis soit distribuée de façon égale sur les suspensions proportionnellement à la charge supportée par les axes. Cependant, en raison de la différence de la rigidité du roulis entre les suspensions avant et arrière, cette situation idéale n'est pas susceptible d'être réalisable dans le cas des véhicules lourds. Comme nous l'avons mentionné précédemment, la distribution de la rigidité du roulis détermine comment la charge sera transférée à partir d'un côté à l'autre. Ainsi, les pneus liés à une suspension plus rigide éprouveront un transfert de charge plus élevé que les pneus associés à une suspension avec une rigidité de roulis inférieure [15]. La hauteur du centre du roulis (voir figure (2.2)) joue également un rôle important dans le seuil de renversement

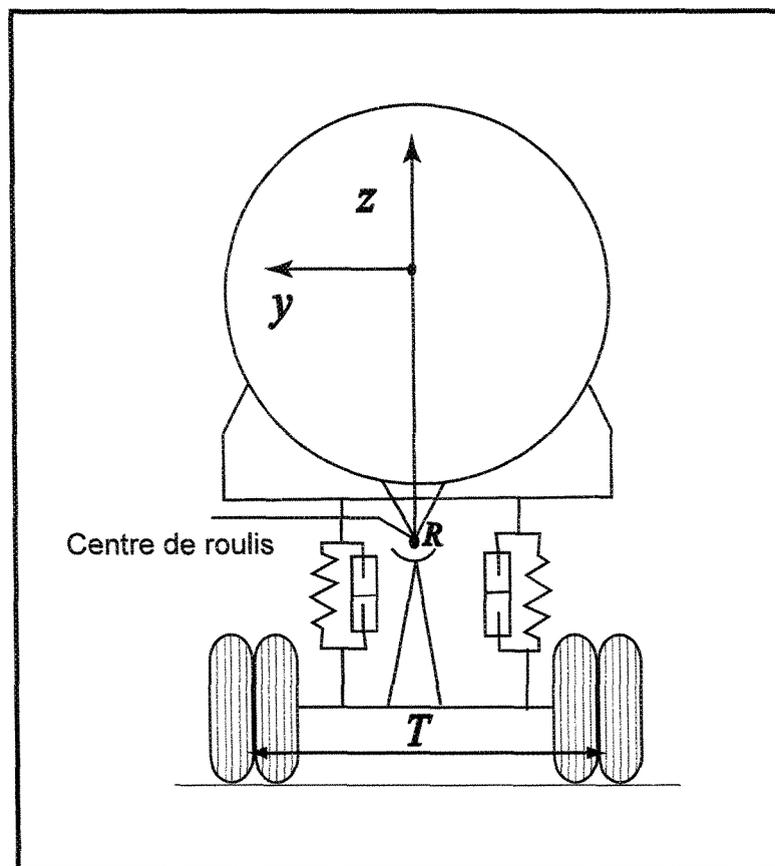


Figure 2.2: Vue de face du camion citerne

Dans une situation de renversement, le véhicule se balance par rapport au centre du roulis qui est typiquement placé sur la ligne centrale du véhicule à une hauteur entre la chaussée et le centre de masse du véhicule. Dans ce cas, les forces latérales sont transférées à partir de la masse non suspendue vers la masse suspendue du véhicule. La réduction de la distance entre le centre du roulis et le centre de la masse du véhicule améliore la stabilité de renversement du véhicule due à la réduction du décalage latéral du centre de masse. Concernant les pneus, le coefficient de dérive et la rigidité verticale sont deux propriétés du pneu qui influencent les forces transmises à la masse suspendue via le centre de roulis. Le niveau de l'amplification arrière d'un véhicule de combinaison due à une entrée d'angle de direction est influencé par la somme des valeurs de coefficient de dérive de tous les axes de la combinaison. De l'autre côté, la rigidité verticale du pneu est une propriété importante qui influence le seuil de renversement d'un véhicule. Un véhicule ayant des pneus avec rigidité verticale faible sera moins stable (roulis) comparativement à un véhicule qui a un pneu avec rigidité verticale élevée [19]. L'utilisation des pneus plus rigides réduira également l'amplification arrière.

2.1.6 Dimension géométrique du véhicule

Il existe plusieurs paramètres géométriques qui influencent le comportement dynamique des véhicules lourds tels que l'emplacement des essieux, la position du point d'articulation et la largeur de voie. Toutes les forces et les moments externes sont appliqués aux pneus et aux points de connexion entre les remorques. Par exemple, l'amplification arrière exprimée par la remorque dans une manœuvre brusque est fortement influencée par l'empâtement de la remorque. Dans ce cas, une augmentation de la longueur entre les axes réduira l'amplification arrière. De l'autre côté, la multiplication de la largeur de voie d'un axe par la charge verticale détermine le niveau

maximum du moment de roulis nécessaire pour éviter le renversement [15]. Par conséquent, sous une manoeuvre donnée, les véhicules avec la même charge mais dans différentes largeurs de voie pourraient générer une réponse dynamique totalement différente. Cependant, en règle générale les véhicules avec des largeurs de voie plus larges génèrent une plus grande stabilité de roulement.

2.2 Ballotement du liquide

Dans la dernière décennie le mouvement des liquides dans des récipients rigides a été le sujet de plusieurs études. Le besoin d'évaluation précis des charges en mouvement est exigé pour les véhicules aérospatiaux où les mouvements violents du combustible liquide dans les réservoirs peuvent affecter la structure [20]. Le mouvement du liquide dans les réservoirs a également suscité un intérêt considérable dans l'industrie du transport, y compris les camions citernes sur les routes et aussi dans le transport ferroviaire [21, 22, 23]. Dans des applications maritimes, l'effet du mouvement peut causer la perte de stabilité et des dommages structuraux [24]. Le mouvement du liquide dans un réservoir partiellement rempli est connu pour affecter la réponse directionnelle des véhicules d'une façon défavorable. Ceci peut causer des risques importants à la sûreté routière et à l'environnement, lorsque des marchandises liquides dangereuses sont transportées. Les caractéristiques dynamiques directionnelles et la stabilité de diverses configurations de véhicule avec charge fixe ont été intensivement rapportées dans la littérature. Cependant, peu d'études étaient dédiées aux camions citernes à cause de la complexité des interactions véhicule-liquide. En 1966, Abramson [20] a rassemblé dans un document une bonne partie des travaux effectués dans le passé d'une manière expérimentale et analytique. Il a conclu que le premier mode de la vibration du liquide dans n'importe quel réservoir rempli est le plus dominant. Il a soutenu sa conclusion en comparant la valeur de la masse m_2 qui simule le deuxième mode de vibration à

la masse m_1 qui simule le premier mode de vibration dans le même réservoir ellipsoïdal employé par Rattayya [25] et cité par Abramson [20], telle qu'illustrée par la figure (2.3). Il a également démontré que presque tous les chercheurs dans ce domaine ont préféré ne simuler que les deux premiers modes de vibration du liquide dans un récipient partiellement rempli.

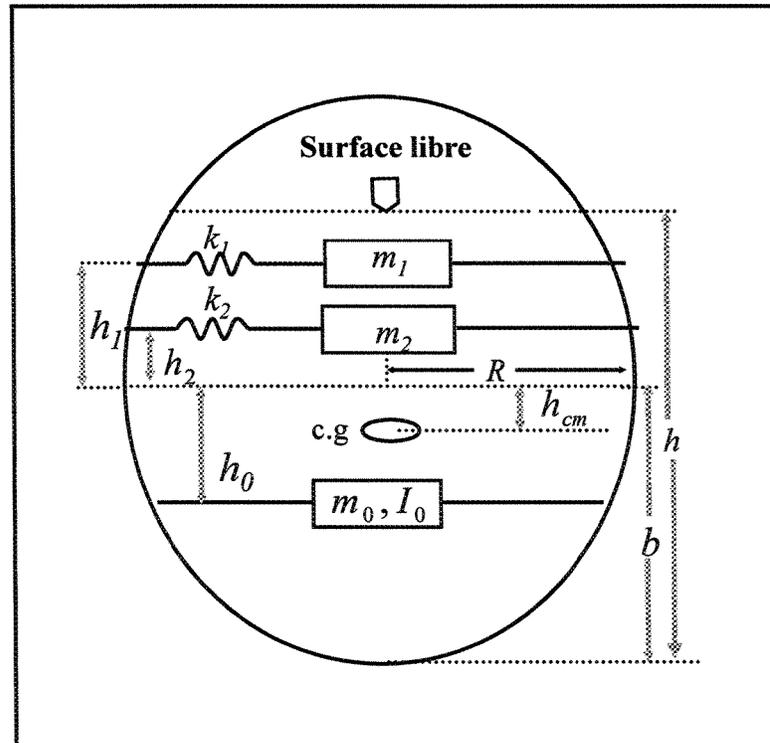


Figure 2.3: Modèle mécanique complexe équivalent pour un réservoir ellipsoïdal.

Plusieurs travaux utilisent le modèle de pendule, représenté par la figure (2.4) pour modéliser le mouvement du liquide. Ce modèle est composé d'une masse ponctuelle qui oscille comme un pendule sans friction soumis à une accélération externe [26, 27]. En 1993, Ranganathan [27] a simulé le mouvement du liquide (sloshing) dans un réservoir cylindrique avec un pendule régulier et une masse fixe. Ranganathan a mentionné que la masse du pendule devrait simuler les effets de ballottement (sloshing) du premier mode de la partie du liquide participant au mouvement. La masse fixe devrait simuler l'inertie et le poids de la partie restante du liquide. Pour obtenir

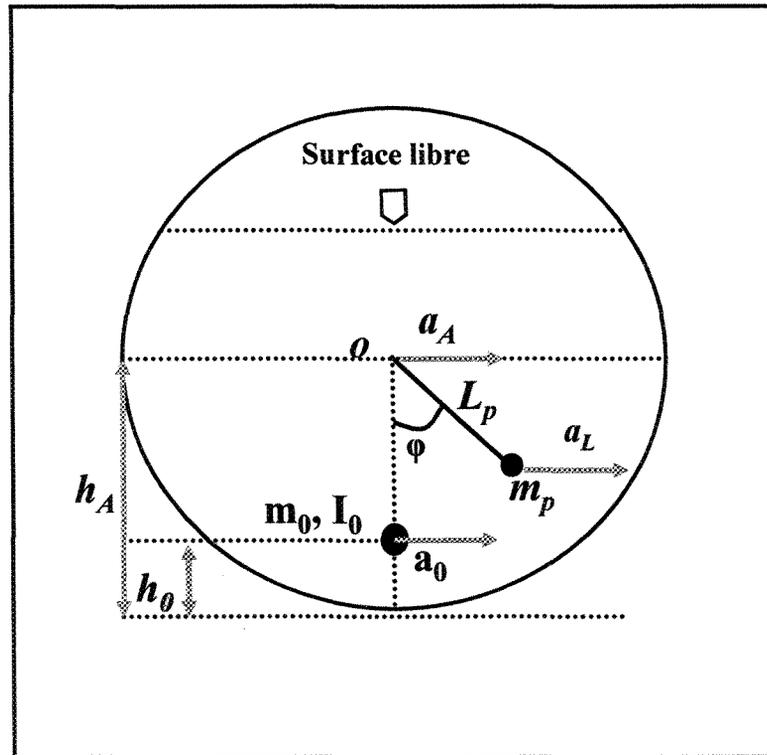


Figure 2.4: Modélisation du mouvement du liquide par l'approche du pendule.

les paramètres du pendule, il a adapté les équations décrivant les effets dynamiques des liquides donnés par Budiansky [28] et les équations qui décrivent l'effet dynamique d'un pendule avec une simple masse. Les limites de la stabilité directionnelle des camions citernes partiellement remplis sont connues pour être sensiblement inférieures à celles des véhicules à charge fixe dues aux interactions dynamiques uniques entre le véhicule et le ballonnement du liquide. Les camions citernes utilisés dans le transport de matière chimiques rencontrent souvent un remplissage partiel dû à la densité variable des produits et des lois régissant les limites des charges sur les essieux. Également, ceux utilisés dans le transport de carburant rencontrent des conditions de remplissage partiel pendant les itinéraires de la livraison. Le mouvement de la charge du liquide augmente de manière significative avec l'augmentation du poids du véhicule et les dimensions. Le ballonnement du liquide couplé à la dynamique du véhicule lourd peut réduire d'une manière significative la stabilité longitudinale et latérale et il génère des

efforts élevés sur la structure de la citerne [29]. La stabilité du camion citerne est généralement faible à cause du mouvement du liquide. Ceci, réduira la valeur du seuil de renversement par rapport aux camions transportant une charge fixe.

La solution simultanée du couplage solide-liquide a été une tâche difficile pour les chercheurs. Plusieurs études ont été réalisées aux cours des dernières années pour expliquer le comportement de ces systèmes couplés. Tout d'abord, l'absence d'un modèle analytique qui modélise le mouvement du liquide a stimulé la recherche afin d'explorer l'effet du ballonnement du liquide dans les récipients en utilisant des expériences empiriques plutôt que des simulations traditionnelles. En 1966, McCarty et al ont étudié les fréquences du ballonnement "slosh" longitudinal dans des réservoirs cylindriques. Par contre, les dimensions des réservoirs étaient réduites en comparaison avec celles utilisées dans le transport des liquides et les extrapolations de ses résultats étaient ainsi limitées [30]. Ensuite, les chercheurs ont développé des modèles simplifiés pour simuler l'effet du ballonnement et l'interaction avec les systèmes de corps rigides. Dans la dernière décennie, peu de modèles ont été développés pour simuler l'effet du ballonnement sur le comportement dynamique des véhicules citernes pour différentes manoeuvres, tel que le mouvement de freinage ou le mouvement dans une courbe. De plus, des manoeuvres de freinage et de rotation et l'évaluation des facteurs de stabilité de renversement des véhicules portant la cargaison liquide doivent également être considérés. Rakheja et al ont proposé un modèle plan de roulis pour étudier le décalage de la charge et la stabilité des camions citernes. Le modèle utilise le moment de roulis pour déterminer le seuil de renversement des camions citernes avec différentes sections: circulaire, elliptique et ovale modifiée [31, 32]. Afin de déterminer l'effet du ballonnement et de prévoir également la stabilité de renversement des véhicules transportant des liquides, des simulations précises doivent être réalisées. Rumold [33] a employé l'algorithme multigrille pour résoudre la discrétisation des équations de Navier-Stokes (2D) pour analyser les interactions du ballonnement du liquide avec le véhicule. Dans

cette étude, un modèle bidimensionnel a été considéré pour résoudre les équations couplées du système solide-liquide.

2.2.1 Effet du taux de remplissage

La plupart des études concluent que le taux de remplissage affecte le mouvement dynamique du liquide et ainsi le comportement dynamique de la cargaison liquide de façon significative. Budiansky [28] a analysé le ballottement du liquide dans les canaux circulaires et les réservoirs sphériques partiellement remplis soumis à une accélération latérale de type harmonique de petite amplitude. L'étude a évalué les fréquences naturelles et les modes propres sous l'influence du taux de remplissage en utilisant la théorie d'écoulement potentiel. Il a démontré que la première fréquence naturelle du ballottement augmente avec l'augmentation du niveau du taux de remplissage. L'étude a calculé les forces exercées sur les cloisons du récipient et il a conclu que le taux de remplissage est un facteur de contribution important. L'étude de Budiansky a mené à beaucoup d'analyses sur le principe fondamental des fréquences du ballottement et le comportement du ballottement du liquide dans les citernes partiellement remplies [20, 29, 34]. L'étude a suggéré que la fréquence fondamentale du ballottement du liquide dans les camions citernes partiellement remplis se situe entre 0.5–0.6 Hz. Cette fréquence peut se situer à proximité de la fréquence de l'angle de direction dans le cas d'une manoeuvre ce qui peut causer la résonance et le décalage dynamique excessif de la charge. Bauer [34] a étudié la stabilité des véhicules spatiaux, spécifiquement l'influence de la fréquence naturelle du carburant à l'intérieur du récipient (réservoir). L'étude a modélisé le liquide par un système mécanique équivalent qui est basé sur la théorie potentielle d'écoulement pour étudier le ballottement du liquide à l'intérieur de la citerne cylindrique. L'objectif était d'identifier la meilleure géométrie de la citerne qui augmente la fréquence du ballottement ou qui diminue l'oscillation du liquide à

l'intérieur du réservoir. L'influence de la hauteur du centre de masse du liquide sur les forces hydro dynamiques est en fonction du taux de remplissage. Il a conclu que la deuxième masse modale pourrait être considérable à bas niveau de remplissage. Ranganathan [35] a développé une approche semblable pour modéliser le ballonnement du liquide à l'intérieur d'un réservoir circulaire horizontal partiellement rempli basé sur l'analogie du pendule. Le modèle a été couplé au modèle dynamique du véhicule. Les réponses dynamiques de véhicules citernes remplis à 50 % et à 70 % ont été évaluées sous l'excitation d'une accélération latérale sinusoïdale. La comparaison des réponses avec celles d'un véhicule rigide de cargaison équivalent a indiqué que les réponses moyennes d'un véhicule citerne partiellement rempli sont considérablement plus grandes que celles d'un véhicule avec une charge fixe. La fréquence de réponse s'est avérée près de la fréquence naturelle du liquide indépendamment du taux de remplissage. Dans ce cas, l'angle maximal du pendule s'est approché près de 90 degrés. La formulation du modèle a été modifiée pour expliquer les grands angles sous l'excitation sinusoïdale. Salem [36] a proposé une analogie mécanique du ballonnement du liquide à l'intérieur d'un réservoir de section elliptique comme pendule de trammel assumant de petits angles d'oscillations telle qu'illustrée par la figure (2.5). La fréquence naturelle de l'oscillation est obtenue par analyse linéaire. Celle-ci a été comparée avec les résultats obtenus à partir des logiciels de modélisation numériques tels que LS-DYNA et FLUENT. Les résultats ont indiqué une bonne concordance raisonnable avec les fréquences obtenues à partir de LS-DYNA et de FLUENT. Les résultats obtenus pour un réservoir de section circulaire ont indiqué une bonne concordance avec ceux rapportés par Ranganathan [27], pour des faibles amplitudes d'accélération.

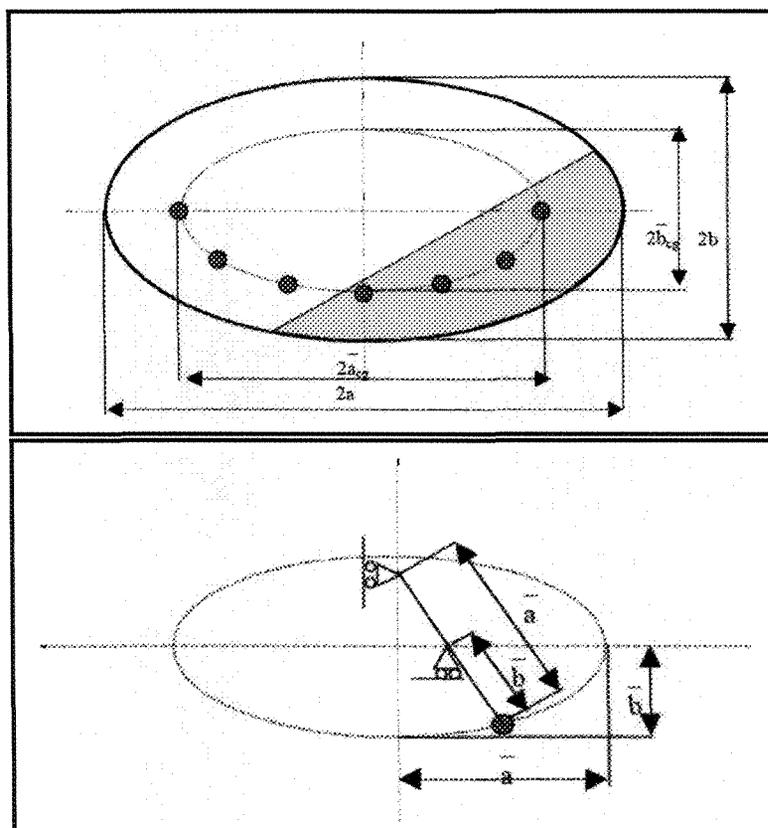


Figure 2.5: Modèle de pendule trammel pour une citerne de section elliptique.

2.2.2 Amplitude de l'accélération

L'amplitude du ballonnement du liquide est fortement influencée par l'amplitude de l'accélération longitudinale et latérale du véhicule. En analysant le mouvement de propulsion dans un récipient cylindrique, Bauer [34] a démontré que l'amplitude du moment due aux forces hydrauliques est fonction de l'amplitude d'excitation. L'effet de l'amplitude d'excitation sur la réponse du liquide sur les cloisons du réservoir caractérisée, par les forces et les moments, ont été également étudiés et considérés par la NASA [37] comme des critères de conception des véhicules spatiaux. L'influence directe de l'amplitude de l'accélération latérale sur le seuil de renversement statique des camions citernes de section circulaire, elliptique et ovale modifiée est également étudiée

avec des modèles simplifiés basés sur l'équilibre du moment [31]. Le transfert latéral de la charge du liquide provoqué par une excitation latérale élevée a eu comme conséquence le renversement du véhicule. Des analyses semblables sous des accélérations longitudinales, provoquées lors du freinage, ont indiqué des variations excessives de la charge du liquide vers l'avant qui influencent les distances d'arrêts du véhicule [38]. L'étude du modèle de pendule trammel [36] a indiqué que l'amplitude de l'accélération latérale caractérisée par les forces horizontale, verticale et le moment de roulis influence directement la réponse du mouvement du liquide.

2.2.3 Géométrie de la citerne

La fréquence du ballottement et l'amplitude des forces et des moments exercés par le liquide sur la structure de la citerne sont fortement influencés par les dimensions de la géométrie et le design des cloisons de la citerne [34]. Peu de chercheurs ont essayé de développer et analyser des modèles analytiques afin de démontrer l'efficacité des cloisons latérales dans des modèles de récipients horizontaux bidimensionnels de section rectangulaire. Ces modèles sont développés pour illustrer l'influence des cloisons pour atténuer le ballottement du liquide [39, 40]. Dans d'autres cas la citerne était de forme cylindrique verticale ou horizontale [41, 42, 43]. La majorité de ces études ont exploré le rôle des cloisons et les murs de séparation par l'intermédiaire des moyens expérimentaux. L'analyse de différentes citernes de section circulaire et rectangulaire a démontré clairement l'influence de la géométrie sur la fréquence et les moments exercés par le ballottement du liquide sur la structure de la citerne [44, 45]. Ces études concluent que les chicanes (cloisons) ont tendance à réduire le décalage longitudinal de la charge due au ballottement du liquide. L'effet des chicanes sur la distorsion de la surface libre a été étudié en considérant une citerne de section rectangulaire partiellement remplie d'huile sujet à une oscillation forcée. Une technique numérique a été adoptée pour

résoudre les équations du modèle. L'étude a conclu que les chicanes réduisent d'une façon significative le comportement des oscillations du liquide en réduisant la hauteur des vagues. Les résultats ont démontré aussi que les dimensions des chicanes influencent le comportement du ballonnement du liquide. Une augmentation de la hauteur des chicanes diminue la hauteur des vagues, tandis qu'un grand trou dans les chicanes augmente les vagues [40]. L'influence de la géométrie sur le comportement dynamique des camions citernes articulés a été considérée également dans l'étude de Ranganathan [46]. Quatre configurations de citernes de section circulaire, ovale modifiée, carré modifié et elliptique ont été étudiées. La citerne a été intégrée dans un modèle plan du véhicule incluant le mouvement de roulis. Il démontre l'effet de la géométrie sur le décalage de la charge sous l'influence de différentes amplitudes d'accélération latérale, modélisées par impulsion à échelon, en admettant qu'il transporte la même charge. L'étude conclut que la géométrie influence fortement la performance statique du mouvement de roulis du véhicule. La citerne de section ovale modifiée présente une faible performance de stabilité directionnelle. En raison de l'influence significative de la section transversale de la citerne sur le seuil de renversement du véhicule, Kang [32] a optimisé la forme de la citerne afin d'obtenir une géométrie optimale. Il a proposé pour l'optimisation une coupe générique d'une citerne comportant huit secteurs circulaires. Des fonctions objectives basées sur le seuil statique de renversement et le décalage de la charge dans le plan du roulis ont été formulées afin de les minimiser. Ces fonctions sont sujettes aux contraintes imposées au poids de la citerne, au périmètre et au volume de la citerne. L'étude a proposé deux sections transversales optimales, différentes pour des gammes de taux de remplissage de 50 – 70% et de 70 – 90%. Ces sections ont un seuil d'accélération de renversement plus élevé comparativement à celles de sections circulaire, elliptique et ovale modifiée.