

Chapitre 6

Analyse dynamique du système complet véhicule-citerne

6.1 Introduction

La stabilité et la réponse dynamique des camions citernes partiellement remplis sont fortement influencées par le mouvement de la charge du liquide dans la citerne. Ce phénomène est associé au décalage de la charge qui peut causer l'instabilité et/ou la perte de contrôle directionnelle du véhicule. Lors des manoeuvres directionnelles ou de freinage, le transfert de la charge dans les directions longitudinale, latérale, et verticale est affecté par la force de freinage, l'angle de direction et la vitesse du véhicule. La majorité des études traitent seulement cet effet dans le cas d'un véhicule transportant une charge fixe. Cependant, peu d'études analysent le mouvement du ballonnement du liquide dans la citerne. Un des objectifs de ce travail est d'étudier en profondeur cet aspect, en l'occurrence l'étude de l'effet du comportement dynamique du liquide sur le véhicule. Comme nous l'avons mentionné dans les chapitres précédents, le système est composé de plusieurs sous-systèmes couplés et programmés dans simulink/matlab. Les équations du mouvement doivent être résolues simultanément telle que représenté à la figure (6.1). L'approche est très commode puisque n'importe quelle modification dans la configuration du véhicule pourrait être actionnée d'une manière simple dans

l'interface simulink. La procédure pour résoudre les équations couplées du liquide et du véhicule est présentée à la figure (6.2). Afin de montrer comment ces sous-systèmes sont reliés, nous admettons qu'à l'instant t , les paramètres d'entrées à un sous-système sont connus. Le choix d'un ordre est donc artificiel basé sur la considération de l'algorithme. Le modèle du liquide est le premier à être appliqué. A l'instant t nous admettons également que nous connaissons les sorties du modèle du véhicule (les accélérations) qui seront les entrées du modèle du liquide. Dans ce cas les paramètres de sortie du modèle du liquide seront utilisés comme les entrées du modèle du véhicule à un retard Δt très petit. Ces sorties sont les coordonnées du centre de la masse du liquide et la variation de la matrice d'inertie. Ces itérations continuent jusqu'à ce que le temps désiré soit atteint. L'équation de contrainte sera soit d'appliquer un couple de freinage afin d'étudier le décalage de la charge vers l'avant, soit un angle de direction afin d'étudier la stabilité et la résistance au renversement. Dans cette étude, nous traitons seulement la stabilité directionnelle. L'excitation sera représentée par un angle de direction lors des manoeuvres directionnelles.

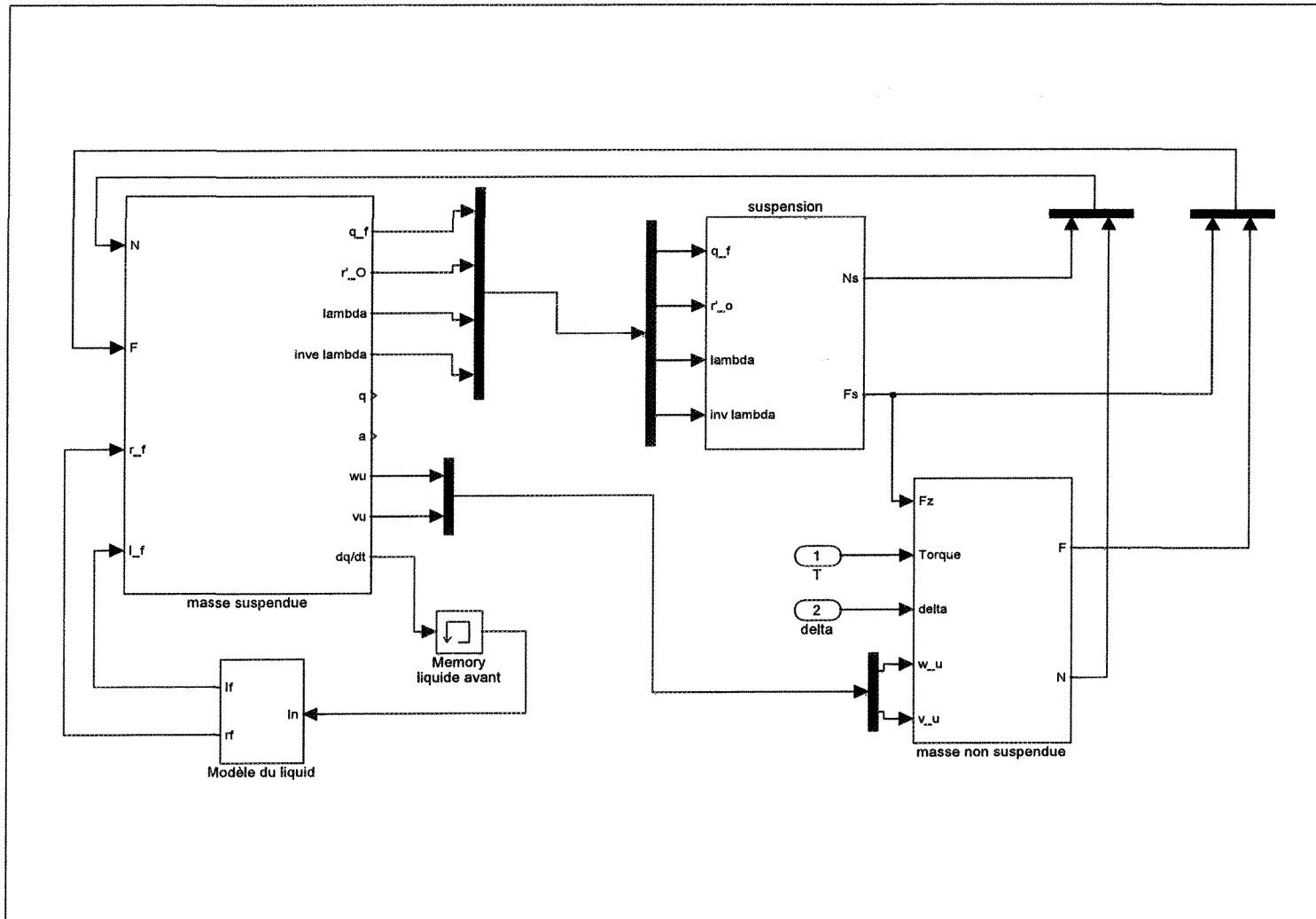


Figure 6.1: Intéraction liquide-véhicule.

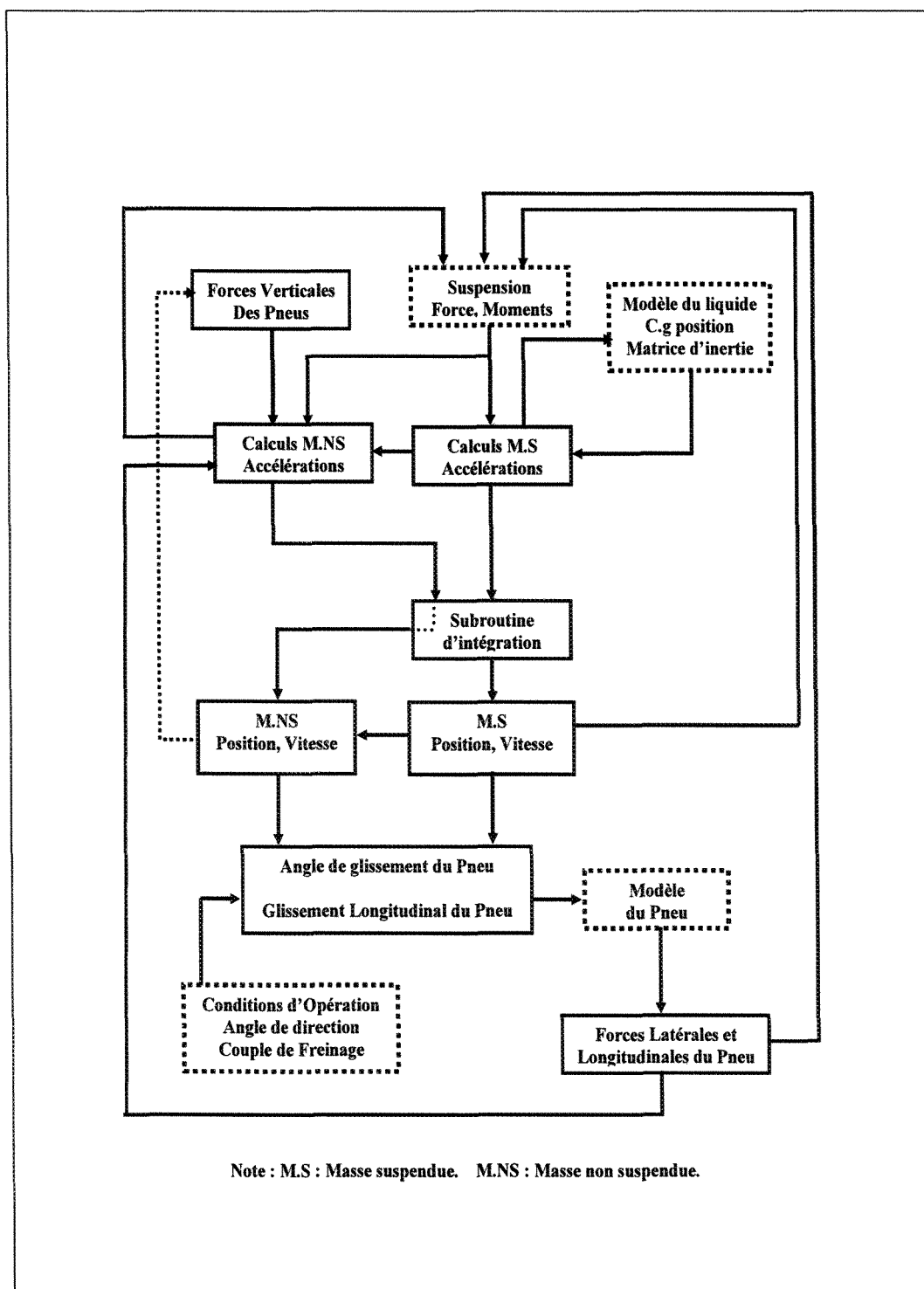


Figure 6.2: Organigramme de la solution du système.

6.2 Critères d'évaluation de la réponse dynamique

Les camions citernes rencontrent souvent des conditions de remplissage partiel lors de la livraison du liquide transporté. Un autre cas de remplissage partiel est dû à la densité du liquide qui est variable tels que les produits chimiques. Avec les règlements régissant les limites des charges sur les essieux et la période du dégel au Québec, cette situation est souvent rencontrée. Tel que décrit dans les chapitres précédents, nous utilisons les mêmes taux de remplissage partiel (50% et 70%). Ces taux sont choisis pour simuler et comparer entre un véhicule-citerne et un véhicule transportant une charge fixe équivalente. L'évaluation de la réponse dynamique des véhicules est fréquemment évaluée en termes de déplacement, vitesse et accélération. Un autre facteur important pour mesurer la performance de roulis (stabilité directionnelle) qui est connu par le coefficient de transfert de la charge latérale (*LTR*) est étudié [59, 60, 62, 76]. Ce facteur est très utile pour évaluer le pourcentage de décalage de la charge. Il est défini comme le rapport instantané en valeur absolue de la différence de la charge entre le côté droit des roues et gauche ainsi que la charge totale supportée par les axes. Il faut noter que l'axe avant produit une réponse de roulis élevée. Donc, il est exclu du calcul de ce coefficient.

$$LTR = \sum_{j=1}^k \frac{|F_{zrj} - F_{zlj}|}{F_{zrj} + F_{zlj}} \quad (6.1)$$

Avec: k le nombre d'axe.

6.3 Réponse dynamique directionnelle du véhicule

La performance de la stabilité directionnelle du véhicule d'unité et articulé sera évaluée lors de différentes manoeuvres directionnelles. Ces manoeuvres sont représentées par une boucle ouverte pour le mouvement dans une courbe et à boucle fermée pour le mouvement de changement de voie simple ou double. Ces mouvements sont illustrées par les figures (6.3 et 6.4).

Pour une citerne de section circulaire, la théorie de Budiansky [28] reporte que la fréquence naturelle du ballonnement du liquide pour les taux de remplissage 40 %, 60 % et 80 % sont respectivement égales à 0.55 Hz , 0.6 Hz et 0.72 Hz . Wink a suggéré que la fréquence maximale de l'angle de direction ne doit pas dépassé 0.3 Hz pour le mouvement de changement de voie simple et 0.26 Hz pour le mouvement de changement de voie double [9]. Donc, une fréquence qui dépasse ces limites peut causée la résonance du ballonnement du liquide. Dans ce cas, l'hypothèse que la vitesse de la surface libre est nulle imposée lors de développement du modèle analytique sera plus valide. Pour une vitesse de 90 km/h , nous avons choisi un angle de direction maximum de (1.5 deg) pour les deux mouvements telle qu'illustrée par la figure (6.4).

La stabilité directionnelle sera évaluée en fonction du coefficient de décalage de la charge latérale (LTR), l'angle de roulis et l'accélération latérale de la masse suspendue. Ces paramètres affectent directement la stabilité directionnelle.

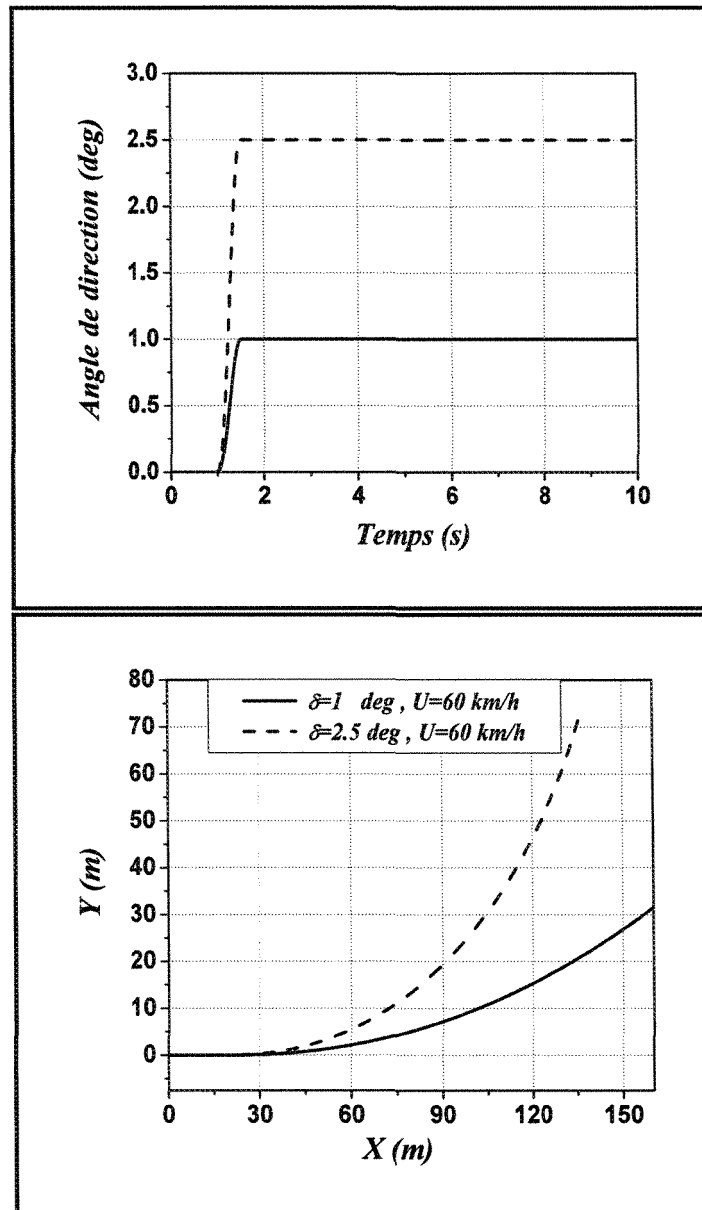
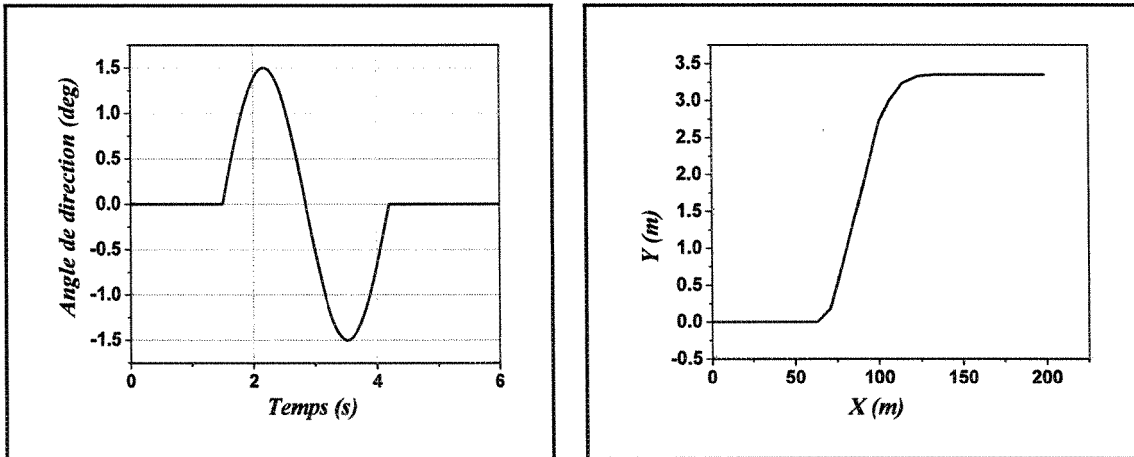
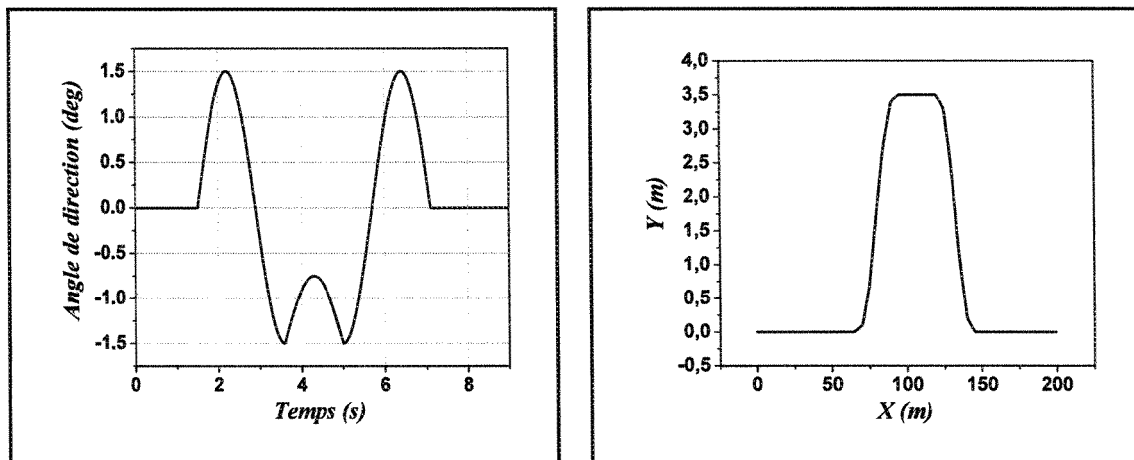


Figure 6.3: Mouvement dans une courbe.



a) Manoeuvre de changement de voie simple



b) Manoeuvre de changement de voie double.

Figure 6.4: Angle de direction et la trajectoire désirée.

Afin d'étudier l'effet de la hauteur du centre de masse, nous avons utilisé la même masse pour les deux cas du taux de remplissage. Nous avons varié seulement la densité du liquide. Deux liquides sont retenus en l'occurrence, l'huile domestique avec une densité 960 kg.m^{-3} pour un taux de remplissage de 70% et l'acide industriel de densité de 1344 kg.m^{-3} pour un taux de remplissage de 50%. La citerne est de section circulaire de diamètre 2.1 m et de longueur de 4.5 m pour le cas du véhicule d'unité et de longueur de 12.2 m pour le cas du véhicule articulé. Les autres paramètres des véhicules sont les mêmes tels que présentés dans les tableaux (5.1 et 5.2).

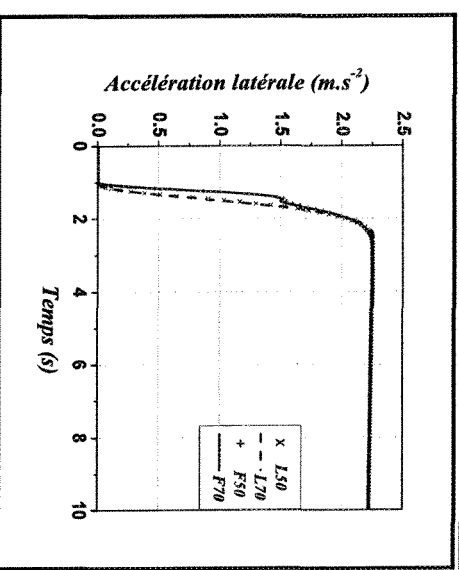
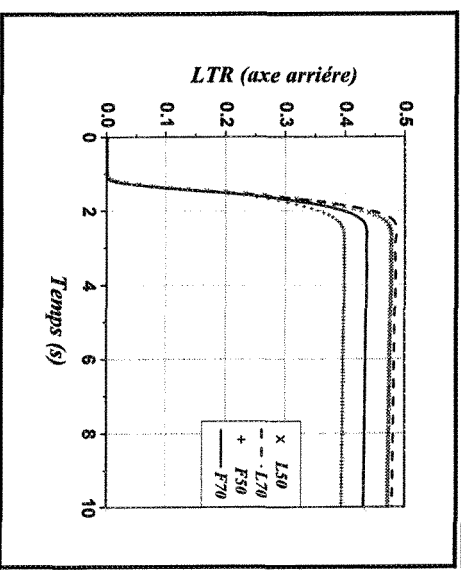
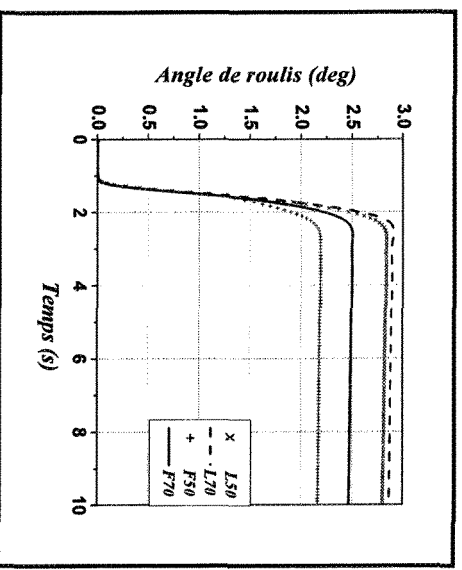
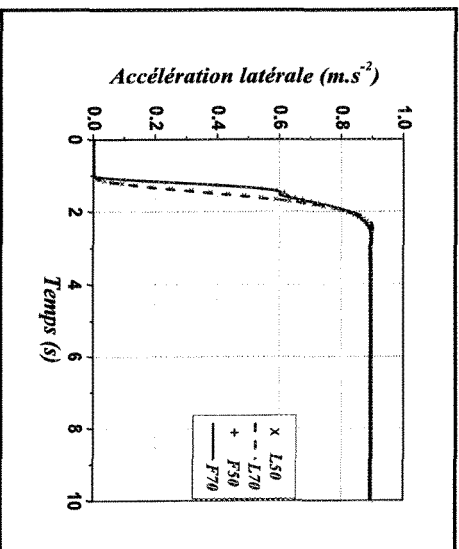
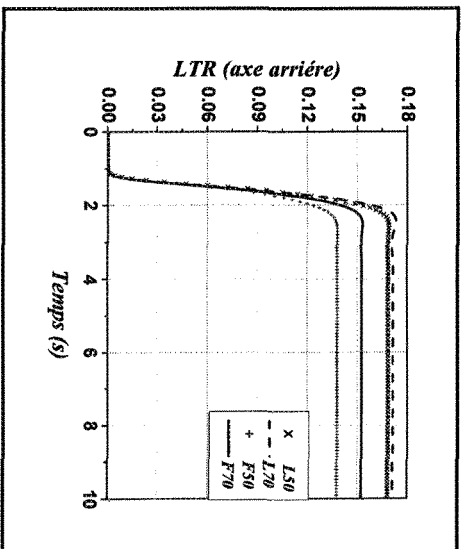
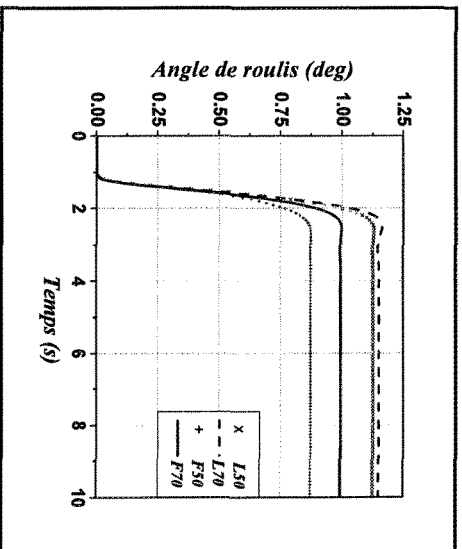
Pour simplifier la notation dans les graphiques de comparaison, nous avons introduits les indices suivants.

- L50 : Charge du liquide à 50 % du taux de remplissage.
- F50 : Charge fixe équivalente à 50 % du taux de remplissage.
- L70 : Charge du liquide à 70 % du taux de remplissage.
- F70 : Charge fixe équivalente à 70 % du taux de remplissage.
- L50, U60: Charge du liquide à 50 % du taux de remplissage avec une vitesse $U = 60 \text{ km/h}$.
- F50, U60: Charge fixe équivalente à 50 % du taux de remplissage avec une vitesse $U = 60 \text{ km/h}$.
- L70, U90: Charge du liquide à 70 % du taux de remplissage avec une vitesse $U = 90 \text{ km/h}$.
- F70, U90: Charge fixe équivalente à 70 % du taux de remplissage avec une vitesse $U = 90 \text{ km/h}$.

6.3.1 Cas d'un véhicule d'unité

Mouvement dans une courbe

La figure (6.5) illustre la comparaison entre un véhicule d'unité transportant une charge liquide (**CL**) et un véhicule d'unité transportant une charge fixe équivalente (**CF**). Le véhicule est sujet à une excitation d'impulsion à échelon ($\delta = 1 \text{ deg}$ et $\delta = 2.5 \text{ deg}$) avec une vitesse constante ($U = 60 \text{ km/h}$). Nous observons qu'à faible angle de direction ($\delta = 1 \text{ deg}$), la différence entre les deux taux de remplissage dans le cas du véhicule CF est faible. Cependant, nous enregistrons une différence du décalage de la charge en faveur du liquide indépendamment du taux de remplissage. D'une façon générale, la réponse reste assez faible due aux conditions d'excitations faibles. Dans le cas de l'angle de direction de ($\delta = 2,5 \text{ deg}$) avec la même vitesse, nous observons une augmentation de décalage de la charge. Cette augmentation atteint 10% dans le cas du taux de remplissage de 50% et 5% dans le cas du taux de remplissage de 70% en faveur du cas CL par rapport au cas CF. L'accélération latérale reste indépendante de la nature de la charge. Elle passe de $a_y = 0.8m.s^{-2}$ dans le cas de l'angle de direction de ($\delta = 1 \text{ deg}$) à $2.25m.s^{-2}$ dans le cas de l'angle de direction de ($\delta = 2.5 \text{ deg}$).

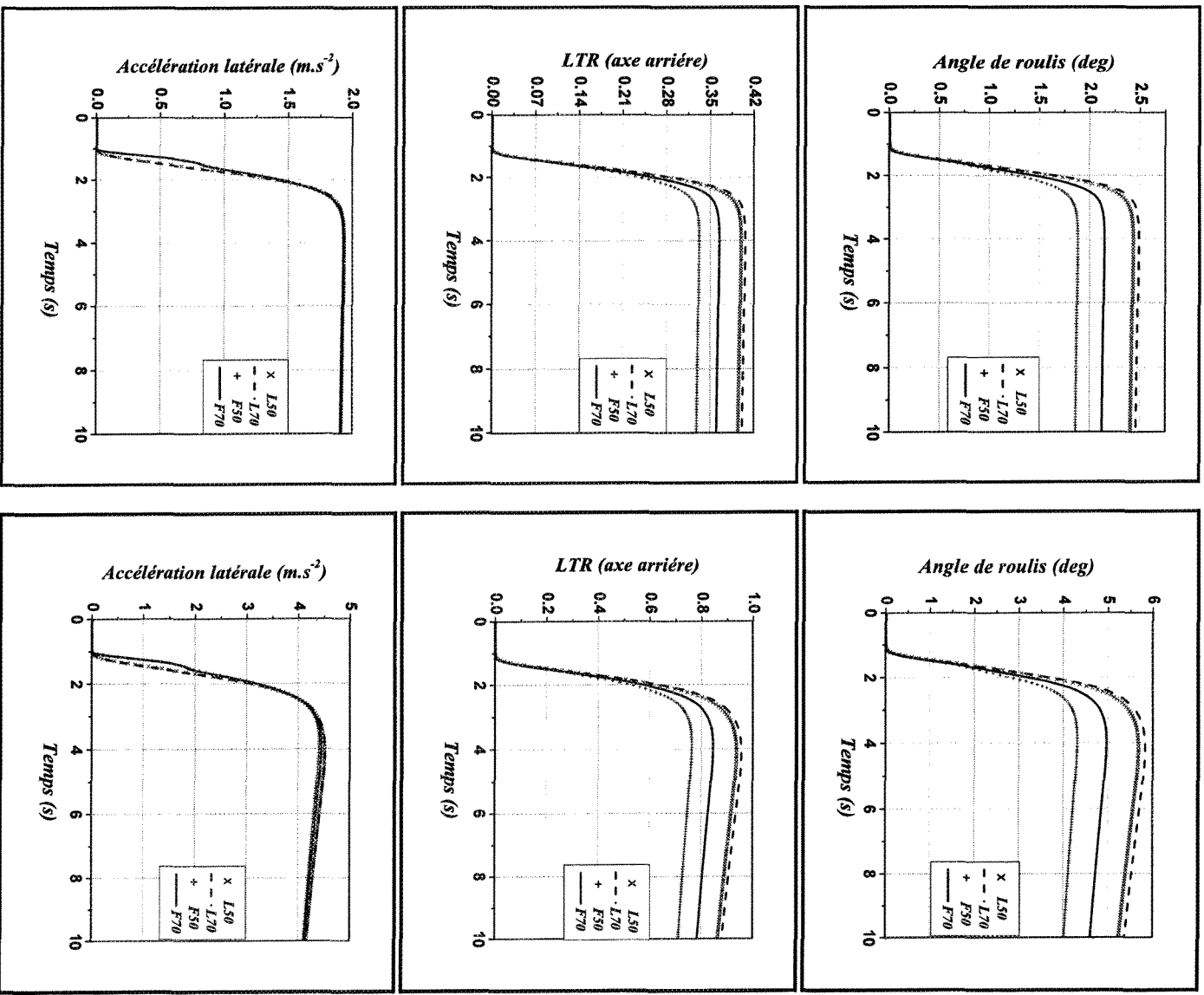


($\delta = 1 \text{ deg}$)

($\delta = 2.5 \text{ deg}$)

Figure 6.5: Influence de l'angle de direction sur la réponse directionnelle du véhicule d'unité ($U = 60 \text{ km/h}$).

Pour approfondir l'étude de la limite de stabilité, nous avons augmenté l'angle de direction en utilisant une vitesse d'amplitude constante 90 km/h telle qu'illustrée par la figure (6.6). Nous observons que la différence du décalage du cas CL par rapport au cas CF est de l'ordre de 10% dans le cas de l'angle de direction de ($\delta = 1 \text{ deg}$) et de 30% pour un taux de remplissage de 50% avec un angle de direction de ($\delta = 2.25 \text{ deg}$). Cependant, ce décalage est réduit jusqu'à 20% dans le cas du taux de remplissage de 70%. Après plusieurs simulations, nous avons conclu que pour les deux cas de remplissage avec une vitesse constante de 90 km/h , l'angle de direction maximum est ($\delta = 2.25 \text{ deg}$). Dans cette condition le coefficient du décalage du cas CL est presque égal à $LTR = 0.95$ et l'accélération latérale est égale à $a_y = 4.5 \text{ m.s}^{-2}$. Dans ce cas, si nous dépassons cet angle max les roues se souleveront et peuvent causés le renversement. Cependant pour le cas CF, le coefficient du décalage lateral est environ $LTR = 0.7$.



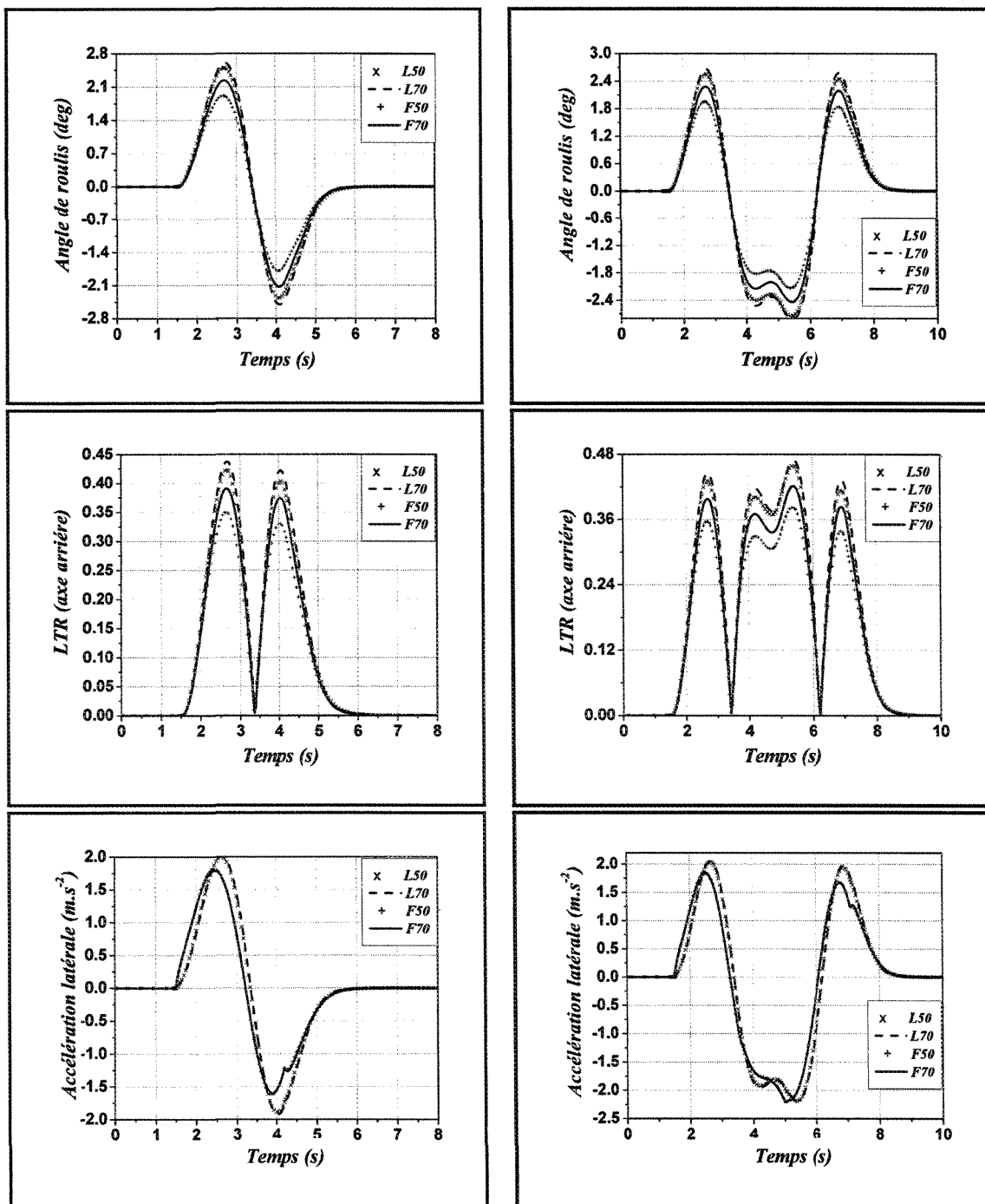
($\delta = 1 \text{ deg}$)

($\delta = 2.25 \text{ deg}$)

Figure 6.6: Influence combinée de la vitesse et l'angle de direction sur la réponse directionnelle du véhicule-d'unité ($U = 90 \text{ km/h}$).

Mouvement de changement de voie simple et double

La figure (6.7) représente la comparaison entre le véhicule CL et un véhicule CF lors des manoeuvres de changement de voie simple et double avec une vitesse d'amplitude constante (90 km/h). Les mêmes paramètres utilisés précédemment sont considérés pour cette comparaison. Lors du mouvement de changement de voie simple (figure 6.7-(a)), nous observons que nous avons approximativement 10% de différence de décalage de la charge entre le cas CL et le cas CF pour un taux de remplissage de 50%. Cependant, il est seulement de l'ordre de 5% pour le taux de remplissage de 70%. Nous remarquons également que nous avons les mêmes résultats lors de changement de voie double (figure 6.7-(b)). Pour l'angle de roulis la différence est faible. Une différence de l'accélération latérale de l'ordre de 0.5 m.s^{-2} a été enregistrée en faveur du véhicule CL pour les deux cas de manoeuvres, changement de voie simple ou double.



(a) changement de voie simple.

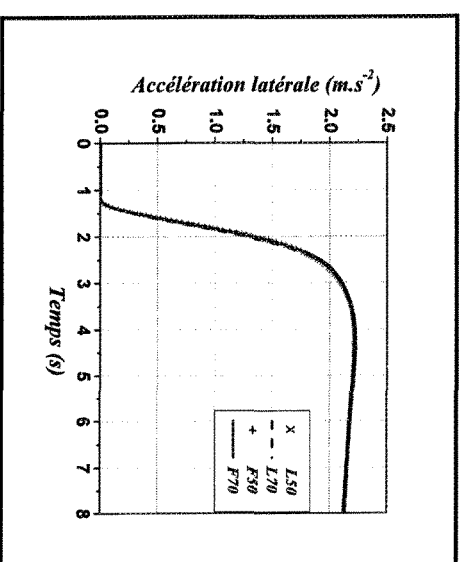
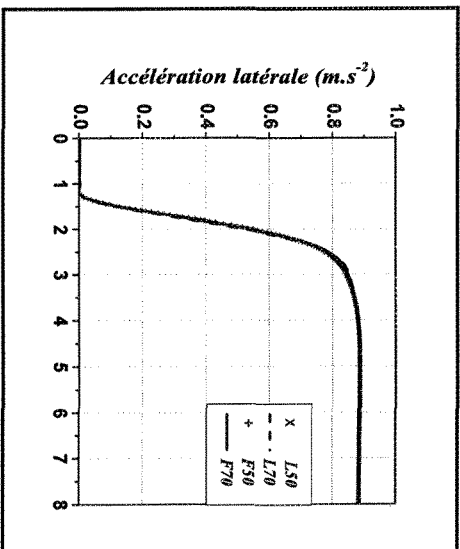
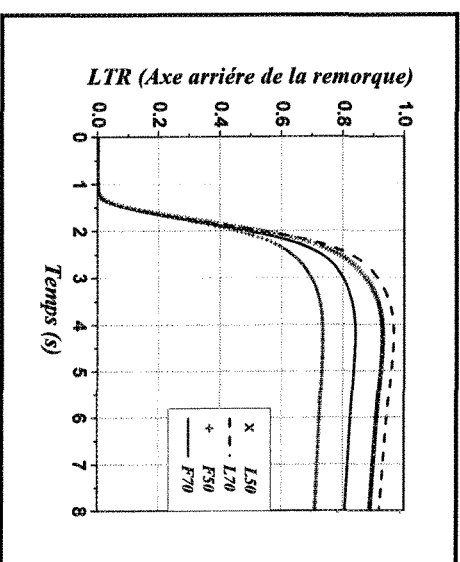
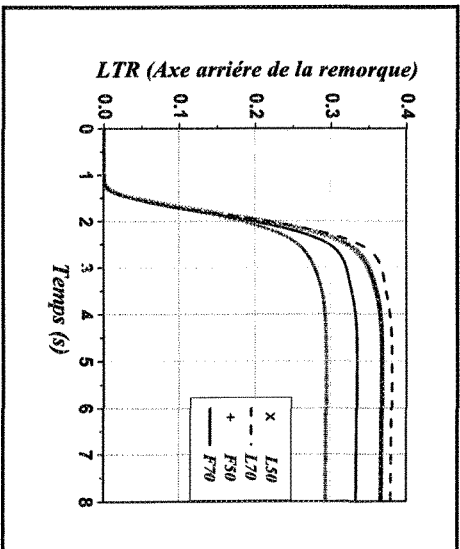
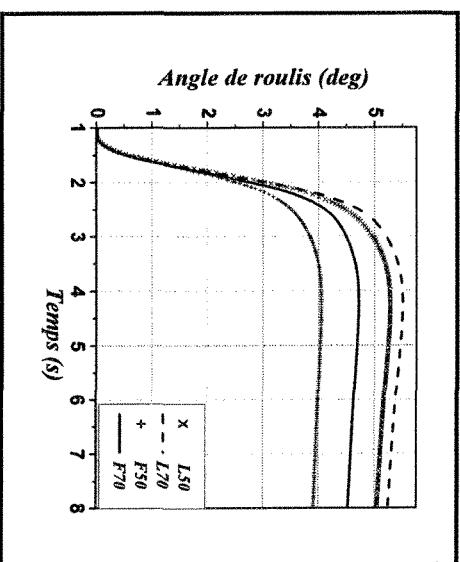
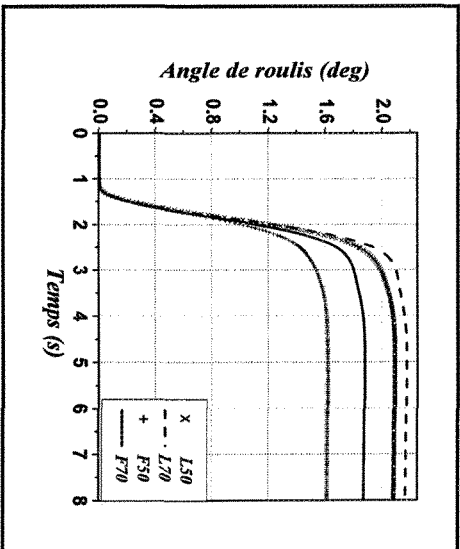
(b) changement de voie double.

Figure 6.7: Influence combiné de la vitesse et l'angle de direction sur la réponse directionnelle du véhicule-d'unité ($U = 90 \text{ km/h}$).

6.3.2 Cas d'un véhicule articulé

Mouvement dans une courbe

Les paramètres considérés pour cette comparaison sont : le coefficient du décalage de la charge (LTR), l'angle de roulis et l'accélération latérale de la remorque-citerne. La figure (6.8) illustre la comparaison entre le véhicule articulé CL et un véhicule articulé CF. Le véhicule est sujet à une excitation d'impulsion à échelon ($\delta = 1 \text{ deg}$ et $\delta = 2.5 \text{ deg}$) avec une vitesse d'amplitude constante (60 km/h). Pour un angle de direction ($\delta = 1 \text{ deg}$) nous remarquons que pour toutes les courbes, la différence du décalage entre les cas CL et CF est plus significative pour un taux de remplissage de 50% que pour un taux de 70%. Cette différence est due à l'espace vide dans le cas du taux de remplissage de 50% car cet espace favorise le ballonnement du liquide. D'une façon générale, la réponse reste assez faible due aux conditions d'excitations faibles. Dans le cas de l'angle de direction de ($\delta = 2,5 \text{ deg}$) avec la même vitesse constante, nous observons une augmentation de la différence du décalage entre les cas CL et CF. L'augmentation de la différence atteint 20% dans le cas du taux de remplissage de 50% et 10% dans le cas du taux de remplissage de 70% en faveur du cas CL comparé au cas CF. Dans ces conditions nous enregistrons que le coefficient du décalage du cas CL est égal à $LTR = 0.95$, l'accélération latérale est égale à $a_y = 2.25 \text{ m.s}^{-2}$ et l'angle de roulis est de l'ordre de ($\phi = 5.5 \text{ deg}$). Donc, nous sommes à la limite de la stabilité.



($\delta = 1 \text{ deg}$)

($\delta = 2.5 \text{ deg}$)

Figure 6.8: Influence de l'angle de direction sur la réponse directionnelle du véhicule-articulé ($U = 60 \text{ km/h}$).

La figure (6.9) représente l'effet de la vitesse pour un angle de direction constant ($\delta = 1 \text{ deg}$). Deux vitesses de 60 km/h et 90 km/h sont choisies pour la comparaison. Nous observons que la différence du décalage entre le cas CL et le cas CF est plus significative pour la vitesse de 90 km/h que pour la vitesse de 60 km/h . Cette augmentation de vitesse $\Delta U = 30 \text{ km/h}$ cause une augmentation de décalage de la charge latérale de l'ordre de 50 % pour le cas CL et 40 % pour le cas CF. Nous concluons qu'avec un angle de direction ($\delta = 1 \text{ deg}$) et une vitesse constante de 90 km/h le coefficient du décalage est approximativement égal à $LTR = 0.9$ pour le cas CL. Dans une telle situation, si nous dépassons cette valeur maximale de l'angle de direction ($\delta = 1 \text{ deg}$), le renversement sera inévitable. Cependant, pour le véhicule CF le coefficient est environ $LTR = 0.7$.

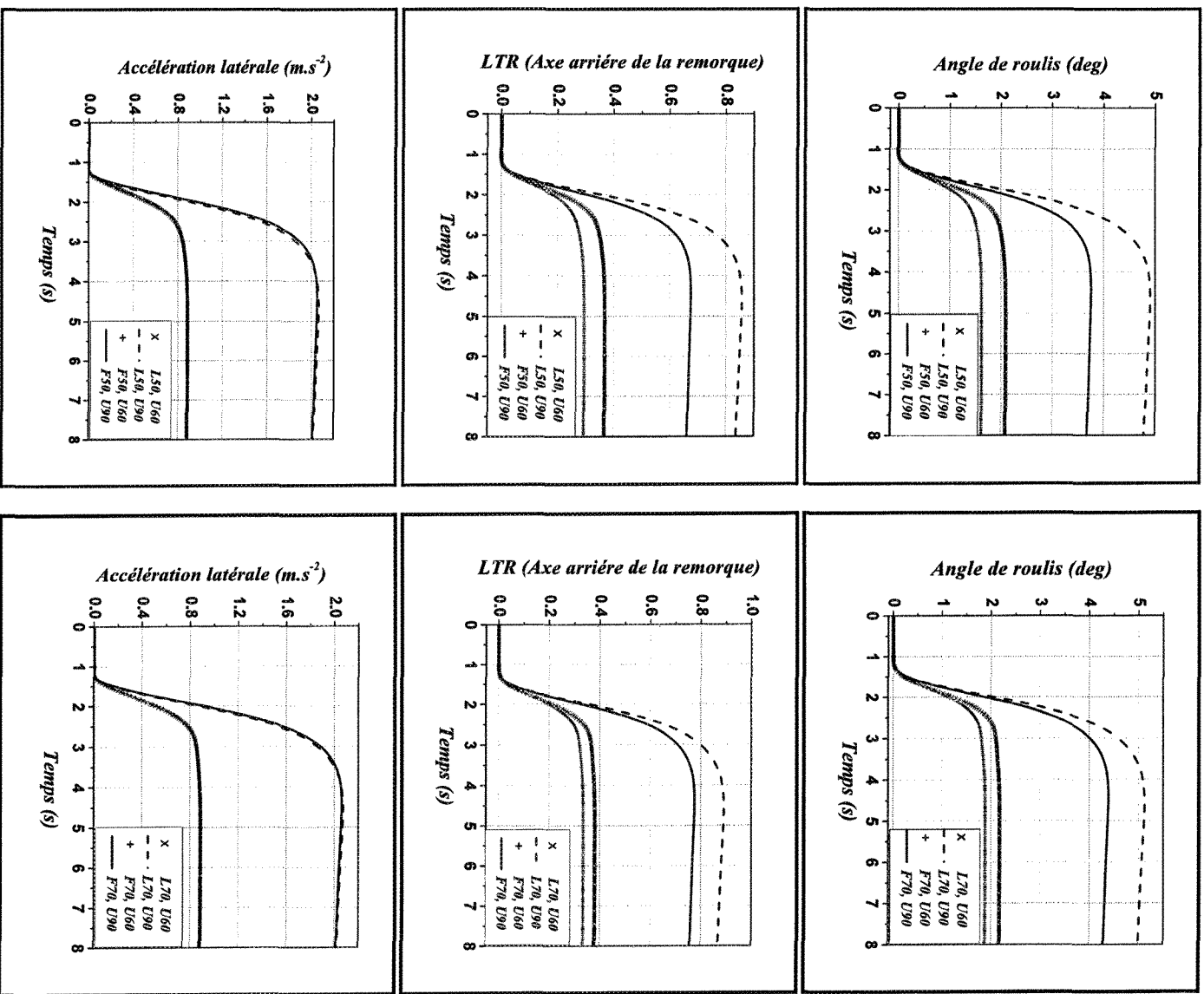


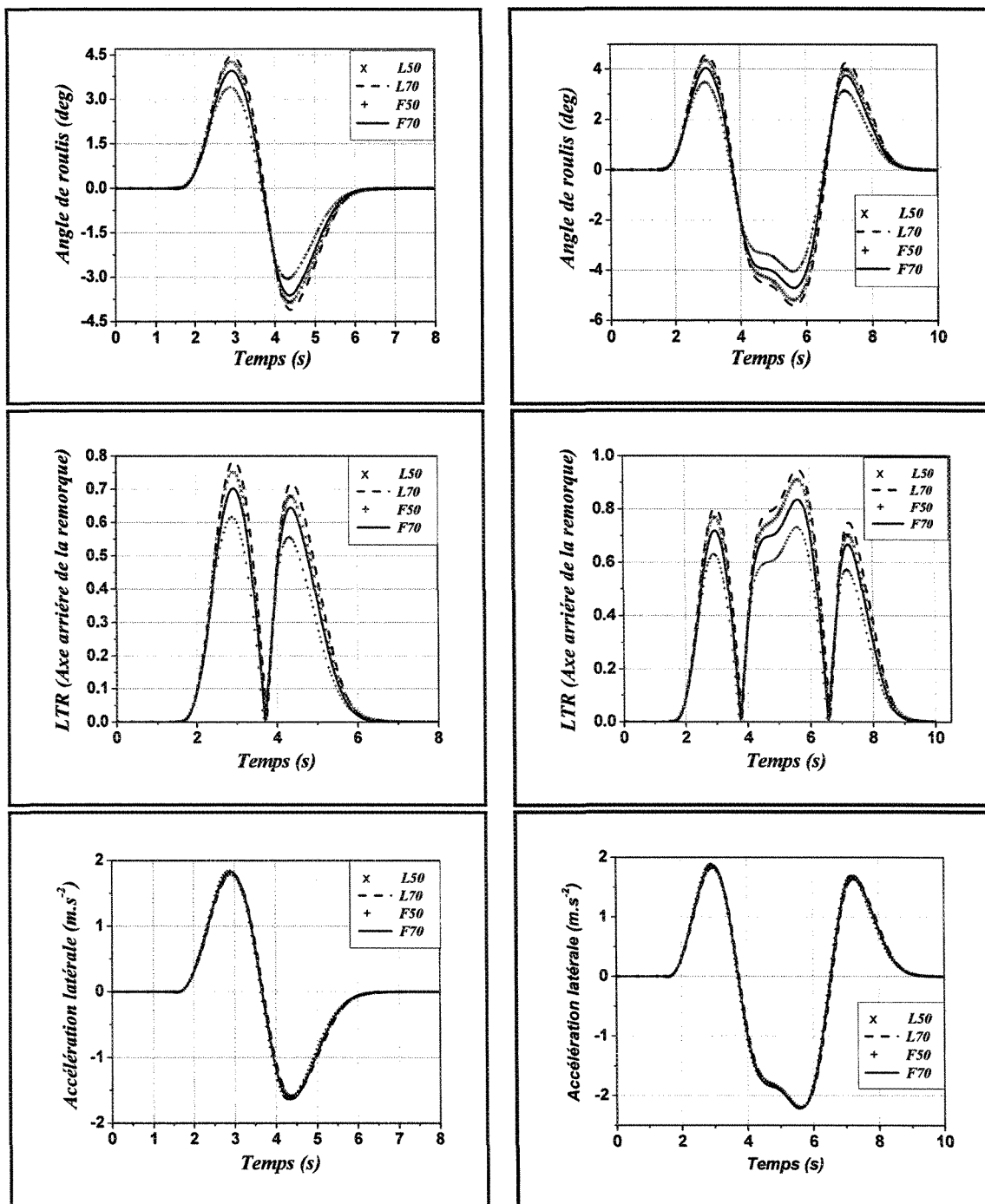
Figure 6.9: Influences de la vitesse sur la réponse directionnelle du véhicule-articulé ($\delta = 1 \text{ deg}$).

Mouvement de changement de voie simple et double

La figure (6.10) illustre la comparaison entre le véhicule articulé CL et un véhicule articulé CF lors des manoeuvres de changement de voie simple et double avec une vitesse d'amplitude constante de 90 *km/h*. Pour les deux manoeuvres, nous observons que nous avons approximativement 5% de différence du décalage de la charge entre le cas CL et le cas CF pour un taux de remplissage de 70 %. Cette différence augmente jusqu'à 15% dans le cas du taux de remplissage de 50 %. Cependant, le décalage de la charge est plus significatif comparativement aux mêmes conditions dans le cas du véhicule d'unité. Le décalage de la charge est de l'ordre de 80 % pour le cas CL et 70 % pour le cas CF lors du mouvement de changement de voie simple telle que montré par la figure (6.10-(a)). Ce décalage augmente davantage lors du mouvement de changement de voie double illustré par la figure (6.10-(b)). Il est de l'ordre de 95 % pour le cas CL et de l'ordre de 80 % pour le cas CF. Dans ces conditions nous concluons que le mouvement pourrait être considéré comme dangereux pour les véhicules citernes articulés. Cependant, dans le cas d'un camion citerne d'unité et dans les mêmes conditions, nous avons conclu que le décalage égale presque la moitié en terme de pourcentage.

Aussi nous avons enregistré une différence moyenne de décalage de la charge latérale de l'ordre de 15% à 20% entre le véhicule CL et le véhicule CF.

Finalement, par ces résultats nous concluons que les véhicules citernes articulés sont moins stables comparativement aux véhicules citernes d'unités.



(a) Changement de voie simple.

(b) Changement de voie double.

Figure 6.10: Influence combiné de la vitesse et l'angle de direction sur la réponse directionnelle du véhicule-d'unité ($U = 90 \text{ km/h}$).