

Contrôle du tangage d'un véhicule en phase balistique

Ph. VASLIN^a, V. POUZOLS^a, Ch. GOUNAUD^a, J.-Ch. FAUROUX^b, S. DELEPLANQUE^a, M. DAVIS^{a,b}

a. Clermont University – Blaise Pascal University (UBP) – LIMOS
B.P. 10448 – 63000 CLERMONT-FERRAND, France.

b. Clermont University – French Institute for Advanced Mechanics (IFMA) – LaMI
B.P. 10448 – 63000 CLERMONT-FERRAND, France.

Résumé :

Le contrôle du tangage d'un véhicule en phase balistique est empiriquement bien connu des pratiquants de moto-cross et des pilotes de modèles réduits automobiles : il consiste à accélérer ou à freiner les roues suivant que le pilote souhaite faire cabrer ou piquer l'avant de son véhicule. Les paramètres mécaniques de ce phénomène ont été identifiés par des mesures lors de sauts réels à moto-cross, puis ont été intégrés dans un modèle 2D de simulation écrit en Java et destiné à étudier l'influence des conditions initiales du saut et des caractéristiques du véhicule sur le contrôle de son tangage.

Mots clefs : tangage, phase balistique, véhicule.

Abstract :

The pitch motion control during the aerial phase of a vehicle is empirically well known by pilots of motocross or car models: it consists in accelerating or braking the wheels whether the pilot wishes to pull up or to dive the vehicle nose. Mechanical parameters of this phenomenon have been identified by measures performed during real jumps, and have then been integrated into a 2-D simulation model written in Java language and designed for studying the influence of the jump initial conditions and the vehicle characteristics on the control of its pitch motion.

Keywords : pitch motion, aerial phase, vehicle.

1 Introduction

Lors des sauts à moto-cross, les pilotes affirment qu'ils peuvent « allonger » ou « raccourcir » leurs trajectoires en accélérant ou en freinant au cours de la phase aérienne du saut. Cette impression subjective semblant défier les lois de la mécanique classique, nous avons cherché à en identifier les causes en utilisant une approche expérimentale basée sur des mesures effectuées sur le terrain et en laboratoire, puis en élaborant un modèle mécanique dont les équations ont été intégrées dans un programme informatique de simulation écrit en Java et destiné à reproduire le comportement du système {Pilote + Moto} dans les trois conditions étudiées lors des expérimentations réelles : lorsque le Pilote n'exerçait aucune action sur les commandes (accélérateur, freins) au cours de la phase aérienne du saut (saut « normal »), lorsqu'il accélérât (saut « accéléré ») et lorsqu'il freinait la roue arrière de la moto en vol (saut « freiné »). Les méthodes mises en œuvre et les résultats obtenus par ces deux approches sont présentés, ainsi que leurs conséquences potentielles en vue de contrôler le mouvement de tangage d'un véhicule, de taille réelle ou réduite, au cours de la phase aérienne d'un saut provoqué par un accident de terrain prévisible ou non.

2 Matériel & Méthode

2.1 Approche expérimentale

Deux jeunes pilotes de moto-cross, alors engagés dans le Championnat de France Junior, ont exécuté plusieurs sauts avec la même moto et sur la même bosse du circuit du Moto-Club Vicomtois (Puy-de-Dôme, France). Chaque pilote devait essayer d'arriver sur la bosse avec la même vitesse et réaliser trois types de sauts, suivant les actions exercées sur les commandes de la moto au cours de la phase aérienne : aucune action (saut « normal »), accélération de la roue arrière (saut « accéléré »), freinage de la roue arrière (saut

« freiné »). Tous les sauts ont été enregistrés à 25 images/seconde (25 Hz) par une caméra vidéo numérique (résolution : 720 x 576 pixels) fixée sur un trépied et située à une vingtaine de mètres du plan de la trajectoire (figure 1). L'axe optique de la caméra était placé perpendiculairement à ce plan (xOy), dans lequel ont été également enregistrées les dimensions d'une mire afin de convertir les mesures sur les images en dimensions réelles.

Trois sauts caractéristiques (normal, accéléré, freiné) réalisés par un même pilote ont été sélectionnés et ont fait l'objet d'une analyse cinématique 2D [1]. Cette analyse a consisté à décomposer l'enregistrement de chaque saut en images individuelles sur lesquelles ont été relevées les coordonnées (x, y) de points caractéristiques du pilote (articulations de la cheville, du genou, de la hanche, de l'épaule, du coude et du poignet, extrémité du pied) et de la moto (axes des roues arrière et avant, cale-pied, extrémité du guidon).

Les masses de la moto, du casque et des bottes du pilote ont été mesurées et les positions de leurs centres de masse ont été déterminées en laboratoire par la méthode de la double suspension. Les masses du casque et des bottes ont été utilisées pour pondérer les masses et positions des centres de masse des segments tête, jambes et pieds dans le calcul du centre de masse (G_P) du pilote [2-4]. La masse et la position du centre de masse de la moto (G_M) ont ensuite été utilisées pour calculer la position du centre de masse (G_Σ) du système {Pilote + Moto}. Les moments d'inertie des roues avant (J_{G1z}) et arrière (J_{G2z}) et de la moto complète (J_{GMz}) ont également été calculés suivant la méthode du pendule pesant à partir de mesures d'oscillations effectuées sur des enregistrements vidéo numériques à 25 Hz. Toutes ces valeurs ont ensuite été utilisées dans le programme de simulation pour calculer le moment d'inertie total du système ($J_{G\Sigma z}$) et les variations d'orientation du châssis de la moto induites par les actions du pilote sur les commandes.



FIG. 1 – Vue générale des différentes phases d'un saut « normal » enregistré à 25 images/seconde.

2.2 Modèle mécanique

En parallèle et à la suite de l'approche expérimentale, nous avons formulé l'hypothèse que les impressions ressenties par le pilote suite à ses actions sur les commandes étaient provoquées par les variations d'orientation de la moto en l'air (mouvement de tangage). Compte tenu des vitesses de translation observées sur le terrain, la résistance de l'air a été supposée nulle au cours du saut. Dans ces conditions, la seule force agissant sur le système {Pilote + Moto} est son poids, appliqué au centre de masse du système (G_Σ), et dont le moment en ce point est nul. Par conséquent, le moment cinétique total du système est alors égal au moment cinétique barycentrique ($\vec{\sigma}^*$) et reste constant tout au long de la phase aérienne. Par contre, les moments cinétiques propres des roues avant ($\vec{\sigma}_1 = J_{G1z} \vec{\omega}_1$) et arrière ($\vec{\sigma}_2 = J_{G2z} \vec{\omega}_2$) peuvent varier, du fait des actions du pilote sur les commandes. Ces moments cinétiques peuvent être exprimés au centre de masse (G_Σ) du système {Pilote + Moto}, en appliquant le Premier Théorème de Koenig [5] :

$$\vec{\sigma}_1^* = \overline{G_\Sigma G_1} \wedge m_1 \vec{v}_1^* + \vec{\sigma}_1 \quad \text{et} \quad \vec{\sigma}_2^* = \overline{G_\Sigma G_2} \wedge m_2 \vec{v}_2^* + \vec{\sigma}_2$$

où : $\vec{v}_1^* = \vec{v}(G_1/R^*)$, et : $\vec{v}_2^* = \vec{v}(G_2/R^*)$, sont les vitesses linéaires relatives des axes des roues avant (G_1) et arrière (G_2) dans le référentiel barycentrique (R^*) du système {Pilote + Moto}.

De façon similaire, les moments cinétiques des centres de masse du pilote (G_P) et de la moto (G_M) dans R^* s'écrivent :

$$\vec{\sigma}_P^* = \overline{G_\Sigma \vec{G}_P} \wedge m_P \vec{v}_P^* \quad \text{et} \quad \vec{\sigma}_M^* = \overline{G_\Sigma \vec{G}_M} \wedge m_M \vec{v}_M^*$$

où : $\vec{v}_P^* = \vec{v}(G_P/R^*)$, et : $\vec{v}_M^* = \vec{v}(G_M/R^*)$, sont les vitesses linéaires relatives des centres de masse du pilote et de la moto dans R^* .

Par conséquent, le moment cinétique barycentrique total du système {Pilote + Moto} s'écrit :

$$\boxed{\vec{\sigma}^* = \vec{\sigma}_P^* + \vec{\sigma}_M^* + \vec{\sigma}_1^* + \vec{\sigma}_2^*} \quad \text{ou encore} \quad \boxed{\vec{\sigma}^* = \vec{\sigma}_\Sigma^* + \vec{\sigma}_1^* + \vec{\sigma}_2^*} \quad (1)$$

avec : $\vec{\sigma}_\Sigma^* = \overline{G_\Sigma \vec{G}_P} \wedge m_P \vec{v}_P^* + \overline{G_\Sigma \vec{G}_M} \wedge m_M \vec{v}_M^* + \overline{G_\Sigma \vec{G}_1} \wedge m_1 \vec{v}_1^* + \overline{G_\Sigma \vec{G}_2} \wedge m_2 \vec{v}_2^*$.

Il est important de noter que les vitesses linéaires relatives (\vec{v}_1^* , \vec{v}_2^* , \vec{v}_M^* , \vec{v}_P^*) ne sont généralement pas nulles du fait que le référentiel barycentrique (R^*) est, par définition, uniquement en translation par rapport au référentiel terrestre, et que la vitesse angulaire ($\vec{\omega}_\Sigma$) – ou vitesse de tangage – du système {Pilote + Moto} au décollage est également non nulle. Compte tenu du choix des axes du référentiel terrestre (Ox horizontal et positif dans le sens du mouvement ; Oy vertical et positif vers le haut), $\vec{\omega}_\Sigma$ était négative dans les sauts étudiés ici, car le système basculait vers l'avant aussitôt après le décollage.

A partir de l'équation (1), il est possible d'écrire :
$$\boxed{\vec{\sigma}^* = J_{G_\Sigma z} \vec{\omega}_\Sigma + J_{G_{1z}} \vec{\omega}_1 + J_{G_{2z}} \vec{\omega}_2} \quad (2)$$

avec : $J_{G_\Sigma z} = m_P \|\overline{G_\Sigma \vec{G}_P}\|^2 + m_M \|\overline{G_\Sigma \vec{G}_M}\|^2 + m_1 \|\overline{G_\Sigma \vec{G}_1}\|^2 + m_2 \|\overline{G_\Sigma \vec{G}_2}\|^2$, en première approximation.

L'équation (2) permet finalement d'exprimer la vitesse de tangage du système ($\vec{\omega}_\Sigma$) en fonction du moment cinétique barycentrique total ($\vec{\sigma}^*$) et des vitesses de rotation des roues avant ($\vec{\omega}_1$) et arrière ($\vec{\omega}_2$) :

$$\boxed{\vec{\omega}_\Sigma = (\vec{\sigma}^* - J_{G_{1z}} \vec{\omega}_1 - J_{G_{2z}} \vec{\omega}_2) / J_{G_\Sigma z}} \quad (3)$$

Puisque le moment cinétique total ($\vec{\sigma}^*$) du système {Pilote + Moto} doit rester constant en phase aérienne, quel que soit le type de saut réalisé, l'équation (3) a permis d'analyser et d'expliquer les mouvements de tangage du système qui se produisent dans les sauts caractéristiques étudiés ici.

3 Résultats & Discussion

3.1 Sauts réels

Les principaux résultats de l'analyse cinématique des trois sauts étudiés concernent l'orientation du châssis de la moto au cours des phases aériennes (figure 2) : ils font clairement apparaître que le châssis de la moto s'est cabré lors du saut « accéléré », alors qu'il a basculé vers l'avant lors du saut « freiné », par comparaison avec le saut « normal ». On peut formuler ici l'hypothèse que ce mouvement de tangage du système (positif vers l'arrière et négatif vers l'avant) est à l'origine des impressions du pilote sur la longueur de ses sauts :

- Le cabrage de la moto lors du saut « accéléré » lui a permis d'atterrir sur la roue arrière, puis de basculer vers l'avant après la reprise du contact avec le sol. Ce mouvement pourrait être à l'origine de l'impression du pilote « d'allonger son saut » lorsqu'il accélère en phase aérienne ;
- Inversement, le mouvement de piqué de la moto lors du saut « freiné » s'est traduit par un atterrissage sur la roue avant, suivi d'une bascule du système vers l'arrière après la reprise du contact avec le sol. Ce mouvement pourrait être à l'origine de l'impression du pilote de « raccourcir son saut » lorsqu'il freine la roue arrière en phase aérienne.

En l'absence de mesures des vitesses de rotation des roues de la moto au cours des sauts réels, les autres résultats quantitatifs de l'analyse cinématique n'ont pas apporté d'arguments décisifs à la question traitée ici.

Composant du système	Masse	Moment d'inertie
Roue avant (diamètre = 21 pouces)	$m_1 = 8 \text{ kg}$	$J_{G_{1z}} = 0,52 \text{ kg.m}^2$
Roue arrière (diamètre = 18 pouces)	$m_2 = 11 \text{ kg}$	$J_{G_{2z}} = 0,57 \text{ kg.m}^2$
Moto complète (avec les roues)	$m_M = 111 \text{ kg}$	$J_{G_{Mz}} = 29,54 \text{ kg.m}^2$
Pilote assis (taille = 1,75 m)	$m_P = 70 \text{ kg}$	$J_{G_{Pz}} = 12,68 \text{ kg.m}^2$
Système {Pilote + Moto}	$m_\Sigma = 181 \text{ kg}$	$J_{G_{\Sigma z}} = 52,08 \text{ kg.m}^2$

Tableau 1 : Paramètres inertiels des composants du système {Pilote + Moto}.

Par contre, les dimensions et les paramètres inertiels réels (tableau 1) des composants du système {Pilote + Moto} ont été intégrés dans le programme informatique écrit en Java avec les équations du modèle mécanique et destiné à simuler le mouvement de tangage du système lors de différents sauts effectués avec des conditions initiales identiques.

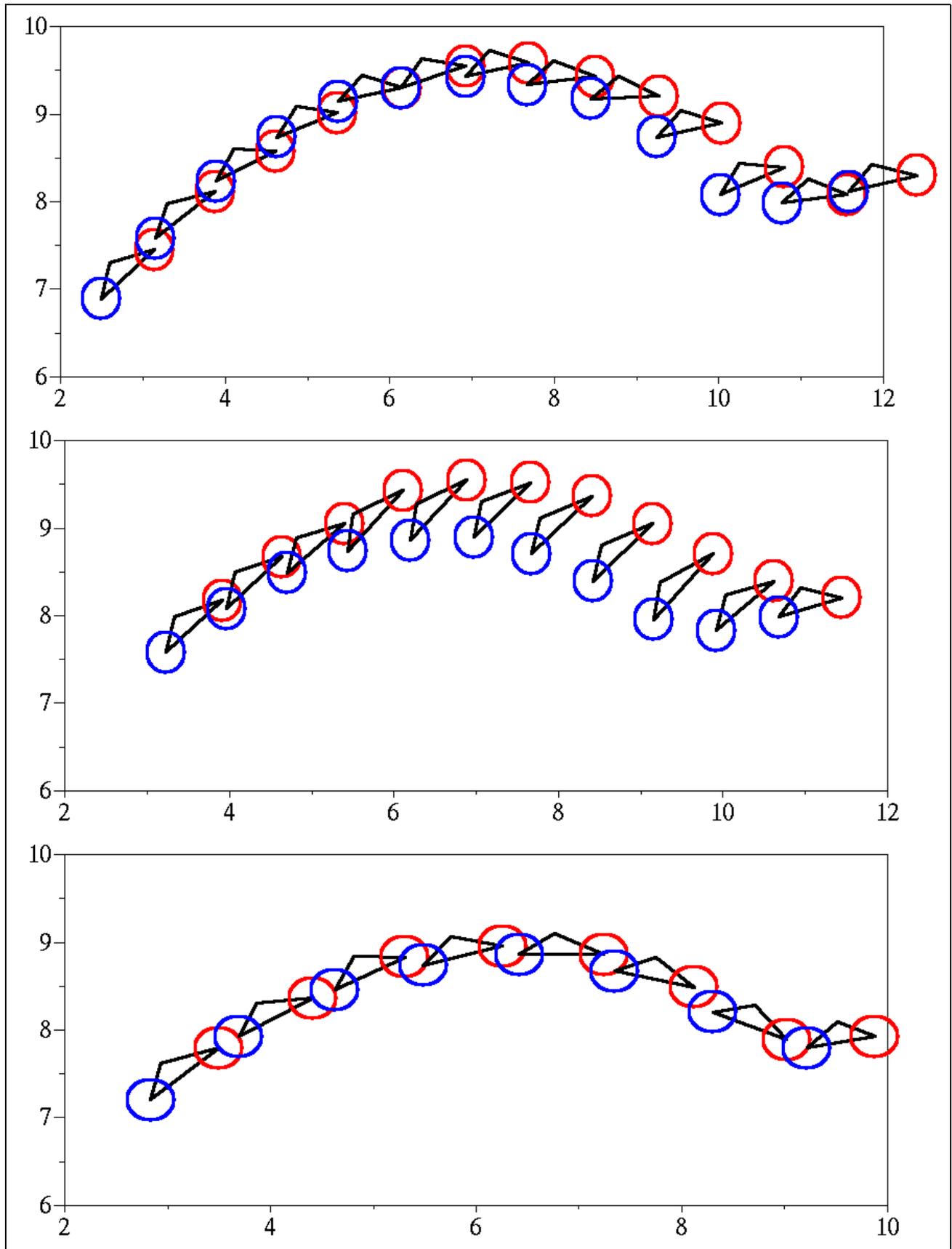


FIG. 2 – Représentation du mouvement de tangage du système {Pilote + Moto} au cours des trois *sauts réels* analysés : « normal », « accéléré » et « freiné » (de haut en bas).

3.2 Sauts simulés

Ce programme a été utilisé pour simuler quatre sauts (figure 3) dont les conditions initiales identiques (vitesse linéaire initiale : 50 km/h ; angle de décollage : 30° ; vitesse angulaire initiale $\vec{\omega}_Y$: -83 °/s) ont permis d'analyser les mouvements de tangage du système {Pilote + Moto} observés dans les cas suivants :

- Saut « normal » : puisque $\vec{\sigma}^*$ reste constant et que le pilote n'accélère pas et ne freine pas, la vitesse angulaire ($\vec{\omega}_Y$) du système {Pilote + Moto} reste constante au cours de la phase aérienne ;
- Saut « accéléré » : $\vec{\omega}_2$, qui est négative au décollage, augmente en valeur absolue. Donc le terme $-J_{Gz}\vec{\omega}_2$ augmente également, mais dans le sens positif. Ceci se traduit par une diminution de $\vec{\omega}_Y$, qui était également négative au décollage. Le résultat de cette action est donc une diminution de la rotation du système vers l'avant, qui peut éventuellement changer de sens (rotation vers l'arrière) ;

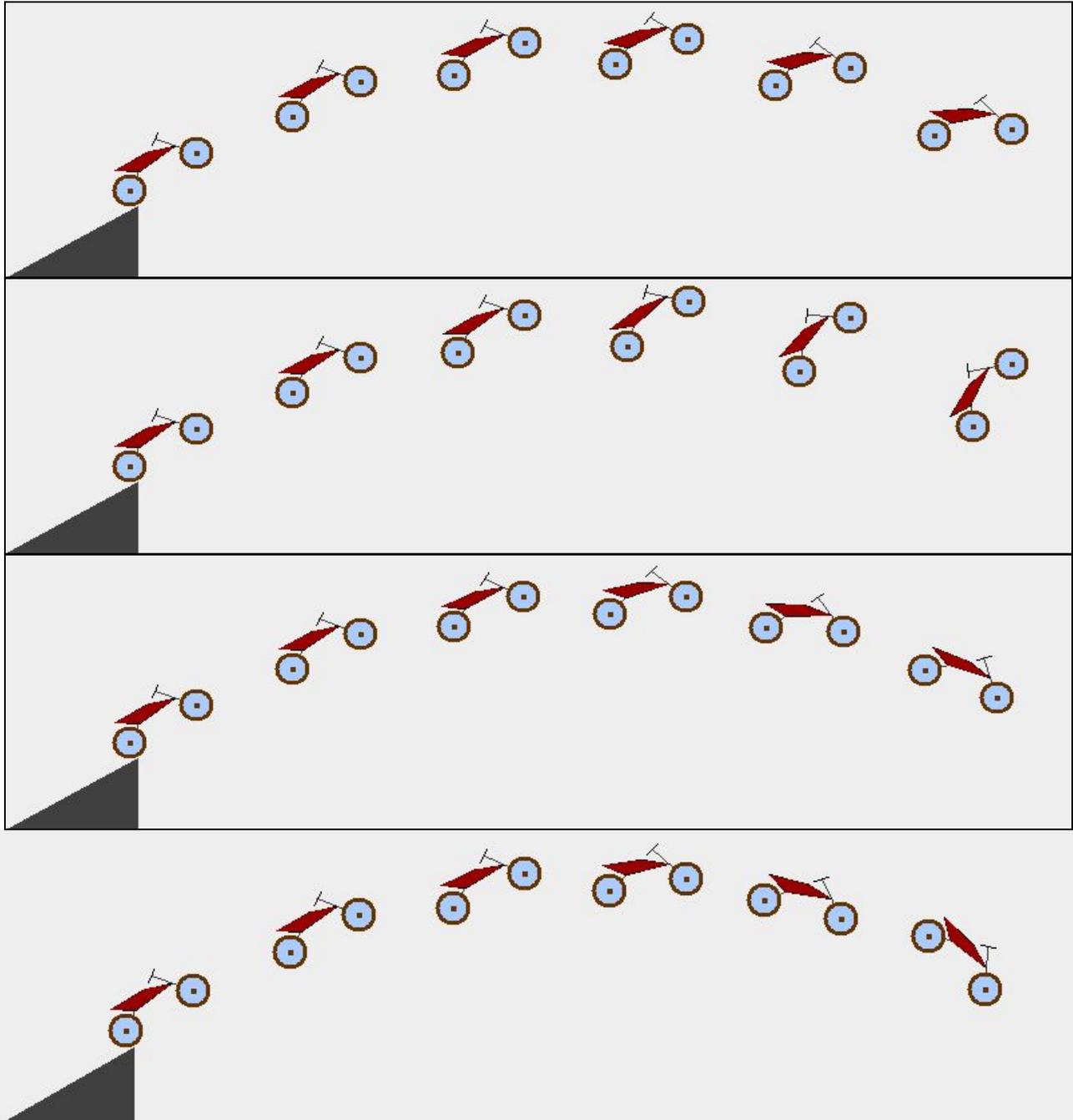


FIG. 3 – Mouvement de tangage du système {Pilote + Moto} au cours de quatre *sauts simulés* : « normal », « accéléré », « freiné » de la roue arrière et « freiné » des deux roues (de haut en bas).

- Saut « freiné » : $\vec{\omega}_2$ diminue en valeur absolue, jusqu'à s'annuler au moment du blocage de la roue. Donc, le terme $-J_{Gz} \vec{\omega}_2$, qui était positif, disparaît, ce qui se traduit par une augmentation de $\vec{\omega}_s$ en valeur absolue. Or, comme $\vec{\omega}_s$ est négative, le résultat de cette action est une augmentation de la rotation du système vers l'avant. Cet effet est encore accentué lorsque les deux roues sont freinées en phase aérienne, puisque le terme $-J_{Gz} \vec{\omega}_1$ diminue également jusqu'à s'annuler (figure 3 bas).

4 Conclusion & Perspectives

A la suite de mesures sur le terrain, qui ont permis d'identifier le phénomène mais pas de l'analyser finement, un modèle mécanique a été développé et intégré dans un programme de simulation afin d'étudier l'influence des actions du pilote sur les commandes de sa moto-cross (accélération ou freinage de la roue arrière, freinage des deux roues) sur le mouvement de tangage du système {Pilote + Moto} au cours de la phase aérienne d'un saut. Les résultats expérimentaux et surtout les simulations ont permis de montrer que les lois de la mécanique classique n'étaient pas remises en cause au cours de ces sauts et que les impressions du pilote « d'allonger » ou de « raccourcir » sa trajectoire suivant qu'il accélère ou freine la roue arrière de sa moto en l'air pouvaient s'expliquer par le mouvement de tangage provoqué par ses actions sur les commandes et notamment par le mouvement de bascule du système, vers l'avant ou vers l'arrière, après l'atterrissage sur la roue arrière ou sur la roue avant, respectivement.

Au-delà de son intérêt immédiat pour les pilotes de différents véhicules, de taille réelle ou réduite, le contrôle de ce mouvement de tangage est crucial pour un véhicule robotisé capable de se déplacer à grande vitesse (10 m/s) en tout-terrain et susceptible de décoller de manière intempestive sur un relief quelconque, prévisible ou non. Dans ce cas, cependant, le contrôle du tangage ne sera sans doute pas suffisant et devra être complété par la capacité du véhicule à se retourner en l'air pour corriger un éventuel mouvement de roulis créé au décollage [6]. Un véhicule robotisé présentant de telles qualités pourrait être d'une grande utilité dans les applications nécessitant un engin capable de rouler rapidement dans un milieu naturel faiblement structuré (exploration, surveillance, secours d'urgence).

Références

- [1] Pouzols V., Modélisation des facteurs influençant la trajectoire aérienne du système {pilote + moto} lors d'un saut en moto-cross. Validation expérimentale du modèle. Master Mécanique 1^{ère} année, Université Blaise Pascal, Clermont-Ferrand, 2006, 55 p.
- [2] Winter D.A., Biomechanics and motor control of human movement [Anthropometry : p. 51-74]. New York: Wiley Interscience Publication, 1990.
- [3] Duboy J., Junqua A., Lacouture P., Mécanique humaine : Éléments d'une analyse des gestes sportifs en deux dimensions, Paris : Revue E.P.S., 1994, 217 p.
- [4] Junqua A., Lacouture P., Duboy J., Marecot J. et Bonneau O., La science des mouvements humains : Sport – Ecole – Entraînement. CD-Rom d'initiation à la mécanique humaine. Paris : Revue E.P.S., 2001.
- [5] Grossetête Ch., Olive P., Mécanique des systèmes et du solide (2^{ème} année MP – MP* – PT – PT*). Paris : Ellipses [Taupe-Niveau], 1999, 312 p.
- [6] Davis M., Gouinaud C., Fauroux J.-C., Vaslin P., Modélisation du comportement en roulis d'un véhicule capable d'auto-retournement en phase balistique. 20^{ème} Congrès Français de Mécanique, Besançon, 29 août – 2 sept. 2011 (soumis).

Remerciements

Les auteurs de cette étude tiennent à remercier les jeunes pilotes Dylan Laroche et Tomy Steinmetz du Moto-Club Vicomtois (Puy-de-Dôme, France) qui ont aimablement accepté de participer à ces mesures.