

Étude et modélisation du maintien horizontal de l'assiette d'un véhicule tout-terrain pour personnes à mobilité réduite

Ing. B. HUBERT
Dr J. LECOINTRE
PIERRARD – Virton

Cet article traite de l'étude et la modélisation d'un système permettant de maintenir horizontalement un plateau disposé sur un véhicule tout-terrain et destiné au transport de personnes à mobilité réduite.

Les étapes de l'étude sont : une analyse fonctionnelle, une modélisation mathématique du véhicule, la caractérisation et le choix des éléments du système de stabilisation du plateau et une analyse économique.

Mots-clefs : personnes à mobilité réduite, véhicule tout-terrain, assiette constante, maintien horizontal, modélisation.

This paper consists in the study and modeling of a system maintaining horizontal a plate set on an all-terrain vehicle for the transportation of disabled persons.

The steps of this work are as follows: a functional analysis, mathematical modeling of the vehicle, characterization and selection of elements and an economic analysis.

Keywords: disabled persons, all-terrain, constant altitude, horizontal retainer, modeling.

1. Introduction

L'asbl "Les Papillons de Saint-Jacques" (Les Papidjacs) organise des pèlerinages sur les chemins de Saint-Jacques de Compostelle pour les personnes à mobilité réduite (PMR).

Les véhicules existants à ce jour pour le transport de ces personnes sur des chemins de campagne ne sont pas adaptés et nécessitent plusieurs accompagnants. De plus, ils procurent une telle sensation de déséquilibre que beaucoup renoncent.

C'est dans ce contexte que l'asbl a eu l'idée d'un véhicule destiné au transport des PMR sur les chemins de campagnes, qui soit sûr et ne nécessite que très peu d'accompagnement : le projet *Randochar* !

Le projet a d'abord été proposé aux universités de Liège (ULg) et Louvain-la-Neuve (UCL), avant d'être proposé au département Ingénieur Industriel de Pierrard-Virton (HENALLUX). L'institut Pierrard a accepté ce projet à long terme et a décidé de s'y consacrer durant plusieurs années.

Ces travaux de recherche se font en partenariat avec l'entreprise CMI EMI à Aubange qui est spécialisée dans la construction mécano-soudée et qui apportera une contribution intellectuelle (brainstorming) dans un premier temps, puis mécanique lors de la réalisation du prototype et de l'industrialisation.

L'objet de cet article consiste en l'étude du système de maintien du plateau à l'horizontale et il a été divisé en plusieurs parties :

- une analyse fonctionnelle;
- une modélisation mathématique du véhicule ;
- une étude du terrain ;
- la caractérisation des systèmes de suspension et de stabilisation;
- le choix des systèmes et éléments à utiliser.

Régulièrement, des réunions avec les membres du personnel de l'entreprise ainsi qu'une prise de contact avec des fabricants et revendeurs ont permis d'apporter des avis extérieurs et ont quelquefois entraîné une remise en question des choix effectués.

2. Cahier des charges

Le cahier des charges définit simplement les spécifications de base du *Randochar*. Il a été défini après de nombreuses réunions avec l'asbl « les Papillons de Saint-Jacques ».

Les spécifications du *Randochar* ont dû être modifiées en concertation avec les différentes parties pour tenir compte des réalités techniques. Le cahier des charges initial du *Randochar* est présenté ci-dessous, les différentes modifications apportées sont décrites au fur et à mesure de l'article.

1. Transporter une personne à mobilité réduite en chaise roulante de 120 kg maximum, aidée d'un accompagnateur
2. Le *Randochar* devra être transportable par une camionnette ou une remorque
3. Accessibilité aisée de la chaise roulante sur le *Randochar* (rampe d'accès...)
4. Type de terrain rencontré :
 - ornières de 20 cm de profondeur
 - pente de 15 %
 - dévers de 15 %
 - tout type de terrain (sable, boue, terre, gravillon, asphalte, un gué...)

Le point le plus important aux yeux de l'asbl est le suivant : pour le confort de la personne à mobilité réduite, son siège restera à l'horizontale en permanence.

5. Garantir la sécurité du passager en toutes circonstances :
 - Protection active dans la stabilité
 - Protection de fonctionnement (commande, direction...)
 - Système de freinage
 - Protections passives (arceaux, ceintures, éclairage...)
 - Système de fixation de la chaise sur le *Randochar* sécurisé
 - Respect des normes en vigueur (CE)
 - Protection des circuits électriques contre les intempéries
 - Résistance du châssis vis-à-vis des sollicitations (flexion, torsion...)

6. Performances :
- Vitesse : 5 km/h
 - Propulsion écologique (électrique...)
 - Autonomie sur route : au moins 6 heures
 - Autonomie en tout terrain : au moins à 3 heures
 - Rayon de braquage : environ 2 m
 - Centre de gravité du véhicule chargé le plus bas possible (compromis entre garde au sol et centre de gravité)
 - Confort de l'utilisateur du *Randochar* (suspension adaptée, suspension active, pneumatiques, rigidité du châssis, intempéries...)
 - Longueur maxi. : le plus court possible
 - Largeur maximale : 1.10 m
 - Véhicule ultra léger
7. Eco-conception : recyclage, durée de vie, peu énergivore,
8. Aspects économiques : bilan économique (estimation de prix de vente à 15.000 €)

3. Description du travail

Une analyse de faisabilité du projet réalisée en 2011 par des étudiants du département Ingénieur Industriel de Pierrard-Virton (HENALLUX) a mené à plusieurs choix concrets concernant le véhicule :

- Le véhicule comportera quatre roues motrices, chacune disposant de son propre moteur électrique. Elles seront fixes : le changement de direction apparait en faisant tourner les roues d'un côté à une vitesse différente des roues de l'autre côté, à la manière d'un véhicule à chenilles.
- Le plateau gyroscopique accueillant la PMR reposera en son centre sur une rotule et sera maintenu à l'horizontale grâce à deux vérins disposés à 90° en bout de plateau et pilotés par un automate.

Ces choix ont servi de base à la réalisation du présent travail sur le système de maintien du plateau.

3.1. Analyse fonctionnelle

L'analyse fonctionnelle a pour but d'étudier l'ensemble des éléments du véhicule et leurs interactions en se concentrant sur la partie principale, à savoir le système de stabilisation du plateau.

Le système principal est décomposé en 4 sous-systèmes :

Le système de direction (fig. 1a)

Le système de direction regroupe les roues, pneus et moteurs. Il tient compte du terrain rencontré.

Le système de suspension (fig. 1b)

Le système de suspension (suspension en parallélogramme déformable) comprend une suspension (ressort et amortisseur), le parallélogramme déformable et le châssis.

Le système "plateau-chaise-personne" (fig. 1c)

Ce système est celui qui sera en contact avec la personne, il reprend le système de rotation du plateau (cardan), les vérins servants à maintenir le plateau ainsi que le plateau en lui-même.

Le dernier système reprend l'automate, le gyroscope, l'énergie et la sécurité.

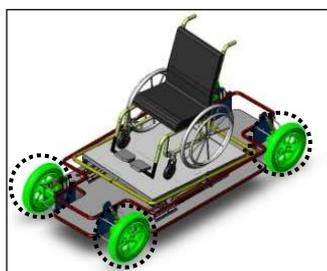


Figure 1a : Système de direction



Figure 1b : Système de suspension

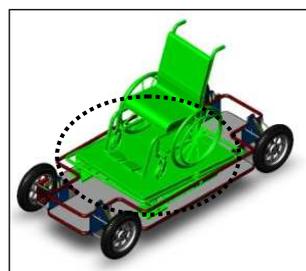


Figure 1c : Système "plateau-chaise-personne"

L'analyse n'est pas définitive : elle sera complétée et modifiée dans le cadre des travaux de recherche qui suivront.

3.2. Modélisation mathématique

La modélisation mathématique doit permettre de caractériser le comportement du véhicule sur les chemins de campagnes et notamment lors du passage de différents obstacles.

Le modèle créé et représenté ci-dessous reprend les quatre roues reliées au châssis par un système de suspension.

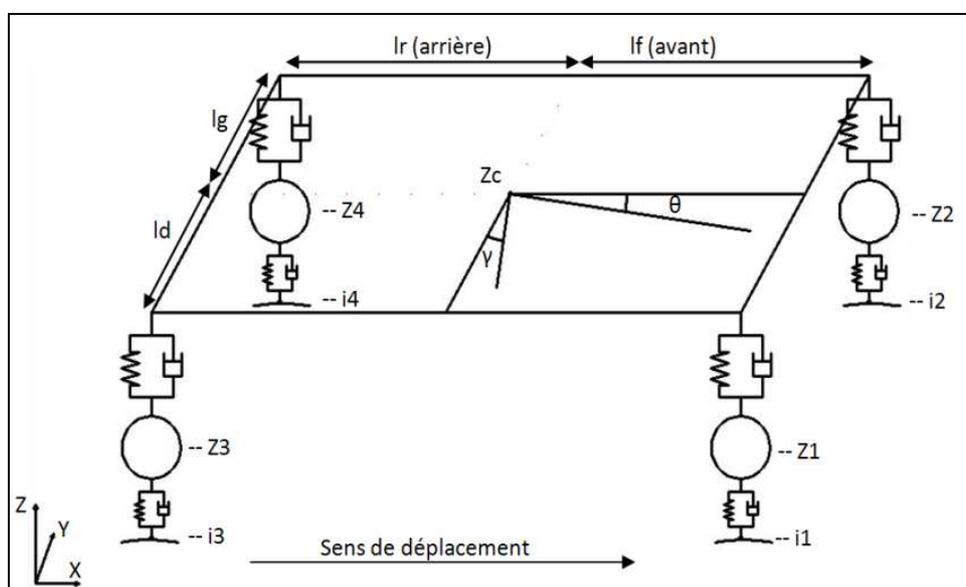


Figure 2 : Modèle d'un véhicule à quatre roues

Tableau des variables et symboles utilisés dans les équations

Variable	Désignation	Valeur	Unité
i_1	Profil de la route vu par la roue 1	Entrée	m
i_2	Profil de la route vu par la roue 2	Entrée	m
i_3	Profil de la route vu par la roue 3	Entrée	m
i_4	Profil de la route vu par la roue 4	Entrée	m
z_1	Position du centre de la roue avant droite	Sortie	m
\dot{z}_1	Vitesse du centre de la roue avant droite		m/s
\ddot{z}_1	Accélération du centre de la roue avant droite		m/s ²
z_2	Position du centre de la roue avant gauche	Sortie	m
\dot{z}_2	Vitesse du centre de la roue avant gauche		m/s

\ddot{z}_2	Accélération du centre de la roue avant gauche		m/s^2
z_3	Position du centre de la roue arrière droite	Sortie	m
\dot{z}_3	Vitesse du centre de la roue arrière droite		m/s
\ddot{z}_3	Accélération du centre de la roue arrière droite		m/s^2
z_4	Position du centre de la roue arrière gauche	Sortie	m
\dot{z}_4	Vitesse du centre de la roue arrière gauche		m/s
\ddot{z}_4	Accélération du centre de la roue arrière gauche		m/s^2
Z_c	Position de la rotule	Sortie	m
\dot{Z}_c	Vitesse verticale de la rotule		m/s
\ddot{Z}_c	Accélération verticale de la rotule		m/s^2
θ	Angle d'inclinaison du châssis selon l'axe des X	Sortie	rad
$\dot{\theta}$	Vitesse angulaire d'inclinaison du châssis (axe X)		rad/s
$\ddot{\theta}$	Accélération angulaire d'inclinaison du châssis (axe X)		rad/s ²
γ	Angle d'inclinaison du châssis selon l'axe des Y	Sortie	rad
$\dot{\gamma}$	Vitesse angulaire d'inclinaison du châssis (axe Y)		rad/s
$\ddot{\gamma}$	Accélération angulaire d'inclinaison du châssis (axe Y)		rad/s ²
k_p	Constante de raideur des pneus	500.000	N/m
k_s	Constante de raideur de la suspension	60.000	N/m
C_p	Constante d'amortissement des pneus	2.000	N.s/m
C_s	Constante d'amortissement de la suspension	800	N.s/m
M_{Tot}	Masse totale suspendue	210	kg
m	Masse d'une roue (masse non suspendue)	10	kg
l_f	Distance du centre de gravité à l'avant du véhicule	0,75	m
l_r	Distance du centre de gravité à l'arrière du véhicule	0,75	m
l_d	Distance du centre de gravité au côté droit du véhicule	0,55	m
l_g	Distance du centre de gravité au côté gauche du véhicule	0,55	m
I_{rcx}	Moment d'inertie du châssis autour de l'axe X	65	kg.m ²
I_{rcz}	Moment d'inertie du châssis autour de l'axe Y	80	kg.m ²

Tableau 1 : Variables et symboles du modèle de véhicule

Ces données ont été discutées et validées en entreprise. Elles sont issues : des contraintes du cahier des charges, d'une étude en biomécanique pour analyser les différents moments d'inertie du corps humain, d'une étude des chaises roulantes disponibles sur le marché, d'une analyse des dispositifs existants (pour les constantes de raideur et d'amortissement).

Mise en équations

Le système comporte sept degrés de liberté (sept inconnues), il nous faut donc sept équations pour le caractériser :

- la position verticale des centres de roues (z_1, z_2, z_3 et z_4),
- la position verticale du centre des masses (Z_c),
- les angles de tangage et de roulis (thêta et gamma).

Les mouvements des centres des roues ainsi que du centre des masses sont des translations verticales. Les équations sont trouvées en appliquant les lois de Newton $\sum \vec{F} = m \cdot \vec{a}$ et de Hooke $F = k \cdot (l - l_0)$ en ces points.

Les mouvements des angles sont des rotations autour du centre des masses dans les plans verticaux X-Z et X-Y. Les équations sont trouvées en appliquant le principe fondamental de la dynamique en rotation $\sum \vec{M} = I \cdot \ddot{\theta}$ aux angles thêta et gamma.

Dans un souci de clarté pédagogique, les équations peuvent être séparées de la manière suivante :

- Pour chaque roue (avec $i = 1,2,3,4$) :

$$m \cdot \ddot{z}_i = f_{suspension}^i + f_{amortissement}^i$$
- Pour chaque centre de masse :

$$M \cdot \ddot{Z}_c = f_{suspension}^C + f_{amortissement}^C$$

Les différentes contributions sont présentées ci-après. Bien entendu, dans un souci d'exactitude scientifique, ce sont les équations complètes qui sont résolues.

Equations de la suspension

Centre de la roue 1 : $m \cdot \ddot{z}_1 = -kp \cdot (z_1 - i_1) + ks \cdot (Z_c + lf \cdot \theta + ld \cdot \gamma - z_1)$

Centre de la roue 2 : $m \cdot \ddot{z}_2 = -kp \cdot (z_2 - i_2) + ks \cdot (Z_c + lf \cdot \theta - lg \cdot \gamma - z_2)$

Centre de la roue 3 : $m \cdot \ddot{z}_3 = -kp \cdot (z_3 - i_3) + ks \cdot (Z_c - lr \cdot \theta + ld \cdot \gamma - z_3)$

Centre de la roue 4 : $m \cdot \ddot{z}_4 = -kp \cdot (z_4 - i_4) + ks \cdot (Z_c - lr \cdot \theta - lg \cdot \gamma - z_4)$

Centre des masses :

$$M \cdot \ddot{Z}_c = -ks \cdot (Z_c + lf \cdot \theta + ld \cdot \gamma - z_1 + Z_c + lf \cdot \theta - lg \cdot \gamma - z_2 + Z_c - lr \cdot \theta + ld \cdot \gamma - z_3 + Z_c - lr \cdot \theta - lg \cdot \gamma - z_4) = -ks \cdot (4 \cdot Z_c + 2 \cdot lf \cdot \theta + 2 \cdot ld \cdot \gamma - 2 \cdot lr \cdot \theta - 2 \cdot lg \cdot \gamma - z_1 - z_2 - z_3 - z_4)$$

Tangage (oscillation du véhicule d'avant en arrière, autour de l'axe Y) :

$$I_{RCY} \cdot \ddot{\theta} = -ks. (lf. (Zc + lf. \theta + ld. \gamma - z1) + lf. (Zc + lf. \theta - lg. \gamma - z2) - lr. (Zc - lr. \theta + ld. \gamma - z3) - lr. (Zc - lr. \theta - lg. \gamma - z4))$$

Roulis (oscillation du véhicule de droite à gauche, autour de l'axe X):

$$I_{RCX} \cdot \ddot{\gamma} = -ks. (ld. (Zc + lf. \theta + ld. \gamma - z1) - lg. (Zc + lf. \theta - lg. \gamma - z2) + ld. (Zc - lr. \theta + ld. \gamma - z3) - ld. (Zc - lr. \theta - lg. \gamma - z4))$$

Equations de l'amortissement

$$\text{Centre de la roue 1 : } m. \ddot{z1} = -Cp. (\dot{z1} - i1) + Cs. (\dot{Zc} + lf. \dot{\theta} + ld. \dot{\gamma} - \dot{z1})$$

$$\text{Centre de la roue 2 : } m. \ddot{z2} = -Cp. (\dot{z2} - i2) + Cs. (\dot{Zc} + lf. \dot{\theta} - lg. \dot{\gamma} - \dot{z2})$$

$$\text{Centre de la roue 3 : } m. \ddot{z3} = -Cp. (\dot{z3} - i3) + Cs. (\dot{Zc} - lr. \dot{\theta} + ld. \dot{\gamma} - \dot{z3})$$

$$\text{Centre de la roue 4 : } m. \ddot{z4} = -Cp. (\dot{z4} - i4) + Cs. (\dot{Zc} - lr. \dot{\theta} - lg. \dot{\gamma} - \dot{z4})$$

Centre des masses :

$$M. \ddot{Zc} = -Cs. (\dot{Zc} + lf. \dot{\theta} + ld. \dot{\gamma} - \dot{z1} + \dot{Zc} + lf. \dot{\theta} - lg. \dot{\gamma} - \dot{z2} + \dot{Zc} - lr. \dot{\theta} + ld. \dot{\gamma} - \dot{z3} + \dot{Zc} - lr. \dot{\theta} - lg. \dot{\gamma} - \dot{z4}) = -Cs. (4. \dot{Zc} + 2. lf. \dot{\theta} + 2. ld. \dot{\gamma} - 2. lg. \dot{\gamma} - 2. lr. \dot{\theta} - \dot{z1} - \dot{z2} - \dot{z3} - \dot{z4})$$

Tangage :

$$I_{RCY} \cdot \ddot{\theta} = -Cs. (lf. (\dot{Zc} + lf. \dot{\theta} + ld. \dot{\gamma} - \dot{z1}) + lf. (\dot{Zc} + lf. \dot{\theta} - lg. \dot{\gamma} - \dot{z2}) - lr. (\dot{Zc} - lr. \dot{\theta} + ld. \dot{\gamma} - \dot{z3}) - lr. (\dot{Zc} - lr. \dot{\theta} - lg. \dot{\gamma} - \dot{z4}))$$

Roulis :

$$I_{RCX} \cdot \ddot{\gamma} = -Cs. (ld. (\dot{Zc} + lf. \dot{\theta} + ld. \dot{\gamma} - \dot{z1}) - lg. (\dot{Zc} + lf. \dot{\theta} - lg. \dot{\gamma} - \dot{z2}) + ld. (\dot{Zc} - lr. \dot{\theta} + ld. \dot{\gamma} - \dot{z3}) - lg. (\dot{Zc} - lr. \dot{\theta} - lg. \dot{\gamma} - \dot{z4}))$$

Ces équations ont été exploitées par le logiciel de calcul MatLab, via l'outil Simulink. Cela donne accès à une gamme d'outils permettant de développer des algorithmes, d'analyser des simulations et de traiter les signaux. Nous obtenons un programme capable, en y entrant le profil de terrain désiré, d'obtenir les mouvements et déplacements des points étudiés. Nous allons donc calculer la course, la vitesse et l'accélération des vérins qui seront utilisés pour stabiliser le plateau. Sur cette base, nous contacterons les fournisseurs afin de trouver le modèle de vérin le mieux adapté à notre cas.

3.3. Etude du terrain

L'étude du terrain a permis de redéfinir le cahier des charges, trop peu complet sur ce point, en tenant compte des réalités du terrain.

Cette étude a déterminé cinq types de chemins ou d'obstacles ainsi que la vitesse estimée à laquelle ils seront pris :

- Route ou Ravel : pas d'obstacles → 5 km/h
- Chemin caillouteux 1 : obstacles de 2,5 cm → 4 km/h
- Chemin caillouteux 2 : obstacles de 5 cm → 3 km/h
- Marche de 10 cm → 1 km/h
- Marche de 20 cm → 0,5 km/h

Ces obstacles ont été insérés en entrée du programme MatLab, ce qui a permis d'obtenir le comportement des différents éléments du véhicule en fonction de l'obstacle franchi. Les résultats des deux obstacles les plus intéressants (25 mm et 200 mm) sont représentés ci-dessous.

Graphes des entrées :

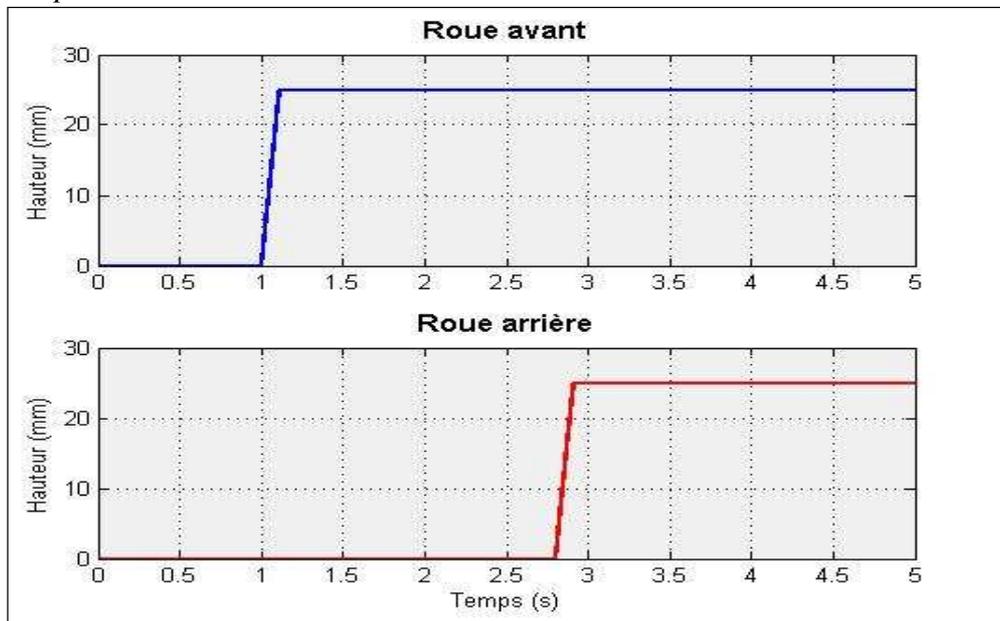


Figure 3 : Obstacle de 25 mm – Entrées

Obstacle de 25 mm

L'obstacle le plus souvent rencontré sur les chemins de campagnes sera assimilable à une marche de 25 mm prise à 4 km/h.

Graphes des mouvements du châssis :

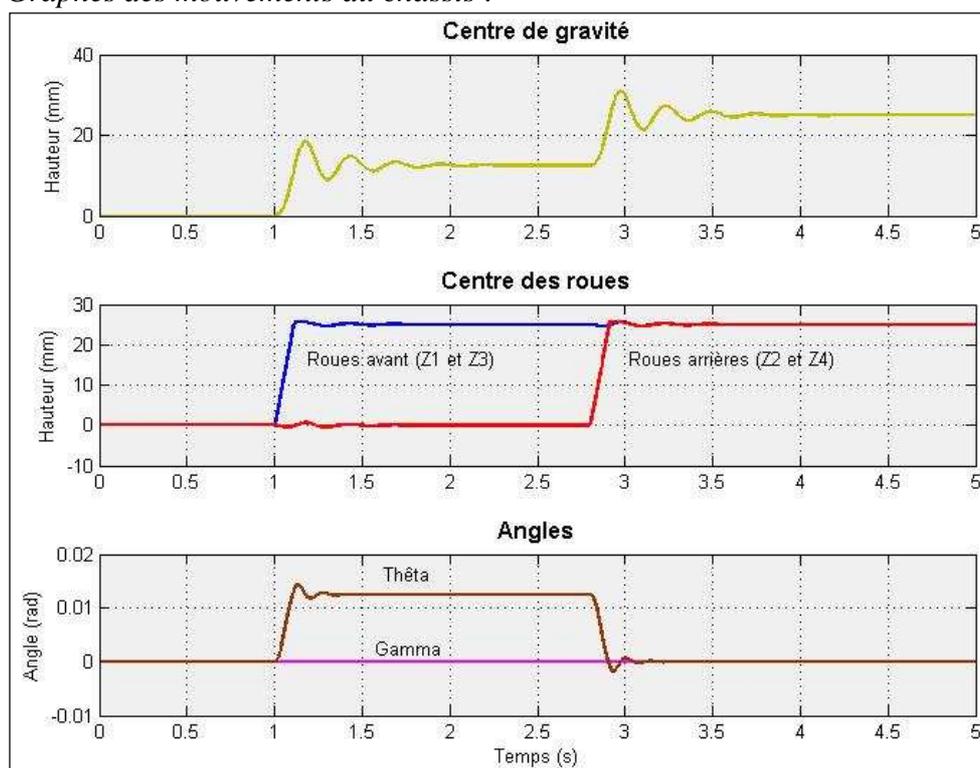


Figure 4 : Obstacle de 25 mm – Sorties

Dans ce cas, la roue monte de 25 mm en 0,11 seconde.

La montée de l'obstacle est très rapide et il y a de faibles oscillations du châssis (5 mm pendant 0,5 s). Ces oscillations apparaissent après les montées des roues avant et arrière.

Obstacle de 200 mm

L'obstacle le plus difficile sera une marche de 200 mm. Il ne sera rencontré que rarement et sera pris à vitesse très faible (0,5 km/h).

Graphes des entrées :

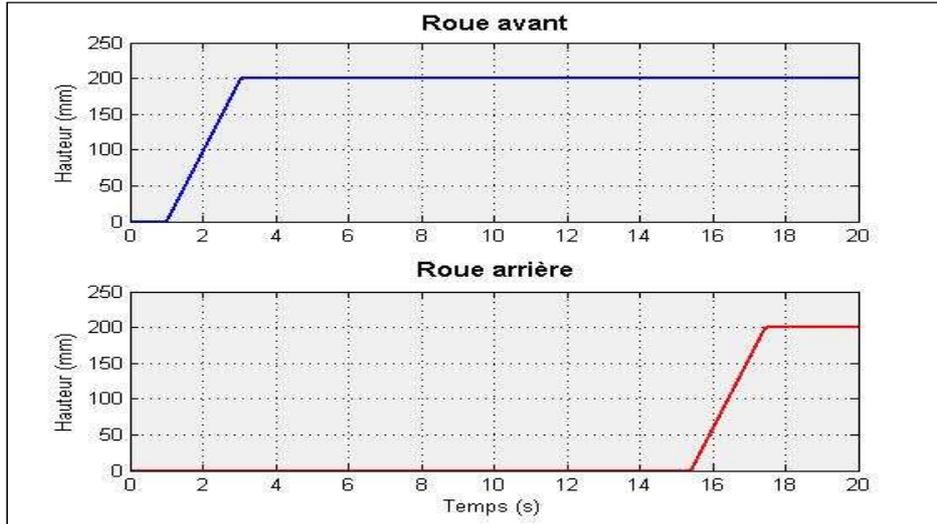


Figure 5 : Obstacle de 200 mm - Entrées

Graphes des mouvements du châssis :

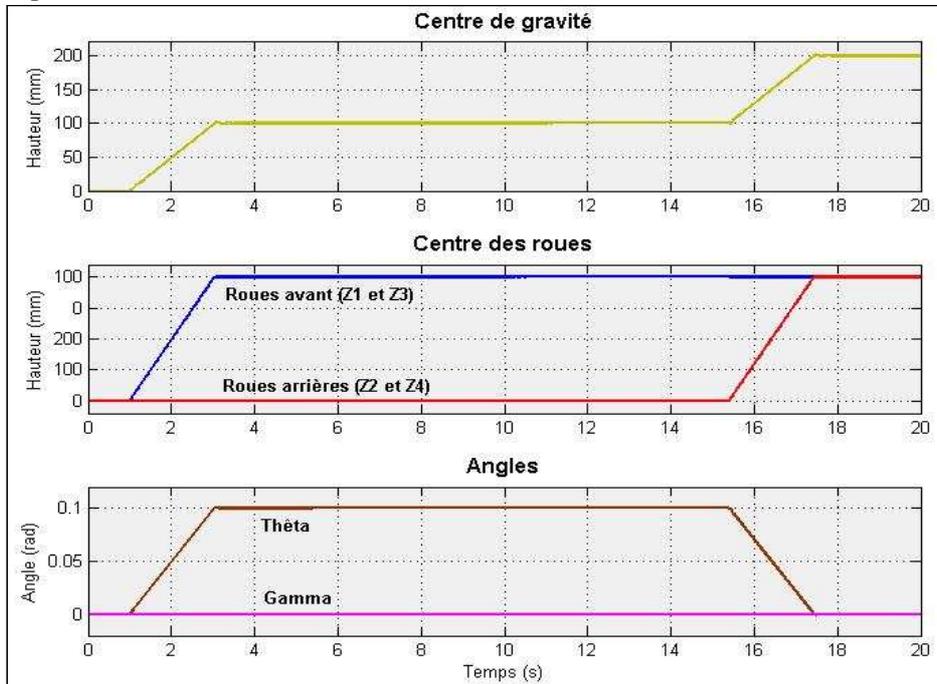


Figure 6 : Obstacle de 200 mm - Sorties

Dans ce cas, la roue monte de 200 mm en 2,04 secondes.

La montée de l'obstacle est très lente et il n'y plus d'oscillations visibles.

Bien sûr, ces obstacles peuvent être pris autrement que de face ou en combinaison avec d'autres, mais les obstacles de 25 et 200 mm sont suffisants pour l'étude qui nous intéresse.

3.4. Etude des éléments

Système de rotation du plateau

L'originalité du projet reposant essentiellement sur le fait que la PMR restera à l'horizontale, le système de rotation du plateau est donc le point essentiel.

Une première solution envisagée a été de suspendre le plateau à la manière d'une nacelle. Cette solution présente l'avantage d'avoir un système naturellement stable, et donc ne demandant que peu d'énergie externe pour le stabiliser. Cependant, le déportement de la nacelle lors de l'inclinaison du terrain imposerait une largeur de véhicule trop importante. De plus, l'embarquement et le débarquement de la PMR serait compliqué par les liens reliant la nacelle à son point de rotation.

Une autre idée est de faire reposer le plateau sur une rotule en son centre et deux vérins aux extrémités. La rotule supportera l'essentiel de la charge verticale et les deux vérins, le premier disposé à l'avant et l'autre sur un côté, assureront le maintien du plateau à l'horizontale. Cette solution a été retenue en y apportant cependant une modification : la rotule qui permet une rotation du plateau dans le plan horizontal a été remplacée par un cardan qui empêche le plateau de tourner sur lui-même.

De cette idée découlent deux solutions possibles :

- le cardan est placé sous le plateau à la manière de la rotule (fig. 7) ;
- le plateau fait office de cardan grâce à un cadre intermédiaire entre le plateau et le châssis (fig. 8).

La première solution a l'avantage de réduire la largeur nécessaire au véhicule. Quant à la seconde, elle libère la place sous le plateau et permet, par exemple, d'y placer les batteries.

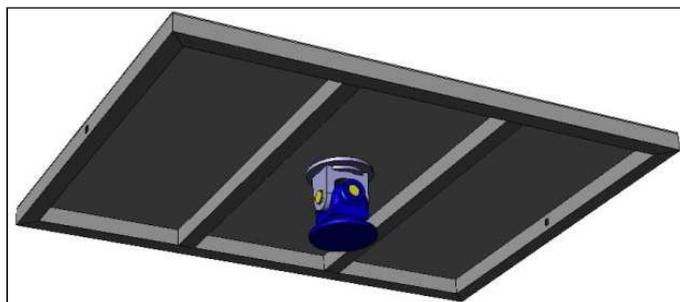


Figure 7 : Système de cadre rigide

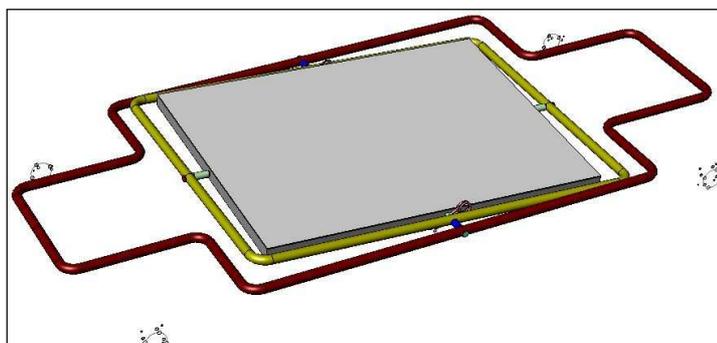


Figure 8 : Système de cadre rigide

Le choix de la solution retenue n'est pas encore arrêté, il le sera lors de l'étude des matériaux ou du design, étape qui sera effectuée par d'autres travaux de recherche.

Système de stabilisation du plateau

La stabilisation du plateau est assurée par deux vérins électriques commandés par un automate recevant les informations sur l'inclinaison du plateau par un gyroscope placé sur celui-ci.

L'idée de base est de disposer les vérins verticalement sous le plateau, le premier à l'extrémité avant et le second sur un côté, de façon à ce qu'ils soient indépendants l'un de l'autre. En effet, le vérin à l'avant gère l'inclinaison d'avant en arrière du plateau (tangage) sans se préoccuper de l'inclinaison de côté (roulis), qui est gérée par le second vérin. Cette solution facilite la modélisation ainsi que la programmation.

Le choix des vérins se fait grâce à la modélisation du véhicule. En effet, le programme donne les mouvements du châssis lors de la prise d'obstacles, et ce sont ces mouvements que les vérins devront compenser pour garder le plateau à l'horizontale. On peut donc en déduire la course, la vitesse et l'accélération que les vérins devront avoir (fig. ci-dessous). Un calcul nous donne aussi la force à développer par les vérins. Ces informations sont suffisantes pour caractériser les vérins.

Courses, vitesses et accélérations des vérins pour les obstacles de 25 et 200 mm :

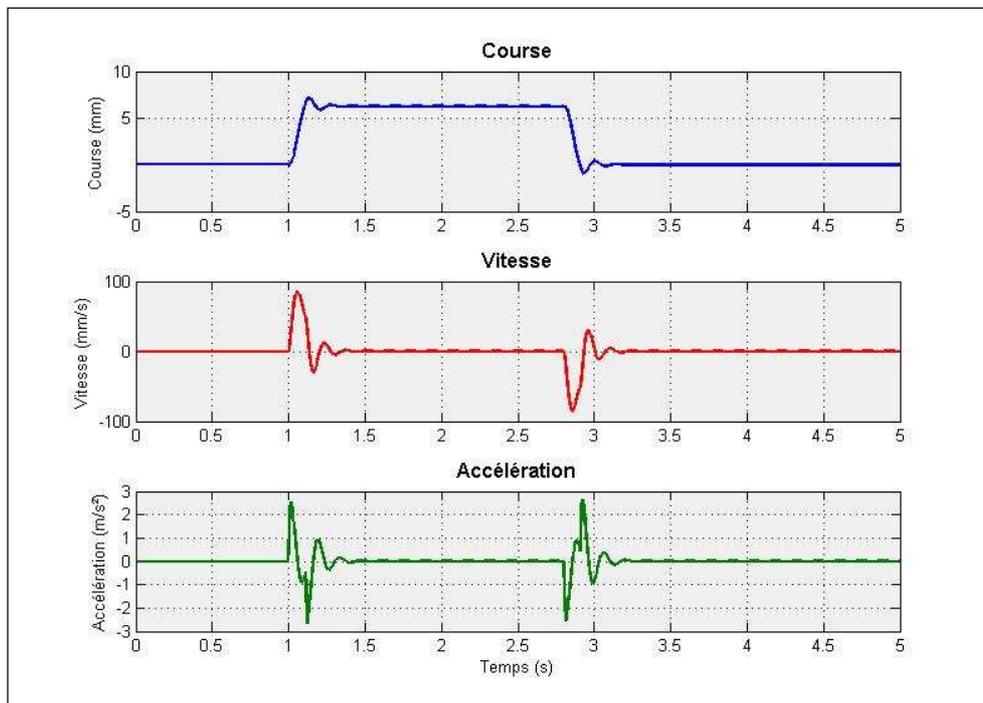


Figure 9 : Caractéristique des vérins – obstacle de 25 mm

Ces graphiques montrent que la course du vérin sera maximale lors du franchissement d'un obstacle de 200 mm : elle sera de $2 \times 50 \text{ mm} = \mathbf{100 \text{ mm}}$ (une course légèrement supérieure à 100 mm sera préférée). La vitesse maximale est de $\mathbf{100 \text{ mm/s}}$ et l'accélération de $\mathbf{3 \text{ mm/s}^2}$.

Nous avons ainsi la course, la vitesse et l'accélération des vérins. Les dernières données à connaître pour caractériser entièrement les vérins sont les forces qu'ils devront être capables de déployer.

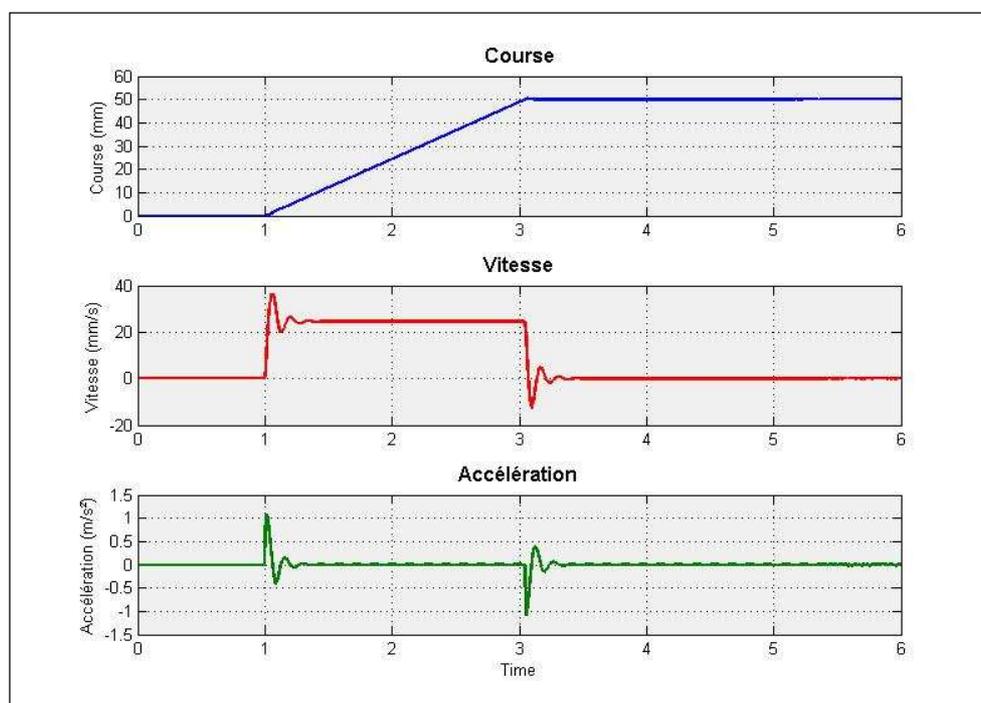


Figure 10 : Caractéristique des vérins – obstacle de 200 mm

Force des vérins

Pour le calcul de la force qu'un vérin doit pouvoir fournir, on suppose que le centre de gravité de la chaise roulante et la personne est, dans le plan horizontal, à 15 cm du centre du plateau. En prenant cette hypothèse, nous avons l'équation pour trouver la force à déployer :

$$\text{Masse sur le plateau} \times (g + a) \times \frac{0,15}{l_{v\theta}} \times \text{coefficient de sécurité} \\ = \text{Force à déployer}$$

A l'arrêt, le système de stabilisation devra supporter les forces exercées lors de l'embarquement et du débarquement de la PMR et pouvoir supporter occasionnellement le poids d'un accompagnant extérieur qui viendrait à grimper sur le plateau.

Les calculs montrent que les vérins devront être capables de produire une force d'au moins 730 Newtons en dynamique et de résister à 2200 Newtons en statique.

Positionnement des vérins

Après le choix des vérins et une entrevue avec un représentant d'un fabricant, il est apparu que les vérins sont beaucoup trop imposants pour pouvoir les mettre verticalement sous le plateau. Il a donc fallu revoir le système de maintien du plateau.

La solution finalement adoptée est de placer les vérins horizontalement sous le plateau en transmettant leurs efforts grâce à des renvois d'angles (fig. 11).

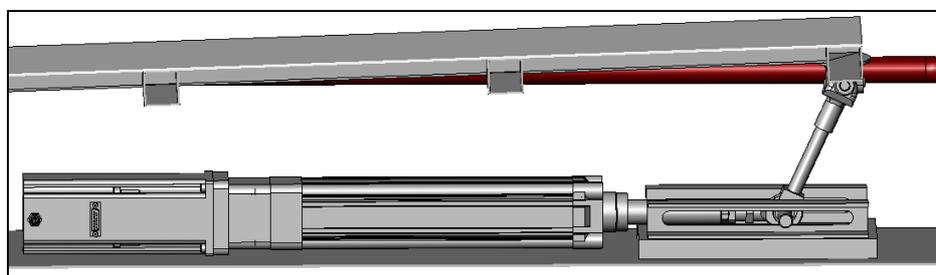


Figure 11 : Vérin placé sous le plateau et renvoi d'angle

La disposition des vérins a aussi été revue, ils seront disposés à l'avant droite et gauche du plateau. Cette disposition, imposée par la taille des vérins, complique la modélisation et la commande des vérins car ils sont dépendants l'un de l'autre.

Système de suspension du véhicule

Le système de suspension du véhicule sert essentiellement à amortir les chocs et "lisser" le terrain pour décharger au maximum le système de stabilisation du plateau. Cependant, la vitesse du véhicule étant extrêmement faible (moins de 5 km/h), un système de suspension simple est suffisant.

Ici encore, deux solutions sont possibles :

- un système de suspension classique comportant un système de parallélogramme déformable et un amortisseur à chaque roue ;
- pas de système de suspension, mais l'utilisation de pneus sous-gonflés qui amortissent les chocs.

La seconde solution a l'avantage de réduire le nombre de pièces à utiliser ainsi que l'encombrement (les roues étant directement attachées au châssis).

Cependant, les pneus sous-gonflés augmentent les oscillations du véhicule après le passage d'obstacles.

Batteries

Le véhicule étant électrique, l'électricité fournie par la batterie sera la seule source d'énergie disponible. Le choix de la batterie se révèle donc important. Après recherches et comparaison des différentes technologies de batteries existantes sur le marché (Plomb, Nickel-Cadmium, Nickel Métal-Hydrure, Lithium-Ion et Lithium-Polymère), il est ressorti que les batteries au plomb sont les plus économiques, mais beaucoup trop lourdes et les batteries lithium-polymère sont les plus performantes, mais à un prix beaucoup trop élevé.

La technologie Lithium-Ion semble être un compromis acceptable bien que le prix dépasse ce qui est prévu dans le cahier des charges.

4. Plans et dessins

Les plans et les dessins 3D ont été réalisés à l'échelle sur le logiciel SolidWorks au sein de l'entreprise CMI EMI.

Les plans et dessins représentés aux figures 12 et 13 sont ceux de la partie du véhicule comprenant le plateau faisant office de cardan, les deux vérins placés sous le plateau ainsi qu'un système de suspension en parallélogramme déformable.

Les autres accessoires, batteries et systèmes de sécurité ne sont pas représentés.



Figure 12 : Vue d'ensemble du véhicule

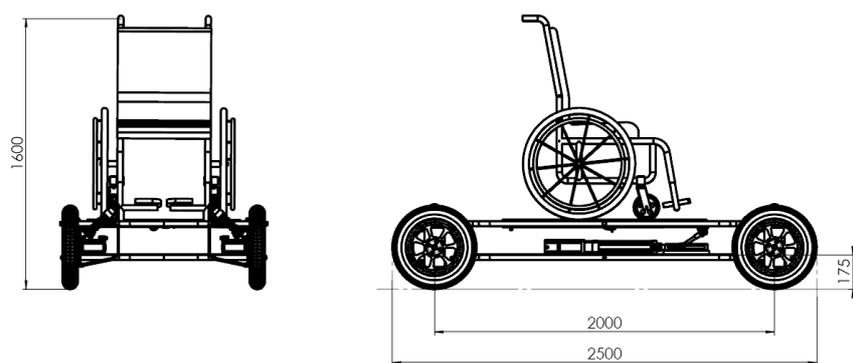


Figure 13 : Plans de face et du côté droit du véhicule

5. Conclusions

En ce qui concerne les résultats, la modélisation mathématique a été menée aussi loin que possible, ainsi que l'analyse fonctionnelle, malgré de nombreuses modifications du cahier des charges durant la réalisation du projet. Grâce à la modélisation mathématique via Matlab/Simulink, un système de stabilisation du plateau a été développé et des vérins ont été sélectionnés. L'étude du système de suspension du *Randochar* et la recherche de batteries ont été bien avancés.

Cependant, une première analyse économique montre que le budget initialement prévu sera largement dépassé, principalement en raison de l'approvisionnement en énergie du véhicule. En effet, le véhicule étant très gourmand en énergie et les batteries coûtant cher, le prix du *Randochar* sera en grande partie influencé par celui des batteries.

6. Bibliographie

6.1. Modélisation et programme

DUYSINX, Pierre (consulté le 16 février 2012) *Cours dispensés par Pierre Duysinx* (ULg).

Adresse URL : www.ingveh.ulg.ac.be/index.php?page=education

LECOINTRE, Julien, *Automatique temps réel*, notes de cours, 2011-2012 (HENALLUX).

SAURET Christophe, *Cinétique et énergétique de la propulsion en fauteuil roulant manuel*, 29 mars 2010.

SAMMIER Damien, *Sur la modélisation et la commande de suspension de véhicules automobiles*, 9 novembre 2001.

MathWorks (site consulté en février 2012) URL : <http://www.mathworks.nl>

BOËLS Mathieu, DEPIESSE Jérôme, DEVILLE Vincent, RENKIN Michaël, *Rapport d'atelier multidisciplinaire*, 2010-2011 (HENALLUX).

BOULARD Romain, HUBERT Benjamin, VAN DROOGENBROEK Maxime, WILMET Benoit, *Rapport d'atelier multidisciplinaire*, 2011-2012 (HENALLUX).

6.2. Analyse fonctionnelle

MORTUREUX, Yves, *AMDE(C)*, Techniques de l'ingénieur, SE 4 040
NOYES Daniel, PÉRÈS François, *Analyse des systèmes*, Techniques de l'ingénieur, AG 3 520

6.3. Batteries :

AVEM (site consulté en mai 2012), *Site d'information sur le véhicule électrique et hybride*
Adresse URL : www.avem.fr

GREENUNIVERS (page consultée en mai 2012), *Repère : comparatif des technologies de batteries*
Adresse URL : www.greenunivers.com/2009/04/comparatif-technologies-batteries-5044/

ESA (site consulté en mai 2012), *ESA : Electricity Storage Association*
Adresse URL : www.electricitystorage.org

SYMBIOCARS (Page consultée en mai 2012), *Bref comparatif des technologies*, Adresse URL :
www.symbiocars.com/symbiocars/JO/index.php?option=com_content&view=article&id=9:bref-comparatif-des-technologies-de-batteries&catid=3:batteries&Itemid=14