

Nolan Bohler

Gymnase de la Cité, Lausanne (élève promu en été 2023), nolan.bohler@icloud.com

Etude des suspensions d'un vélo tout terrain à l'aide d'un automate

1 Introduction théorique

Sur un vélo prévu pour des chemins techniques ou pour de la descente, il y a la plupart du temps deux suspensions : la fourche et la suspension arrière.

Une suspension est toujours constituée de 2 éléments : le ressort et l'amortisseur.

2 types de ressorts différents existent. Les ressorts dits pneumatiques et les ressorts hélicoïdaux. Comme le dit son nom, un ressort pneumatique fonctionne grâce à une certaine pression d'air pompé dans la suspension. Ce fonctionnement peut s'apparenter à une seringue que l'on bouche à son extrémité. Un ressort pneumatique est composé d'une chambre à air positive, une chambre à air négative ainsi qu'un piston.

Une certaine quantité d'air est enfermée dans la chambre à air positive, et lorsque la fourche se comprime, un piston va venir comprimer cet air.

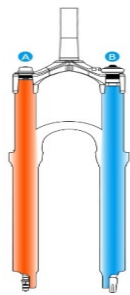


Fig. 1 Schéma d'une fourche



Fig. 2 Schéma d'une fourche à ressort pneumatique

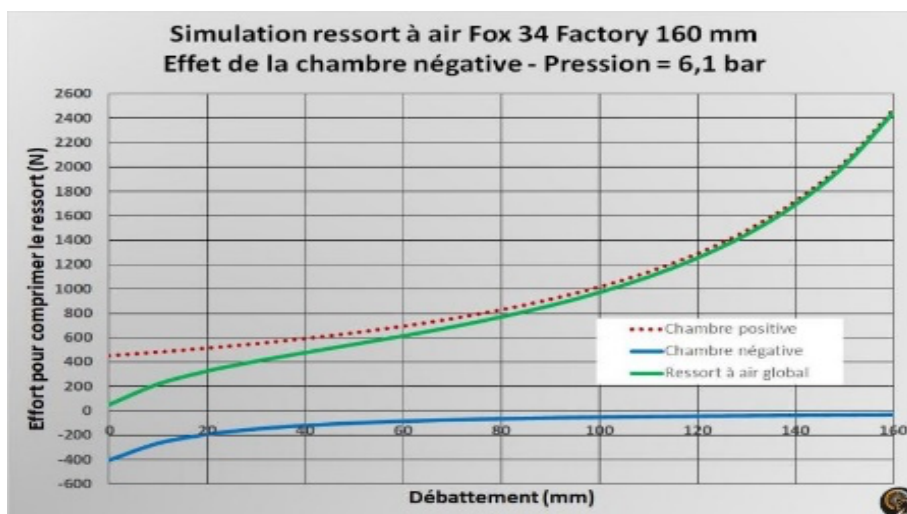


Fig. 3 Simulation d'un ressort pneumatique / effet de la chambre à air négative

Le

ressort
hélicoïdal

Le ressort hélicoïdal permet un fonctionnement « linéaire ». Il se comporte donc de manière identique sur la totalité du débattement et est sensible déjà sur les débuts de course.

L'amortisseur est généralement hydraulique. Il permet de ralentir les vitesses de déplacement des plongeurs ainsi que d'amortir les chocs grâce à l'huile de laminage. L'amortisseur sert notamment à freiner les oscillations produites par le ressort afin de constituer des oscillations amorties. On va donc forcer l'huile de laminage à passer à travers des clapets. Plus les clapets sont fermés, plus le passage de l'huile va être difficile et lent. Cela va donc influencer la vitesse d'amortissement des oscillations.

Les suspensions arrière sont composées de la même manière que la fourche.

1.1 Mécanisme et fonctionnement des suspensions

1.1.1 Simulation sans frottement ni amortisseur¹

Dans ce cas, le système est entièrement suspendu afin qu'il n'y ait pas de perte (aérodynamique et sans frottement). La fréquence d'oscillations est de 2.5 Hz.

Si un vélo était composé d'une suspension sans frottement ni amortisseur, cela serait un véritable désastre, car il serait impossible de stopper des oscillations provoquées par le ressort.

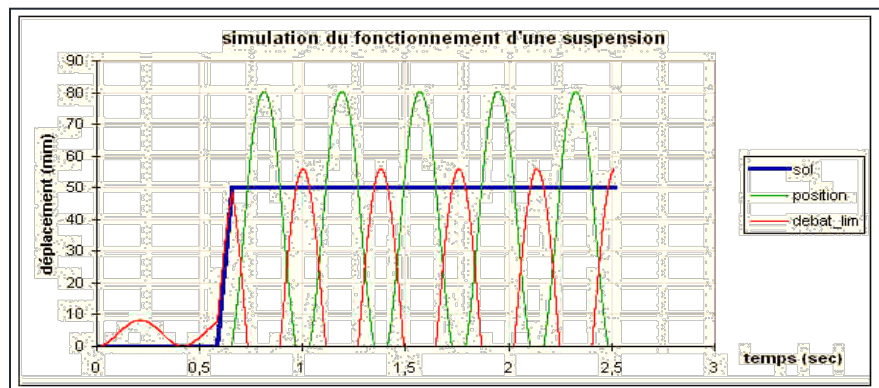


Fig. 4 Simulation d'une suspension sans frottement ni amortissement

Heureusement, une telle simulation n'est pas possible, car un système mécanique sans frottement n'existe pas dans la réalité.

Nous allons donc comprendre par la simulation suivante le rôle de l'amortisseur et de l'huile de laminage dans les suspensions. Pour cette simulation, une force de frottement va entrer en jeu. Cette force est produite par un amortisseur hydraulique et cela va ralentir les oscillations de manière constante.

En observant ce graphique, nous voyons que la courbe verte, qui représente la trajectoire du cadre, va adoucir l'amplitude des oscillations. Cela nous donne donc une oscillation amortie (fonction sinusoïdale dont l'amplitude décroît selon une fonction exponentielle).

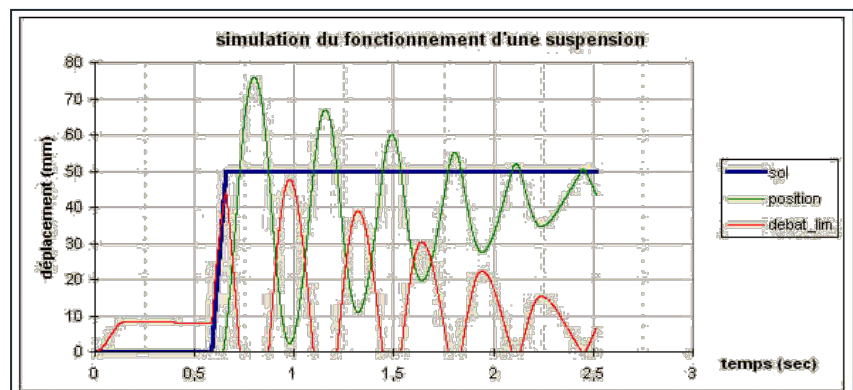


Fig. 5 Simulation d'une suspension avec frottement

¹ Inspiré du site <http://louping12.free.fr/vtt/suspension/suspensions.htm>

Dans ce cas, c'est un mouvement oscillatoire amorti. C'est un mouvement pseudopériodique et la durée d'une oscillation vaut : $T = \frac{2\pi}{\omega}$ ou encore

$$T = 2\pi \cdot \sqrt{\frac{m}{k}} \text{ [s]}$$

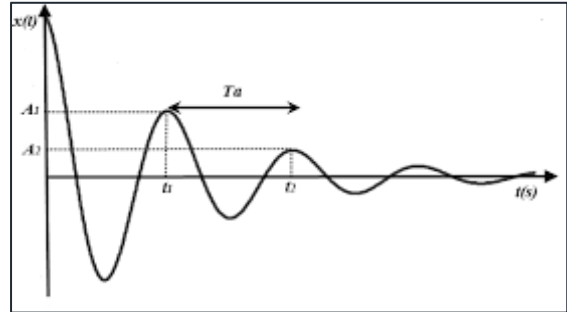


Fig. 6 Schéma d'une oscillation amortie

1.2 Oscillations amorties (physique)²

Essayons maintenant de comprendre le côté physique qui se cache derrière une oscillation amortie d'une suspension de vélo tout terrain.

Dans chaque suspension, une force de rappel permet de former des oscillations (mouvement harmonique). Pour simplifier les calculs, prenant en compte que le ressort est hélicoïdal et non pneumatique. Une 2^{ème} force : la force de frottement, permet l'amortissement de ces oscillations afin que la suspension n'oscille pas infiniment, mais que la suspension revienne à l'équilibre. Cette force de frottement provient de l'huile de laminage ainsi que des frottements dans l'air.

Pour la force de frottement, nous allons prendre le cas le plus simple dans lequel la force de frottement est proportionnelle à la vitesse d'oscillation.

- $\vec{F}_r = -k \cdot \vec{\Delta x}$ } Force de rappel pour un ressort hélicoïdal
- $\vec{F}_{fr} = -c \cdot \vec{v}$ } Où c correspond à une constante de proportionnalité

L'équation de Newton s'écrit donc :

$$\sum \vec{F} = m \cdot \vec{a} \Rightarrow -k \cdot \Delta x - c \cdot v = m \cdot a \text{ ou encore } m \cdot a + k \cdot \Delta x + c \cdot v = 0$$

On obtient ensuite une équation différentielle pour la fonction horaire. L'équation de x est une fonction sinusoïdale dans laquelle l'amplitude diminue au fil du temps. Nous choisissons donc une fonction exponentielle décroissante.

- $\vec{x} = \vec{A} \cdot e^{-\delta t} \cdot \sin \omega t$
- $\vec{v} = -\delta \vec{A} \cdot e^{-\delta t} \cdot \sin \omega t + \omega \vec{A} e^{-\delta t} \cos \omega t$
- $\vec{a} = \delta^2 \vec{A} \cdot e^{-\delta t} \cdot \sin \omega t - \delta \omega \vec{A} e^{-\delta t} \cos \omega t - \delta \omega \vec{A} e^{-\delta t} \cos \omega t - \omega^2 \vec{A} \cdot e^{-\delta t} \cdot \sin \omega t$

Nous pouvons maintenant remplacer les équations différentielles dans la somme des forces :

$$m \cdot (\delta^2 \vec{A} \cdot e^{-\delta t} \cdot \sin \omega t - \delta \omega \vec{A} e^{-\delta t} \cos \omega t - \delta \omega \vec{A} e^{-\delta t} \cos \omega t - \omega^2 \vec{A} \cdot e^{-\delta t} \cdot \sin \omega t) + c \cdot (-\delta \vec{A} \cdot e^{-\delta t} \cdot \sin \omega t + \omega \vec{A} e^{-\delta t} \cos \omega t) + k(\vec{A} \cdot e^{-\delta t} \cdot \sin \omega t) = \vec{0}$$

Après simplification, nous arrivons à cette formule :

$$\vec{A} \cdot e^{-\delta t} \cdot \sin \omega t (m\delta^2 - m\omega^2 - c\delta + k) + \vec{A} \cdot e^{-\delta t} \cos \omega t (-2m\delta\omega + c\omega) = \vec{0}$$

Nous pouvons en déduire ω qui est la fréquence de l'oscillation amortie :

² Inspiré du livre « Cours de physique mécanique » par J.-A Monard

$$-2m\delta\omega + c\omega = 0 \Rightarrow \delta = \frac{c}{2m} \Rightarrow m\delta^2 - m\omega^2 - c\delta + k = 0 \Rightarrow m\left(\frac{c}{2m}\right)^2 - m\omega^2 - c\frac{c}{2m} + k \Rightarrow$$

$$\omega = \sqrt{\frac{k}{m} - \frac{c^2}{4m^2}}$$

En conclusion, nous obtenons cette formule pour la fréquence de l'oscillation amortie : $\omega = \sqrt{\omega_0^2 - \delta^2}$

2 Expérience

Voici le matériel utilisé pour ce travail de maturité :

Plusieurs capteurs différents m'ont permis de récolter des données et de les retranscrire (enregistrer) grâce à un automate programmable sur une carte SD puis sur un fichier EXCEL. Une batterie a aussi été utilisée dans le but de pouvoir alimenter en continu l'automate ainsi que les capteurs. De plus une prise WIFI a été nécessaire afin d'avoir une visualisation en direct du débattement des suspensions.

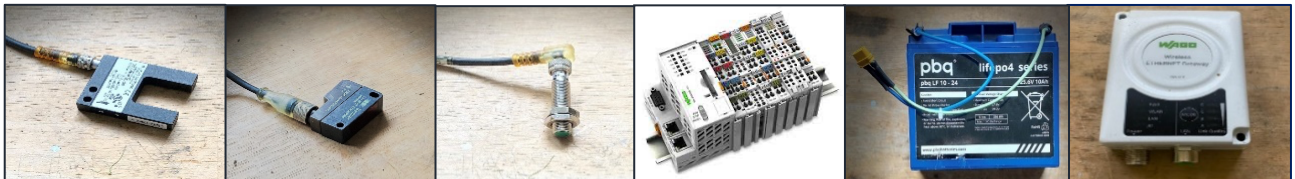


Figure 7 : Capteur optique TOR / Capteur optique analogique Baumer / Capteur inductif TOR / automate Wago / Batterie 25.6V 10Ah / Borne Wifi Wago

J'ai donc programmé l'automate WAGO grâce au logiciel ecockpit (basé sur CoDeSys). Cela nous a permis de récolter les données des capteurs afin de créer un tableau permettant de mettre en évidence les propriétés ainsi que le fonctionnement de nos suspensions.

Suite à cela plusieurs essais ont été réalisés sur le vélo. Afin d'étudier les suspensions sous différents angles, un parcours de 3 obstacles complètement différents a été construit. Après plusieurs essais, plusieurs graphiques sur lesquels nous observons correctement les oscillations amorties ont été obtenus.



Figure 8 : Parcours contenant les 3 obstacles testés

En nous focalisant un peu plus sur les différents obstacles, les oscillations amorties peuvent être observées facilement. Ces graphiques nous permettent de comprendre les interactions des suspensions avec les obstacles parcourus. Plus l'intensité de l'obstacle est importante, plus l'enfoncement de la fourche est grand, cela provoque donc un temps d'oscillation amortie plus long.

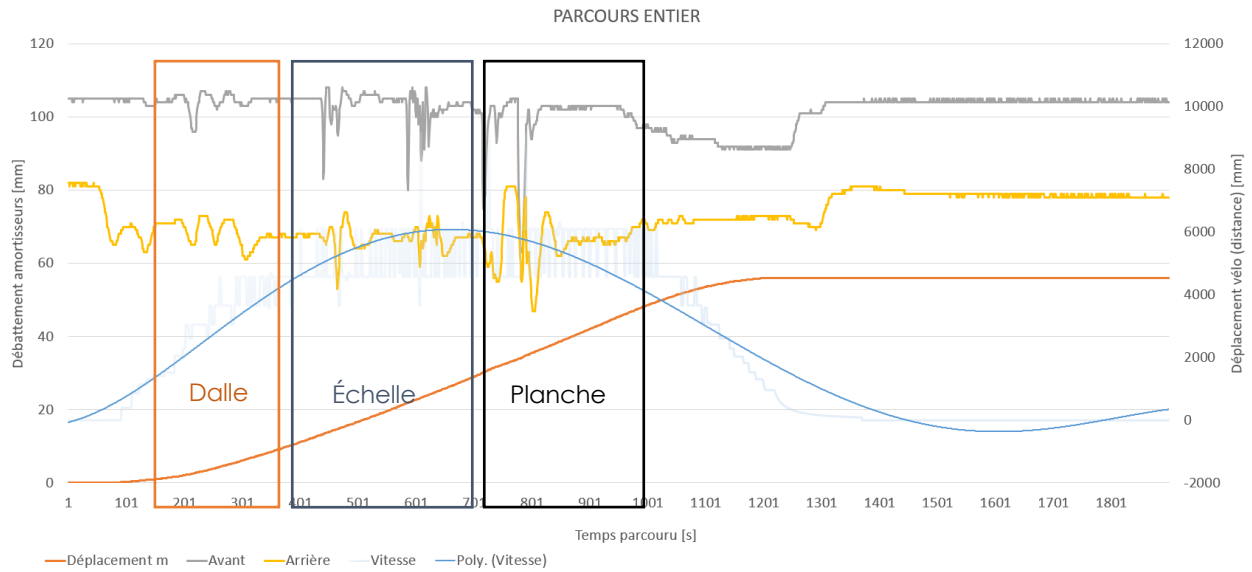


Figure 9 : Graphique obtenu (totalité du parcours contenant les 3 obstacles)

Ce graphique n'est pas très intéressant, car l'échelle est beaucoup trop grande. Pour permettre une meilleure analyse des graphiques, il est préférable de sélectionner uniquement les parties voulues (3 obstacles).

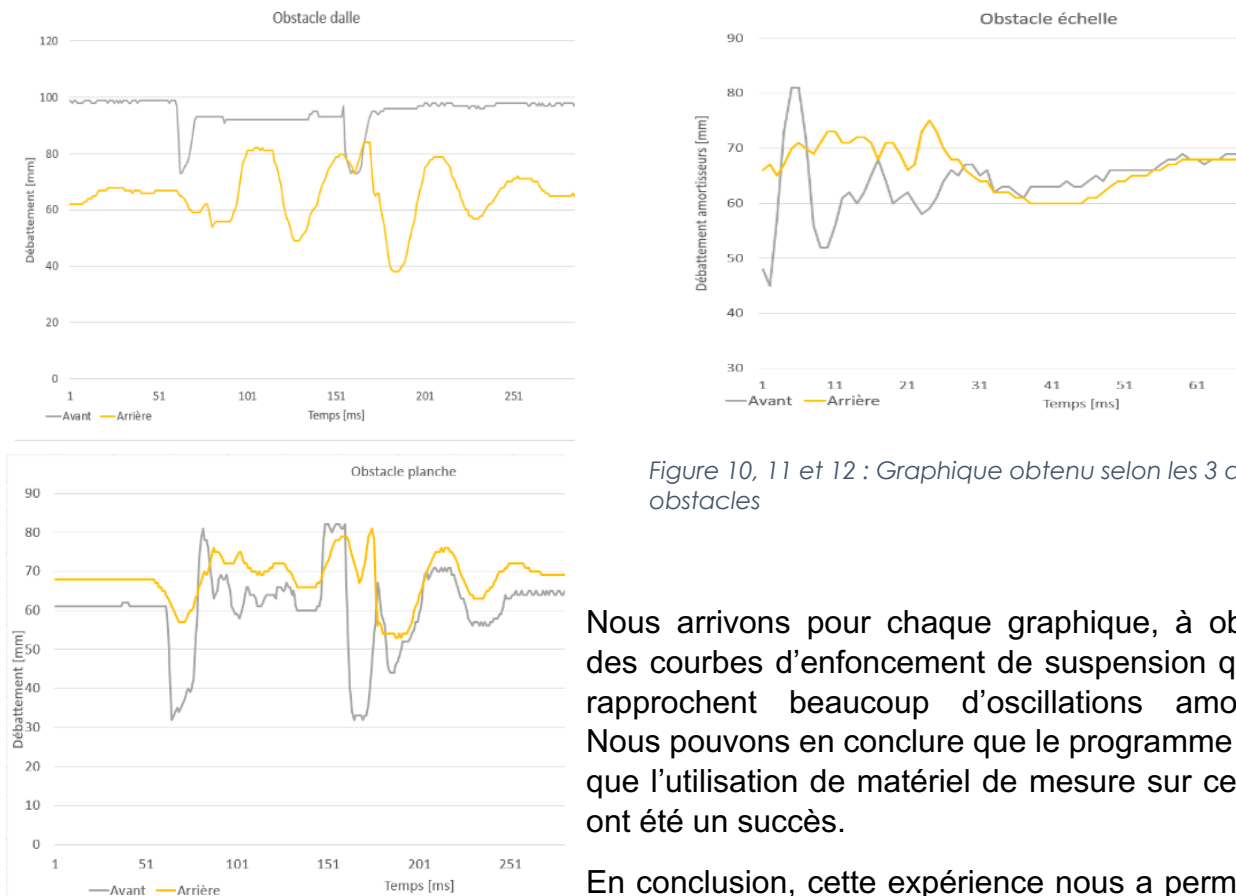


Figure 10, 11 et 12 : Graphique obtenu selon les 3 différents obstacles

Nous arrivons pour chaque graphique, à obtenir des courbes d'enfoncement de suspension qui se rapprochent beaucoup d'oscillations amorties. Nous pouvons en conclure que le programme ainsi que l'utilisation de matériel de mesure sur ce vélo ont été un succès.

En conclusion, cette expérience nous a permis de comprendre d'une manière concrète (sur une suspension de VTT) ce que représente une oscillation amortie. Nous pouvons donc conclure que la partie programmation et automation est un succès, car nous avons pu tirer des résultats intéressants sous forme de graphique.