

Université du Québec à Rimouski
Département de Mathématiques, d'informatique et de génie.

**ÉTUDE D'ÉVALUATION DES CONDITIONS D'OPÉRATION SÉCURITAIRE DE
VÉHICULES TOUT-TERRAIN CONÇUS À L'ORIGINE POUR UN CONDUCTEUR
SEULEMENT ET MODIFIÉS EN VÉHICULES AVEC PASSAGER, CIRCULANT SUR
DES SENTIERS DE LA FÉDÉRATION QUÉBÉCOISE DES CLUBS QUADS (FQCQ)**

À l'attention de madame
Stéphanie Cashman-Pelletier
Chef de service de la sécurité en Transport
Service des politiques de sécurité

Par
Boumédiène Falah, ing., PhD.
professeur

Octobre 2008

REMERCIEMENTS

Le réalisation de ce projet a nécessité l'intervention de plusieurs personnes, nous voudrions particulièrement remercier les personnes suivantes :

- M. Eddy Vallières, du Centre de Formation en Transport de Charlesbourg pour nous avoir permis d'utiliser les locaux du centre pour la réalisation de la table de renversement et les différents essais statiques.
- Madame Stéphanie Cashman-Pelletier, chef de service des politiques de sécurité au ministère des Transports du Québec, qui n'a ménagé aucun effort dans la concrétisation de cette étude.
- Monsieur Danny Gagnon et Bellevance de la Fédération Québécoise des Clubs Quads pour leur totale implication à la réussite de ce projet.

INTRODUCTION	6
DESCRIPTION DE LA PROBLÉMATIQUE	6
OBJECTIF	7
MÉTHODOLOGIE	7
MONTAGE EXPÉRIMENTAL POUR L'ANALYSE DES STABILITÉS LONGITUDINALE ET LATÉRALE	8
Table de renversement.....	8
Quads d'essai.	12
Résultats d'essais de la table de renversement	12
configurations d'essai et leurs répartitions de charges aux roues	12
Stabilité longitudinale	17
Renversement latéral	22
Essais dynamiques sur piste	26
Instrumentation du véhicule d'essai	26
Essais dynamiques portant sur la stabilité longitudinale du véhicule.	27
Essais d'accélération et de freinage.	31
Essais sur cercle à rayon constant.	39
Détermination de la pente maximale du quad modifié et des vitesses maximales en courbe	43
Détermination de la pente maximale théorique pour le quad modifié.	43
Détermination des vitesses maximales en courbe pour le quad modifié.	45
SYNTHÈSE DES RÉSULTATS D'ESSAI.....	47
Essais sur table de renversement	47
Stabilité longitudinale	47
Stabilité latérale.....	49
Essais dynamiques.....	51
CONCLUSION.....	51
RECOMMANDATIONS	53

BIBLIOGRAPHIE	53
ANNEXE A	55
ANNEXE B	57
ANNEXE C	58
Figure 1 Évolution des charges aux roues avant et arrière durant un essai de renversement latéral	9
Figure 2 Détermination de l'angle de renversement à partir de l'instant de décollement des roues avant.....	9
Figure 3 Renversement latéral sur table	10
Figure 4 Renversement longitudinal sur table	11
Figure 5 Répartition de la charge aux roues pour différentes configurations de quad à une place.	14
Figure 6 Répartition de la charge aux roues pour différentes configurations du quad à deux à 2 places	15
Figure 7 Répartition de la charge additionnelle (autre que la masse du conducteur) telle que souhaitée par le constructeur du quad.	16
Figure 8 Exemple de désignation d'une configuration d'essai.....	17
Figure 9 Seuils de renversement longitudinal (quad à une place)	20
Figure 10 Seuils de renversement longitudinal (quad à 2 places)	21
Figure 11 Seuils de renversement latéral. (quad à 1 place)	24
Figure 12 Seuils de renversement latéral. (quad à 2 places).....	25
Figure 13 Système d'acquisition de signaux fixé dans le coffre du siège ajouté.	27
Figure 14 Mécanisme d'anti-renversement monté à l'arrière du véhicule d'essai.....	27
Figure 15 Évolution de l'angle de tangage durant les essais sur une pente. (mine Asbestos).	29
Figure 16 Validation en dynamique des seuils de renversement longitudinal enregistrés sur table de renversement.....	30
Figure 17 Montage typique du capteur linéaire pour la mesure de la course d'une suspension	31
Figure 18 Niveaux maximums d'accélérations/décélérations sur piste asphaltée.....	33
Figure 19 Variations de la course des suspensions avant en phase de freinage.	35
Figure 20 Variations de la course des suspensions arrière en phase d'accélération.....	36
Figure 21 Angle de tangage maximal en phase d'accélération ou de freinage.	38
Figure 22 Angles de roulis et de volant (cercle à rayon constant).....	41
Figure 23 Angles de roulis et de volant lissés. (Cercle à rayon constant).	42
Figure 24 Pentes maximales pour différentes configurations de quad.	44
Figure 25 Vitesses en fonction du rayon de courbe.....	46
Figure 26 Comparaison des seuils de renversement longitudinal entre le quad à une place et le quad à deux places.....	48
Figure 27 Comparaison des seuils de renversement latéral entre le quad à une place et le quad à deux places.....	50

Figure 1	Évolution des charges aux roues avant et arrière durant un essai de renversement latéral	9
Figure 2	Détermination de l'angle de renversement à partir de l'instant de décollement des roues avant	9
Figure 3	Renversement latéral sur table	10
Figure 4	Renversement longitudinal sur table	11
Figure 5	Répartition de la charge aux roues pour différentes configurations de quad à une place	14
Figure 6	Répartition de la charge aux roues pour différentes configurations du quad à deux à 2 places	15
Figure 7	Répartition de la charge additionnelle (autre que la masse du conducteur) telle que souhaitée par le constructeur du quad	16
Figure 8	Exemple de désignation d'une configuration d'essai	17
Figure 9	Seuils de renversement longitudinal (quad à une place)	20
Figure 10	Seuils de renversement longitudinal (quad à 2 places)	21
Figure 11	Seuils de renversement latéral. (quad à 1 place)	24
Figure 12	Seuils de renversement latéral. (quad à 2 places)	25
Figure 13	Système d'acquisition de signaux fixé dans le coffre du siège ajouté	27
Figure 14	Mécanisme d'anti-renversement monté à l'arrière du véhicule d'essai	27
Figure 15	Évolution de l'angle de tangage durant les essais sur une pente. (mine Asbestos)	29
Figure 16	Validation en dynamique des seuils de renversement longitudinal enregistrés sur table de renversement	30
Figure 17	Montage typique du capteur linéaire pour la mesure de la course d'une suspension	31
Figure 18	Niveaux maximums d'accélérations/décélérations sur piste asphaltée	33
Figure 19	Variations de la course des suspensions avant en phase de freinage	35
Figure 20	Variations de la course des suspensions arrière en phase d'accélération	36
Figure 21	Angle de tangage maximal en phase d'accélération ou de freinage	38
Figure 22	Angles de roulis et de volant (cercle à rayon constant)	41
Figure 23	Angles de roulis et de volant lissés. (Cercle à rayon constant)	42
Figure 24	Pentes maximales pour différentes configurations de quad	44
Figure 25	Vitesses en fonction du rayon de courbe	46
Figure 26	Comparaison des seuils de renversement longitudinal entre le quad à une place et le quad à deux places	48
Figure 27	Comparaison des seuils de renversement latéral entre le quad à une place et le quad à deux places	50
Figure 28	Diagramme des corps libres d'un quad en montée sur une pente	58
Tableau 1	Description des configurations d'essai sur table de renversement	17
Tableau 2	Capteurs d'instrumentation du véhicule	26
Tableau 3	taux de roulis du quad	39

Introduction

En septembre 2003, le Service des politiques de sécurité en transports de la Direction de la sécurité en transport du ministère des Transports (MTQ) a confié à l'UQAR [1] une étude portant sur la dynamique de véhicules tout-terrain (vtt) en présence d'un passager afin d'évaluer les risques reliés à cette pratique. Cette étude a démontré que la présence d'un passager sur un quad conçu pour un conducteur seulement se traduisait par un déplacement notable du centre de masse tant longitudinalement que verticalement par rapport à sa position initiale (véhicule + conducteur). Les résultats de l'étude ont démontré notamment que l'augmentation de la hauteur du centre de masse en présence d'un second passager, peut atteindre jusqu'à 25 % environ. Les déplacements dans la direction longitudinale vers l'arrière du véhicule enregistrent quant à eux des augmentations de plus de 16%. Les niveaux de ces déplacements affectent les stabilités latérale et longitudinale du véhicule et compromettent ainsi la sécurité de ces quads.

Description de la problématique

Depuis les années 90, le nombre d'utilisateurs de quad à des fins de loisir, ne cesse de croître. Ainsi, de nombreux sentiers quad ont vu le jour à travers la province du Québec. Selon le guide d'aménagement et d'entretien des sentiers de quad au Québec [2], ces sentiers s'étendent sur plus de 16 000 km. Ceux-ci sont, en principe, aménagés, entretenus et pourvus d'une signalisation adéquate. Bien qu'interdit par les constructeurs, de nombreux adeptes de quad transportent un passager. Ce dernier est transporté grâce à l'ajout d'un siège fixé à l'endroit du porte bagage arrière du véhicule. Ainsi, en présence d'un passager, la répartition de la charge aux roues se trouve biaisée vers l'arrière. Comment cette répartition de charge va-t-elle influencer :

- la surcharge des roues arrière ?
- les stabilités longitudinale et latérale du véhicule ?
- la manœuvrabilité du véhicule ?
- le comportement durant le freinage ?
- les opérations de conduite ?

Le comportement dynamique de ce type de véhicule a déjà fait l'objet d'une étude [1] dont la conclusion ne recommandait pas l'ajout d'un siège destiné à un passager. Il est bien clair que cette étude est associée à des conditions opératoires d'utilisation générales et n'a pas abordé spécifiquement l'utilisation de conditions spécifiques aux sentiers de quad. Par ailleurs, la

féderation Québécoise des clubs quads (FQCQ) soutient que la présence d'un passager et la modification apportée au véhicule n'altèrent aucunement la sécurité de ces véhicules tant que leur circulation est limitée aux sentiers aménagés. Pour répondre à ces besoins particuliers, certains constructeurs ont mis en marché des véhicules conçus pour un conducteur et un passager. La conception de ces véhicules est revue en augmentant notamment l'empattement du véhicule qui passe, en général, de 50 pouces à 58 pouces environ, soit une augmentation de 16 %

.. Cette augmentation est d'ailleurs égale au déplacement longitudinal du centre de masse rapporté par l'étude dynamique spécifiée à la référence [1]. La problématique soulevée, par l'ajout d'un siège pour le transport d'un passager, peut se résumer ainsi : dans quelles conditions sécuritaires, notamment de vitesse, de terrain (pente, courbe, état du terrain, etc.) et de répartition des charges aux roues, un quad modifié, circulant uniquement dans des sentiers aménagés de la FQCQ, est-il sécuritaire ?

Objectif

L'objectif principal de cette étude est de déterminer pour des quads, initialement conçus par leur constructeur pour un conducteur seulement et modifiés par leurs utilisateurs pour transporter un passager, et circulant sur des sentiers aménagés de la FQCQ, les conditions possibles d'opérations sécuritaires en terme de vitesses, de charges et de pentes.

Méthodologie

La conduite de cette étude repose essentiellement sur une exploration expérimentale. Un véhicule d'essai est sélectionné et fait l'objet d'essais statiques sur table de renversement conçue à cet effet. Ces essais portent sur l'évaluation des seuils de renversement longitudinal et latéral. Enfin, des essais sont entrepris sur des pistes de la FQCQ en vue de caractériser le comportement dynamique d'un véhicule à une place modifiée pour accepter un passager.

Montage expérimental pour l'analyse des stabilités longitudinale et latérale

Table de renversement

Les seuils de renversement longitudinal et latéral sont déterminés grâce à la réalisation d'une table de renversement. Celle-ci est conçue à partir d'une structure en bois sur laquelle quatre capteurs de force sont fixés. Chacun des capteurs reçoit une charge provenant d'une roue du véhicule. De plus, un gyroscope numérique est installé sur le coin de la table destiné à mesurer l'angle de roulis pour l'essai de renversement latéral, et l'angle de tangage pour l'essai de renversement longitudinal. Un essai consiste à soulever la table à l'aide d'un portique équipé d'un moteur et acquérir d'une part, les quatre signaux provenant des capteurs de force et le signal d'angle issu du gyroscope, d'autre part. Ces signaux sont acquis à l'aide d'un appareil CRIO de National Instruments. L'analyse de ces signaux permet de détecter précisément l'instant et l'angle de renversement. Les figures 1 et 2 montrent, dans un exemple de renversement longitudinal, l'évolution des charges aux roues avant et arrière du véhicule ainsi que l'instant associé au renversement d'où la détermination de l'angle et du seuil de renversement. Cet instant correspond simplement à une charge nulle aux roues avant. Les figures 3 et 4 montrent la table de renversement en opération pour chacun des deux types de renversement.

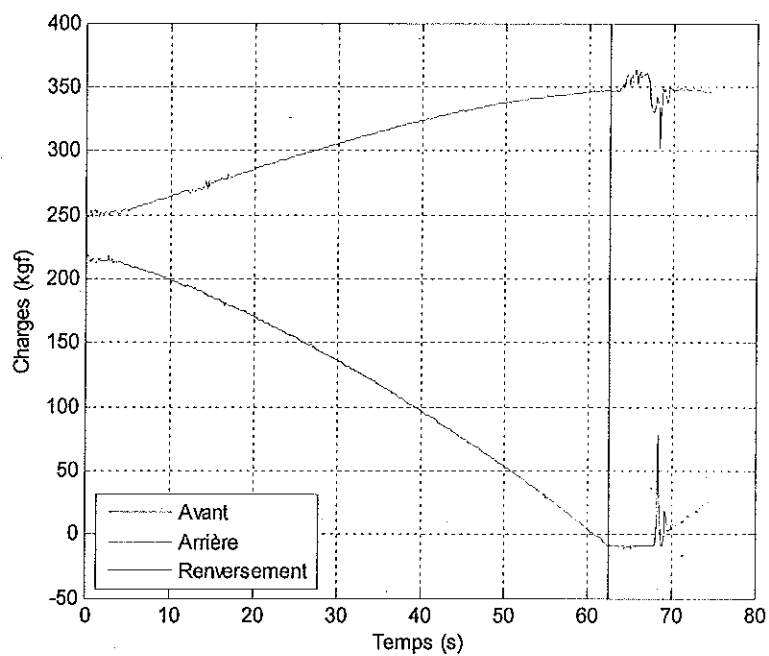


Figure 1 Évolution des charges aux roues avant et arrière durant un essai de renversement latéral

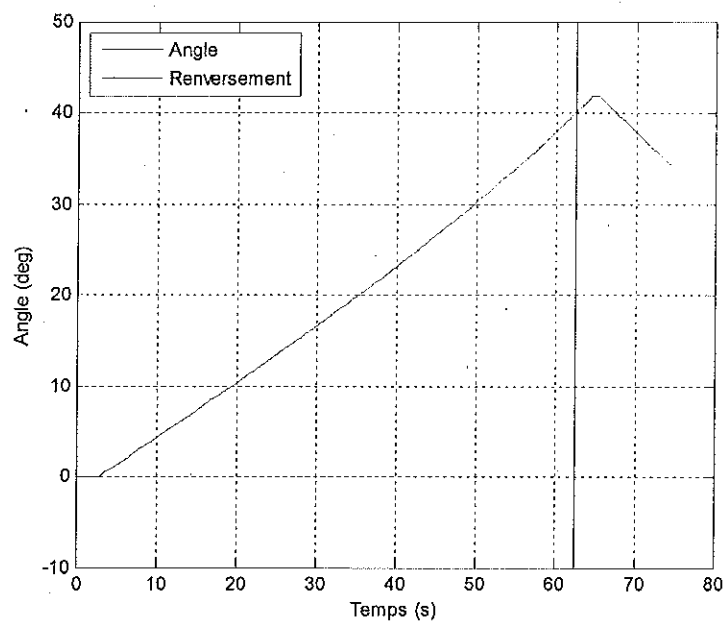


Figure 2 Détermination de l'angle de renversement à partir de l'instant de décollement des roues avant

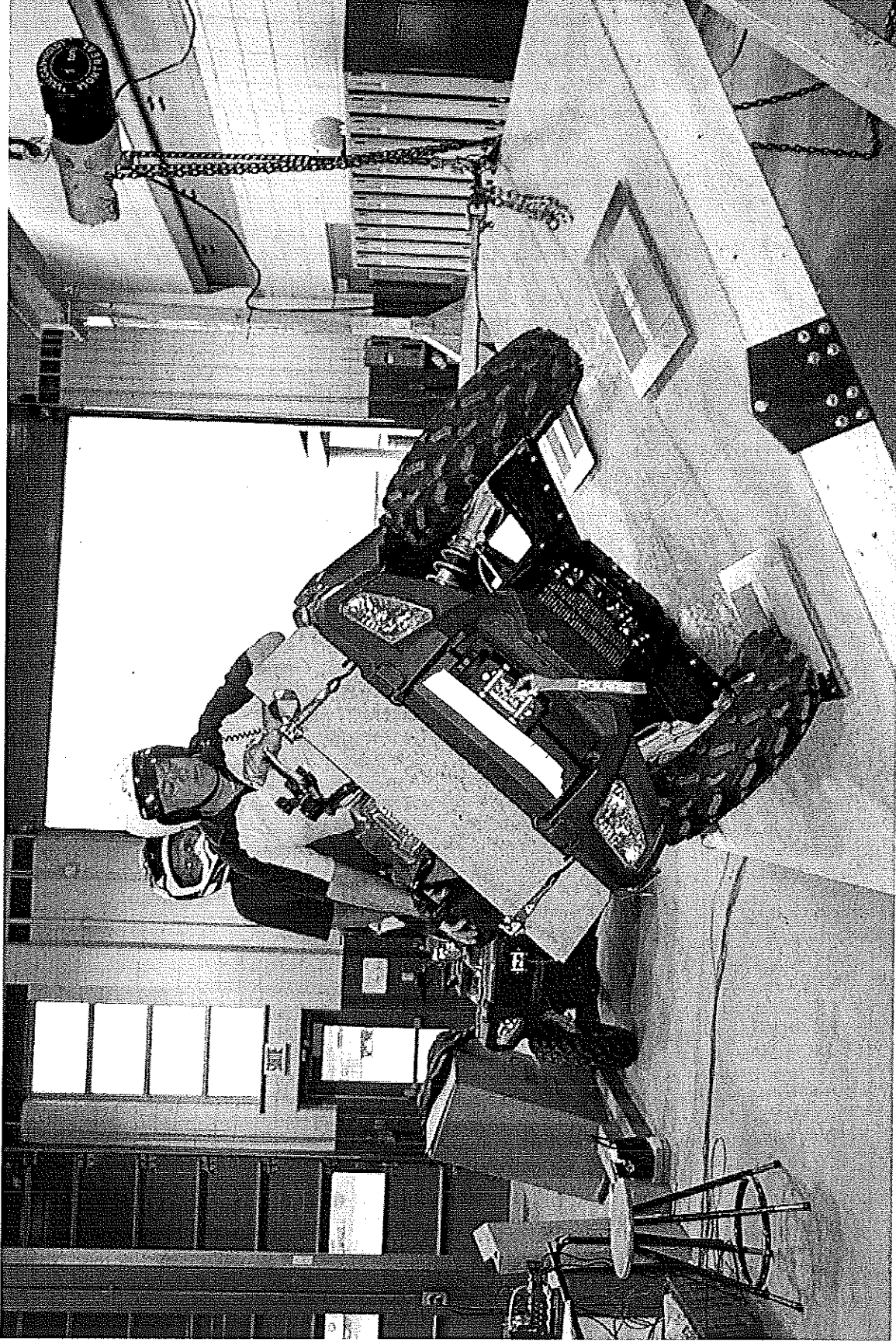


Figure 3 Renversement latéral sur table



Figure 4 Renversement longitudinal sur table

Quads d'essai.

La Fédération Québécoise des clubs quads (FQCQ) a mis à notre disposition deux quads d'essai neufs : un (une place) et son équivalent à deux places : un

La différence principale entre ces deux véhicules réside dans leur empattement. Le à une place a un empattement à 50.5 pouces (1282.7 mm) alors que celui du véhicule à deux places est de 57 pouces (1447.8 mm), soit une augmentation de 13 % environ. Le à une place a fait l'objet d'essais statiques à l'aide d'une table de renversement et d'essais dynamiques sur piste. Par contre, seule une investigation statique sur table à renversement a été accomplie pour le quad à deux places. Il importe de rappeler ici que le quad à deux places ne fait pas l'objet de notre étude. Il sert uniquement, s'il y a lieu, comme outil de comparaison entre le véhicule à une place modifié en un véhicule à deux places par l'ajout d'un siège fixé à l'arrière. Enfin, l'annexe A regroupe les principales caractéristiques des deux quads associés à cette étude. Aucune modification n'a été apportée aux quads d'essai. La pression des pneus est maintenue à 5 psi (34.5 kPa) telle que spécifiée par le constructeur des quads.

Résultats d'essais de la table de renversement

configurations d'essai et leurs répartitions de charges aux roues

Afin d'analyser l'influence du passager sur les seuils de renversement du véhicule, six configurations du véhicule d'essai ont été réalisées. Le tableau 1 décrit sommairement les six configurations d'essai. Les figures 5 et 6 reportent, pour chaque quad d'essai, les répartitions des charges aux roues, la charge totale supportée par chacune des six configurations ainsi que la charge maximale totale (GVW) tolérée par le fabricant. Le constructeur du quad à une place tolère une charge additionnelle de 270 lb répartie comme le suggère la figure 7. Un 1/3 de la charge à l'avant (90 lb) et 2/3 de la charge à l'arrière (180 lb). L'examen de la figure 5 montre que les répartitions de charge, dans le cas des configurations conducteur et passager d'une part, et conducteur et charges à l'avant et à l'arrière d'autre part, sont biaisées vers les roues arrière. Autrement dit, la charge du passager comme les charges ajoutées sont en grande partie supportées par les roues arrière. Ainsi, la présence du passager influe très peu sur les charges supportées par les roues avant. Cette observation demeure valide dans le cas du quad conçue expressément pour transporter un passager. En effet, la figure 6 illustre clairement cette

réalité. Nous pouvons conclure dans ce cas aussi, que la répartition de la charge est aussi biaisée vers l'arrière. Ce type de répartition de charge, biaisé vers l'arrière, va particulièrement conditionner, comme nous allons l'observer au paragraphe suivant, la stabilité longitudinale du quad à une seule place modifié pour transporter un passager. En effet, vu la nature biaisée de la répartition de la charge et le court empattement du quad, les seuils de renversement longitudinal pour cette configuration vont être sensiblement affectés.

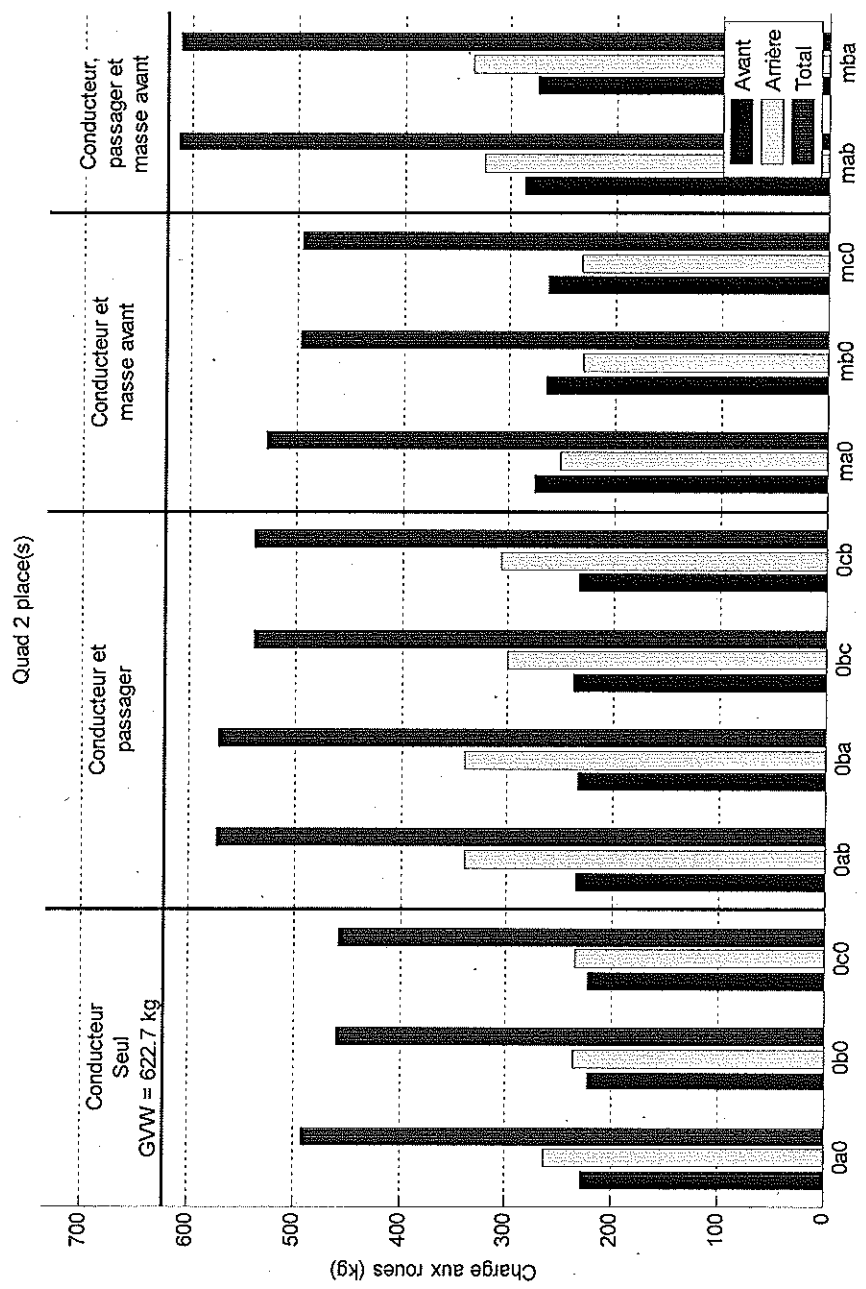


Figure 6 Répartition de la charge aux roues pour différentes configurations du quad à deux à 2 places

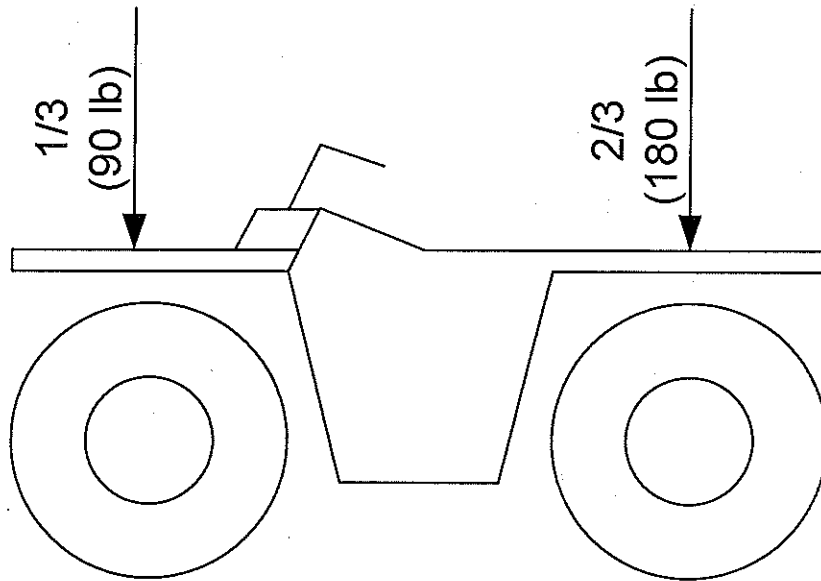


Figure 7 Répartition de la charge additionnelle (autre que la masse du conducteur) telle que souhaitée par le constructeur du quad.

Tableau 1 Description des configurations d'essai sur table de renversement.

Configurations	Description
#1	Configuration de référence. Le conducteur est le seul passager. Aucune masse n'est ajoutée au véhicule.
# 2	Trois conducteurs/ passagers de poids différents (élevé, moyen et léger) sont utilisés dans cette configuration.
# 3	Conducteur, masses de charge à l'avant et à l'arrière. Cette configuration simule le conducteur en présence de charges maximales à l'avant et à l'arrière tolérées par le fabricant.
# 4	Conducteur avec une masse de charge à l'arrière. La masse en béton ajoutée est de 78 kg. La valeur de la masse ajoutée est très proche de la masse maximale tolérée par le constructeur (81.8 kg)
# 5	Conducteur avec une masse de charge ajoutée à l'avant du véhicule. Cette masse de 39 kg en béton est très proche de la masse maximale tolérée par le constructeur (40.9 kg).
# 6	Conducteur, passager et masse de charge à l'avant. La masse ajoutée est de 39 kg.

Stabilité longitudinale

La figure 8, ci-dessous, montre un exemple de désignation adoptée pour désigner les différentes configurations d'essai. Ainsi, la configuration **mab** où chaque lettre désigne respectivement la position de la masse à l'avant (**m**), le conducteur (**a**) et le passager (**b**)

Les figures 9 et 10 montrent, pour chacun des deux véhicule d'essai, l'ensemble des seuils de renversement longitudinal enregistrés sur la table de renversement. En abscisse de l'histogramme sont reportées les configurations d'essai.

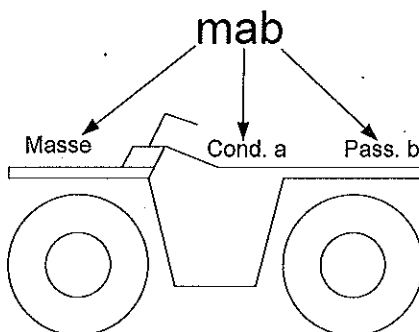


Figure 8 Exemple de désignation d'une configuration d'essai.

La masse totale associée à chaque configuration est aussi indiquée en bas de chaque configuration d'essai. Il est à noter que la masse totale de certaines configurations dépassent la masse totale tolérée de 545.5 kg (1 200 lb). Nous allons commenter dans ce qui suit les résultats liée à la stabilité longitudinale des configurations associées au quad à une place et sa version modifiée. Le lecteur pourra lui-même faire ses commentaires pour le véhicule à deux places.

Configuration 1 : Conducteur seul (référence). [0.85 g 1 g]

Les seuils de renversements varient de 0.85 g à légèrement plus de 1 g. Il importe de noter toutefois que plus le conducteur compense adéquatement, plus le seuil de renversement est élevé.

Configuration 2 : Conducteur et passager. [0.65 g 0.8 g]

En présence d'un passager, les seuils de renversement chutent sensiblement et varient entre un minimum de 0.65 g et un maximum légèrement inférieur à 0.8 g. On observe que le seuil maximal enregistré en présence d'un passager (0.8 g) n'atteint même pas le seuil minimal (0.85 g) enregistré dans le cas où le conducteur est seul sur le quad. Cette réalité s'explique, qu'en présence d'un conducteur et d'un passager, le centre de gravité se déplace sensiblement vers l'arrière. En conséquence, le seuil de renversement diminue. On note que durant ces essais, et selon la masse du conducteur et du passager, la masse totale a dépassé la masse tolérée par le constructeur. Par ailleurs, comme nous l'avons observé dans le cas du conducteur seul, le seuil de renversement augmente avec le type de compensation.

Configuration 3: Conducteur, masses de charge à l'avant et à l'arrière. [0.67g 0.82g]

Les seuils de renversement, dans ce cas, se situent dans une plage comprise entre 0.67g et 0.82g. Ces essais sont caractérisés par une charge de 39 kg à l'avant et de 78 kg à l'arrière. La baisse des niveaux des seuils de renversement par rapport au cas 1 (référence) s'explique par un chargement plus important à l'arrière, qui comme nous l'avons souligné à plusieurs reprises, contribue à déplacer le centre de gravité vers l'arrière et compromettre ainsi la stabilité longitudinale du véhicule. Il importe de noter toutefois que les seuils de renversement obtenus pour cette configuration sont comparables à ceux de la configuration précédente : conducteur et passager, soit la configuration cible dans cette étude.

Configuration 4 : Conducteur et masse de charge à l'arrière. [0.65g 0.8 g]

Les seuils enregistrés, en présence d'un conducteur et d'une charge de 78 kg telle que suggérée par le constructeur, sont sensiblement identiques aux niveaux des seuils observés dans le cas précédent où l'essai est associé à un conducteur en présence d'un passager. Autrement dit, les seuils de renversement se situent à l'intérieur d'un intervalle compris entre 0.65 g et 0.8 g. La seule différence se situe au niveau de la masse totale qui dans ce cas ne dépasse, pour aucun essai effectué, la valeur tolérée (545.5 kg).

Configuration 5 : Conducteur et masse de charge à l'avant. [0.85g 1g]

Ces essais sont réalisés en ajoutant une charge de 39 kg environ à l'avant du véhicule. La valeur de la masse de cette charge est sensiblement égale à la masse maximale tolérée par le constructeur. Les seuils enregistrés se situent à l'intérieur de l'intervalle comprise entre 0.85 g et 1.04 g environ. Cet intervalle est légèrement supérieur à celui observé dans le cas où le conducteur est le seul passager. Ce résultat tout à fait prévisible traduit simplement le déplacement du centre de gravité de l'ensemble véhicule, charge et conducteur vers l'avant. Notons, toutefois, qu'un résultat opposé à celui-ci est obtenu dans le cas où le conducteur est en présence d'une charge à l'arrière.

Configuration 6 : Conducteur, passager et masse de charge à l'avant. [0.65g 0.8g]

Les seuils de renversement se situent entre 0.65 g et 0.8 g. Cet intervalle est identique à celui observé dans le cas 2 (conducteur et passager). La présence de la masse de charge à l'avant influe très peu sur le seuil de renversement. En effet, la masse du passager domine largement la charge à l'avant et impose au centre de gravité un déplacement vers l'arrière. Cette réalité se traduit donc par une chute du seuil de renversement comparé au cas 1 où seule la masse du conducteur est prise en compte.

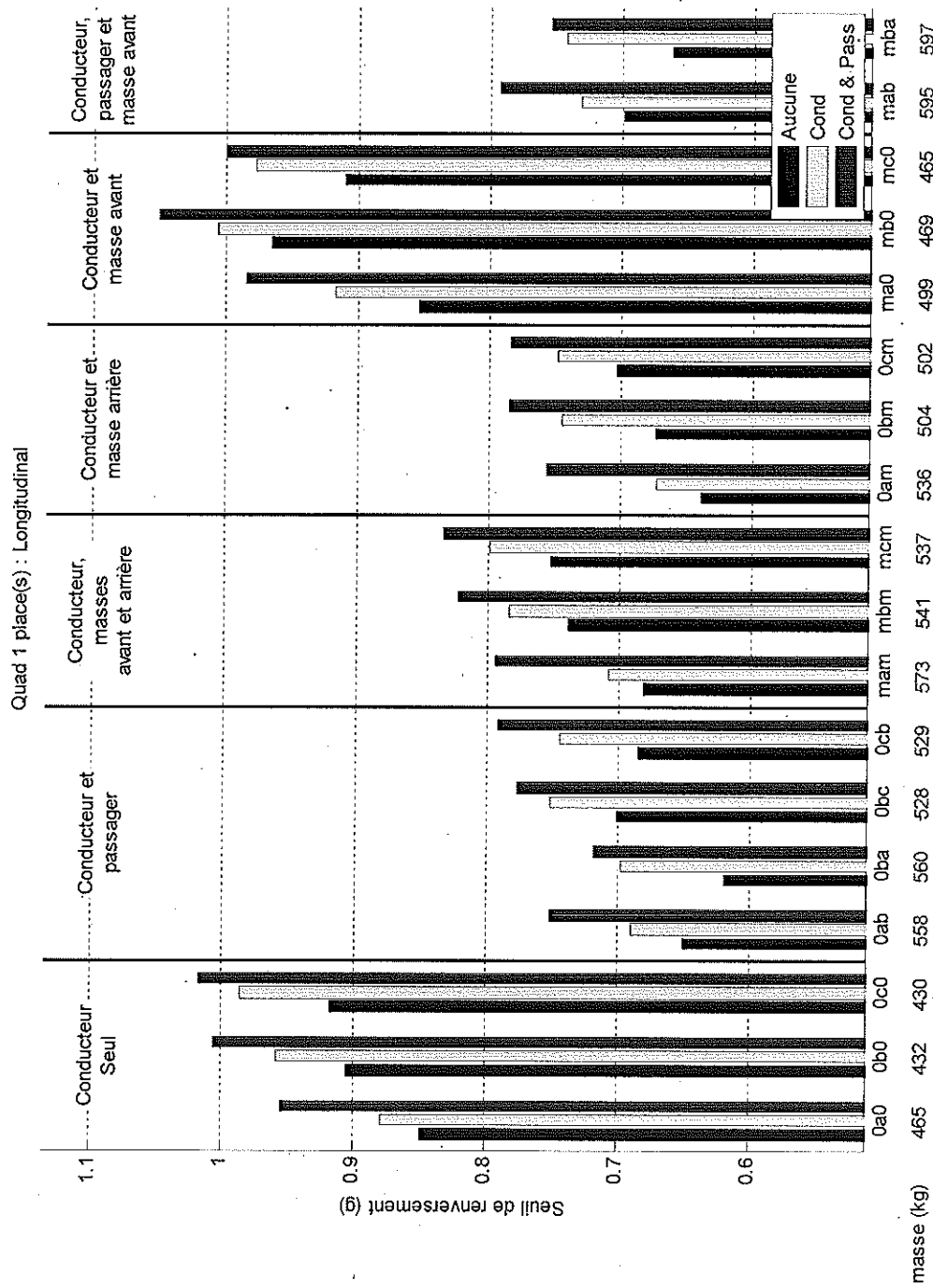


Figure 9 Seuils de renversement longitudinal (quad à une place)

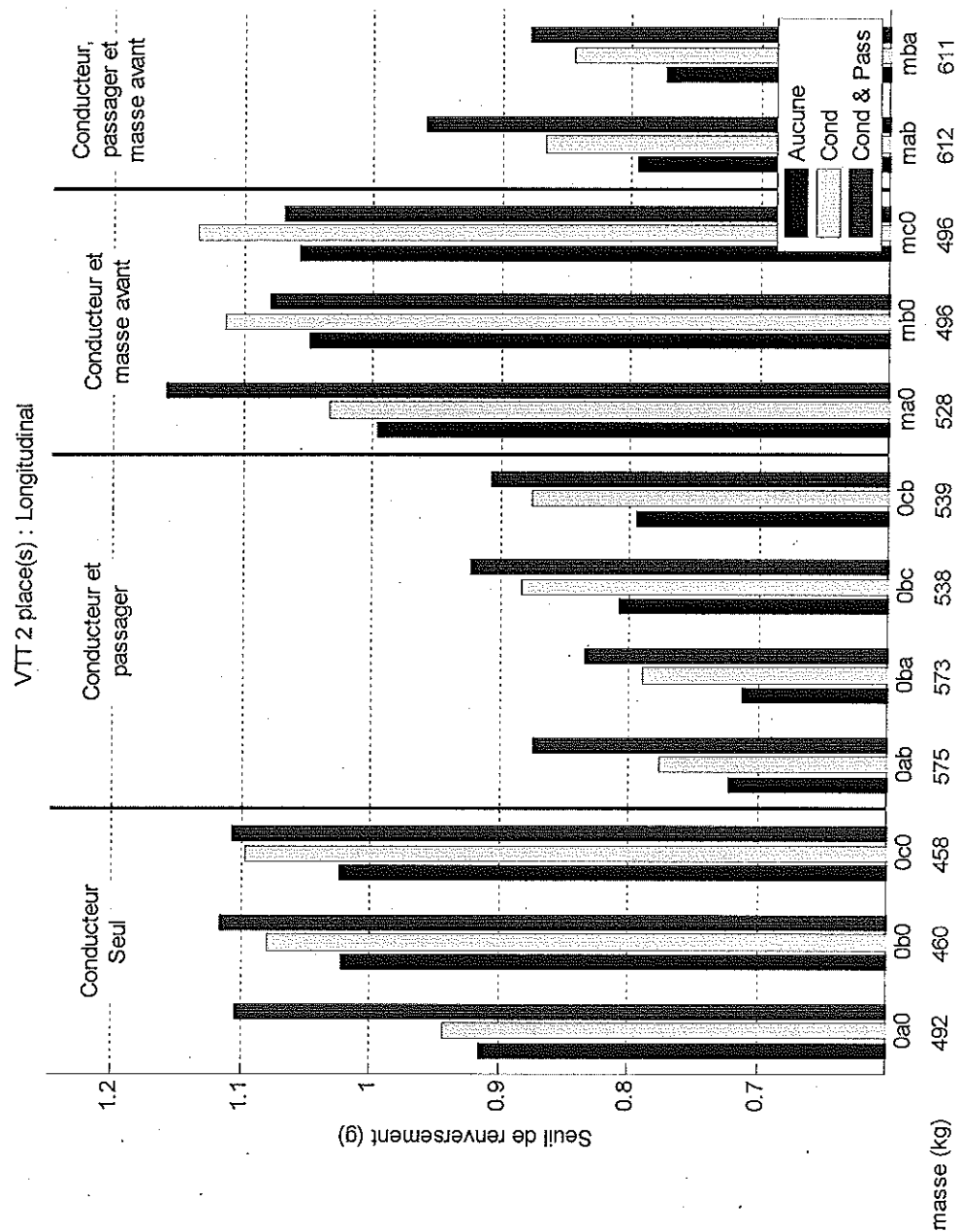


Figure 10 Seuils de renversement longitudinal (quad à 2 places)

Renversement latéral

Les figures 10 et 11 montrent l'ensemble des résultats associés aux seuils de renversement latéral alors que le véhicule est testé sous différentes conditions de charge. Nous décrivons ci-dessous, les résultats associés aux différentes configurations. Une remarque générale pour l'ensemble des résultats enregistrés durant ces essais est liée à l'influence de la compensation du chauffeur et du passager sur l'amélioration des niveaux de seuils de renversement.

Configuration 1 : Conducteur seul (référence). [0.55 g 0.68 g]

Les seuils enregistrés pour cette configuration se situent entre 0.55 g et .68 g environ. La compensation permet, comme dans le cas du renversement longitudinal, à améliorer le niveau du seuil de renversement. Ainsi par exemple, pour l'essai 0b0 (conducteur seul), la compensation permet de relever le seuil de 0.58 g à 0.68 g, soit une augmentation relative de plus de 17%.

Configuration 2 : Conducteur et passager. [0.48 g 0.58 g]

Les seuils de renversement mesurés sont plus faibles comparativement à la configuration de référence précédente. En effet, les seuils sont compris dans l'intervalle [0.48 g, 0.58 g]. On remarque que la borne supérieure de cet intervalle (0.58 g) est relativement proche de la borne inférieure (0.55 g) associée à la configuration de référence où le conducteur constitue l'unique passager. Comparé à la configuration de référence, le seuil de renversement maximal enregistré pour cette configuration est plus faible et enregistre une chute de l'ordre de 17% par rapport à la configuration de référence.

Configuration 3 : Conducteur, masses de charge à l'avant et à l'arrière. [0.45 g 0.53 g]

Les seuils de renversement sont inclus dans une plage allant de 0.45 g à 0.53 g environ. Ces niveaux sont encore une fois plus faibles que ceux observés dans le cas de la configuration de référence. Cette diminution des seuils s'explique aussi par l'ajout des masses qui induit une masse totale plus importante et implique alors une baisse des seuils de renversement

Configuration 4 : Conducteur et masse de charge à l'arrière. [0.50 g 0.60 g]

La présence d'une masse de charge à l'arrière se traduit par un abaissement des seuils de renversement. On enregistre pour cette configuration des niveaux compris entre 0.5 g et 0.6 g.

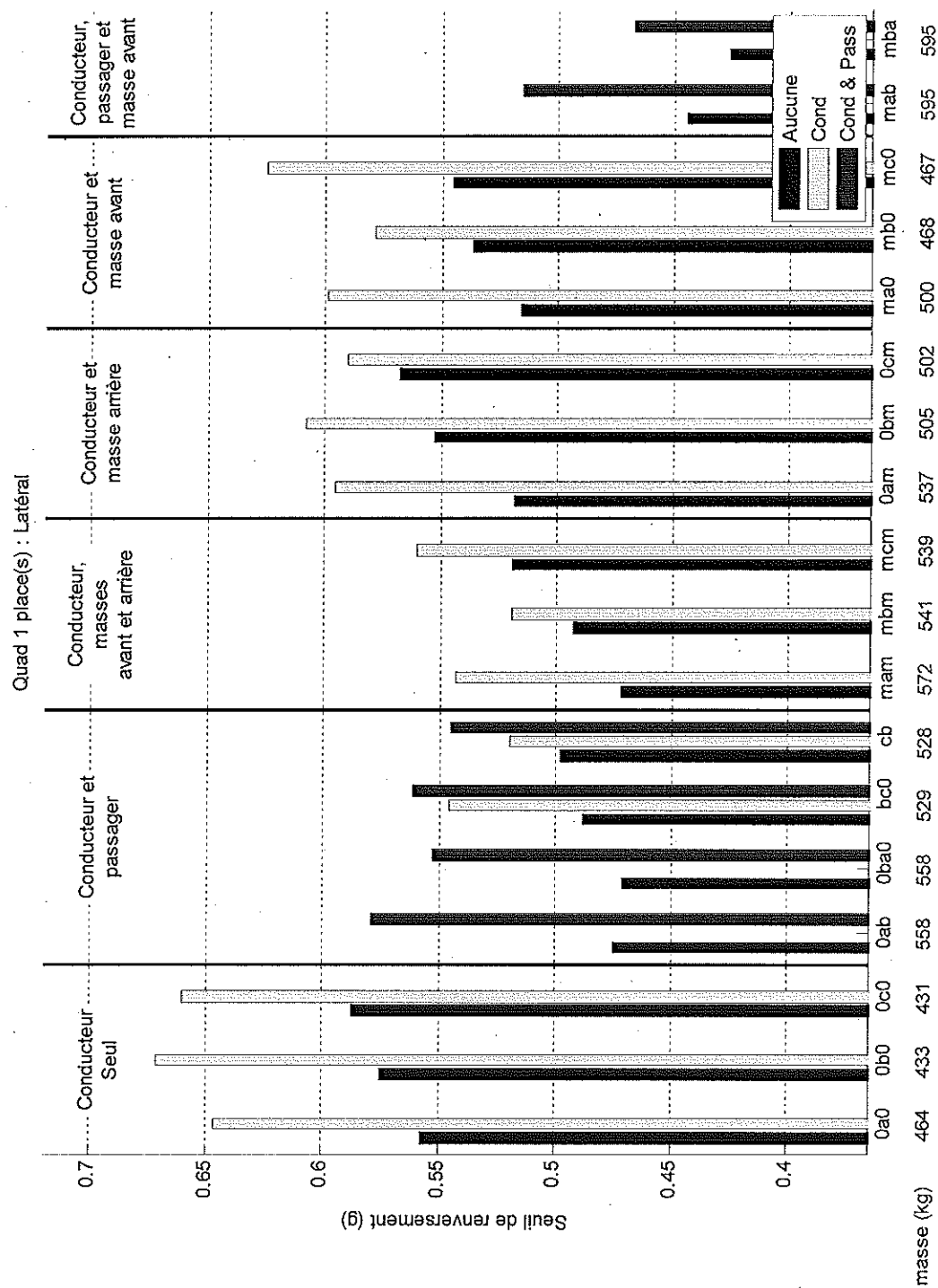
Cette diminution s'explique, pour chaque essai, par l'augmentation de la masse totale par rapport à celle de la configuration de référence qui implique alors un angle de roulis plus important.

Configuration 5 : Conducteur et masse de charge à l'avant. [0.50g 0.61g]

Cette configuration est globalement identique à la configuration précédente. En effet, les seuils de renversement varient entre 0.5 g et 0.61 g. L'augmentation de la masse totale explique, comme dans le cas de la configuration précédente, cette baisse des seuils de renversement.

Configuration 6 : Conducteur, passager et masse de charge à l'avant. [0.42g 0.51g]

Les seuils enregistrés pour cette configuration se situent entre 0.42 g et 0.51 g environ. Cette baisse par rapport aux seuils observés dans le cas de la configuration 2 est liée encore une fois à l'augmentation de la masse totale.



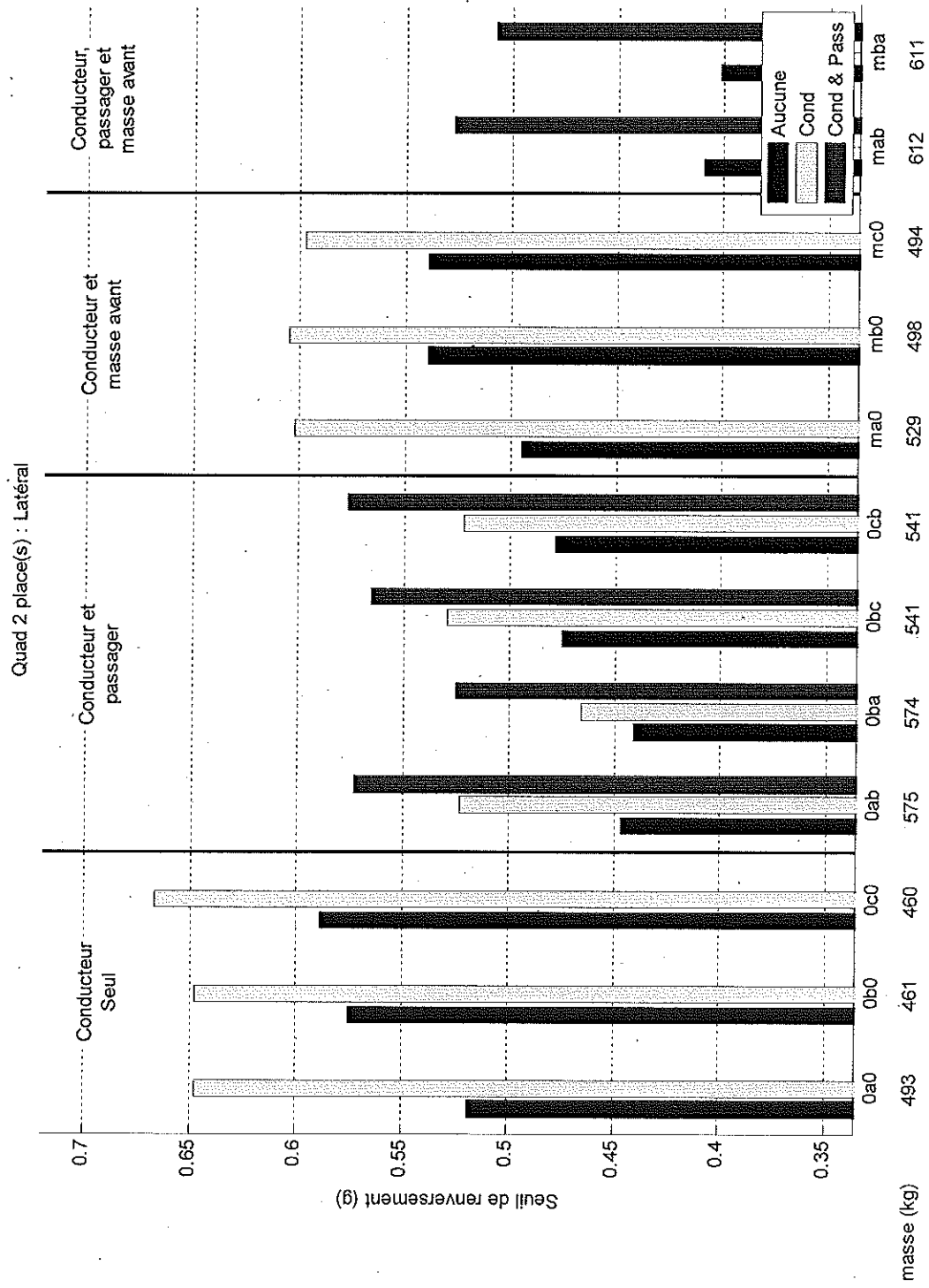


Figure 12 Seuils de renversement latéral. (quad à 2 places)

Essais dynamiques sur piste

En vue de compléter les essais statiques sur table de renversement, une série d'essais dynamiques sur piste de la FQCQ ont été entrepris. Ces essais, dont seul le quad à une place a fait l'objet, ont eu lieu sur des sentiers de quad situés dans la mine d'Asbestos dans la région de Victoriaville.

Les essais réalisés sont :

- Accélération sur une pente d'environ 20 degrés (Asbestos)
- Accélération et freinage sur asphalte (CFTC à Charlesbourg et mine Asbestos)
- Cercle à rayon constant (terrain à Thetford Mines)
- Circulation sur un sentier quad typique (mine Asbestos)

Instrumentation du véhicule d'essai

De nombreux capteurs sont installés sur le véhicule. Le tableau 3 ci-dessous regroupe l'ensemble des capteurs équipant le véhicule d'essai. La figure 13 montre le système d'acquisition des signaux délivrés par les différents capteurs.

Tableau 2 Capteurs d'instrumentation du véhicule.

Mesure	Unités	Capteur	Localisation	Commentaire
Vitesse véhicule	km/h	GPS	Arrière du véhicule	
Accélération latérale	g	Watson MDS-S605	En dessous du siège arrière	Dynamique du véhicule
Accélération longitudinale	g			
Accélération verticale	g			
Déplacement vertical de la suspension gauche avant	mm	Capteur de position linéaire	Capteur à fil fixé entre la roue et le châssis	Mouvement vertical de l'ensemble des suspensions avant et arrière
Déplacement vertical de la suspension droite avant	mm			
Déplacement vertical de la suspension gauche arrière	mm			
Déplacement vertical de la suspension droite arrière	mm			
Vitesse de rotation de la roue avant gauche	km/h	Capteur à effet Hall	Disque de la roue	Détection de glissement ou de blocage des roues
Vitesse de rotation de la roue avant droite	km/h			
Vitesse de rotation des roues arrière gauche et droite (roues tournent à la même vitesse)	km/h			
Angle de tangage	m	Ultrason	Un capteur à chaque extrémité du quad	Permet de détecter en dynamique l'angle de tangage et renversement s'il a lieu.

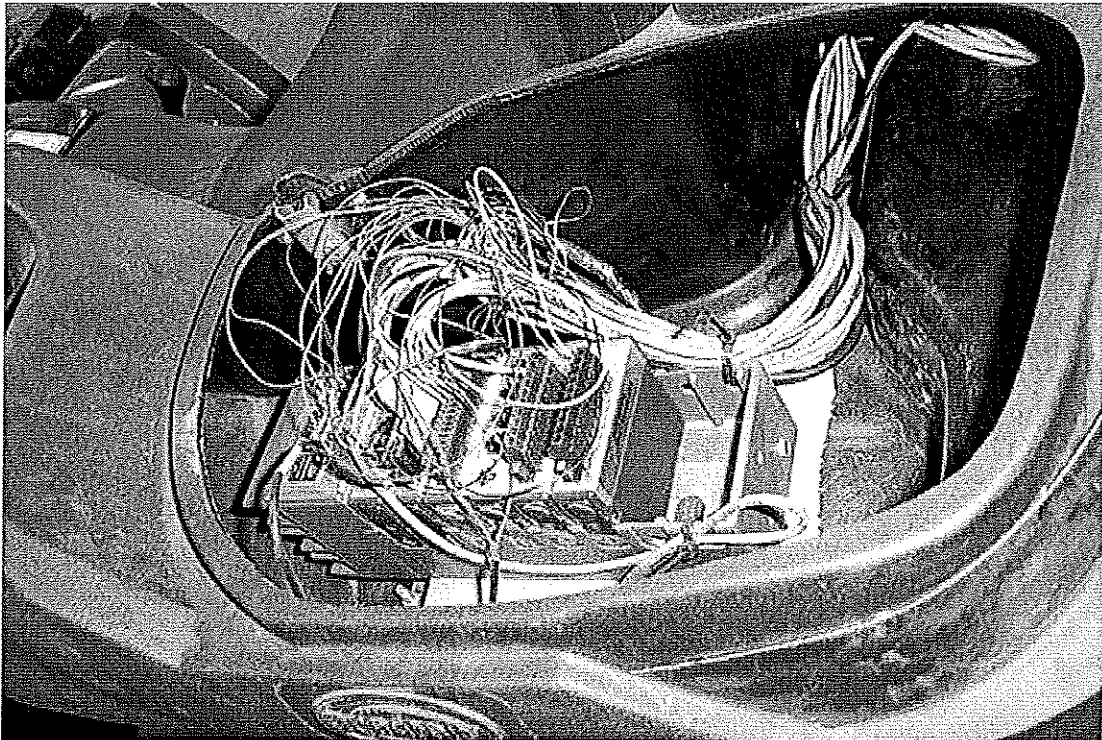


Figure 13 Système d'acquisition de signaux fixé dans le coffre du siège ajouté.

Essais dynamiques portant sur la stabilité longitudinale du véhicule.

Pour assurer la sécurité de ces essais sur pente, un mécanisme d'anti-renversement est conçu et réalisé. La figure 14 montre le véhicule d'essai équipé de ce système d'anti-renversement.

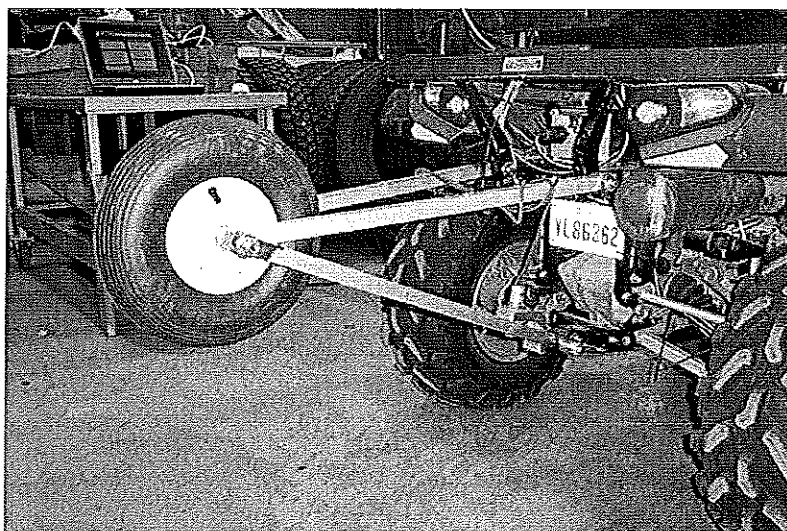


Figure 14 Mécanisme d'anti-renversement monté à l'arrière du véhicule d'essai.

Les essais dynamiques sur la stabilité longitudinale ont eu lieu sur une pente d'environ 20 degrés située sur un sentier de quad dans la mine Asbestos. Les essais consistent, à partir d'une position d'arrêt, à accélérer le véhicule et enregistrer l'évolution de l'angle de tangage (pitch angle) en fonction du niveau d'accélération. Cet angle est déterminé par intégration du signal de la vitesse angulaire autour de l'axe latéral (pitch axis). La figure 15 montre la variation de l'angle de tangage en fonction des configurations testées. L'observation de la figure 15 montre que l'angle de tangage augmente avec la masse du véhicule. En effet, en présence uniquement du conducteur, aucun renversement n'est enregistré. Par contre lorsque le quad transporte deux passagers, nous avons observé deux renversements. Cependant, en présence du passager (c) (71 kg, le moins lourd des participants aux essais), le véhicule ne renverse pas et demeure stable. Cette observation est liée au fait qu'en présence du passager (c), le centre de masse du véhicule ne recule pas suffisamment vers l'arrière pour compromettre la stabilité longitudinale. Sur la figure 16 sont reportés les seuils de renversement longitudinal obtenus sur table renversement ainsi que les angles maximums de tangage enregistrés durant les essais dynamiques et montrés sur la figure 15 précédente. Il importe de noter que chaque fois que l'angle maximum, enregistré durant les essais, est supérieur à l'angle obtenu sur table renversement, il se produit un renversement. Ces essais dynamiques valident ainsi ceux obtenus sur table de renversement. Autrement dit, les résultats d'essais obtenus sur table de renversement sont suffisants pour prédire une éventuelle instabilité longitudinale du véhicule en présence d'un conducteur seulement ou d'un conducteur et d'un passager.

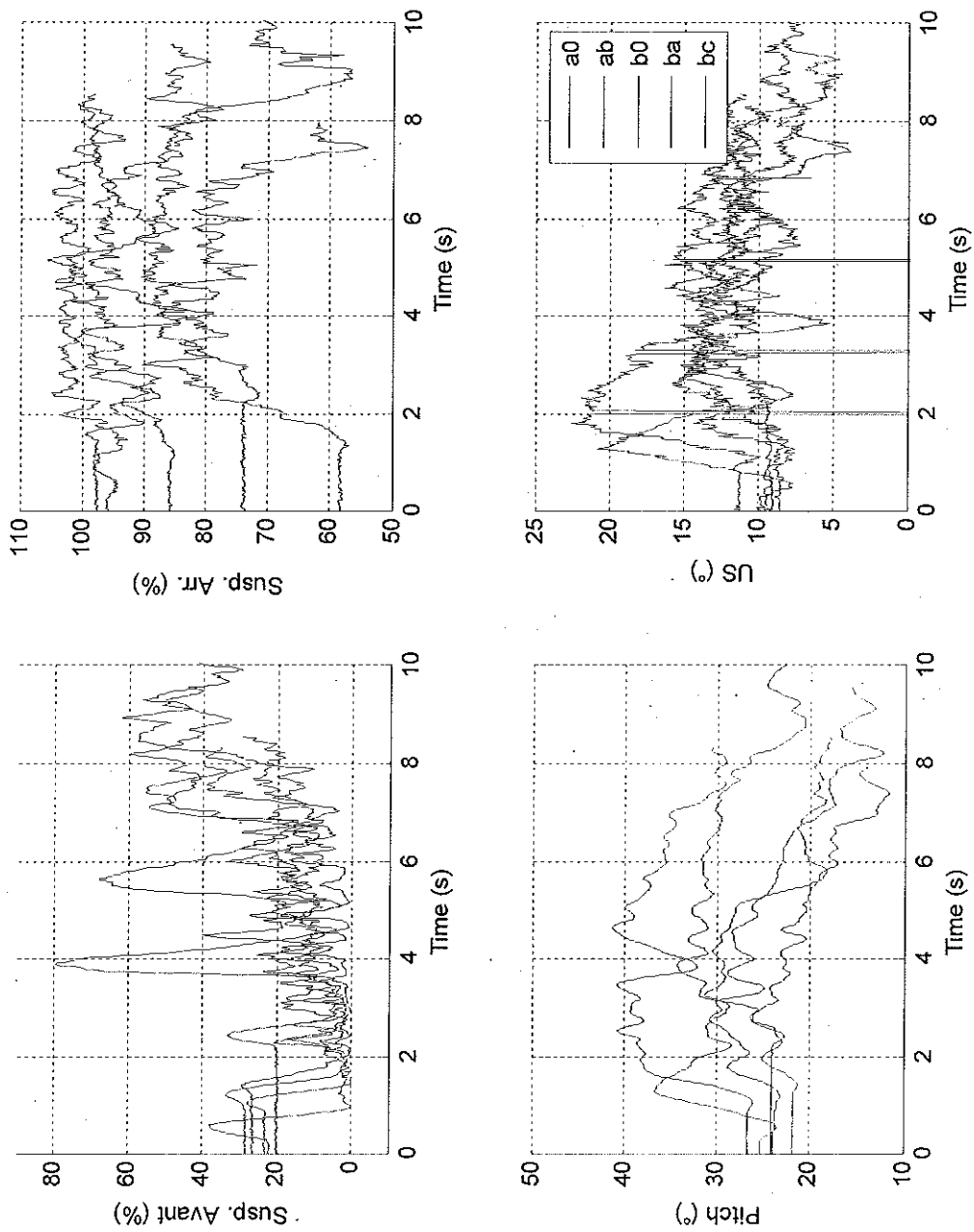


Figure 15 Évolution de l'angle de tangage durant les essais sur une pente. (mine Asbestos).

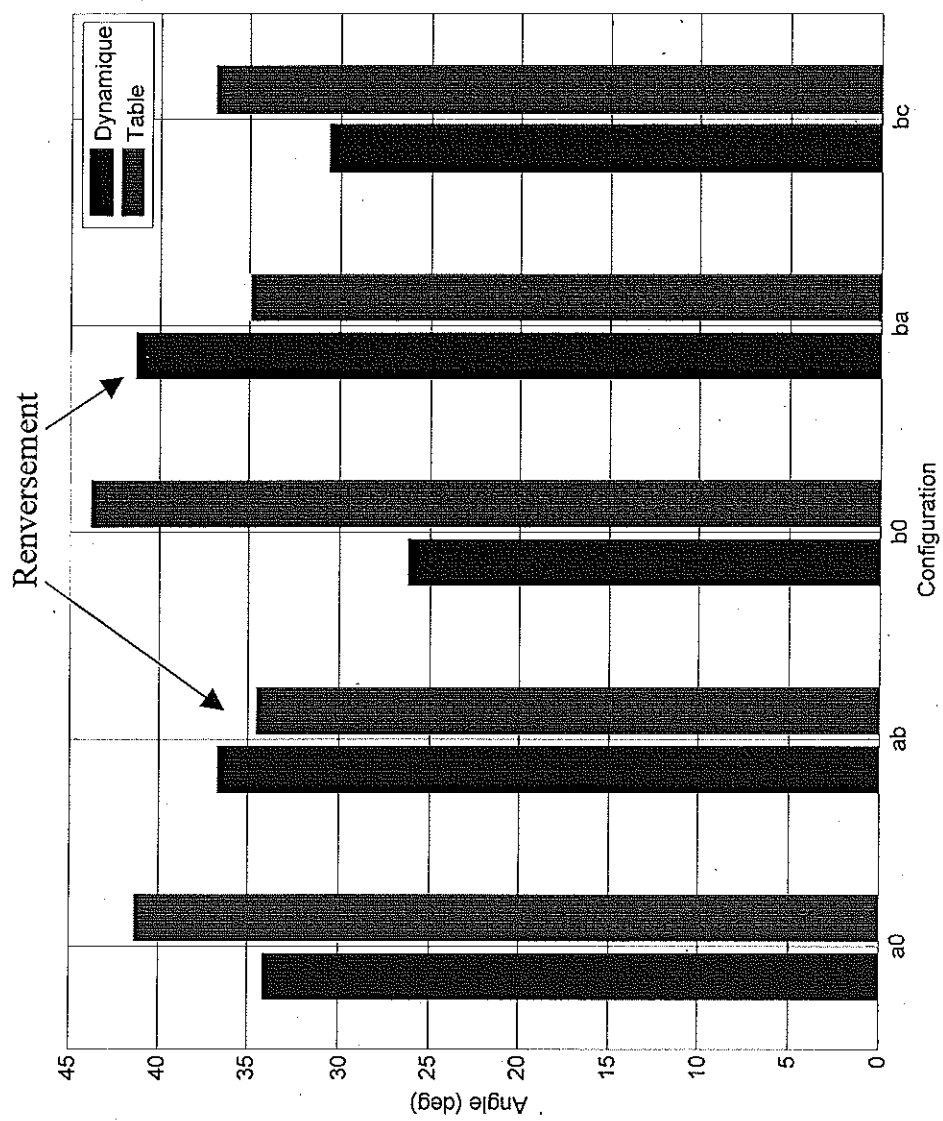


Figure 16 Validation en dynamique des seuils de renversement longitudinal enregistrés sur table de renversement

Essais d'accélération et de freinage.

L'ajout d'un passager se traduit par un déséquilibre de charge au profit des roues arrières. Les essais en freinage et d'accélération ont pour but d'analyser les transferts de charges respectivement vers l'avant ou l'arrière du véhicule. Par ailleurs, ces essais vont permettre aussi d'observer les variations des courses de la suspension alors, qu'en présence d'un passager, la masse totale du véhicule vient d'être substantiellement augmentée d'au moins 20%.

6.3.1 Mesure de la variation de la course des suspensions.

Pour chacune des quatre suspensions, un capteur de position linéaire est fixé entre le châssis et le bras inférieur de la suspension. La figure 17 montre un exemple type de montage.

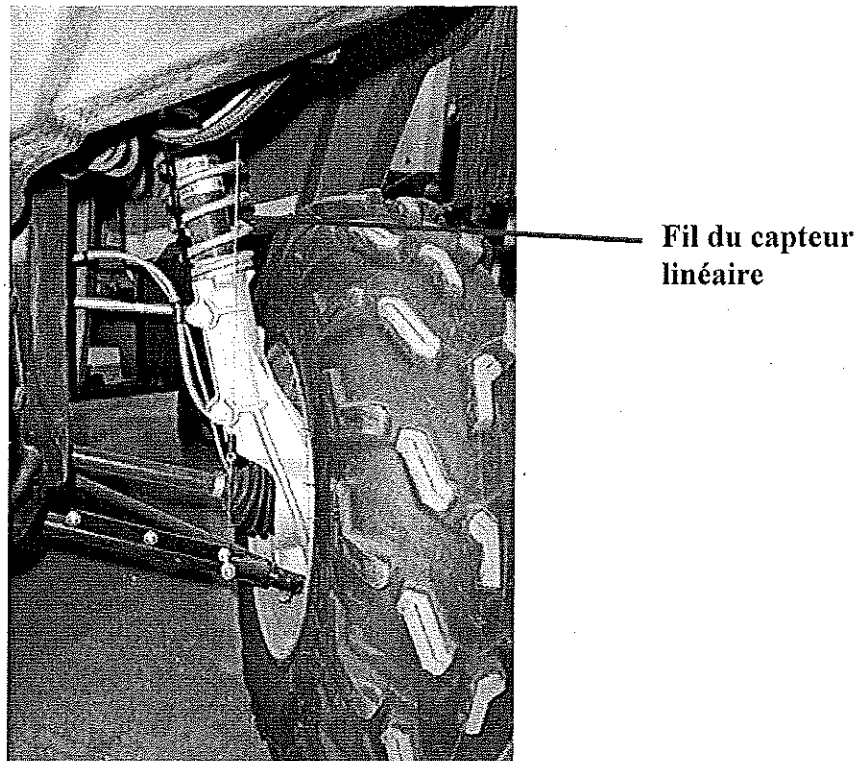


Figure 17 Montage typique du capteur linéaire pour la mesure de la course d'une suspension

Les signaux associés aux essais de freinage et d'accélération sont traités et les résultats sont regroupés sur les figures 18, 19 et 20.

La figure 18 met en évidence les résultats des accélérations ou décélérations enregistrées lors d'essais effectués à la piste du CFTC à Charlesbourg (asphalte). Deux types de configurations sont visées. La première configuration dite configuration de référence concerne la présence

uniquement du conducteur seul sur le véhicule. La seconde configuration est associée à la présence du conducteur et d'un passager. Nous analysons dans les lignes qui suivent les résultats de chacun de ces deux types de configurations.

Figure 18 : Conducteur seul

Les niveaux d'accélération enregistrés pour cette configuration se situent entre 0.61 g et 0.63 g. Quant aux niveaux de décélération, ils se rangent l'intérieur de l'intervalle compris entre 0.78 g et 0.8 g. La limite maximale de ces niveaux sont limités par la friction du sol d'essai et la puissance de freinage disponible.

Figure 18: Conducteur et passager

Les accélérations enregistrées pour cette configuration se situent entre 0.53 g et 0.61 g. Ces niveaux d'accélérations sont légèrement plus faibles que les celles enregistrées pour la configuration de référence. Cette réduction dans les niveaux d'accélérations est liée à l'augmentation de la masse totale du véhicule.

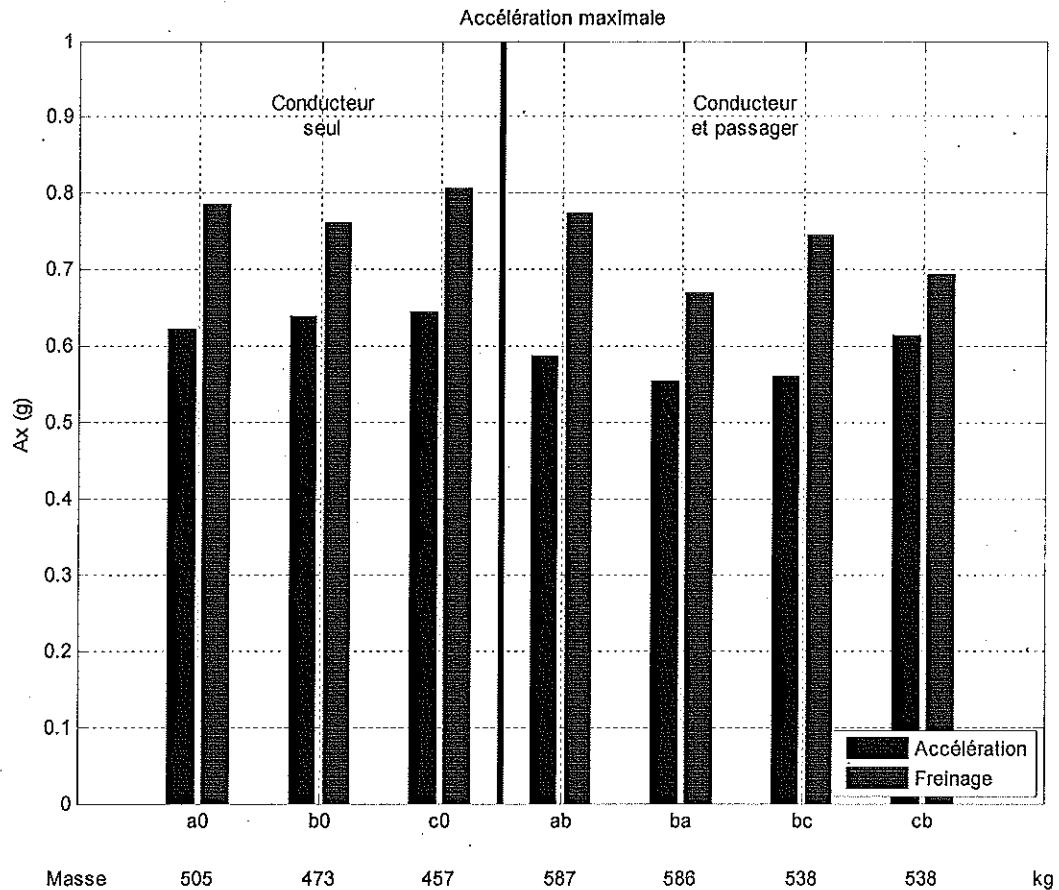


Figure 18 Niveaux maximums d'accélération/décélération sur piste asphaltée.

Avant d'entamer l'analyse des résultats associés aux courses des suspensions, il importe de préciser la nature de l'ordonnée des graphes des figures 19 et 20. Cette ordonnée est liée à l'écrasement ou course de la suspension exprimée en pourcentage. Le pourcentage de 100% représente le déplacement maximal de la suspension avant d'atteindre la butée (bumper). Les déplacements supérieurs à 100% représentent en fait des courses qui vont au-delà de la butée. Enfin, plus la course est élevée, plus la charge supportée par la suspension l'est aussi.

Figure 19 : opérations de freinage (suspensions avant)

Conducteur seul

Les niveaux des courses statiques (avant freinage G_0 et D_0) atteignent des pourcentages qui sont inférieurs à 50%. En mode freinage, les courses dynamiques des suspensions gauche et droite

($G_{\max}$ et $D_{\max}$) atteignent des niveaux élevés (environ 90%) mais demeurent inférieures à la course totale avant butée. Seul le conducteur (a) dont la masse est élevée (113 kg) arrive à atteindre la course totale de 100%.

Figure 19 : opérations de freinage (suspensions avant)

Conducteur et passager

Les niveaux des courses statiques sont comparables à celles correspondant à la configuration de référence. Cette observation confirme que la masse apportée par la présence du passager influe relativement peu sur les charges des roues avant. Autrement dit, la charge liée au passager est supportée uniquement par les roues arrière. Par contre, durant les opérations de freinage, les courses dynamiques des suspensions atteignent la course maximale de 100%. Cette situation a été enregistrée uniquement, dans le cas de la configuration de référence, par le conducteur (a) dont la masse est relativement élevée (113 kg).

Figure 20 : opérations d'accélération (suspensions arrière)

Conducteur seul

Les courses statiques de cette configuration sont moins importantes que celles observées dans le cas des suspensions des roues avant (inférieurs à 40%). Cette réalité traduit la répartition de la charge statique au profit de l'avant pour la configuration de référence. En mode accélération, les courses dynamiques des suspensions demeurent inférieures à 80 % sauf dans le cas du conducteur (a) où le transfert de charge vers l'arrière est plus important.

Figure 20 : opérations d'accélération (suspensions arrière)

Conducteur et passager.

Les courses statiques sont nettement plus élevées que dans le cas de la configuration de référence. Dans le cas par exemple du couple (b,a), la course statique est comparable à celle enregistrée dynamiquement par le conducteur (b). En général, les courses dynamiques se situent au-delà de 90 % alors que dans certains cas, elles dépassent 100% ((ab) et (ba)).

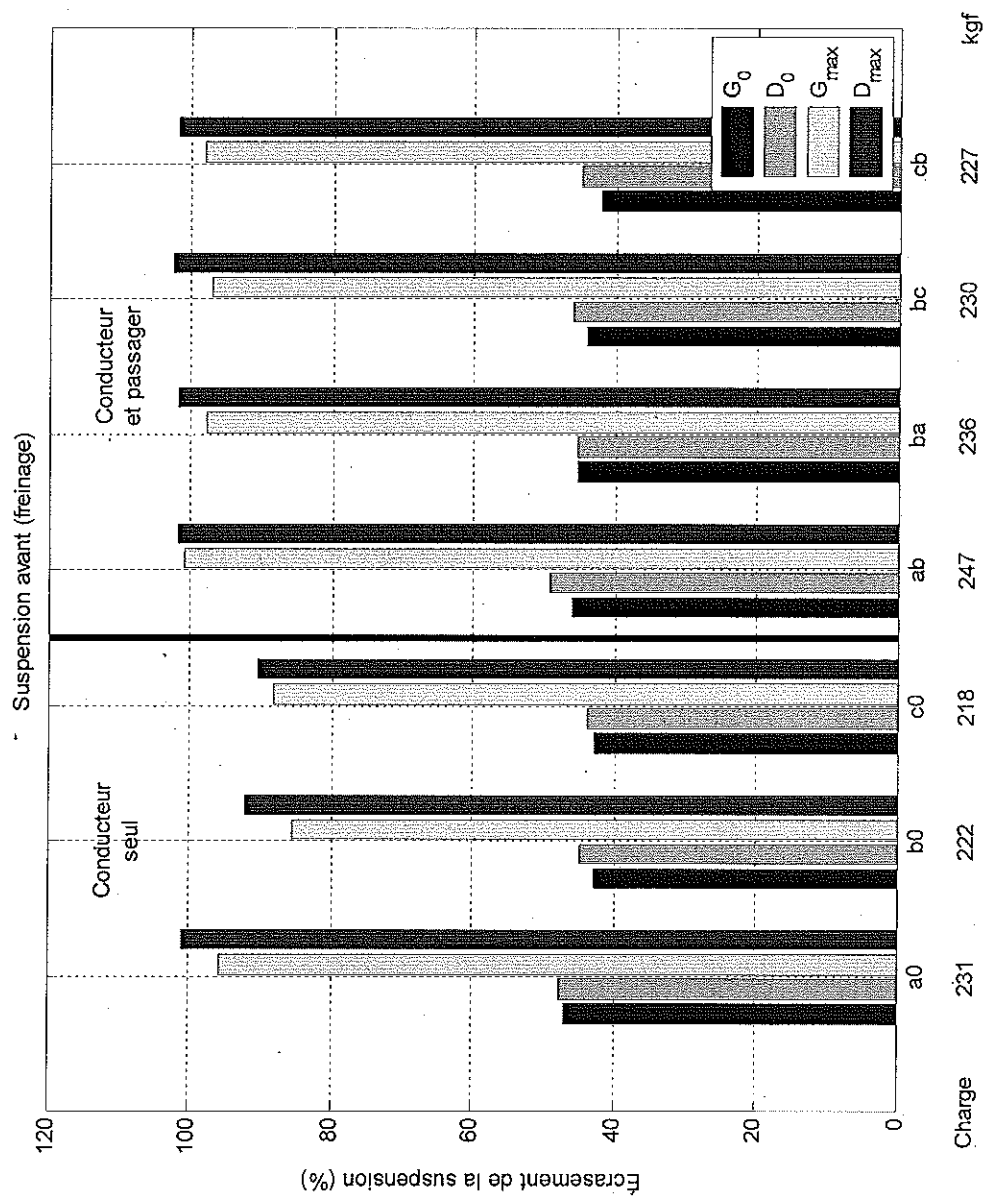


Figure 19 Variations de la course des suspensions avant en phase de freinage.

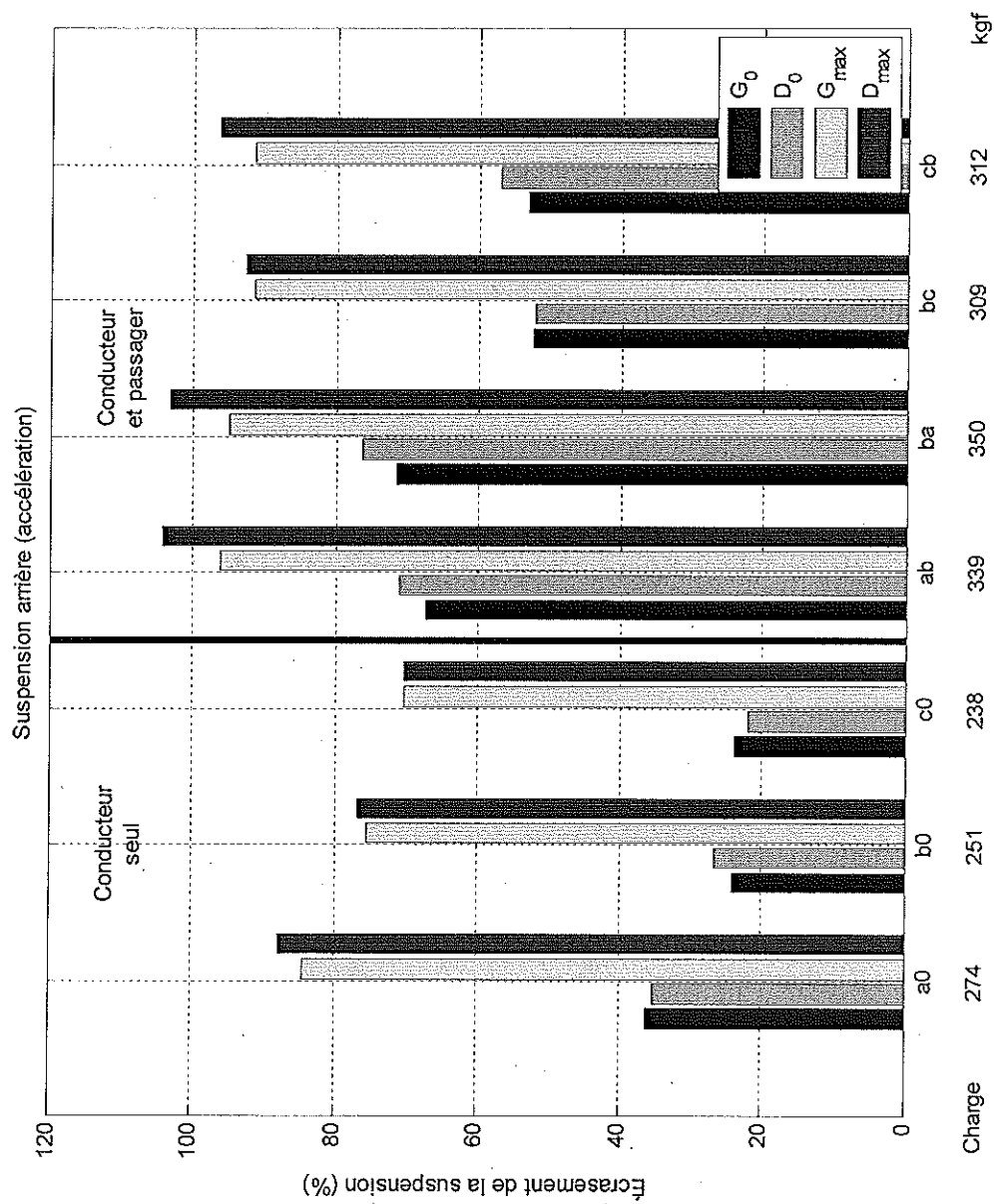


Figure 20 Variations de la course des suspensions arrière en phase d'accélération.

Durant les opérations de freinage ou d'accélération, l'angle de tangage (pitch angle) du véhicule varie selon l'amplitude de l'excitation. La figure 21 illustre ces variations d'angle de tangage. L'analyse de la figure 21 démontre plusieurs résultats intéressants. Pour la configuration où seul le conducteur est embarqué, l'angle de tangage initial est limité et varie entre 0.37 à 1.45 degrés alors qu'en présence d'un passager l'angle initial peut atteindre jusqu'à 5 degrés, soit plus de trois fois l'angle maximum enregistré pour la configuration de référence. En mode de freinage, l'angle de tangage est relativement stable et se situe environ autour de 6 degrés. Alors qu'en mode d'accélération, les angles de tangage, entre la configuration de référence et celle associée à la présence d'un passager, ne sont pas situés dans le même intervalle de variation. Il est clair d'observer qu'en présence d'un passager l'angle de tangage est d'autant plus élevé que la masse totale est élevée. En effet, lorsque la masse totale de la configuration avec passager est inférieure à la masse totale tolérée par le constructeur (545.5 kg), l'augmentation de l'angle de tangage par rapport à la configuration de référence est limitée à un degré environ, alors que dans le cas où la masse totale dépasse la valeur de la masse tolérée, l'écart enregistré atteint 3 degrés environ. Cette réalité confirme simplement que la présence d'un passager se traduit par une répartition de charge biaisée vers l'arrière.

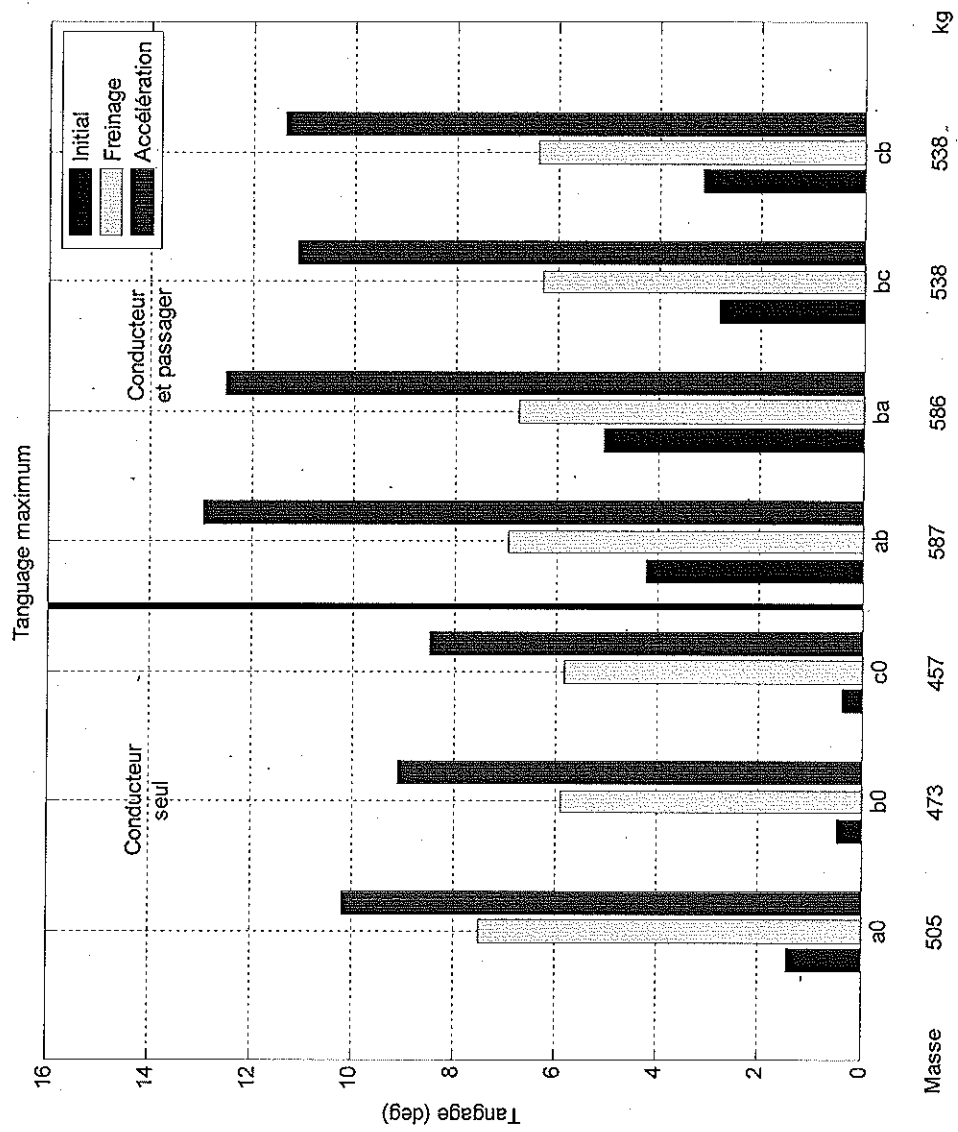


Figure 21 Angle de tangage maximal en phase d'accélération ou de freinage.

Essais sur cercle à rayon constant.

Ces essais visent à caractériser la manœuvrabilité du véhicule sous deux types de chargements : conducteur seul et conducteur accompagné d'un passager. Les paramètres de sortie à surveiller durant ces essais sont liés à l'angle de roulis et l'angle du volant en fonction de l'accélération latérale du véhicule.

Ces essais consistent à décrire par le conducteur un cercle de 6 m de rayon à vitesse progressive jusqu'à renversement ou perte de contrôle par le conducteur. Ce sont des essais qui nécessitent plusieurs répétitions avant d'atteindre des résultats acceptables. Les figures 21 et 22 illustrent les résultats d'essai traités où les angles de roulis et le volant sont tracés en fonction de l'accélération latérale du quad. L'observation de ces courbes montre que plus la masse transportée par le véhicule est élevée plus l'angle de roulis augmente (tableau 4). Ce résultat est tout fait prévisible et confirme ceux enregistrés durant les essais statiques sur table de renversement.

Tableau 3 taux de roulis du quad

configuration	Taux de roulis (deg /g)
Conducteur (a) seul	12.52
Conducteur (a) + passager (b)	16.03
Conducteur (b) seul	11.60
Conducteur (b) + passager (a)	17.37
Conducteur (b) + passager (c)	15.97

La variation de l'angle du volant en fonction de l'accélération latérale du quad traduit le caractère sous-vireur ou sur-vireur (understeer/oversteer) du véhicule. Le quad d'essai possède un essieu arrière sans différentiel (rigid rear axle). Autrement dit, lorsque le véhicule est engagé dans un virage, les deux roues de l'essieu tournent à la même vitesse. Ainsi lorsque le véhicule est en rotation, les roues arrière développent un couple résistant à la rotation du véhicule. Ainsi, plus les roues de cet essieu sont chargées, plus l'angle initial du volant, comme le montrent les figures 21 et 22, est important. Les courbes exprimant l'angle du volant en fonction de l'accélération latérale démontrent que le comportement du véhicule est légèrement survireur (oversteer) à partir de 0.3 g environ d'accélération latérale. Ce comportement est en général typique à ce genre de véhicule. Ce qu'il faut retenir de ces résultats associés au cercle à rayon constant est la présence

du couple résistant développé par l'essieu arrière qui augmente avec la charge de l'essieu et impose au conducteur plus d'effort pour tourner son véhicule.

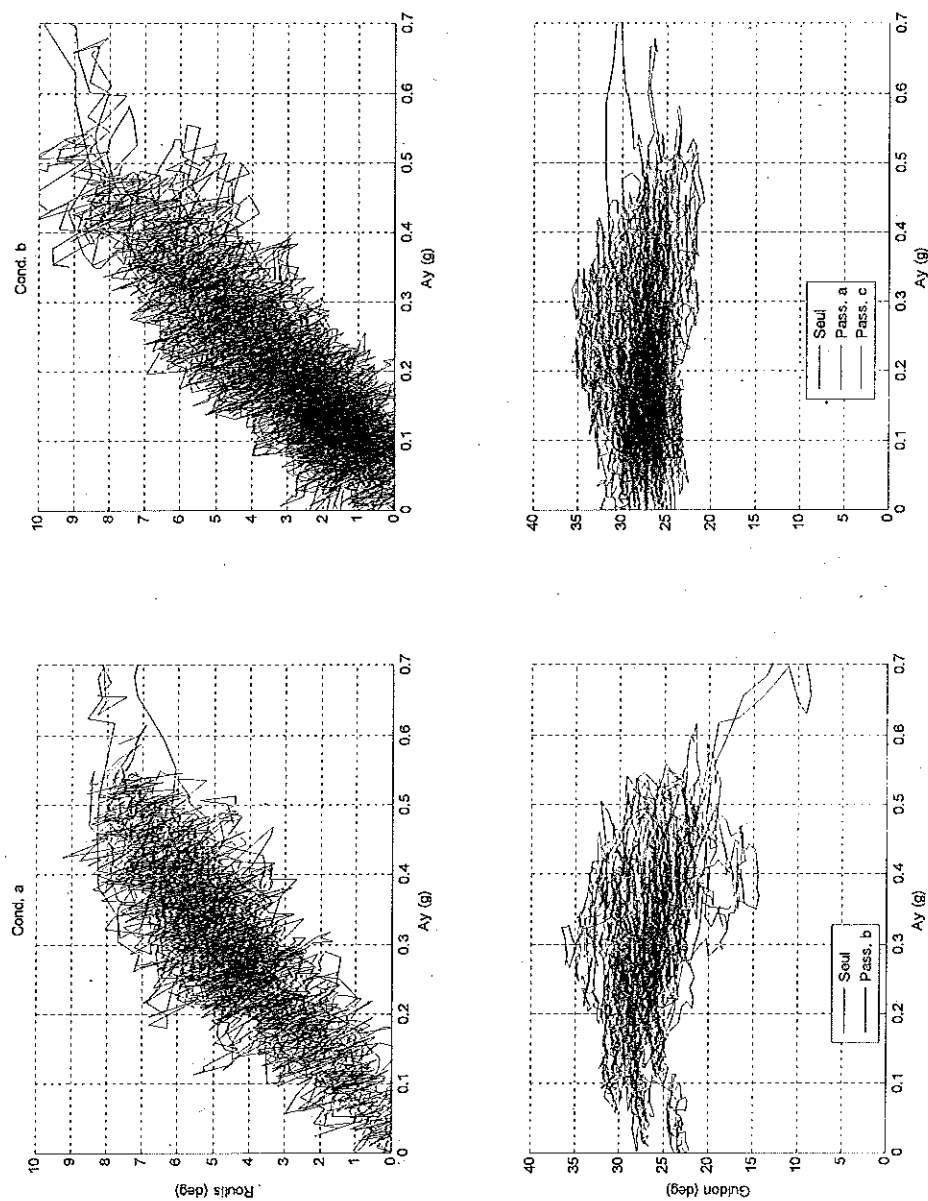


Figure 22 Angles de roulis et de volant (cercle à rayon constant)

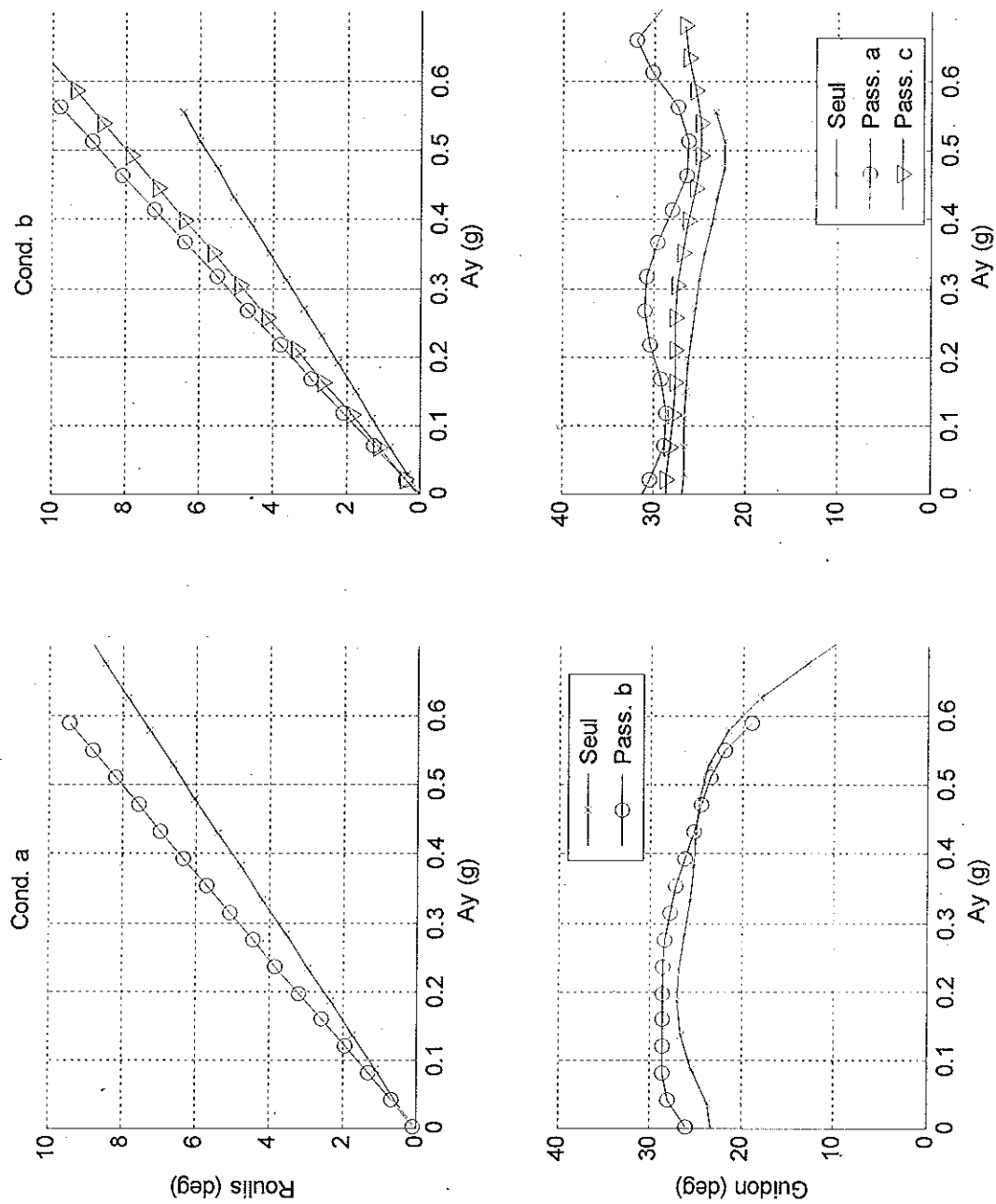


Figure 23 Angles de roulis et de volant lissés. (Cercle à rayon constant).

Détermination de la pente maximale théorique pour le quad modifié.

L'annexe C détaille la mise en équation de la stabilité longitudinale d'un quad [3] alors qu'il gravit une pente. Cette mise en équation permet de déterminer la condition de stabilité longitudinale du véhicule. Cette condition donnée par l'équation (10) de l'annexe C est reprise ici et fournie par l'équation (1) ci-dessous. Les symboles utilisés dans les équations développées dans ce sous-paragraphe sont entièrement définis en annexe C.

$$\frac{a}{h} \geq \frac{F_f \mp MR_R}{W_T \cos(\theta)} \quad (1)$$

En utilisant l'inéquation (1) et les seuils de renversement longitudinal déterminés sur la table de renversement, il est possible d'évaluer la pente maximale que le quad à une place modifié pour accepter un passager est susceptible de gravir sans risque de renversement. Cette évaluation n'est bien sûr possible que si l'on impose au quad une accélération donnée.

En se posant sur le cas limite, c'est à dire en passant de l'inégalité fournie par l'équation (1) à l'égalité ci-dessous et en posant $MR = 0$.

$$\frac{a}{h} = \frac{\ddot{x}}{\cos(\theta)} + \tan(\theta) \quad (2)$$

$\ddot{x}$: Accélération du quad sur la pente d'angle θ

$\frac{a}{h}$: Seuil de renversement longitudinal du quad modifié pour transporter un passager et fourni par les essais sur table de renversement.

En imposant différents niveaux d'accélération, et en résolvant l'équation (2), il est possible de déterminer l'angle maximum théorique que les différentes configurations sont susceptibles de gravir sans risque de renversement (figure 24). Les résultats montrés par la figure 24 mettent en évidence que plus le seuil de renversement longitudinal diminue plus la capacité du quad, à gravir des pentes élevées, est compromise.

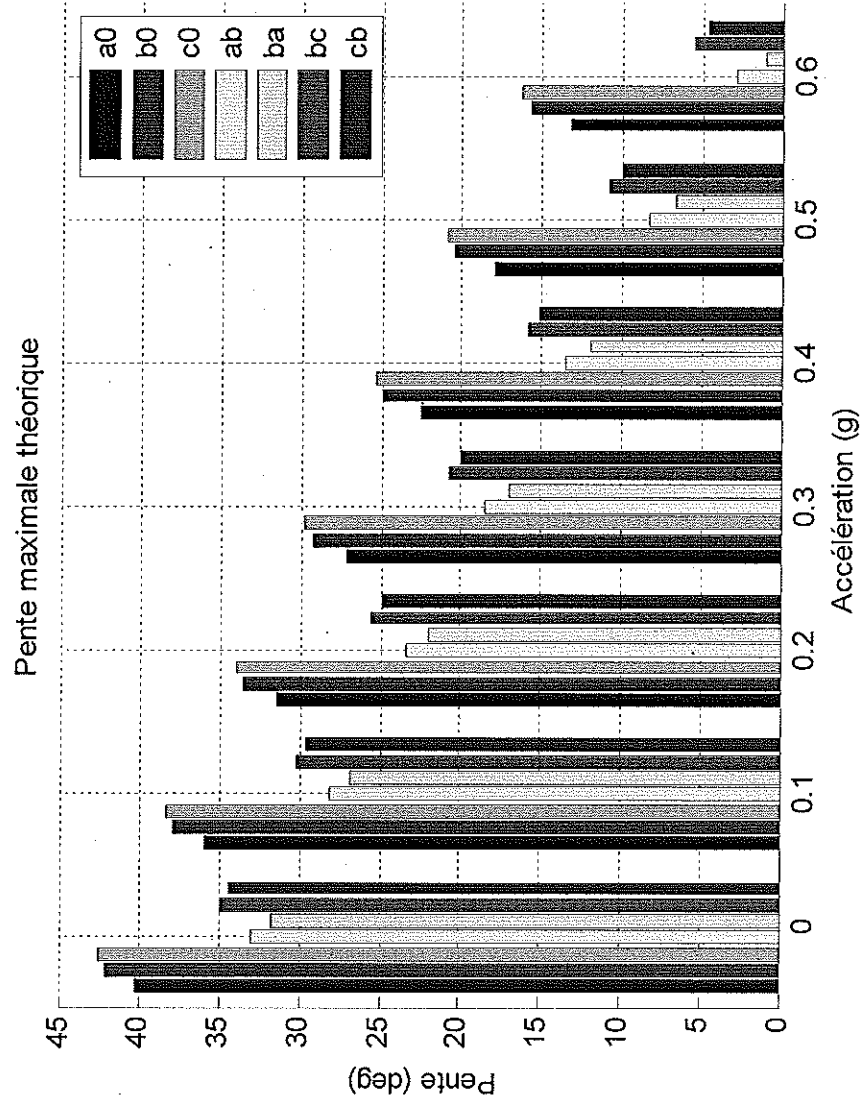


Figure 24 Pentes maximales pour différentes configurations de quad.

Détermination des vitesses maximales en courbe pour le quad modifié.

En se référant aux seuils de renversement latéral enregistrés pour la configuration de référence et la configuration correspondant au quad modifié pour accepter un passager, nous proposons, en se basant sur la définition de l'accélération latérale ($a_y = \frac{v^2}{R}$), d'établir la vitesse requise pour le quad modifié lorsque celui-ci est engagé sur un virage de rayon R. La figure 25 traduit cette proposition sous formes de courbes permettant de déterminer la vitesse de circulation sur courbe en fonction du rayon R et de la configuration du quad. En effet, pour un même rayon, le quad modifié, à cause de son seuil limité en stabilité latérale, est caractérisé par une vitesse au virage plus faible que celle associée au quad de référence.

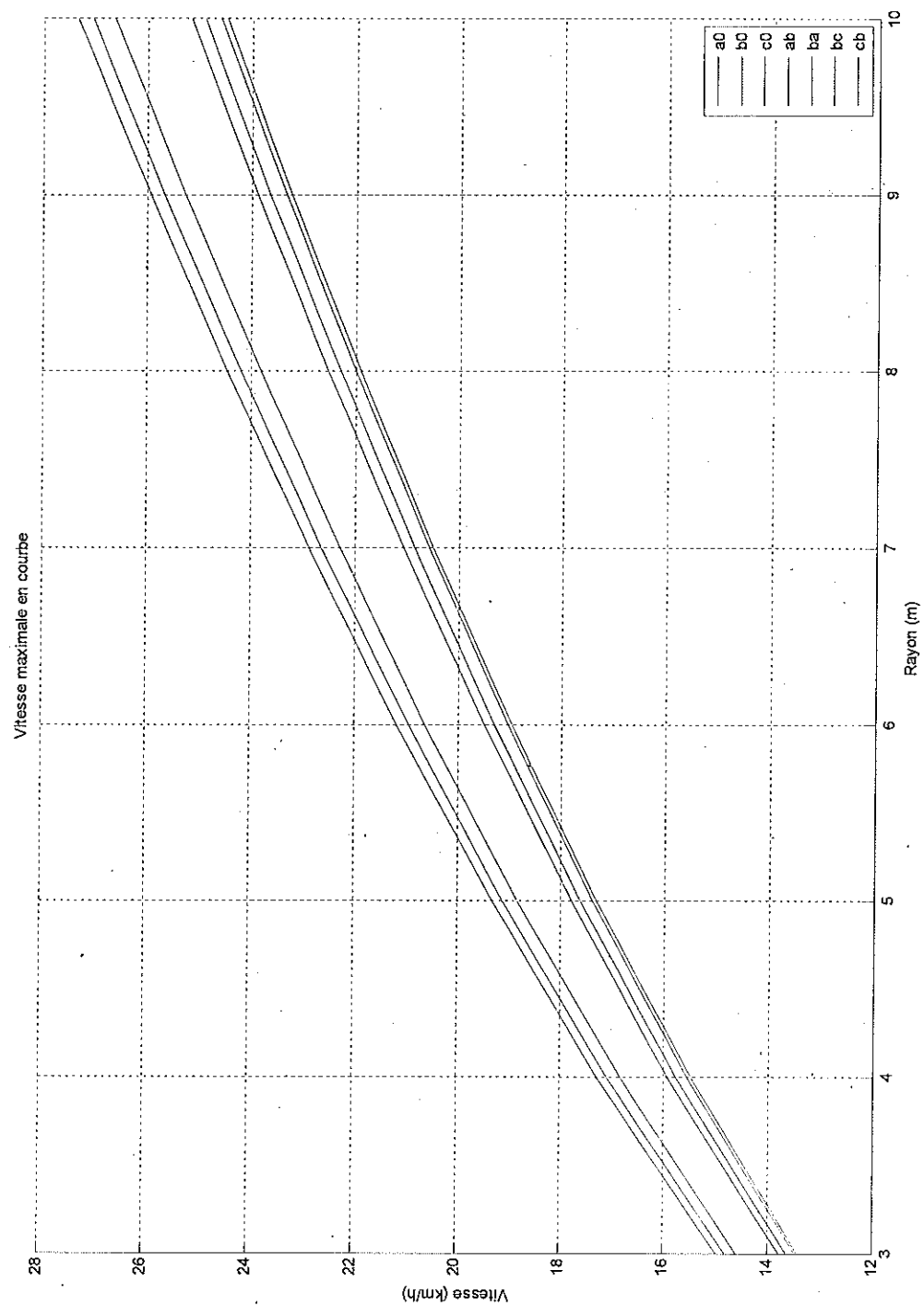


Figure 25 Vitesses en fonction du rayon de courbe

Synthèse des résultats d'essai.

Essais sur table de renversement

Stabilité longitudinale

La figure 26 illustre la chute du seuil de renversement du quad modifié et du quad à deux places par rapport au quad de référence. Il importe de noter, qu'au minimum le seuil de renversement chute de 20 % pour le véhicule modifié. Autrement dit, les risques d'instabilité longitudinale sont plus élevés. Par ailleurs, plus la masse du passager augmente plus le seuil de stabilité du quad se détériore. La configuration (b,a) où le passager pèse 113 kg, son seuil de stabilité chute de plus de 30%. Il importe de souligner que le quad à deux places lui aussi enregistre des baisses de seuil de renversement. Cependant, ces baisses sont moins importantes que celles observées dans le cas du quad modifié. En effet, hormis le cas de la configuration transportant le passager le plus lourd (113 kg), la baisse demeure inférieure à 15%. Il est à souligner qu'au niveau de la stabilité longitudinale, le quad à deux places analysé dans cette étude présente des seuils de renversement intermédiaires situés entre ceux du quad de référence et du quad modifié.

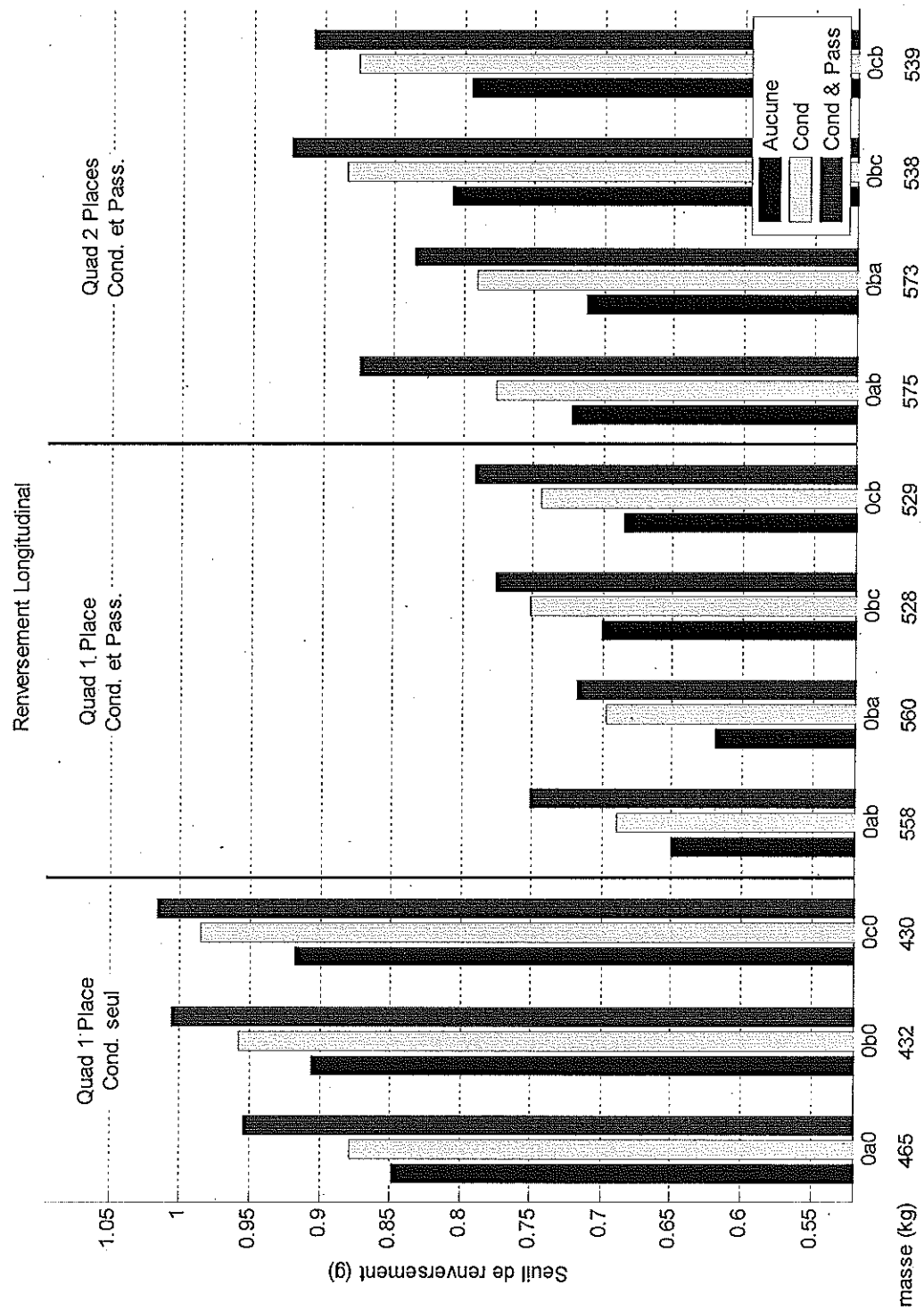


Figure 26 Comparaison des seuils de renversement longitudinal entre le quad à une place et le quad à deux places.

Stabilité latérale

Sur la figure 27 sont tracés les seuils de renversement associés à trois configurations de quad. Les seuils enregistrés pour le quad modifié démontrent une baisse de niveau d'une moyenne de 15 % environ comparativement aux seuils observés pour le quad de référence. Cette diminution s'explique qu'en présence d'un passager, la hauteur du centre de masse augmente alors que la distance latérale entre les pneus (track) demeure intacte entre les deux configurations de quads.

La compensation a bien sûr un effet souhaitable puisqu'elle permet d'améliorer les seuils de renversement à la conditions que le conducteur et le passager l'exécutent correctement. Il importe de noter, par ailleurs, que l'effet du conducteur (compensation) sur le seuil de renversement latéral est plus prononcé lorsque le conducteur opère seul. La présence du passager semble limiter l'effet de la compensation. Néanmoins, la participation du passager permet quand même d'améliorer le seuil de renversement latéral. Cette amélioration due au mouvement du passager est plus efficace dans le cas du quad à deux places. Cette efficacité est probablement due au fait que, dans ce cas, le passager dispose de plus d'espace pour accomplir ses mouvements. Enfin, les seuils de renversement latéral du quad à deux places sont tout à fait comparables à ceux enregistrés dans le cas du quad à une place modifié pour accepter un passager. Dans certains cas, les seuils de renversement associé au quad modifié sont supérieurs à ceux du quad à deux places.

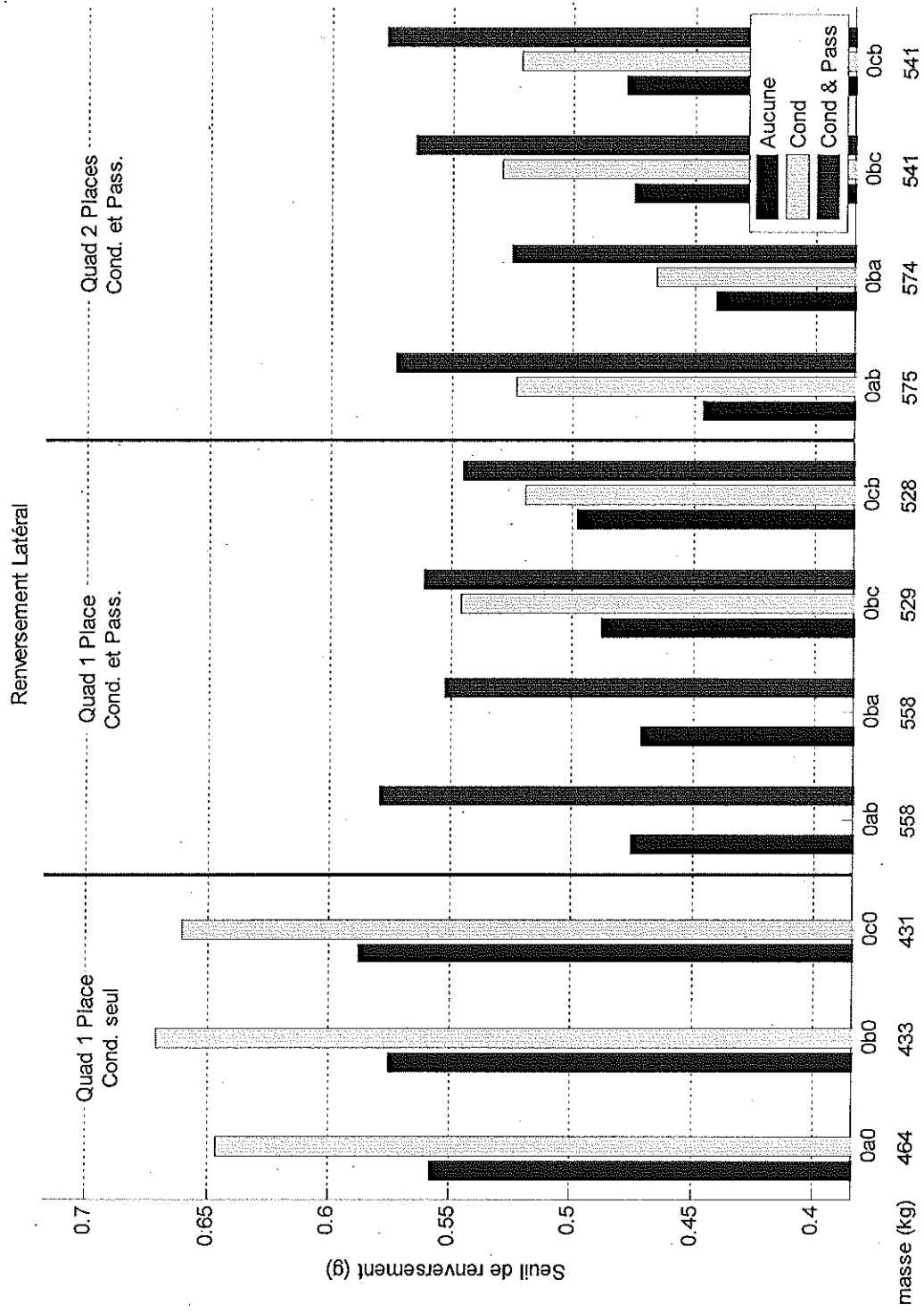


Figure 27 Comparaison des seuils de renversement latéral entre le quad à une place et le quad à deux places.

Essais dynamiques.

Durant les essais de freinage, les suspensions du quad modifié sont plus sollicitées que celles du quad de référence. Ces efforts de sollicitations pourraient dépasser les limites en termes de résistance des suspensions. Durant les opérations d'accélération, les suspensions arrière sont soumises à de notables variations d'efforts. Les courses de suspensions en statique (à l'arrêt) pour la configuration modifiée sont nettement plus importantes que celles enregistrées pour la configuration de référence. En effet, elles sont au moins trois fois plus importantes. Pour une accélération de 0.6 g environ, les suspensions de la configuration modifiée subissent des elongations qui dépassent la course disponible avant butée. Alors que dans les mêmes conditions, les courses des suspensions arrière du quad de référence enregistrent des niveaux en dessous de la course totale. Par ailleurs, les angles de tangage enregistré pour le quad modifié sont plus prononcés que ceux associés au quad de référence. Cette réalité pourrait contribuer à favoriser un comportement indésirable de la suspension. Un comportement que nous n'avons pas analysé dans cette étude. Enfin, les essais de manœuvrabilité démontrent que l'essieu rigide des roues arrière est siège d'un couple initial dont l'importance croît avec la masse du passager. Autrement dit, plus le passager est pesant, plus le conducteur doit développer un effort directionnel conséquent.

Conclusion

Dans le but d'analyser l'influence, en termes de sécurité, de la modification apportée à un quad en vue de transporter un passager, deux types d'essai ont été réalisés. Des essais statiques sur table de renversement sont entrepris et destinés à caractériser les seuils de stabilité longitudinal et latéral. Les essais sur table de renversement ont porté sur trois types de configurations : quad de référence à une place, un quad modifié pour transporter un passager, et un quad conçu pour un conducteur et un passager. Des essais dynamiques sur piste ont été réalisés, sur les deux premiers quads, en vue de valider certains résultats provenant d'essais statiques mais aussi d'explorer les transferts de charges sur les systèmes de suspension durant les opérations de freinage et d'accélération. Enfin, des essais de manœuvrabilité exécutés sur un cercle à rayon constant (6 m) ont été exécutés sur une piste de la FQCQ. La présence du passager modifie le comportement du quad de référence comme suit:

1. Un chargement biaisé vers l'arrière. Plus le passager est lourd plus le biais est prononcé. La charge arrière peut atteindre jusqu'à plus de 60 % de la charge totale du quad.
2. La charge totale, selon les poids du conducteur et du passager, peut dépasser la limite tolérée par le fabricant du quad
3. Une augmentation de la hauteur du centre de masse.
4. La combinaison d'une répartition biaisée de la charge vers l'arrière et d'une augmentation de la hauteur du centre de masse, contribue à baisser les seuils de renversement longitudinal.
5. L'augmentation de la hauteur du centre de masse et le maintien d'une distance latérale entre pneus constante conduit à une baisse des seuils de renversement latéral.
6. Le chargement du quad de référence avec des masses à l'avant et à l'arrière démontre des seuils de renversement longitudinal et latéral sensiblement comparables à ceux enregistrés en présence d'un passager.
7. Les seuils de renversement longitudinal du quad à deux places sont plus élevés que ceux du quad modifié, mais demeurent quand même plus faibles que ceux observés dans le cas du quad de référence.
8. Les seuils de renversement latéral du quad à deux places sont comparables à ceux du quad modifié. Dans certaines conditions, les seuils du quad modifié sont supérieurs à ceux du quad à deux places.
9. Une conduite avec une compensation, de la part du conducteur et du passager, est nécessaire puisqu'elle permet d'améliorer sensiblement les seuils de renversement.
10. En dynamique (freinage ou accélération), les suspensions du quad modifié sont nettement plus sollicitées. Ces efforts, notamment lorsque la masse totale du véhicule excède la limite tolérée par le fabricant, pourraient dépasser la limite de résistance des éléments de la suspension. Le quad à deux places n'a pas fait l'objet d'essai dynamiques, mais en mode de freinage ou d'accélération, les transferts de charge, à cause de l'allongement de son empattement, devraient être limités.
11. La nature biaisée du chargement conduit, notamment lorsque celle-ci est importante, à des angles de tangage plus élevés pour le quad modifié que ceux associés au quad de

référence. L'influence de la variation de ces angles de tangage n'a pas été explorée dans cette étude.

Recommandations

La configuration associée à un quad modifié par l'ajout d'un siège à l'arrière pourrait être tolérée à circuler uniquement dans les sentiers de la FQCQ dans les conditions suivantes :

1. Ne pas dépasser la capacité de charge nominale du quad telle que spécifiée par le constructeur.
2. Assurer une formation pertinente pour le conducteur, notamment en présence d'un passager.
3. Proposer des vitesses maximales comparables à celles recommandées par le constructeur en cas de transport de charge.
4. Éviter de gravir des pentes abruptes (maximum 10 degrés).
5. Éviter la circulation sur les flancs des pentes
6. Éviter des freinages agressifs et des accélérations sur pente.
7. Pourvoir les sentiers de la FQCQ de panneaux de signalisations pertinents, notamment les limites de vitesses aux niveaux des virages et des pentes.
8. Analyser ultérieurement l'aspect ergonomique, de la présence du passager et de son siège, en terme de conduite et de confort.
9. Privilégier le choix d'un quad conçu pour deux places pour transporter un passager.

Bibilographie

1. B., Falah, '*Comportement dynamique de véhicules tout-terrain (quad) en présence d'un second passager*', rapport technique, Université du Québec à Rimouski. Sept 2003.
2. *Guide d'aménagement et d'entretien des sentiers quad au Québec*. La fondation de la faune du Québec. 2003.
3. R., R., Wright, '*Lateral and Longitudinal Stability of Atvs*', ASAE, paper 87-5005

Annexe A

Quad d'essai.

Alternator Output	350 w	350 w
Bore x Stroke	92 x 75	92mm x 75mm
Brake Light	26,9 watts	26,9 watts
Brake, Auxiliary	Foot-Activated Hydraulic Disc	
Brake, Foot		All-wheel hydraulic disc
Brake, Hand		All-wheel hydraulic disc
Brake, Parking	Hydraulic lock, all wheel	Transmission park lock and hydraulic lock, all wheel
Brakes, Front	Single-Control Hydraulic Disc	
Brakes, Rear	Single-Control Hydraulic Disc	
Compression Ratio	10,2:1	10,2:1
Coolant Capacity	2,7 qts. (2,5 l)	2,7 qts. (2,5 l)
Demand Drive Fluid Capacity		6 oz. (175 ml)
Displacement	499 cc	499 cc
Drive Ratio, Front	3,82:1	3,82:1
Driving System Type	Automatic	Automatic
Dry Weight	728 lbs. (330 kg) (base model) (weight of other models may vary)	798 lbs. (362 kg)
Engine	EH50PLE	EH50PLE
Engine Oil Capacity	2 qts. (1,9 l)	2 qts. (1,9 l)
Front Rack/Storage Box Capacity	90 lbs. (40,8 kg)	90 lbs. (41 kg)
Front Suspension	MacPherson strut with 8,2 (21 cm) travel	MacPherson strut with 8,2 (21 cm) travel
Fuel Capacity	4,13 gal. (15,6 l)	6 gal. (22,7 l)
Fuel System	Electronic Fuel Injection	Electronic Fuel Injection
Gear Reduction, Forward	10,49:1	10,57:1
Gear Reduction, Low	23,91:1	23,91:1
Gear Reduction, Reverse	16,30:1	21,74:1
Gross Vehicle Weight	1200 lbs. (544 kg)	1400 lbs. (635 kg)
Ground Clearance	11,25 in. (28,5 cm)	11 in. (28 cm)
Headlight	1 Single Beam on Headlight Pod (50 watt) 2 Single Beam on Bumper (37,5 watt)	2 Hi/Lo beam on bumper (37,5 watt)
Ignition System	Electronic Ignition	Electronic Ignition
Ignition Timing	13 +/- 3 BTDC @ 1150 RPM, engine warm	10 +/- 1 BTDC @ idle
Instrument Cluster	LCD	LCD
Lubrication System	Dry Sump	Dry Sump
Minimum Turning Radius	65 in. (165 cm) unloaded	82 in. (208 cm) unloaded
Overall Height	48 in. (122 cm)	48 in. (122 cm)
Overall Length	83 in. (211 cm)	93 in. (236 cm)

Overall Width	48 in. (122 cm)	48 in. (122 cm)
Rear Rack/Storage Box Capacity	180 lbs. (81,6 kg)	348 lbs. (158 kg)
Rear Suspension	Progressive rate with 9,5 (24 cm) travel	Progressive rate with 8,75 (22 cm) travel
Receiver Hitch Tongue Capacity	120 lbs. (54 kg) (Rear rack capacity and tongue weight not to exceed 180 lbs./81,6 kg)	120 lbs. (54,4 kg) (Rear rack capacity and tongue weight not to exceed 348 lbs./158 kg)
Receiver Hitch Towing Capacity	1225 lbs. (556 kg)	1225 lbs. (555 kg) on level ground
Shift Type	Side Lever (H/L/N/R/P)	
Spark Plug		NGK BKR6E
Spark Plug / Gap	NGK BKR6E / .035 in. (0,9 mm)	.035+0,0/-0,004 in. (0,9+0,0/-0,1 mm)
Taillights	8,26 watts	8,26 watts
Tires/Pressure, Front	26x8-12 / 5 psi	25x8-12 / 5 psi (34,5 KPa)
Tires/Pressure, Rear	26x11-12 / 5 psi	25x11-12 / 5 psi (34,5 KPa)
Transmission		Automatic EBS (Engine Braking System)w/E-Z Shift H/L/N/R/P
Transmission Oil Capacity		32 oz. (948 ml)
Wheelbase	50,5 in. (128,3 cm)	57 in. (145 cm)

Annexe B

Répartition des charges sur le véhicule d'essai

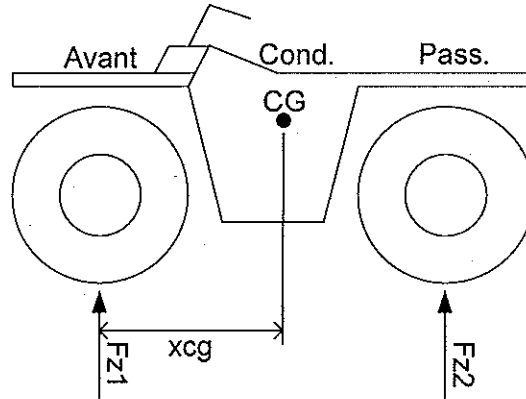


Tableau 1 : Données massiques sur les configurations d'essai

configuration	fz1 (kgf)	fz2 (kgf)	masse (kg)	xcg (mm)
000	179.2	171.5	350.7	633.5
0a0	216.8	249.5	466.2	693.2
0ab	234.5	322.7	557.2	750.3
0am	193.8	342.1	535.9	827.0
0b0	205.1	227.4	432.5	681.1
0ba	217.7	342.4	560.1	791.9
0bc	229.4	298.0	527.4	731.9
0bm	196.9	306.4	503.4	788.6
0c0	210.4	219.0	429.4	660.7
0cb	222.9	306.0	528.9	749.5
0cm	198.2	303.8	502.0	783.9
ma0	252.7	246.7	499.4	640.0
mab	275.1	320.9	596.1	697.5
mam	229.3	344.5	573.8	777.8
mb0	247.0	222.2	469.2	613.4
mba	259.3	337.7	596.9	732.8
mbm	229.4	310.7	540.1	745.1
mc0	250.6	215.1	465.7	598.3
mcm	244.2	291.0	535.2	704.4
Masse avant	86 lb (39 kg) : bordure universelle 8 x 3 x 39 pouces			
Masse arrière	2 fois masse à l'avant (172 lb, 78 kg)			
Conducteur a	113.2 kg			
Conducteur b	81.2 kg			
Conducteur c	71 kg			
Siège pour passager	13.81 kg			

Annexe C

Équations sur la stabilité longitudinale d'un véhicule quad [3]

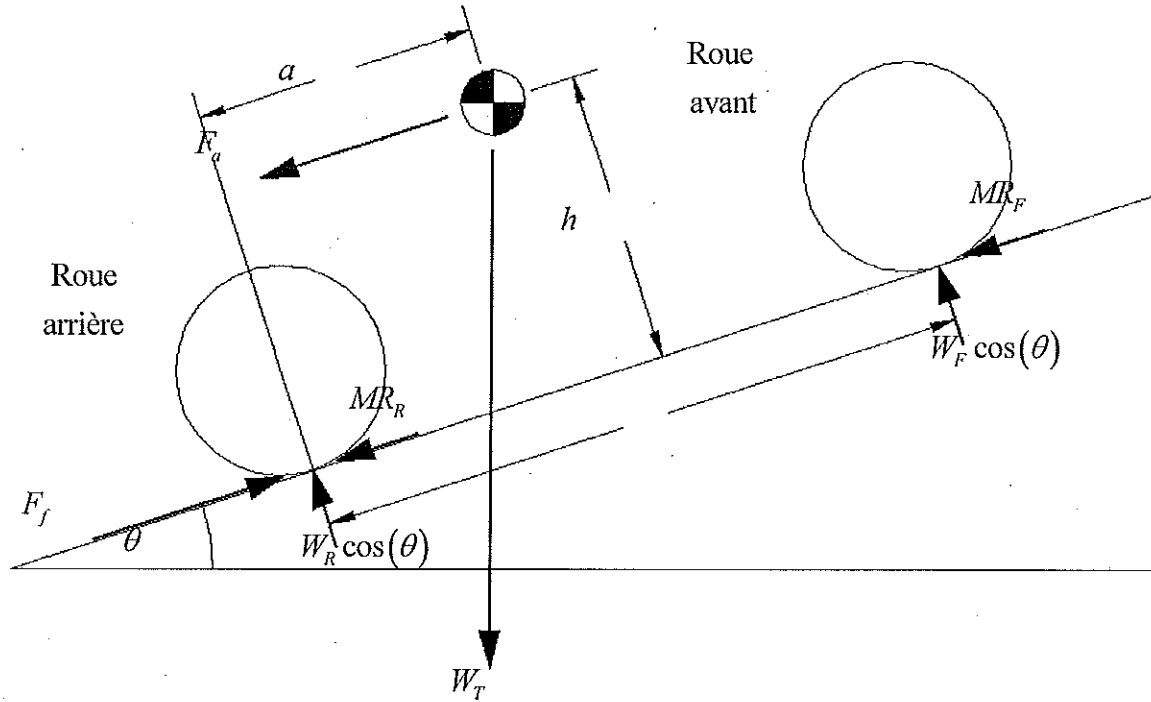


Figure 28 Diagramme des corps libres d'un quad en montée sur une pente.

Lorsqu'il y a décollement des roues avant,

$$(1) \quad W_F \cos(\theta) = 0$$

$$(2) \quad MR_F = 0$$

Dans ces conditions, le moment de stabilité du véhicule correspond à :

$$(3) \quad M_{\text{stabilité}} = aW_T \cos(\theta)$$

Et celui d'instabilité correspond à :

$$(4) \quad M_{\text{instabilité}} = hF_a + hW_T \sin(\theta)$$

Le véhicule ne renverse pas si :

$$(5) \quad aW_T \cos(\theta) \geq hF_a + hW_T \sin(\theta)$$

$$(6) \quad \frac{a}{h} \geq \frac{F_a + W_T \sin(\theta)}{W_T \cos(\theta)}$$

Puisque nous avons des forces de friction et de résistance au roulement seulement à l'arrière, nous obtenons que lorsque le véhicule monte une pente :

$$(7) \quad F_f = F_a + W_T \sin(\theta) + MR_R$$

Et lorsque le véhicule descend une pente à reculons :

$$(8) \quad F_f = F_a + W_T \sin(\theta) - MR_R$$

On obtient que :

$$(9) \quad F_a + W_T \sin(\theta) = F_f \mp MR_R$$

Si on substitue l'équation (9) dans l'équation (6), on obtient :

$$(10) \quad \frac{a}{h} \geq \frac{F_f \mp MR_R}{W_T \cos(\theta)}$$

On sait que la force de friction aux roues arrières correspond à :

$$(11) \quad F_f = W_T \cos(\theta) \mu$$

Ainsi,

$$(12) \quad \mu = \frac{F_f}{W_T \cos(\theta)}$$

De la même manière,

$$(13) \quad \rho = \frac{MR_R}{W_T \cos(\theta)}$$

Pour que le véhicule demeure stable lors d'une ascension, il faut que :

$$(14) \quad \frac{a}{h} \geq \mu - \rho$$

Et lors d'une descente en marche arrière :

$$(15) \quad \frac{a}{h} \geq \mu + \rho$$