

G5E Etat de l'Art Les Accéléromètres Industriels (MEMS et autres)

Flammarion Paul



Version numéro 1.0
12 juin 2023

Table des matières

| | | |
|----------|--|-----------|
| 1 | Simulation de la mesure de la vitesse à la montée ou à la descente d'un ascenseur au cours du temps | 2 |
| 2 | Simulation de la mesure de la vitesse d'une voiture depuis son habi- | 2 |
| | tacle | |
| 3 | Résultats de la simulation 1 et analyse des données obtenues | 3 |
| 4 | Résultats de la simulation 2 et analyse des données obtenues | 6 |
| 5 | Annexes | 13 |
| 5.1 | Bibliographie | 13 |
| 5.2 | Calcul de la distance à partir de l'accélération | 13 |

1 Simulation de la mesure de la vitesse à la montée ou à la descente d'un ascenseur au cours du temps

- *Construction d'un dispositif pour mesurer l'accélération linéaire à l'aide d'un accéléromètre.* Pour cette simulation, nous avons utilisé un accéléromètre MEMS. Dans le cas de l'utilisation de ce capteur nous avons utilisé l'application "Physics Toolbox Suite" qui enregistre en temps réel les données de l'accéléromètre implémenté dans un smartphone.
- *Montée dans un ascenseur et effectuer des mesures d'accélération linéaire à différents moments de la montée ou de la descente.* Pour cette étape, nous sommes montés dans un ascenseur et avons effectué des mesures d'accélération linéaire lors de la montée ou de la descente de celui-ci. Nous avons enregistré les données en utilisant un smartphone.
- *Analyse des données pour déterminer la vitesse de l'ascenseur au cours du temps.* Pour cette étape, nous allons utiliser un logiciel de traitement de données (MATLAB ainsi que Python) pour analyser les données et déterminer la vitesse de l'ascenseur au cours du temps. Nous allons tracer un graphique de l'accélération en fonction du temps pour visualiser les résultats qui en découlent.

2 Simulation de la mesure de la vitesse d'une voiture depuis son habitacle

- Pour cette simulation, nous avons fixé un accéléromètre à l'intérieur d'une voiture pour que celui-ci ne bouge plus par rapport au référentiel de la voiture. Nous avons ensuite effectué des mesures d'accélération linéaire en conduisant la voiture à plusieurs accélérations différentes : de 0 à 30 km/h, de 0 à 45 km/h et de 0 à 80km/h.
- Pour cette étape, nous avons développé un programme Python pour analyser les données relevé et déterminer la vitesse de la voiture au cours du temps. Nous avons donc tracé un graphique de la vitesse en fonction du temps pour visualiser les résultats et les analyses qui en découlent.

3 Résultats de la simulation 1 et analyse des données obtenues

Nous avons utilisé l'application "Physics Toolbox Suite" pour enregistrer les variations de l'accélération de la pesanteur à la surface de la Terre en fonction du temps lors de la montée d'un ascenseur sur 3 étages. Nous avons dans un premier temps analysé ce tableau pour en déduire les données qui nous intéressaient.

| time ↕ | gFx ↕ | gFy ↕ | gFz ↕ | TgF ↕ |
|-------------|---------|---------|--------|-------|
| 0.002060923 | 0,0036 | -0,0435 | 0,9917 | 0,993 |
| 0.002641615 | 0,0060 | -0,0471 | 0,9996 | 1,001 |
| 0.00309323 | 0,0026 | -0,0445 | 1,0012 | 1,002 |
| 0.006678461 | -0,0095 | -0,0403 | 0,9977 | 0,999 |
| 0.007237615 | -0,0079 | -0,0422 | 0,9944 | 0,995 |
| 0.008188307 | 0,0048 | -0,0377 | 0,9817 | 0,982 |
| 0.010464077 | 0,0099 | -0,0352 | 0,9714 | 0,972 |
| 0.01428223 | 0,0043 | -0,0377 | 0,9851 | 0,986 |
| 0.017283769 | 0,0048 | -0,0373 | 0,9964 | 0,997 |
| 0.023130846 | 0,0146 | -0,0345 | 0,9986 | 0,999 |
| 0.023655154 | 0,0136 | -0,0364 | 0,9954 | 0,996 |
| 0.024101923 | -0,0007 | -0,0438 | 0,9966 | 0,998 |
| 0.025510538 | -0,0032 | -0,0454 | 1,0059 | 1,007 |
| 0.028186154 | 0,0069 | -0,0357 | 1,0064 | 1,007 |
| 0.030623692 | 0,0160 | -0,0315 | 1,0096 | 1,010 |
| 0.033284077 | 0,0065 | -0,0377 | 1,0086 | 1,009 |
| 0.037360692 | -0,0068 | -0,0422 | 1,0066 | 1,008 |

FIGURE 1 – Tableau de données enregistrées par l'application

Comme nous pouvons le remarquer dans ce tableau, la première colonne nous permet de définir l'instant où la mesure a été prise. Les autres colonnes sont respectivement l'accélération en x, en y, en z et la somme de ces forces. Dans le cadre de cette expérience nous souhaitons analyser les variations de l'accélération par rapport à l'axe z. La somme totale des forces ne serait pas intéressante car l'ascenseur ayant une trajectoire purement verticale, cela ne ferait qu'ajouter du bruit à nos valeurs.

Nous n'allons donc garder que le temps et la mesure de l'accélération en z que nous allons afficher sur un graphique pour une meilleure visualisation du jeu de données.

Dans un premier temps, nous avons fait notre simulation sur le logiciel MATLAB. Une fois le jeu de données chargé nous obtenons le graphique suivant 3 :

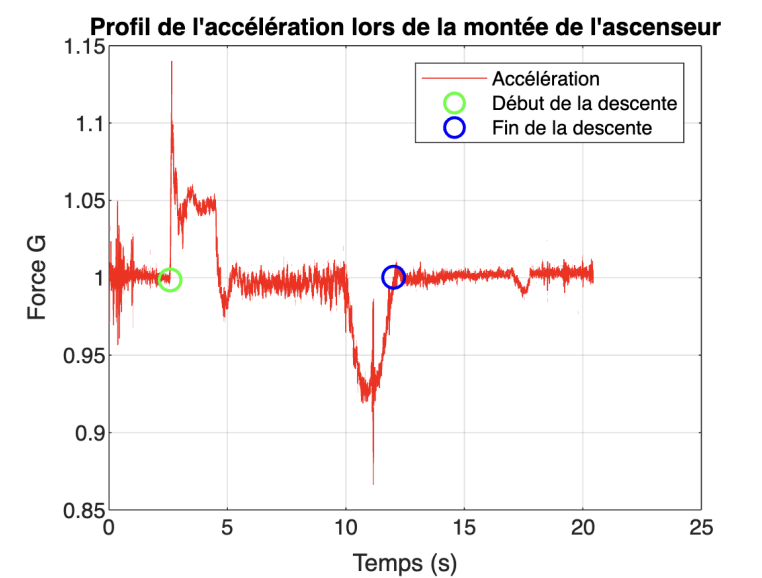


FIGURE 2 – Visualisation des données enregistrées pendant la montée d'un ascenseur

Sur ce graphique 3, nous remarquons par analyse graphique une augmentation de l'accélération de 2,5 secondes à 5 seconde, une stabilisation pendant 5 secondes, et une décélération pendant 2,5 secondes. Nous allons donc diviser notre programme en 3 parties distinctes : la phase d'accélération, la phase de vitesse constante, et la phase de décélération. Pour que notre algorithme soit juste, nous avons défini une vitesse de départ et d'arrivée à 0 m/s. Nous en déduisons le graphique suivant :

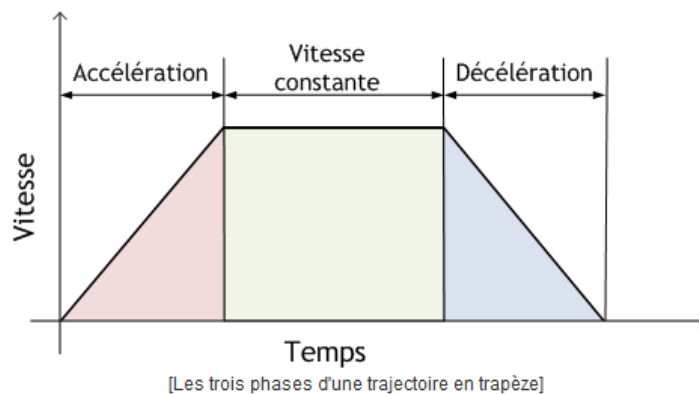


FIGURE 3 – Modèle Trapézoïdale de la vitesse d'un ascenseur | Source 5.1

Nous avons fait une moyenne de l'accélération que nous avons préalablement multipliée par l'accélération de la pesanteur standard que nous avons notée "g", pour convertir nos valeurs en accélération. Nous avons pris pour nos analyses une valeur de g de $9,81 m \cdot s^{-2}$.

Une fois ces moyennes calculées, nous pouvons en déduire la vitesse maximale atteinte à la suite de l'accélération qui est donnée par :

$$v_{acc} = mean_{acc} \times \Delta t \quad (1)$$

Nous pouvons ensuite en déduire la distance parcourue par l'ascenseur en calculant la distance parcourue lors de l'accélération, lors de la phase durant laquelle la vitesse est constante, et durant la décélération. Nous restons dans le cas où la vitesse à l'origine est 0 m/s.

$$d_{acc} = \frac{1}{2} \times mean_{acc} \times \Delta t_{acc}^2 \quad (2)$$

$$d_{const} = v_{acc} \times \Delta t_{const} \quad (3)$$

$$d_{dece} = \frac{1}{2} \times mean_{dece} \times \Delta(t_{dece}^2) \quad (4)$$

Les calculs plus détaillés sont présent en annexe [5.2](#).

Nous obtenons après ces calculs les résultats suivant lors de l'analyse de la montée d'un ascenseur sur 3 étages :

```
L'acceleration_est_positive_de_2.57_s_a_4.62_s
Avec_une_acceleration_moyenne_de_0.47_m/s^2

L'acceleration est negative de 10.04 s a 12.00 s
Avec une deceleration moyenne de -0.49 m/s^2

On en deduit une acceleration pendant 1.96 m a une vitesse de 0.95 m/s
On en deduit une deceleration pendant 1.89 m a une vitesse de 0.96 m/s

La distance parcourue entre l'acceleration_et_la_deceleration_est_de_5.17_m
Ce_qui_fait_un_total_de_9.02_m_en_9.43_s
```

Une fois ce programme réalisé et cohérent avec l'expérience nous avons décidé de l'implémenter aussi en Python. Nous obtenons les mêmes résultats [4](#) :

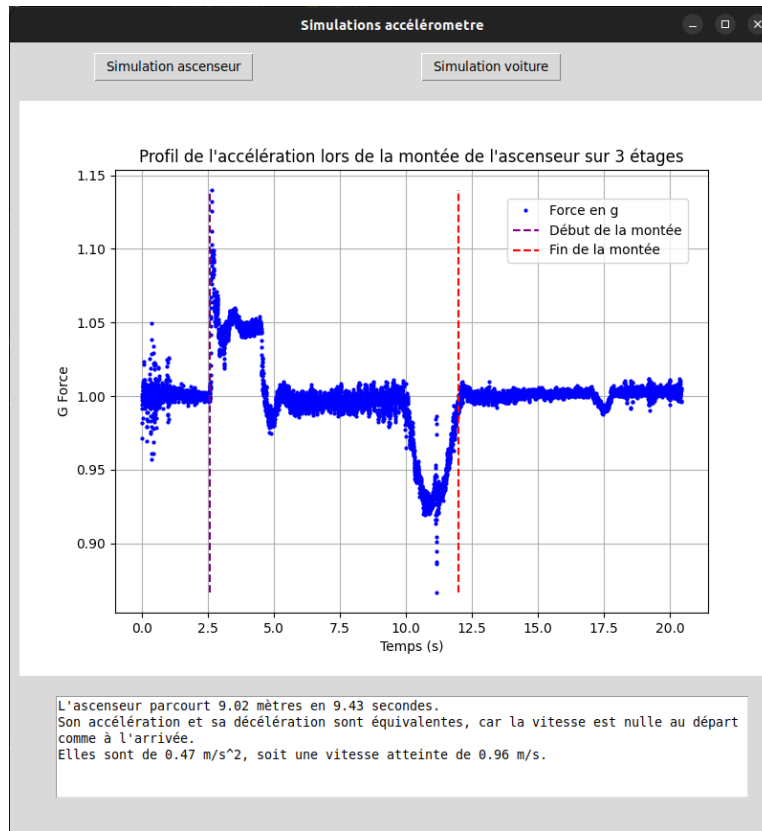


FIGURE 4 – Réalisation de l'algorithme sous Python avec fenêtre graphique

Pour conclure cette simulation, nous pouvons dire que l'accéléromètre utilisé semble avoir une bonne précision car nous sommes dans le bon ordre de grandeur. Cette simulation met en évidence les variations de l'accélération subie par les passagers, ce programme pourrait aussi permettre de détecter des anomalies telles que des accélérations trop brusques, des secousses ou des vibrations. De plus, nous remarquons qu'un ascenseur n'a pas d'accélération linéaire jusqu'à sa décélération et son arrêt, mais une vitesse limite (0,96 m/s) atteinte en 2,5 secondes.

Il aurait été intéressant de comparer les différents profils d'ascenseur, sur un nombre différent d'étages. De plus, nous aurions aussi pu analyser le profil d'accélération d'un ascenseur lors de sa descente pour en tirer des conclusions quant au fonctionnement de celui-ci.

4 Résultats de la simulation 2 et analyse des données obtenues

Pour notre deuxième simulation, nous nous sommes intéressés au profil de l'accélération d'une voiture d'une vitesse nulle à une vitesse choisie. Le but de cette simulation est de pouvoir analyser la variation de la vitesse d'une voiture et en déduire sa linéarité, l'impact de changements extérieurs sur la vitesse, et la précision du compteur de la voiture.

Nous avons donc mesuré trois accélérations : 30, 45, et 80 km/h. Lors de notre expérience nous avons une vitesse nulle à l'origine sur une route plate.

Dans un premier temps, nous avons, comme lors de la première expérience 3 choisi les données à analyser. Durant l'expérience, le téléphone était horizontal et orienté vers l'avant de la voiture, ainsi, l'accélération est à analyser sur l'axe y.

Pour commencer cette simulation nous avons fait un enregistrement de plusieurs secondes de la voiture, moteur allumé à l'arrêt, pour pouvoir calibrer notre expérience et en déduire l'équation du bruit subit par l'accéléromètre.

Nous avons donc commencé par calculer l'accélération instantanée en multipliant toutes les valeurs par "g" 3. Nous avons ensuite calculé la vitesse instantanée en suivant le même protocole que lors de la phase d'accélération lors de la phase de montée de l'ascenseur 3.

Nous en déduisons donc les courbes de la vitesse mesurée en fonction du temps et la position de la voiture par rapport au point de départ.

Le premier enregistrement représente l'accélération d'une voiture de 0 à 30 km/h :

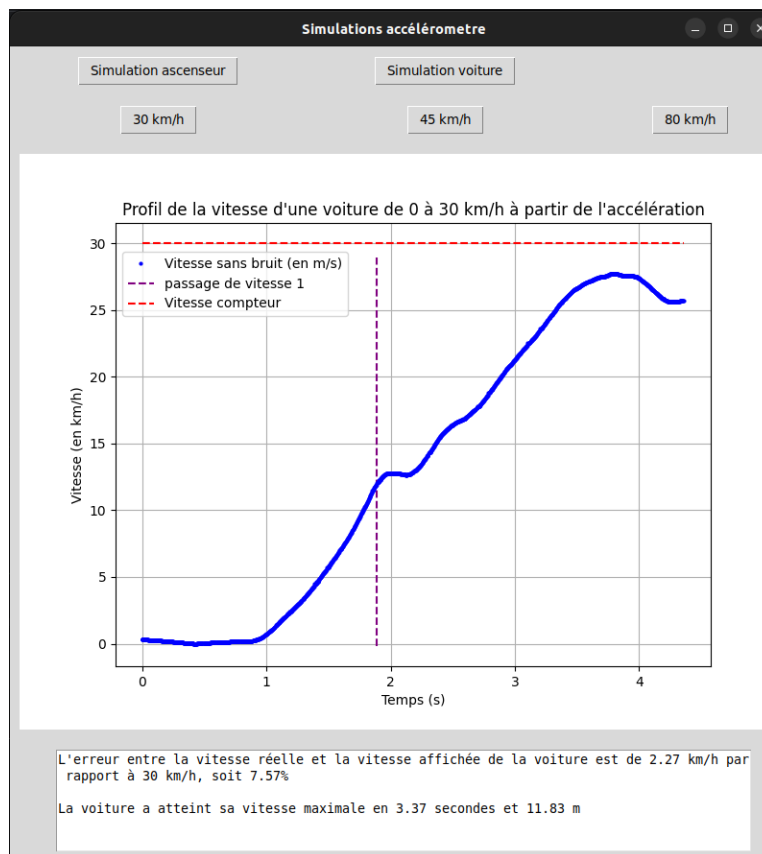


FIGURE 5 – Mesure de la vitesse de 0 à 30km/h de la voiture

Par analyse graphique nous remarquons que la vitesse réelle atteinte n'est pas 30 km/h mais 27,7 km/h, ce qui représente un écart de 7.57% par rapport à la vitesse souhaitée. De plus, comme l'expérience a été faite avec une voiture à boîte mécanique, nous pouvons remarquer un plateau sur la courbe qui traduit un passage de rapport de vitesse. Le passage de rapport de vitesse a été déterminé par le code, car celui-ci est d'autant plus visible sur la courbe de l'accélération. En effet nous remarquons une chute de l'accélération à 0m/s^2 qui décrit le passage de vitesse 6.

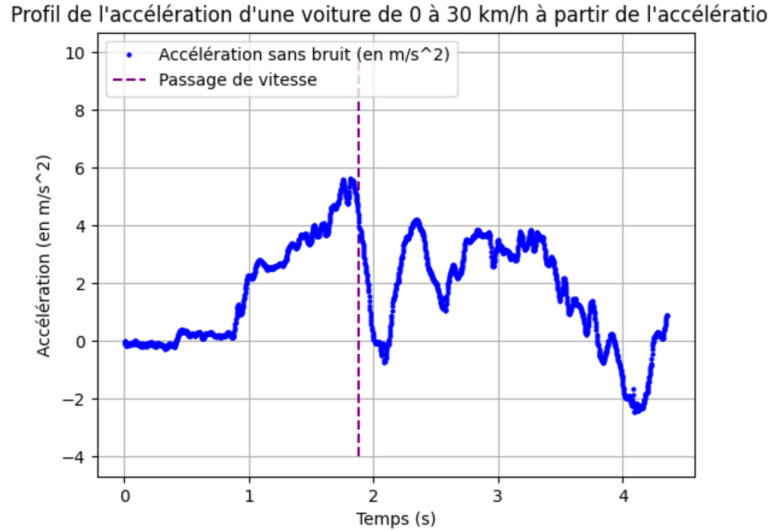


FIGURE 6 – Mesure de l'accélération de 0 à 30km/h de la voiture

Nous avons ensuite enregistré une accélération jusqu'à 45 km/h.

Comme lors de l'accélération de 0 à 30 km/h, nous avons une augmentation linéaire de la vitesse. Nous avons aussi une différence entre la vitesse mesurée et la vitesse du compteur de la voiture. Dans cette simulation il est de 10% avec une vitesse réelle atteinte à 40,5 km/h. Par analyse graphique nous remarquons quelque chose d'intéressant : le premier passage de vitesse a la même allure que le passage de vitesse lors de la première expérience, tandis ce que le deuxième passage de vitesse en jaune sur le graphe 7 a une allure vraiment différente. En effet, nous remarquons un plateau nettement plus long, avec une perte de vitesse et un petit rebond une fois la vitesse enclenchée. Cela s'explique par différentes choses : la distance parcourue par le levier de vitesse entre la deuxième et la troisième vitesse, et les frottements qui dépendent de la formule suivante :

$$R = \frac{1}{2} C_x \rho S v^2 \quad (5)$$

m , la masse de l'objet ;

g , l'accélération de la pesanteur ;

ρ désigne la masse volumique de l'air ;

S , le maître-couple, section droite perpendiculaire au mouvement ;

C_x , le coefficient de résistance « aérodynamique » ;

v , la vitesse de l'objet.

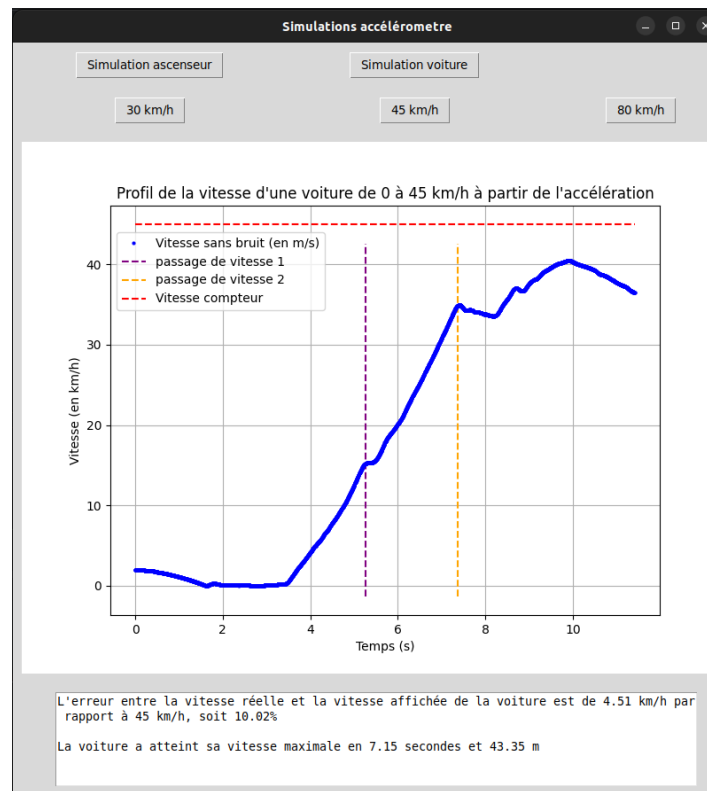


FIGURE 7 – Mesure de l'accélération de 0 à 45km/h de la voiture

La vitesse est donc exprimée au carré, nous en déduisons que la voiture subit quatre fois plus de frottements à 35km/h qu'à 15 km/h. De plus il faut prendre en compte les frottements des pièces mécaniques de la voiture.

Pour la troisième expérience nous avons élané la voiture jusqu'à 80km/h. La voiture n'a subi qu'un seul passage de vitesse, de la vitesse numéro 2 à la vitesse numéro 3. Nous obtenons le graphique suivant :

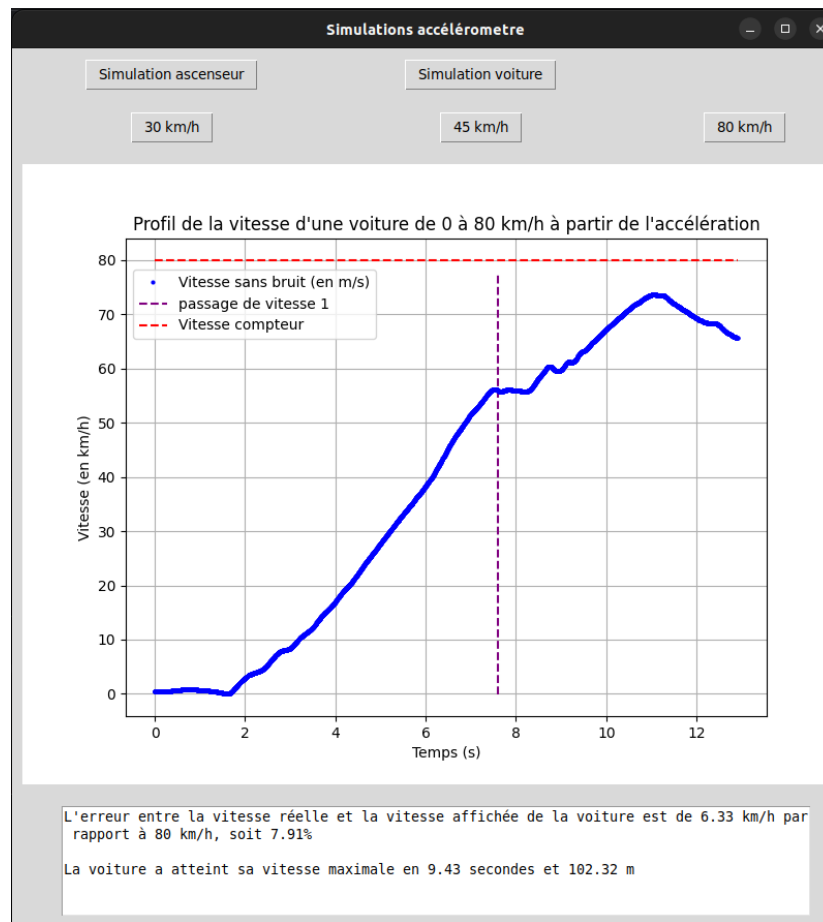


FIGURE 8 – Mesure de l'accélération de 0 à 80km/h de la voiture

Par analyse graphique nous remarquons que le passage de vitesse a les mêmes caractéristiques que le passage équivalent lors de la dernière analyse. Nous remarquons que la variation de vitesse est linéaire sur l'ensemble de l'accélération. Une fois la vitesse maximum atteinte, nous avons arrêté d'appuyer sur l'accélérateur et nous remarquons les frottements subis à cette vitesse qui sont trois à quatre fois supérieurs que lors des expériences précédentes. Nous pouvons aussi noter la différence de vitesse entre la vitesse lue sur le compteur et la vitesse maximale enregistrée. Nous avons ici une différence de 8%.

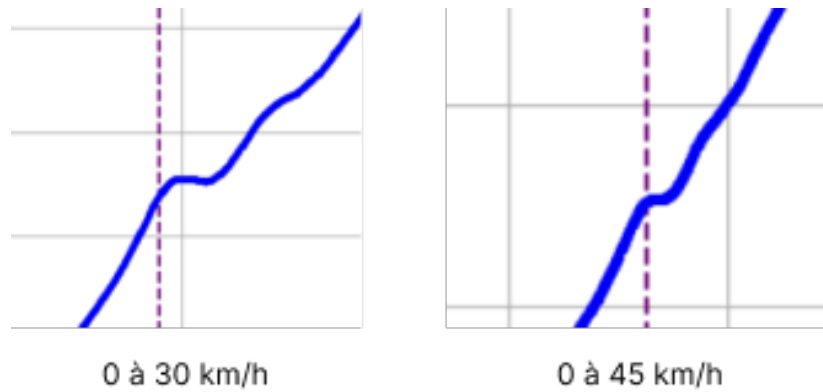


FIGURE 9 – Comparaison des courbes de vitesse du passage de vitesse 1 à vitesse 2 d'une boîte de vitesse mécanique

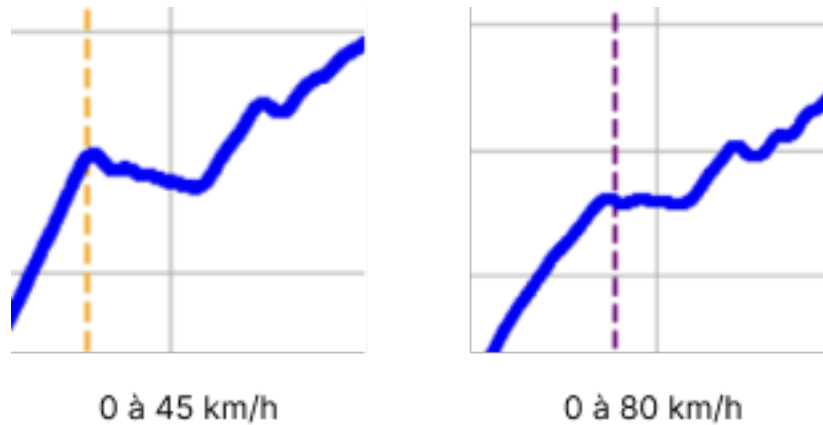


FIGURE 10 – Comparaison des courbes de vitesse du passage de vitesse 2 à vitesse 3 d'une boîte de vitesse mécanique

Ces deux figures 9 et 10 nous montrent qu'il y a potentiellement une corrélation entre la conception des pièces mécaniques de la boîte de vitesse et les performances de la voiture. Cela pourrait être important et pris en compte notamment dans le milieu du sport automobile.

Il faut aussi prendre en compte la conception d'un levier de vitesse. En effet, la distance entre la vitesse une et la vitesse deux est plus courte que la distance entre la vitesse deux et la vitesse trois. Cela peut aussi expliquer le temps de passage qui est plus long dans le deuxième cas. Comme montré sur la graphe 11, la flèche rouge montre le chemin emprunté par le levier lors du passage de la vitesse une à la vitesse deux. Et la flèche bleue montre le chemin emprunté par le levier lors du passage de la vitesse deux à la vitesse trois. Cela met en évidence la différence de temps entre les différents passages de vitesse observés dans les différents jeux de données.

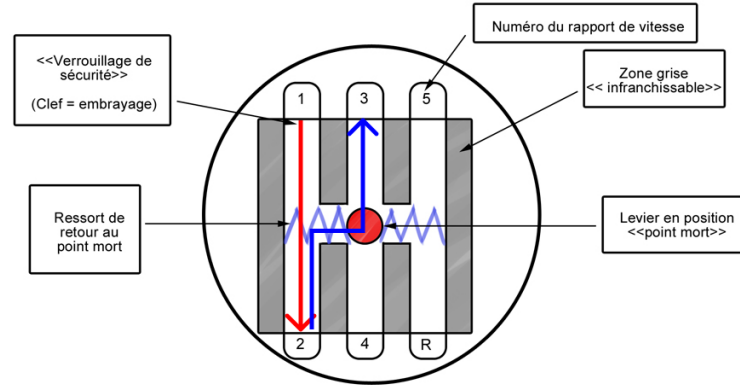


FIGURE 11 – Comparaison du chemin emprunté par un levier de vitesse en fonction de la vitesse choisie | Source : 5.1

À la suite de ces trois expériences nous pouvons calculer le taux d'erreur moyen entre la vitesse enregistrée et le compteur.

$$\epsilon = \frac{7,57 + 10,02 + 7,91}{3} \quad (6)$$

$$\epsilon = 8.5\%$$

Nous avons donc une erreur moyenne de 8,5% même si le constructeur annonce une erreur de 5%. Nous en déduisons alors que nos mesures sont précises à 3,5%. De plus il aurait été intéressant d'effectuer plusieurs fois les mesures dans les mêmes conditions afin de pouvoir comparer les différents jeux de données.

Pour conclure cette simulation, nous pouvons dire que la mesure de l'accélération nous a permis de déterminer les différents passages de vitesse ainsi que leur effet sur l'accélération de la voiture. Nous avons aussi pu mesurer la précision des outils de mesure présents à bord. Les accéléromètres présents dans la voiture ont néanmoins de nombreux usages tels que la détection d'accident, ou de freinage brusque, mais aussi d'anomalies qui ne peuvent pas être ressenties par les utilisateurs comme un profil de passage de vitesse anormal.

5 Annexes

5.1 Bibliographie

- Application Physics Tool Box :
<https://play.google.com/store/apps/details?id=com.chrystianvieyra.physicstoolboxsuite&hl=en>
- Comparaison du chemin emprunté par un levier : <https://www.stych.fr/code/elements-mecaniques-5/la-boite-de-vitesses-303>
- Modèle Trapézoïdale de la vitesse :
http://projet.eu.org/pedago/sin/term/6-asservissement_PID.pdf
- Schéma d'une boîte de vitesse à 5 rapports :
<https://www.stych.fr/code/elements-mecaniques-5/la-boite-de-vitesses-303>

5.2 Calcul de la distance à partir de l'accélération

On a l'équation de la vitesse :

$$\begin{aligned}v &= \frac{dx}{dt} \\ dx &= v \cdot dt\end{aligned}\tag{7}$$

Ce qui nous donne l'expression de la distance :

$$\begin{aligned}d &= \int dx \\ d &= \int v \cdot dt \\ d &= \int mean_{acc} \cdot t \cdot dt \\ d &= mean_{acc} \int t \cdot dt \\ d &= mean_{acc} \cdot \frac{\Delta(t^2)}{2}\end{aligned}\tag{8}$$