Lycée de Berlaymont

Cours de physique générale

Titulaire de cours : Fabrice LACROIX

Loi fondamentale de la dynamique

Janvier 2020

Valentin Allard

Année académique 2019 - 2020

Introduction

Durant le premier semestre, nous avons étudié la cinématique (étude des différents mouvements d'un corps) : deux types de mouvements (rectilignes) ont pu être mis en évidence.

Le **mouvement rectiligne uniformément accéléré (MRUA)**, caractérisé par une accélération $a(t) = a$ constante (non-nulle) où la vitesse $v(t)$ et la position $x(t)$ s'expriment comme :

$$v(t) = at + v_0 \quad \text{(Droite de pente } a\text{)} \qquad\qquad x(t) = \frac{1}{2}at^2 + v_0 t + x_0 \quad \text{(Parabole)}$$

Le **mouvement rectiligne uniforme (MRU)** caractérisé par une accélération nulle, $a(t) = 0$ où la vitesse $v(t)$ et la position $x(t)$ s'expriment comme :

$$v(t) = v_0 \quad \text{(Droite de pente nulle)} \qquad\qquad x(t) = v_0 t + x_0 \quad \text{(Droite de pente } v_0\text{)}$$

Nous avons vu que toute force engendre une accélération (ex : une bille que l'on fait tomber acquiert une accélération constante grâce à son poids, une trousse que l'on fait glisser sur une table s'immobilise quelques temps après à cause des forces de frottements qui la font décélérer jusqu'à son arrêt complet, etc.). Ce chapitre consistera à préciser et établir la relation qui existe entre la force constante exercée sur un corps et l'accélération de ce corps.

Déduction (expérimentale) du principe fondamental de la dynamique

Présentation du dispositif expérimental

Nous allons établir, via l'expérience, le principe fondamental de la dynamique. Pour cela, nous allons étudier le mouvement d'un chariot (de masse brute[1] m_2) se trouvant sur un plan horizontal et mis en mouvement par une masse tractrice m_1 suspendue à une ficelle passant par une poulie et fixée au chariot. La masse totale de ce système est donnée par $M = m_1 + m_2$.

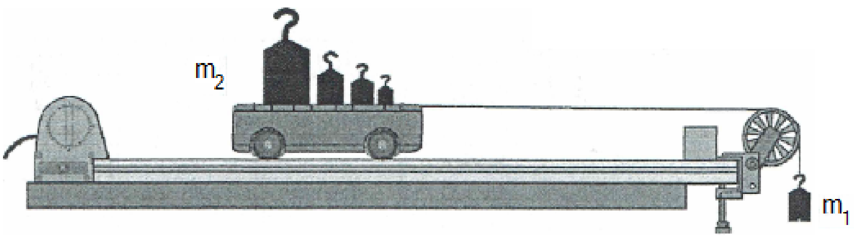

FIGURE 1 – Schéma du dispositif expérimental. La masse du chariot avec sa charge est de m_2 tandis que la masse tractrice est m_1. Le chariot est supposé rouler sans frottements.

Il est possible de faire varier la masse m_2 du chariot en lui rajoutant ou retirant des petites masses tout comme il est possible de modifier la masse tractrice m_1 (et donc, la force de traction) à l'aide de ces petites masses. Un dispositif permet de prendre des mesures du temps de parcours du chariot sur différentes distances parcourues. Le chariot est supposé ne subir aucune force de frottement, seul le poids de la masse m_1 s'exerce sur lui et le met en mouvement.

Type de mouvement : MRU ou MRUA ?

1. Masse brute = Masse du chariot sans chargement + Masse du chargement

La première expérience consiste à déterminer le type de mouvement que possède le chariot lorsqu'il est soumis à une force (de traction) constante. Pour cela, on fixe la masse de traction à $m_1 = 7$g et la masse brute du chariot à $m_2 = 100$g. Afin de rester général dans les mouvements possibles du chariot, nous supposerons que le chariot est en MRUA [2]. Sachant que $x_0 = 0$ et $v_0 = 0$, on devrait avoir $x(t) = at^2/2$ et le rapport $a = 2x/t^2$ devrait nous donner une constante. En reprenant les données précédentes, nous trouvons :

Masse du chariot : 100 g **Masse tractrice : 7 g**		
Distance x (m)	**Temps au carré t^2 (s^2)**	$a = 2x/t^2$ (m/s^2)
0,000	0,000	0,000
0,045	0,160	0,563
0,094	0,360	0,522
0,240	1,000	0,480
0,341	1,440	0,474
0,584	2,560	0,456

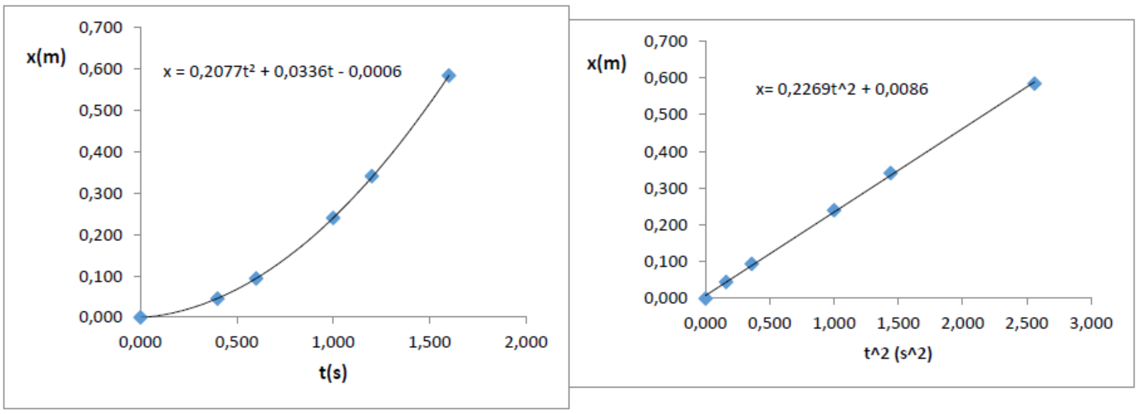

FIGURE 2 – Graphe de la position x en fonction de t (à gauche) et de t^2 (à droite).

Le rapport $a = 2x/t^2$ est constant (aux incertitudes de mesures près) : **le mouvement du chariot est un MRUA** (où la valeur de l'accélération du chariot est donnée par la valeur de a).

Conclusion 1

Une force constante agissant sur un mobile entraîne une accélération constante (donnée par $a = 2x/t^2$) !

2. Ce mouvement est général puisqu'il contient aussi le MRU étant donné que le MRU... est un MRUA où $a = 0$m/s.

Relation entre l'accélération du chariot a et la force de traction F exercée sur celui-ci

La deuxième expérience consiste à étudier l'influence de l'intensité de la force tractrice F sur l'intensité de l'accélération du chariot a. Pour cela, on fixe la masse totale du système à $M = m_1 + m_2 = 107$g et on choisit une distance de $x = 30$cm. On fait varier la masse tractrice m_1 et on mesure le temps pris par le chariot pour parcourir la distance x fixée, afin de calculer l'accélération $a = 2x/t^2$ et de la porter en graphe en fonction de l'intensité de la force tractrice $F = m_1 g$.

Masse du système ($M = m_1 + m_2$) : 107 g Distance (x) fixée : 30 cm				
m_1 (kg)	t (s)	t^2 (s^2)	$a = 2x/t^2$ (m/s^2)	$F = m_1 g$ (N)
0,003	2,76	7,618	0,079	0,03
0,004	1,72	2,958	0,203	0,04
0,005	1,52	2,310	0,260	0,05
0,006	1,26	1,588	0,378	0,06
0,007	1,14	1,300	0,462	0,07

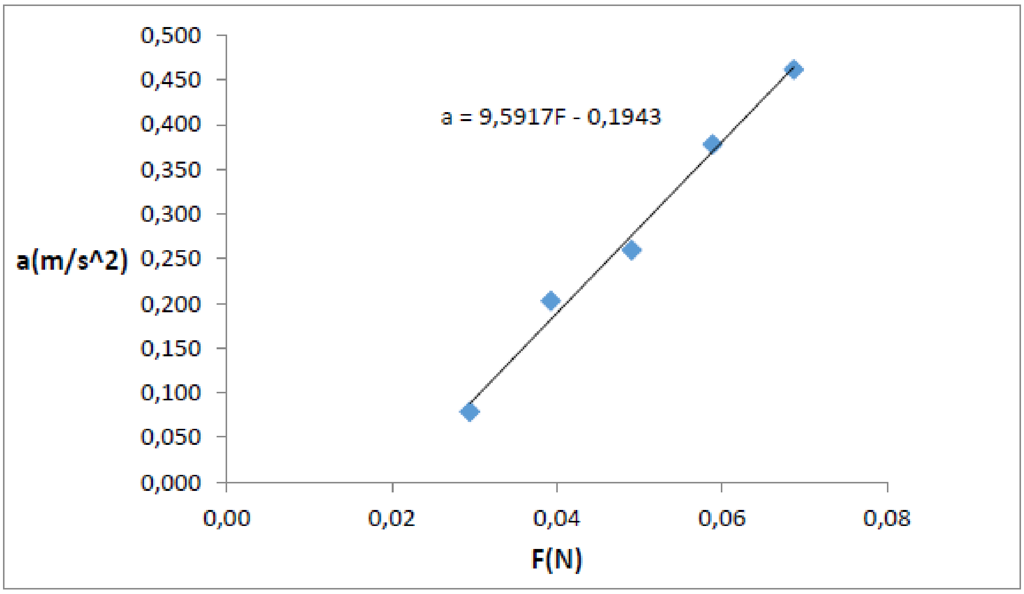

FIGURE 3 – Relation (linéaire) entre l'accélération a et la force de traction F (poids de la masse tractrice).

Conclusion 2

Pour une masse en mouvement $M = m_1 + m_2$ fixée, la relation entre l'accélération a et l'intensité de la force tractrice F est une relation linéaire.

Relation entre l'accélération du chariot a et la masse totale du système $M = m_1 + m_2$

La troisième et dernière expérience consiste à étudier l'influence de la masse totale $M = m_1 + m_2$ du système sur l'intensité de l'accélération du chariot a. Pour cela, on fixe l'intensité de la force tractrice F en fixant la masse tractrice à $m_1 = 7$g et on choisit une distance de $x = 30$cm. On fait varier la masse totale du système $M = m_1 + m_2$ en faisant varier la masse brute du chariot m_2 et on mesure le temps mis par le chariot pour parcourir la distance x fixée, afin de calculer l'accélération a et de la porter en graphe en fonction de la masse totale M.

Masse tractrice ($M = m_1 + m_2$) : 0,007 kg Distance (x) fixée : 0,3 m			
$M = m_1 + m_2$ (kg)	t (s)	a (m/s^2)	$M.a$ $(kg.m/s^2)$
0,057	0,84	0,85	0,05
0,107	1,18	0,43	0,05
0,157	1,52	0,26	0,04
0,207	1,54	0,25	0,05
0,257	1,70	0,21	0,05

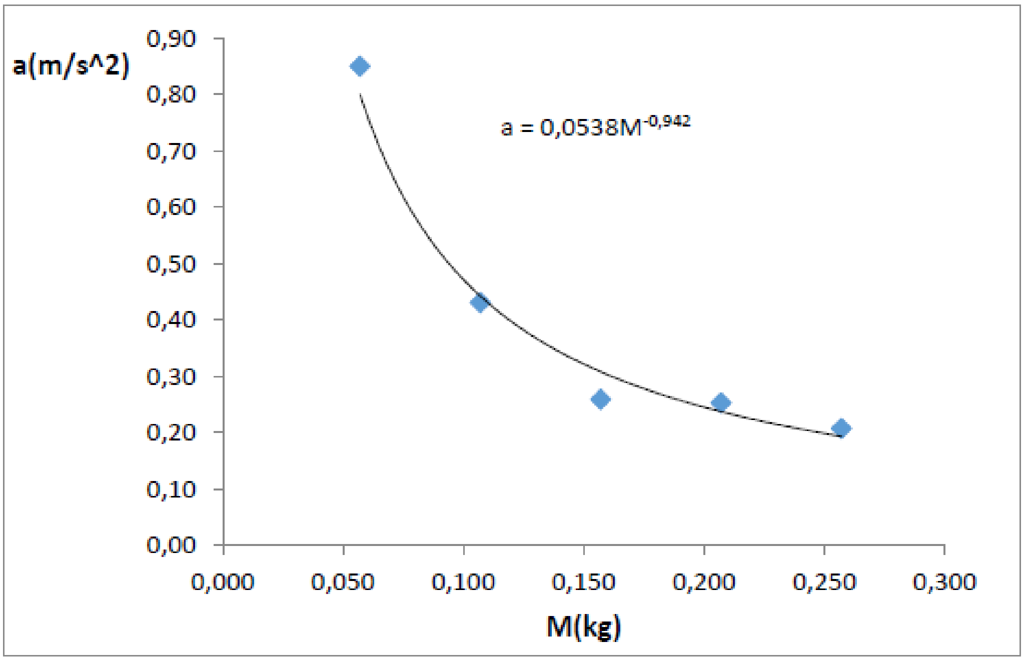

FIGURE 4 – Relation entre l'accélération a et la masse totale en mouvement M.

Le graphe de l'accélération a en fonction de la masse totale M suggère une relation de proportionnalité inverse. En effet, le produit $M.a$ est constant, aux incertitudes près : l'accélération du chariot a est inversement proportionnelle à la masse totale M du système.

Conclusion 3

Lorsqu'une même force agit sur des mobiles de masses différentes, l'accélération produite est inversement proportionnelle à la masse totale en mouvement.

Synthèse des résultats obtenus

Soit F, l'intensité d'une force exercée sur un mobile de masse (totale) m :

- Lorsque m est maintenue constante : l'intensité de l'accélération a est proportionnelle à F.
- Lorsque F est maintenue constante : L'intensité de l'accélération a est inversement proportionnelle à $1/m$.

Nous pouvons alors lier l'intensité de la force F avec l'intensité de l'accélération a qu'elle produit :

$$a = k.\frac{F}{m}$$

Où k est une constante de proportionalité. Comme, en dehors de F et m, aucun paramètre physique n'influence la valeur de l'accélération, la valeur de la constante de proportionalité k ne dépend alors que du choix d'unités et peut donc, en choisissant les bonnes unités, être ramenée à $k = 1$. Nous avons alors le principe fondamental de la dynamique (PFD) sous forme scalaire :

Principe fondamental de la dynamique (PFD) sous forme scalaire

Soit un objet de masse m mis en mouvement par une force d'intensité F, l'intensité de l'accélération a est alors donnée par :

$$a = \frac{F}{m}$$

Énoncé général du principe fondamental de la dynamique

PFD et unité de force

Dans la littérature, le principe fondamental de la dynamique (PFD) s'écrit comme :

$$F = m.a$$

Nous avons déduit, expérimentalement, cette relation pour le cas d'une force F constante. Cependant, nous admettrons que cette relation est générale : elle est valide peu importe la force, qu'elle soit constante ou non.

Le PFD relie la cinématique (étude des mouvements) à la dynamique (étude des forces sur un système). Elle relie donc la force exercée sur un objet et le mouvement que celle-ci imprègne sur cet objet. Le PFD permet aussi de définir l'unité de la force qu'est le Newton :

Définition du Newton (N)

Le **Newton (N)** est l'intensité de la force qui communique une accélération d'un mètre par seconde au carré à un mobile dont la masse est d'un kilogramme.

Forme vectorielle du PFD

Jusqu'à présent nous avons trouvé une relation reliant l'intensité du vecteur F avec l'intensité du vecteur d'accélération a mais qu'en est il du sens et de la direction de ces vecteurs ? Y-a-t'il une relation plus générale, liant le vecteur force $\vec{F}$ et le vecteur accélération $\vec{a}$?

Pour cela, nous considérons le système de l'expérience précédente dans lequel on fixe le repère OX. La Figure 5 montre que le vecteur accélération $\vec{a}$ est dans le même sens que les vecteurs vitesse $\vec{v}_1$ et $\vec{v}_2$ c'est-à-dire, dans le sens positif de l'axe.

La force de traction $\vec{F}$ est aussi orientée dans le sens de l'axe : les vecteurs $\vec{F}$ et $\vec{a}$ ont le même sens et la même direction !

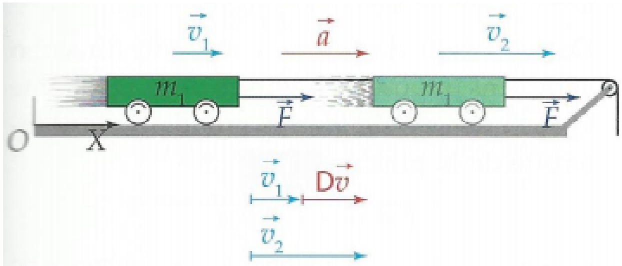

FIGURE 5 – Schéma des vitesses, de la force et de l'accélération de l'expérience du chariot.

Imaginons, qu'avec le même dispositif, nous relancions le chariot arrivé en bout de course avec une vitesse initiale dirigée dans le sens opposé de l'axe en essayant de le renvoyer de là où il est venu. Dans ce cas-là, la Figure 6 nous montre que la force de traction est dirigée vers l'arrière dans un sens opposé à celui de la vitesse. Cependant, cette traction aura pour effet de freiner le chariot et le vecteur accélération $\vec{a}$ décrivant le freinage aura donc lui aussi un sens opposé au mouvement. A nouveau, les vecteurs $\vec{F}$ et $\vec{a}$ ont le même sens et la même direction !

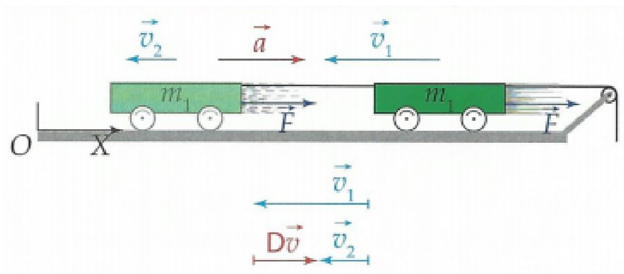

FIGURE 6 – Schéma des vitesses, de la force et de l'accélération de l'expérience du chariot (lorsqu'on essaie de le renvoyer de là où il est venu, lorsque ce chariot arrive en fin de course).

Nous obtenons alors la forme vectorielle du principe fondamental de la dynamique :

Principe fondamental de la dynamique (PFD) sous forme vectorielle

Lorsqu'un objet de masse m est soumis à un ensemble de forces dont la résultante est $\sum \vec{F}$, cet objet acquiert une accélération $\vec{a}$ telle que :

$$\sum \vec{F} = m\vec{a}$$

On utilise le mot "principe" parce que cet énoncé n'est pas démontrable (au sens mathématique) à partir d'autres énoncés : il est admis parce que les faits sont en accord avec lui (Il est admis... parce que ça marche !).

Parenthèse épistémologique : comment la physique et, plus précisément, les sciences se construisent ?

En physique, on a souvent recourt à des principes pour élaborer les bases d'une théorie (exemple : le principe de Fermat [3] forme la base de l'optique et permet de démontrer les lois de la réflexion et de la réfraction de Snell et Descartes). Ces principes, par définition, ne se démontrent pas comme des théorèmes mathématiques : ils se déduisent et se vérifient par les expériences. Ces principes sont communément admis après avoir fait un nombre très élevé d'expériences que l'on construit dans le but d'infirmer ces principes mais qui ont, au final, vérifié ces principes qu'elles essayaient de mettre à mal. Il suffit d'une seule expérience convaincante (dans le sens où celle-ci n'est pas entachée de grosses erreurs et qu'elle n'admette aucun biais) qui met en doute un principe sur lequel une théorie est basée pour mettre en doute toute la théorie basée autour de ce principe !

Jusqu'à présent, toutes les expériences réalisées dans le monde (et ce, depuis 1687 : année de publication de *Philosophiae naturalis principia mathematica* dans lequel, Newton, énonça ses trois grandes lois régissant la cinématique et la dynamique des corps), nous disent que $\vec{F} = m\vec{a}$. Ce principe est très robuste et efficace, il permet encore, de nos jours, de lancer des fusées et sondes spatiales et d'étudier, avec une bonne précision, le mouvement des planètes.

Feedback sur nos expériences

Rappel sur les frottements

Il existe deux sous-catégories de frottements :

- Les frottements statiques F_{fs} qui maintiennent immobile un objet malgré l'intervention d'une force essayant de déplacer cet objet.
- Les frottements dynamiques F_{fd} qui agissent sur deux surfaces en mouvements.

Les forces de frottement agissant sur un objet peuvent s'étudier en accrochant un dynamomètre et en appliquant une force de traction sur cet objet via le dynamomètre. En augmentant de façon constante et au fur et à mesure, la force de traction, il est possible de tracer l'allure du graphe des forces de frottements s'exerçant sur mobile en fonction de la force de traction (Voir Figure 7).

3. La lumière se propage d'un point de départ vers un point d'arrivée fixés en prenant la trajectoire qui minimise le temps de parcours.

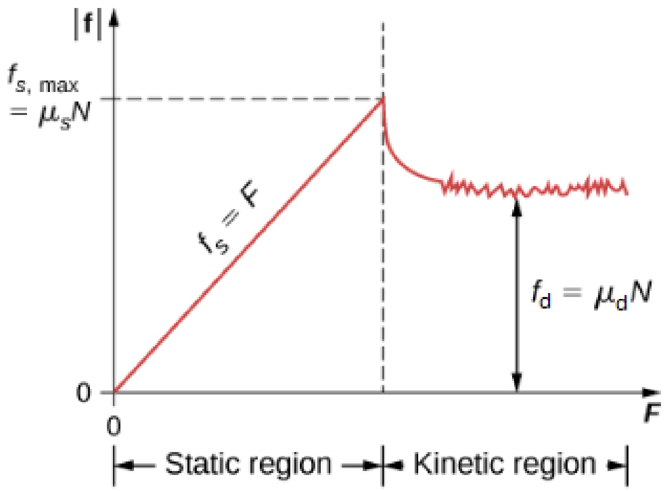

FIGURE 7 – Graphe des forces de frottements (notées $|f|$) exercées sur un corps en fonction de la force de traction F que l'on exerce sur ce corps. Pour les faibles valeurs de F, les forces de frottements sont des frottements statiques $F_{fs} = f_s = \mu_s N$. Pour des grandes valeurs de F, les forces de frottements sont des frottements dynamiques $F_{fd} = f_d = \mu_d N$

Ce graphe est caractérisé par 3 points :

- Premier cas : la force augmente linéairement mais l'objet reste immobile (à cause des forces de frottement statiques F_{fs} notées f_s sur la Figure 7).
- Au bout d'un certain temps, on atteint une valeur de force maximale qui permet de déplacer l'objet : on atteint la valeur maximale de la force de frottement statique $\vec{F}_{fs,Max}$ (notée $f_{s,max}$, sur la Figure 7) et la force de traction devient plus importante que cette force de frottement statique maximale.
- L'objet se déplace et est soumis à la force de frottement dynamique F_{fd} (notée f_d sur la Figure 7) qui est plus faible (en intensité) que la force de frottement statique maximale $F_{fs,Max}$: $F_{fs,Max} > F_{fd}$.

Les forces de frottements sont données par :

$$F_{fs,Max} = \mu_s N \qquad\qquad F_{fd} = \mu_d N$$

Où μ_s et μ_d sont respectivement, le coefficient de frottement statique et le coefficient de frottement dynamique. N est l'intensité de la force normale, c'est-à-dire, la force perpendiculaire à la surface du plan sur lequel l'objet est posé. Comme $F_{fs,Max} > F_{fd}$, on a alors : $\mu_s > \mu_d$.

Feedback sur l'expérience du chariot

A l'aide du PFD, il est possible d'interpréter les résultats trouvés précédemment. Le diagramme des forces du système masse tractrice-chariot est le suivant :

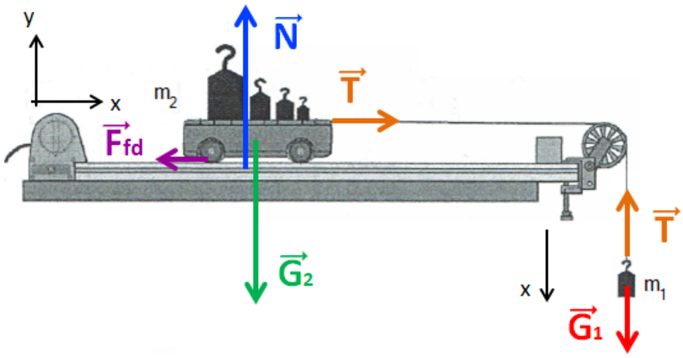

FIGURE 8 – Schéma des forces s'exerçant sur le système chariot-masse tractrice étudié en début de cours.

Appliquons le PFD sur chaque masse.

- Pour le chariot : $\vec{G}_2+\vec{N}+\vec{T}+\vec{F}_{fd} = m_2\vec{a} \Longleftrightarrow \begin{cases} T - F_{fd} = m_2 a & \text{(Axe } x\text{)} \\ N - G_2 = 0 & \text{(Axe } y\text{)} \end{cases}$

- Pour la masse tractrice : $\vec{G}_1 + \vec{T} = m_1\vec{a} \Longleftrightarrow G_1 - T = m_1 a \qquad \text{(Axe } x\text{)}$

En combinant les équations selon l'axe x pour le chariot et la masse tractrice, on trouve :

$$G_1 - m_2 a = m_1 a + F_{fd} \Longleftrightarrow a = \frac{G_1 - F_{fd}}{m_1 + m_2} = \frac{m_1 g - F_{fd}}{m_1 + m_2} = \frac{m_1 g - F_{fd}}{M} g$$

Nous avons précédemment vu que : $F_{fd} = \mu_d N = \mu_d m_2 g$. On trouve alors l'expression de l'accélération en présence de frottements :

$$a = \frac{m_1 - \mu_d m_2}{M} g = \frac{m_1}{M} g - \frac{\mu_d m_2}{M} g$$

Le cas sans frottements s'obtient, tout simplement, à partir de cette expression où on pose que le coefficient de frottement μ_d est nul. Ce résultat permet d'interpréter les expériences réalisées précédemment :

- Pour la Figure 3, la masse totale du système était de $M = 0,107$ kg tandis que la droite obtenue était $a = 9,59.F$ (où $F = G_1 = m_1 g$).

  Si on applique le PFD (en considérant, pour commencer, le cas sans frottements), on a $a = \frac{1}{M}.G_2$. En l'appliquant avec nos résultats, nous avons $\frac{1}{M} = 9,59$, c'est-à-dire : $M = 0,104$ kg. Il y a un écart absolu[4] de $0,003$ kg entre la valeur calculée et la valeur mesurée ce qui correspond à une erreur relative[5] de $2,8\%$. Cette erreur s'explique notamment de par les forces de frottements. En vertu du PFD, l'accélération a est donnée par $a = \frac{G_1}{M} - \frac{F_{fd}}{M}$: les forces de frottements F_{fd} donne une ordonnée à l'origine non nulle $(-F_{fd}/M)$

4. Écart absolu = |Valeur théorique − Valeur expérimentale|
5. Erreur relative (%)= 100.|Valeur théorique − Valeur expérimentale|/Valeur théorique

au graphe de a en fonction de G_1 (pour M fixé). Pour la Figure 3, cette ordonnée à l'origine est de $-0,1943$ m/s^2 ce qui correspond à une force de frottement de $0,02$ N.

- A la Figure 4, pour une masse tractrice de $m_1 = 0,007$ kg, le produit de la masse totale M avec l'intensité de l'accélération a valait, en moyenne : $M.a = 0,05$.

  Par le PFD, ce produit devrait valoir le poids de la masse tractrice si il y a aucune force de frottement en jeu : $F = G_1 = m_1.g = 0,007.9,81 = 0,07$ N. L'erreur relative est de $28,6\%$.

Cette (faible) erreur relative s'explique de par les frottements qui peuvent s'exprimer, à l'aide du PFD, par : $F_{fd} = Ma - G_1$. A partir de l'Expérience 3, les forces de frottements sont estimées à $0,02$ N

Exercices sur le PFD

Pourquoi se sent-on plus lourd (ou léger) lorsqu'un ascenseur commence à monter (ou descendre) ?

Souvent, lorsqu'on prend un ascenseur, nous avons la sensation d'être plus lourd (ou léger) lorsque cet ascenseur commence à monter (descendre). Cette sensation provient de la modification de la force normale $\vec{N}$, que l'on notera à partir de maintenant $\vec{R}$, qui est exercée par l'ascenseur sur nous (cette force s'appelle aussi "poids apparent") lorsque la cabine possède une accélération non nulle. Par le PFD, il est possible de trouver l'intensité de cette force normale. Pour cela, étudions les forces et l'accélération s'exerçant sur une personne dans un ascenseur.

Ascenseur au repos (accélération nulle)

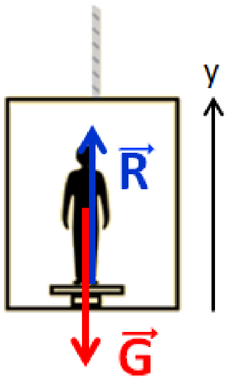

FIGURE 9 – Schéma des forces s'exerçant sur une personne de masse m dans un ascenseur au repos.

Le PFD donne : $\vec{G} + \vec{R} = \vec{0}$. Algébriquement, nous avons : $R - G = 0$. Dans le cas présent :

$$R = G = mg \tag{1}$$

Le passager ne ressent aucune sensation quant à son poids. Notons que l'on aura cette même situation si l'ascenseur était en mouvement à vitesse constante.

Ascenseur en accélération vers le haut

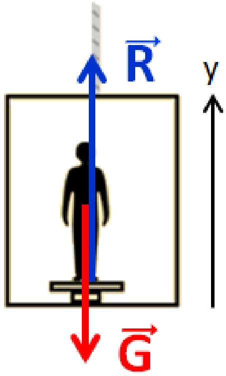

Figure 10 – Schéma des forces s'exerçant sur une personne de masse m dans un ascenseur accéléré vers le haut.

Le PFD donne : $\vec{G} + \vec{R} = m\vec{a}$ ce qui donne $R - G = ma$. Nous avons alors :

$$R = G + ma = m(a + g) \tag{2}$$

Dans ce cas présent, le poids apparent R est supérieur au poids réel G puisque $m(a + g) > mg$: le passager se sent plus lourd que d'habitude !

Ascenseur en accélération vers le bas

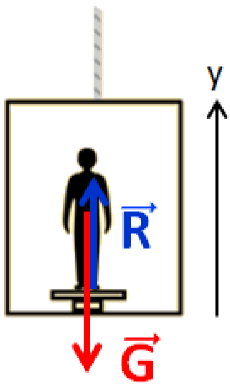

Figure 11 – Schéma des forces s'exerçant sur une personne de masse m dans un ascenseur accéléré vers le bas.

Le PFD donne $\vec{G} + \vec{R} = m\vec{a}$. Algébriquement parlant, nous avons : $R - G = m.(-a)$. Nous avons alors :

$$R = G - ma = m(g - a) \tag{3}$$

Dans ce cas-là, le poids apparent N est inférieur au poids réel G puisque $m(g - a) < mg$: le passager se sent plus léger que d'habitude ! Un cas particulier intéressant est lorsque l'ascenseur accélère vers le bas avec une accélération $a = g$, le poids apparent N s'annule et on se retrouve en état d'apesenteur. Un tel état est constamment expérimenté par les astronautes dans les stations-spatiales qui chutent vers la terre avec une accélération $a = g$ ou, temporairement, dans les vols paraboliques qui nous mettent temporairement dans ces situations d'apesanteur.

Plan incliné avec frottements

Soit un objet de masse m, susceptible de glisser avec frottements sur un plan incliné ; l'angle que fait le plan avec l'horizontale est α. Calculons son accélération en fonction de l'angle.

L'objet est soumis à 3 forces : son poids $\vec{G}$, la force normale exercée par le plan sur l'objet $\vec{R}$ et la force de frottement dynamique $\vec{F}_{fd}$ exercée par le plan sur l'objet et s'opposant au glissement de cet objet. Le PFD donne (vectoriellement) :

$$\vec{G} + \vec{R} + \vec{F}_{fd} = m\vec{a} \tag{4}$$

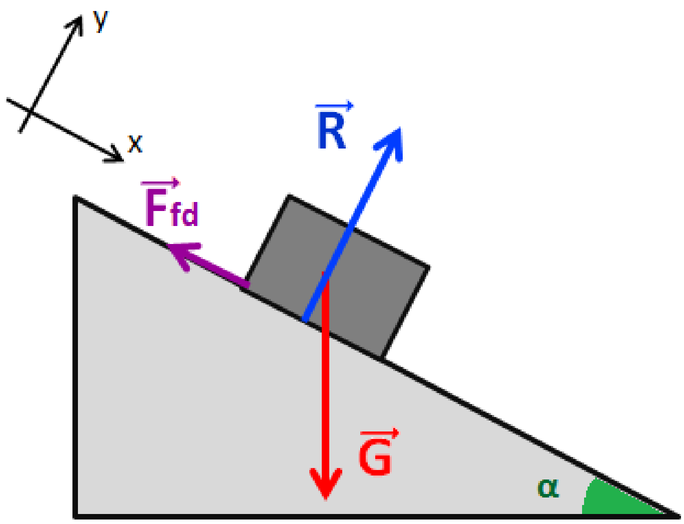

FIGURE 12 – Schéma des forces s'exerçant sur un bloc glissant, avec frottements, sur un plan incliné.

L'idée est d'écrire le PFD de façon algébrique. Pour cela, on choisit un repère OXY (inertiel) dans lequel nos pouvons décomposer nos vecteurs selon les axes x et y. Le PFD s'écrit comme :

$$\begin{cases} G_{//} - F_{fd} = ma & \text{(Axe } x\text{)} \\ R - G_{\perp} = 0 & \text{(Axe } y\text{)} \end{cases} \tag{5}$$

Le mouvement est rectiligne le long du plan (le long de l'axe x), l'accélération le long de l'axe y est, par conséquent, nulle. Par la géométrie, on a : $G_{//} = G \sin\alpha$ et

$G_\perp = G\cos\alpha$. Les forces de frottement dynamiques s'expriment comme : $F_{fd} = \mu_d R$. Les équations deviennent donc :

$$\begin{cases} G\sin\alpha - \mu_d R = ma & \text{(Axe } x\text{)} \\ R - G\cos\alpha = 0 & \text{(Axe } y\text{)} \end{cases} \tag{6}$$

On trouve alors : $G\sin\alpha - \mu_d G\cos\alpha = ma$. Et, puisque $G = mg$, on obtient l'accélération du bloc :

$$a = g\left(\sin\alpha - \mu_d\cos\alpha\right) \tag{7}$$

A partir de cette expression, il est possible de déterminer l'angle α_c à partir duquel le bloc glissera à vitesse constante. Pour cela, on pose $a = 0\ m/s^2$ et on trouve :

$$\alpha_c = \arctan\mu_d$$

Chute des corps et notion de masse inertielle et masse grave

Expérience de Galilée

Si on fait chuter une bille de plomb et une plume, dans l'air, la bille tombera avant la plume. Un tel résultat s'interprète en invoquant les frottements exercés par l'air sur les objets : la plume subit beaucoup plus de forces de frottements que la bille qui ralentissent sa chute.

Pour s'en convaincre, il est possible de faire chuter une bille et une plume dans un tube dans lequel nous avons préalablement fait un vide d'air : la plume et la bille atteignent le bas, en même temps. Cette expérience a notamment été réalisée, en 1971, par le commandant David R. Scott, lors de la mission lunaire Apollo 15 (vidéo : `https://www.youtube.com/watch?v=KDp1tiUsZw8`) : la lune étant dépourvue d'atmosphère constitue un terrain idéal pour tester la chute des corps eet mettre en évidence le résultat connu depuis Galilée :

Résultat des expériences de Galilée sur la chute des corps

Tous les corps chutent de la même manière (MRUA) et ce, indépendamment de leur masse.

Une telle chute est qualifiée de **chute libre** :

Chute libre (Définition)

La **chute libre** d'un objet est la chute à la surface d'un astre (Terre, Lune, par exemple) sous l'effet unique de la force de pesanteur : il s'agit d'une chute s'effectuant en absence d'effet causé par l'atmosphère.

Par le PFD, la valeur de l'accélération en chute libre (**accélération due à la pesanteur**) est donnée par : $\mathbf{g=9{,}81\ m/s^2}$.

Chute d'un corps en présence de frottements et vitesse limite

Tous les corps chutent avec une même accélération de $g = 9,81\ m/s^2$ indépendamment de leur masse, pour autant qu'il n'y ait aucun frottement atmosphérique. En présence d'atmosphère, les forces de frottement $\vec{F_f}$ augmentent avec la vitesse de chute de l'objet. La Figure 13 représente la chute d'un objet de masse m dans l'atmosphère.

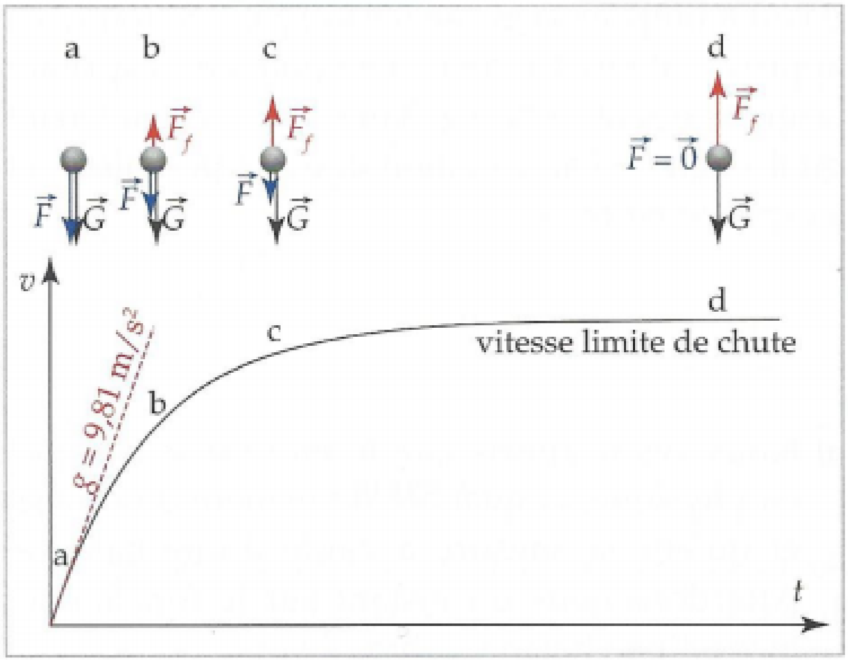

FIGURE 13 – Graphe de la vitesse v en fonction du temps t pour un corps chutant sous l'effet de son propre poids $\vec{G}$ et soumis aux forces de frictions de l'atmosphère $\vec{F}_f$.

- Au démarrage (point a), les forces de frottement sont négligeable et l'accélération est due presque uniquement par le poids $\vec{G} = m\vec{g}$ de l'objet. Par le PFD : $G = ma$ ce qui donne $a = g$.
- Au fur et à mesure que la vitesse augmente (points b et c), les forces de frottement $\vec{F_f}$ deviennent de plus en plus importantes et s'opposent au poids de l'objet ce qui fait réduire l'intensité de la force résultante s'exerçant sur l'objet et, par le PFD, l'accélération de l'objet : $G - F_f = ma$ ce qui donne $a = g - F_f/m < g$.
- A un instant donné (point d), les forces de frottements $\vec{F_f}$ se compensent avec le poids $\vec{G}$: la résultante des forces est nulle et l'objet chute à vitesse constante (il est en MRU). Cette vitesse se nome **vitesse limite de chute**.

Définitions de la masse et principe d'équivalence

La masse grave

Nous avons vu, par le passé, que la force poids $\vec{G} = m_{pesante}\vec{g}$ permet de donner une définition de la masse :

Définition de la masse (pesante)

La **masse (pesante)** $m_{pesante}$ désigne la quantité de matière contenue dans un objet. Cette masse se mesure à l'aide d'une balance.

Cependant, la mesure de cette masse (pesante) ne peut se faire qu'en présence de pesanteur (Lorsque $g = 0$, il est impossible de mesurer la masse pesante). En effet, lorsqu'on place un objet de masse (pesante) $m_{pesante}$ sur un plateau de la balance, cet objet subit une force poids $G = m_{pesante}g$ et exerce une force $F = G$ sur le plateau ce qui le fait pencher (voir Figure 14 (a)). Afin d'équilibrer la balance, il faudra que les forces s'exerçant sur les deux plateaux soient égales (voir Figure 14 (b)) :

$$F = F' \qquad \Longleftrightarrow \qquad G = G' \qquad \Longleftrightarrow \qquad m_{pesante} = m'_{pesante}$$

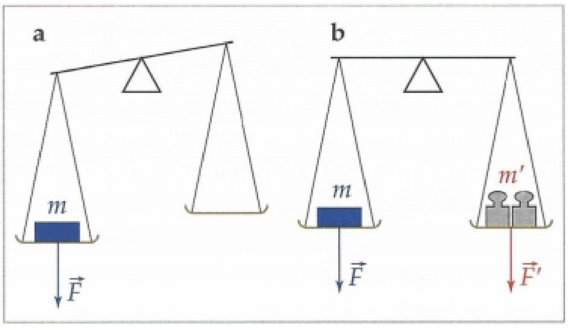

FIGURE 14 – Principe de mesure de la masse pesante, à l'aide d'une balance.

La masse inertielle

Le PFD permet de donner une nouvelle définition à la masse qui n'a plus à voir avec la force de pesanteur (ce qui offre la possibilité d'imaginer des systèmes de mesures de la masse fonctionnant en l'absence de pesanteur) :

Définition de la masse (inertielle)

La **masse (inertielle)** $m_{inertie}$ désigne la résistance qu'un objet possède par rapport à sa mise en mouvement (de translation).

Si on reprend notre chariot, nous avons constaté que (Expérience 3), pour une même force $\vec{F}$ exercée, l'accélération du chariot chargé est plus petite que l'accélération du chariot non-chargé : pour provoquer la même accélération, il faut exercer une force d'autant plus grande que la masse (inertielle) du chariot est élevée.

Le principe d'équivalence

A priori, les deux définitions semblent être différentes (la masse pesante est dépendante de la pesanteur tandis que la masse inertielle n'invoque pas la pesanteur) alors qu'elles désignent une même grandeur : la masse.

Un second problème réside dans la chute des corps. Si on considère la chute d'un corps, le PFD donnerait $F = m_{inertie}a$ et la force poids donnerait $G = m_{pesante}g$. En supposant la chute comme étant une chute libre ($F = G$), on obtient alors l'accélération suivante :

$$a = \frac{m_{pesante}}{m_{inerte}} g$$

Ceci implique que les objets de masses différentes ne tombent pas exactement avec la même accélération ce qui est en contradiction avec les expériences de Galilée !

Fort heureusement, l'Univers admet un principe fondamental dit **principe d'équivalence** :

Principe d'équvalence

La masse pesante et la masse inertielle sont égales : $m_{pesante} = m_{inertie} = m$.

Ce principe, toujours inviolable à ce jour, permet de retrouver les résultats de Galilée et a été repris, en 1907, par Albert Einstein, en vue d'élaborer sa théorie de la relativité générale !

Ce principe permet aussi de définir l'étalon de la masse sans qu'il y ait d'ambiguïtés sur le type de masse (inertielle ou pesante). Depuis Mai 2019, cet étalon de la masse se détermine à partir de trois constantes fondamentales. Jusqu'à cette date, l'étalon de la masse (1 kg) était défini par un cylindre en platine iridié conservé, sous vide, dans une cloche au bureau international des poids et des mesures situé à Sèvres (France).

Synthèse des trois lois de Newton

La dynamique d'un solide (études des causes du mouvement d'un corps) fut formulée, pour la première fois en 1687 par Issac Newton dans *Philosophiae naturalis principia mathematica*. Dans son oeuvre maîtresse, Newton formula la dynamique des corps en trois grandes lois qui sont encore enseignées à ce jour.

Première loi de Newton

Première loi de Newton (Principe d'inertie)

Si la résultante des forces s'exerçant sur un objet est nulle alors cet objet est en mouvement rectiligne uniforme ou au repos :

$$\sum \vec{F} = \vec{0} \qquad \Longleftrightarrow \qquad \text{MRU ou repos}$$

Cette première loi établit une équivalence entre différents repères : tout repère en repos ou à vitesse constante (ce qui est équivalent à tout repère dont la résultante des forces est nulle) constitue un repère inertiel que l'on peut choisir en vue d'étudier la cinématique et la dynamique d'un corps. Le fait qu'il existe une infinité de repères respectant cette première loi permet de conclure qu'il n'existe aucun repère privilégié dans l'Univers (la notion de "centre de l'Univers" ou "centre du Monde" n'existe pas physiquement).

Seconde loi de Newton

Seconde loi de Newton (Principe fondamental de la dynamique)

Si la résultante des forces $\sum \vec{F}$ s'exerçant sur un objet de masse m est nulle alors cet objet acquiert une accélération $\vec{a}$ donnée comme :

$$\sum \vec{F} = m\vec{a}$$

Cette seconde loi peut se voir comme un cas général de la première loi. En effet, lorsque la résultante des forces s'exerçant sur un corps est nulle ($\sum \vec{F} = 0$), le PFD implique que ce corps est en MRU ou au repos puisque $\vec{a} = \vec{0}$. Réciproquement, lorsque le corps est en MRU ou au repos (son accélération $\vec{a}$ est nulle) alors la résultante des forces $\sum \vec{F}$ est nulle.

Troisième loi de Newton

Troisième loi de Newton (Principe des actions réciproques)

Toute force $\vec{F}_{A,B}$ exercée par un objet A sur un objet B provoque une force $\vec{F}_{B,A}$ exercée par l'objet B sur l'objet A, de même direction, de sens opposé mais de même intensité :

$$\vec{F}_{A,B} = -\vec{F}_{B,A}$$

Cette troisième loi stipule que les forces viennent toujours en couples de même intensité, de même direction mais de sens opposés et de points d'applications différents.