Matière en mouvement

Chapitre 1 **Mécanique Newtonienne**

Mécanique : étude des mouvements des objets matériels.
Le domaine habituel de la mécanique de Newton est l'étude des mouvements des objets visibles à l'œil nu.

Temps, cinématique et dynamique newtoniennes

I - Le mouvement, qu'est-ce que c'est ?

Nous disposons d'une vidéo montrant un ballon de basket lancé vers le panier. Son mouvement peut être décomposé et pointé image par image à l'aide du logiciel Regavi. Le fichier obtenu sera exporté afin d'être développé à l'aide du logiciel Regressi.

Affirmer : « je connais le mouvement de ce ballon » c'est connaître toutes les **positions** du ballon au cours de son mouvement ? De plus, comment exprimer cette « connaissance » du mouvement du ballon ?
Mieux : connaissant les **conditions initiales** (direction du lancer, intensité de la poussée, position initiale du ballon, etc), on aimerait pouvoir prévoir les positions qu'occupera le ballon au cours de son mouvement. Par exemple, on pourrait annoncer à l'avance au bout de combien de temps il va toucher le panneau de basket.
Cet exploit nécessitera l'utilisation de deux grandeurs fondamentales en plus de la position : la **vitesse** et l'**accélération** du ballon. Cela ne sera pas non plus possible sans une loi fondamentale de la physique : **la deuxième loi de Newton**.

1) Préliminaires indispensables

a) **Définir très clairement le système :** c'est l'objet matériel (toujours considéré comme indéformable à notre niveau) dont on étudie le mouvement.

b) **Simplifier le système** : Nous étudions le mouvement d'un seul point de ce système auquel on affecte toute la masse du système. Ce point est G, le centre d'inertie du système, c'est toujours G qui a le mouvement le plus simple.
Film « marteau »

c) **Choisir très clairement ce par rapport à quoi sera décrit le mouvement, c'est-à-dire : choisir un référentiel.**

Exemples :
- *Référentiel géocentrique : le mouvement est décrit par rapport au centre de la Terre.*
- *Référentiel terrestre : le mouvement est décrit par rapport à un point fixe de la surface terrestre (par exemple la salle de TP).*

Remarques :
- Citer un exemple de question qui peut être posée en contrôle et indiquer les manières les plus efficaces d'y répondre.
- On ne confondra pas référentiel et repère.

d) Repérer le mouvement avec des origines et valeurs graduées (à l'aide d'unités) :

° Dans le temps ? (*voir plus tard le doc « méca temps »*)

Il nous faut définir une unité de temps, une durée à laquelle on attribuera la valeur 1. L'unité S.I. de temps est la seconde.
Il nous faut, pour chaque mouvement étudié, choisir une date t = 0 s, une origine.

° Dans l'espace ?

Nous présenterons les positions (du centre d'inertie) de notre système en mouvement à l'aide de coordonnées (x, y, z) dans un repère orthonormé $(O, \vec{i}, \vec{j}, \vec{k})$. Nous traiterons uniquement des problèmes à deux dimensions (mouvement plans), nous travaillerons donc dans des repères de type $(O,\vec{\imath}, \vec{\jmath})$ (coordonnées x et y) ou $(O, \vec{\imath}, \vec{k})$ (coordonnées x et z)
On peut aller plus loin et considérer **le vecteur position** $\overrightarrow{OG}$ dont les coordonnées sont aussi (x, y). $\boldsymbol{\overrightarrow{OG} = x\vec{\imath} + y\vec{\jmath}}$ (*schéma 2D au tableau pour aider…*)

On peut alors construire des graphes : ° temporels (x = f(t), y=f(t))
° Purement spatiaux (y = f (x))

Les graphes d'espace permettent de visualiser la <u>trajectoire</u> du (centre d'inertie du) système : ensemble des positions occupées au cours du mouvement.

Ce qui vient d'être présenté sera illustré en séance de TP par l'exploitation du fichier vidéo à l'aide des applications Regavi (exploitation des images) et Regressi (exportation de l'exploitation, tracés, calculs divers)…
Ce travail d'exploitation peut être repris avec la vidéo « tourne disque »

2) Deux grandeurs physiques fondamentales associées au mouvement d'un objet :

La vitesse et l'accélération

a) Présentation expérimentale, étude d'un mouvement (voir séance de TP)

Chaque fichier obtenu à partir de l'exploitation des vidéos (« chute basket » et « tourne-disque ») nous a permis de présenter des valeurs de coordonnées enregistrées au cours du temps. Nous pouvons demander à Regressi de calculer la vitesse et l'accélération du système à tout instant. Nous pouvons même visualiser des vecteurs représentatifs !!

Que constate-t-on ? (CRTP)

b) La vitesse, le vecteur vitesse
a. introduction

Ce que Regressi considère comme représentant la grandeur vitesse est un vecteur de valeur variable (vidéo basket) ou constante (vidéo « tourne disque »), dans le sens du mouvement et **en permanence tangent à la trajectoire.**

Que représente la vitesse ?

La vitesse doit caractériser la variation de la position. Elle représente, plus précisément, la variation de position par unité de temps (on peut aussi l'appeler taux de variation de la position, sous-entendu dans le temps).

La vitesse s'exprime donc en $m.s^{-1}$.

On peut calculer sa valeur moyenne à l'aide d'une formule célèbre : $v = \frac{d}{Dt}$.
Cette expression reste valable et peut être utilisée tant que l'on ne se préoccupe pas d'autre chose que de valeur moyenne… Ou bien si le mouvement est **uniforme**, c'est-à-dire que la **valeur de la vitesse est constante**.

Mais justement nous constatons que de nombreux mouvements donnent lieu à des variations de vitesse et il est évident que nous souhaitons pouvoir définir une grandeur plus précise que nous appellerons **vitesse instantanée**.

De plus, la grandeur physique « vitesse » n'est pas qu'une simple valeur, elle a aussi un sens et une direction, il faut donc aussi la définir vectoriellement.

Deux nouveaux problèmes à résoudre, donc.

b. Caractère vectoriel

Un vecteur vitesse $\vec{v}$, ou plutôt $\overrightarrow{v_G}$, va devoir être défini. Dans un repère (O, $\vec{\imath}, \vec{\jmath}$), ce vecteur sera caractérisé par deux coordonnées v_x, v_y.

c. Vitesse instantanée

Considérant un parcours simplifié sur l'axe Ox du repère (la coordonnée y reste tout le temps égale à zéro…) nous constatons que notre système passe du point A de coordonnée x_A au point B de coordonnée x_B entre les instants t_A et t_B. la vitesse moyenne correspondante vaut donc : $v = \frac{x_B - x_A}{t_B - t_A}$. Cette vitesse peut être notée v_x en tant que variation par unité de temps de la coordonnée x.
On peut même la noter $v_x = \frac{\Delta x}{\Delta t}$

Comment pouvoir considérer v_x comme une vitesse instantanée ?

- En resserrant l'intervalle entre A et B et en considérant la durée Δt suffisamment petite pour admettre que pendant cette durée v_x n'a pas le temps de beaucoup varier et que la valeur trouver peut représenter la valeur à tout instant entre les instants t_A et t_B.

- Nous pouvons faire encore mieux : faire tendre l'intervalle de temps vers zéro et exprimer ainsi une valeur limite de v_x lorsque t_B tend vers t_A ! Si nous savons faire cela, alors nous pourrons affirmer avoir déterminé $v_x(t_A)$.

Voyons l'expression envisagée : $v_x(t_A) = \lim_{x_B \to x_A} \frac{x_B - x_A}{t_B - t_A}$ …

Cela ressemble, c'est comme (en maths) : $\lim_{x_B \to x_A} \frac{f(x_B) - f(x_A)}{t_B - t_A}$ = f '(x_A) la dérivée !!!

Mais ici, la fonction c'est la position x, la variable c'est le temps t et la dérivée c'est la vitesse v_x.

On peut généraliser autres axes de coordonnée et affirmer : la vitesse à la date t est la dérivée par rapport au temps de la position à la date t.

Notations : $v_x = \frac{dx}{dt}$, $v_y = \frac{dy}{dt}$.

d. Vecteur vitesse

La vitesse, c'est la variation du vecteur position par unité de temps.
La vitesse, c'est la dérivée du vecteur position par rapport au temps.

Expression moyenne entre deux instants t_1 et t_2 proches (afin que la portion de trajectoire entre les positions G_1 et G_2 puisse être assimilée, au segment de longueur G_1G_2) :

$$\overrightarrow{v_G} = \frac{\overrightarrow{OG_2} - \overrightarrow{OG_1}}{t_2 - t_1} = \frac{\overrightarrow{\Delta OG}}{\Delta t} = \frac{\overrightarrow{G_1G_2}}{\Delta t} \quad (1)$$

Cela reste une expression de valeur moyenne (entre les dates t_1 et t_2)…
Nous définissons comme précédemment la vitesse instantanée à la date t_1, notée $\vec{v}_{(t1)}$:

Si t_2 tend vers t_1 (si Δt tend vers zéro), alors $\vec{v}$ devient la vitesse instantanée à la date t_1 et l'expression (1) devient une limite exprimant une dérivée :

$$\boldsymbol{\overrightarrow{v_G}}_{(t)} = \frac{\boldsymbol{d\overrightarrow{OG}(t)}}{\boldsymbol{dt}} \qquad (2) \qquad \text{(définition officielle de la vitesse instantanée)}$$

.

On constatera (et on ne l'oubliera pas) que le vecteur $\vec{v}_{(t)}$ s'applique au point $G_{(t)}$ et que sa direction est tangente à la trajectoire en $G_{(t)}$.
(*voir applications, partie d)*)

Remarque : les expressions (1) et (2) ci-dessus mènent souvent à des résultats quasiment identiques si les dates t_1 et t_2 sont proches (voir construction graphique pendant la séance).

c) L'accélération

Revenons à notre enregistrement (vidéo basket): ce que Régressi considère comme représentant la grandeur accélération est **<u>ici</u>** un vecteur de valeur à peu près constante, de direction et de sens à peu près constants : verticale et vers le bas.

Les raisonnements tenus précédemment définissant la vitesse par rapport à la position sont valables pour caractériser l'accélération :

L'accélération doit caractériser la variation de la vitesse. Elle représente, plus précisément, la variation de vitesse par unité de temps (ou taux de variation de la vitesse dans le temps).

L'accélération a un sens et une direction il faut aussi la définir vectoriellement :
C'est la variation du vecteur vitesse par unité de temps.

Expression moyenne entre deux instants t_1 et t_2 : $\vec{a} = \frac{\vec{v}_{(t2)} - \vec{v}_{(t1)}}{t_2 - t_1} = \frac{\Delta\vec{v}}{\Delta t}$ (1)

Si t_2 tend vers t_1 (si Δt tend vers zéro), alors $\overrightarrow{a_G}$ devient l'accélération instantanée à la date t_1 et l'expression (1) devient une limite exprimant une dérivée :

$\overrightarrow{\boldsymbol{a_G}}(t) = \dfrac{\overrightarrow{\boldsymbol{dv_G}}(\boldsymbol{t})}{\boldsymbol{dt}}$ (définition officielle de l'accélération instantanée)

Les coordonnées du vecteur $\overrightarrow{a_G}$ dans le repère $(O, \vec{\imath}, \vec{\jmath}, \vec{k})$ sont :

$a_x = \dfrac{dv_x}{dt}$, $a_y = \dfrac{dv_y}{dt}$

L'unité de l'accélération est le m.s^{-2}

d) Remarques

- Les grandeurs physiques que sont la position et la vitesse, sont donc ici vues comme des fonctions mathématiques d'une variable qui n'est pas x la variable abstraite des mathématiciens, mais t, le temps.

D'où une notation de la fonction dérivée un peu plus détaillée qu'en mathématiques (qui doit illustrer par rapport à quelle variable physique nous dérivons) que l'on peut penser comme (cas de $\vec{a}$) : « **d**érivée de $\vec{\mathbf{v}}$ / **d**ans le **t**emps ».

- Nous sommes allés dans l'onglet « expressions » de Regressi et nous avons noté que les valeurs de vitesse (le raisonnement sera le même pour l'accélération) sont d'abord calculées à partir des coordonnées sur la base d'expressions du type (exemple) : $v_x = \frac{\Delta x}{\Delta t}$ (« DIFF(x,t) »), puis exprimées en tant que normes des vecteurs :

$$v = \sqrt{v_x^2 + v_y^2} \quad (\text{« SQRT}(v_x^2 + v_y^2)\text{ »})$$

- C'est bien parce que nous travaillons dans un repère dont les vecteurs directeurs sont fixes (constants au cours du temps) que nous pouvons valider que les coordonnées de $\overrightarrow{v_G}$ sont $v_x = \frac{dx}{dt}$, $v_y = \frac{dy}{dt}$ et $v_z = \frac{dz}{dt}$ et que celles de $\overrightarrow{a_G}$ sont $a_x = \frac{dv_x}{dt}$, $a_y = \frac{dv_y}{dt}$, $a_z = \frac{dv_z}{dt}$.

Démonstration (cas de la vitesse) : $\overrightarrow{OG} = x\vec{\imath} + y\vec{\jmath} + z\vec{k}$

$$\vec{v} = \frac{d\overrightarrow{OG}}{dt} = \frac{d(x\vec{\imath} + y\vec{\jmath} + z\vec{k})}{dt} = \frac{d(x\vec{\imath})}{dt} + \frac{d(y\vec{\jmath})}{dt} + \frac{d(z\vec{k})}{dt} = \frac{dx}{dt}\vec{\imath} + \frac{dy}{dt}\vec{\jmath} + \frac{dz}{dt}\vec{k}$$

(les trois vecteurs directeurs du repère étant constants)

Donc les coordonnées de $\vec{v}$ sont $v_x = \frac{dx}{dt}$, $v_y = \frac{dy}{dt}$ et $v_z = \frac{dz}{dt}$

Avec le même type de raisonnement et sachant que $\vec{a} = \frac{d\vec{v}}{dt}$, on arrive aux coordonnées du vecteur accélération :

$a_x = \dfrac{dv_x}{dt} = \dfrac{d^2x}{dt^2}$, $a_y = \dfrac{dv_y}{dt} = \dfrac{d^2y}{dt^2}$ et $a_z = = \dfrac{dv_z}{dt} = \dfrac{d^2z}{dt^2}$

Les coordonnées de $\overrightarrow{a_G}$ sont les dérivées des coordonnées de vitesse mais sont aussi les dérivées secondes des coordonnées de position.

e) Exemple 1

Un ballon est frappé depuis le toit du lycée (pt A, t = 0) et sa chute est filmée. Le film est exploité avec Regavi puis exporté vers regressi qui modélise (met en équation) :

$x(t) = 15t$ (1)

$y(t) = -5t^2+12$ (2)

(origine au sol au pied du lycée, axe Ox vers la droite, axe Oy vers le haut, chute curviligne vers le bas et vers la droite).

Vitesse initiale ? Hauteur du lycée ? Date d'arrivée au sol (pt B) ? distance par rapport au lycée en B ? Vitesse en B ?Equation de la trajectoire ??

Mais comment obtient-on les équations horaires (1) et (2) ?
Peut-on prévoir les équations horaires (1) et (2) ?

f) Exemple 2 (voir TP)

Nous avons exploité (paramétrage + pointage Regavi, exportation Regressi) le film « Basket ». Nous pouvons demander une modélisation des graphes x = f(t) et y = f(t) :

- Voyons-nous des ressemblances avec les équations horaires de l'exemple 1 ?
- Pouvons-nous déduire de ces équations horaires les caractéristiques complètes des vecteurs vitesse et accélération du centre d'inertie du ballon à tout instant ?
- Y a-t-il un moyen de construire théoriquement les équations horaires caractéristiques du mouvement ?

II Le mouvement, pourquoi ? Les lois de Newton.

1) Préliminaire

a) Retour à la vidéo « basket »

L'exploitation du mouvement (phase de « chute libre ») a permis de constater que l'accélération était un vecteur à peu près constant : vertical, vers le bas et de valeur 10 $m.s^{-2}$.

Nous connaissons un vecteur ayant les mêmes caractéristiques : le vecteur champ de pesanteur $\vec{g}$, présent notamment dans l'expression du poids d'un corps de masse m : $\vec{P} = m\vec{g}$.

Quelles forces s'exercent sur le ballon au cours de son mouvement (phase de « chute libre ») ? Son poids $\vec{P}$, ainsi que les actions de l'air (poussée d'Archimède et frottements) qui ici sont négligeables par rapport à $\vec{P}$.

Reliant toutes ces constatations, nous pouvons poser un lien entre forces exercées et accélération : $\sum \overrightarrow{\boldsymbol{F_{ext}}} = \mathbf{m}\overrightarrow{\boldsymbol{a_G}}$ **(1)**

b) *Feynman p 116, … … arrive à :* $\sum \overrightarrow{F_{ext}} = \frac{d\vec{p}}{dt}$.

Définition de la quantité de mouvement (après expérience illustrative) : la quantité de mouvement d'un corps en mouvement de translation est égale au produit de la masse du corps par la vitesse de son centre d'inertie : $\boldsymbol{\vec{p} = \mathbf{m}\overrightarrow{v_G}}$. **(2)**

Les expressions (1) et (2) reviennent-elles au même ?

2) Les Lois de Newton

En 1687, Isaac Newton a établi un ensemble de trois lois reliant forces et grandeurs caractéristiques du mouvement. Ces lois restent tout à fait exploitables dans de nombreux cas et sont toujours utilisées.

a) Rappel du principe de l'inertie (classe de seconde)

Tout corps persévère dans son état de repos ou de mouvement rectiligne uniforme si les forces qui s'exercent sur lui se compensent.

Exemples…
(*schémas et combinaisons de vecteurs force, pas de raisonnement avec les projections ou les coordonnées des vecteurs, juste des représentations graphiques de sommes de vecteurs égales à* $\vec{0}$ *… Et on n'oublie pas le mobile autoporteur glissant sans frottement sur un plan horizontal.*

Prenons maintenant une situation dans laquelle le principe de l'inertie semble vérifié (immobilité) alors que la somme (vectorielle) des forces qui s'exercent sur le système n'est pas nulle :

« je suis le système et je suis assis immobile
dans une voiture en train de tourner dans un rond-point »

Système : passager ;
Référentiel : la voiture ;

Le système reste immobile, il est pourtant soumis à une force résultante non nulle (à un ensemble de force dont la somme vectorielle ne vaut pas $\vec{0}$). *(schéma)*

Qu'est-ce qui a changé ?

Il y a un problème de référentiel…

b) Référentiels galiléens

Ce sont les référentiels dans lesquels le principe de l'inertie (ainsi que les autres lois de Newton) est vérifié !
Ce sont tous les référentiels en mouvement de translation rectiligne uniforme par rapport à tout autre référentiel galiléen !

Discussions autour de la question suivante : à quelle condition le référentiel terrestre peut-il être considéré comme galiléen ? (la discussion est valables avec de nombreux référentiels)

Le référentiel voiture de notre situation problématique n'était pas galiléen…

c) Lois de newton version 1

<u>Première loi de Newton (principe de l'inertie)</u> : dans un référentiel galiléen, le centre d'inertie d'un corps soumis à un ensemble de forces qui se compensent ($\sum \vec{F}_{ext} = \vec{0}$) persévère :

- dans un mouvement rectiligne uniforme (s'il était initialement en mouvement) ;
- dans l'immobilité (s'il était initialement immobile).

Un système vérifiant principe de l'inertie est souvent appelé <u>système isolé</u>. Toutefois, « système isolé » signifie que le système soumis à zéro force. Nous considèrerons le plus souvent des **systèmes pseudo-isolés**, c'est-à-dire soumis à une ensemble de forces qui se compensent (qui s'annulent, $\sum \vec{F}_{ext} = \vec{0}$)

<u>Deuxième loi de Newton</u> : dans un référentiel Galiléen, la somme des forces extérieures appliquées à un solide est égale au produit de la masse du solide par l'accélération de son centre d'inertie.

$$\vec{F}_{rés} = \sum \vec{F}_{ext} = m \times \vec{a}_G$$

Conclusion : lorsqu'une force s'exerce sur un corps elle modifie son mouvement, la grandeur caractéristique de cette modification est l'accélération.
Vecteur force (résultante) et vecteur accélération sont proportionnels et le coefficient de proportionnalité s'appelle... la masse.

<u>Troisième loi de Newton (principe des actions réciproques)</u> : lorsqu'un corps A exerce sur un corps B une action mécanique modélisée par le vecteur force $\vec{F}_{A \to B}$, alors le corps B exerce sur le corps A un action modélisée par le vecteur force $\vec{F}_{B \to A}$,

avec :
$$\vec{F}_{A \to B} = - \vec{F}_{B \to A}$$

$\vec{F}_{A \to B}$ et $\vec{F}_{B \to A}$ ont même droite d'action.

Cette loi est valable que A et B soient immobiles ou en mouvement, qu'ils vérifient ou non, chacun de leur coté, le principe de l'inertie.

3) La quantité de mouvement : expériences et premières discussions

Proposons une expérience: un système de masse m et en mouvement à une vitesse v vient percuter un objet matériel.
Objectif : transmission du mouvement vers l'objet.
Plus m augmente (à v constante) plus l'effet est fort sur l'objet.
Plus v augmente (à m constante) plus l'effet est fort sur l'objet.

Il faut maintenant choisir cette grandeur caractéristique qui peut être appelée…
« QUANTITÉ DE MOUVEMENT » (transmise d'un objet à l'autre).
Ce terme nous semble bien adapté.

Une autre expérience : lancer un objet avec « la même force » (en donnant le maximum avec le même bras). Nous ne nous intéressons pas au moment où l'objet accélère sous notre action, mais plutôt au résultat : la quantité de mouvement que nous lui avons communiqué.
Si l'objet est lourd il aura une faible vitesse, s'il est léger sa vitesse au lancer sera plus élevée.

D'où une proposition cohérente d'expression définissant la notion de quantité de mouvement.

Expression la plus simple (et adaptée aux observations) : $m \times v$

Notons une dernière observation : c'est lorsque nous exerçons une force que nous transmettons de la quantité de mouvement, c'est-à-dire que c'est lorsque nous exerçons une force que la quantité de mouvement du système (sur lequel la force s'est exercée) varie.
Sinon, si aucune force ne s'exerce sur un objet, sa quantité de mouvement ne variera pas.
Nous tenterons donc de préciser la nature du lien entre force exercée et variation de la quantité de mouvement.

4) Quantité de mouvement d'un système, définition, caractéristiques

$\vec{p} = m \times \vec{v}_G$ ($\vec{p}$ minuscule, à ne pas confondre avec $\vec{P}$ le poids)

$\vec{p}$ est donc une grandeur vectorielle ;
son unité est le $kg.m.s^{-1}$;
On la rencontre aussi sous l'appellation « impulsion ».

Remarque : la quantité de mouvement d'un système constitué de plusieurs parties est égale à la somme des quantités de mouvement de chacune des parties du système.

5) Mise en évidence de lois physiques liées à $\vec{p}$ (exploitation de vidéos, TP)

- Conservation de la quantité de mouvement d'un système pseudo isolé

Un des objectifs est ici de bien insister sur la possibilité de présenter la quantité de mouvement d'un système sous la forme de la somme (vectorielle) des quantités de mouvement des parties de ce système.

- Variation de $\vec{p}$ sous l'action d'une force résultante non nulle

(le système n'est plus isolé)

(*retour au film « chute-basket »*)

Voir « séance lois de Newton complète »

6) Lois de Newton avec $\vec{p}$

a) les nouvelles présentations

1ère loi : Dans une référentiel galiléen la quantité de mouvement $\vec{p} = m \times \vec{v}_G$ d'un système isolé ou pseudo-isolé est constante.

$\vec{p}$ vecteur constant, donc : $\dfrac{d\vec{p}}{dt} = \vec{0}$

2ème loi : Dans un référentiel galiléen, La somme des forces extérieures exercées sur un système matériel est égale à la dérivée par rapport au temps de la quantité de mouvement de ce système.

$$\sum \vec{F}_{ext} = \frac{d\vec{p}}{dt}$$

On note que, tant que la masse de notre système est constante, $\dfrac{d\vec{p}}{dt} = m \times \vec{a}_G$

3ème loi : lorsqu'un corps A exerce sur un corps B une action mécanique modélisée par le vecteur force $\vec{F}_{A\to B}$, alors le corps B exerce sur le corps A un action modélisée par le vecteur force $\vec{F}_{B\to A}$, avec : $\vec{F}_{A\to B} = -\vec{F}_{B\to A}$

$\vec{F}_{A\to B}$ et $\vec{F}_{B\to A}$ ont même droite d'action.

Cette loi est valable que A et B soient immobiles ou en mouvement, qu'ils vérifient ou non, chacun de leur côté, le principe de l'inertie. (exemple nageur ou rameur)

On peut remarquer que la première et la deuxième loi peuvent être réunies.

b) Pourquoi ?

Parce que c'est plus juste et plus fidèle à ce que l'on observe en général : la force exercée provoque une variation de vitesse, mais cette variation est plus faible si la masse du système est plus élevée et inversement. La grandeur dont la variation est directement liée (égalité) à la force est la quantité de mouvement.
Et puis, qui sait, nous trouverons peut être des systèmes dont la masse n'est pas constante…

c) **Remarque finale**

Expliquer en quoi la loi de conservation de $\vec{p}$ *et la troisième loi de Newton sont intimement liées. (On utilisera la deuxième loi pour une réponse argumentée)*

III Etudes de quelques mouvements

Nous allons enfin considérer des situations concrètes. Nous utiliserons les lois de Newton :
A - pour mettre en équation quelques mouvements simples (et utiliser ces équations pour faire, par exemple des prévisions sur ces mouvements)
B - Pour expliquer la nature de certains mouvements.

Pour les cas A, nous démarrerons de la 2ème loi de Newton sous sa forme

$$\vec{F}_{rés} = \sum \vec{F}_{ext} = m \times \vec{a}_G$$

Pour les cas B, nous raisonnerons en termes de quantité de mouvement et nous pourrons utiliser les trois lois de Newton (moins de calculs).

A – Résolution de situations concrètes (établissement d'équations de mouvements, prévision de valeurs de hauteur atteinte, de vitesse maximum, de distance parcourue, etc)

Nos exemples se limiteront au cas de chute libre, c'est-à-dire que nous considèrerons que les systèmes étudiés ne sont soumis qu'à une seule force : leur poids, considéré comme une force constante (les actions de l'air sont négligées)

1) Détermination d'équations horaires

Rappel du travail réalisé à partir du film « Chute basket »

Nous avons réussi à vérifier la 2ème loi de Newton sur un exemple (chute d'un ballon de Basket soumis à son poids)

Nous pouvons envisager de l'utiliser pour mettre le mouvement en équations :

- Equation de la trajectoire y =f(x)
- Equations horaires : expression des différentes grandeurs du mouvement en fonction du temps.

Rappel, ATTENTION : ***les grandeurs du mouvement (position, vitesse, accélération) sont des grandeurs vectorielles alors que le temps est une grandeur dite algébrique caractérisée juste par une valeur (par rapport à une origine choisie).***

Il ne peut donc pas y avoir d'équation mettant en relation directe les vecteurs $\vec{OG}$, $\vec{v}_G$ ***et*** $\vec{a}_G$ ***avec le temps t.***
Les équations horaires mettront donc en relation avec le temps les <u>coordonnées</u> de ces vecteurs.

Nous pouvons recommencer par exploiter le fichier vidéo.
Notons bien cette contrainte du choix de l'origine du repère : ce choix (par exemple O positionnée au sol, à la verticale de la position initiale du ballon ou O positionnée au point de départ du ballon) ne doit pas être oublié car il conditionnera en partie la nature des équations horaires obtenues.
Après enregistrement, exportation des données vers Regressi et calculs de v et a, nous demandons maintenant à Regressi de **modéliser** les courbes obtenues (x =f(t), y = f(t), v_x =f(t), v_y = f(t)) c'est-à-dire de proposer des équations associées aux courbes obtenues.
Nous ne perdons pas de vue par ailleurs que : $\vec{P} = m\times\overrightarrow{a_G}$,
soit $P_x = m\times a_x = m\times g_x$ et $P_y = m\times a_y = m\times g_y$.

Si cette modélisation réussit, c'est-à-dire si Regressi indique que la courbe expérimentale et le modèle sont identiques avec moins de 5% d'écart, alors nous pourrons alors tenter retrouver ces équations en exploitant les seules lois physiques dont nous disposons pour l'instant : les lois de Newton.

Nous travaillerons selon le protocole suivant (*ce protocole est à retenir et sera appliqué pour toutes les situations que nous étudierons dans le cadre de ce chapitre*) :

- Choix du système (on étudie le mouvement du centre d'inertie du système).
- Choix du référentiel.
- Inventaire des forces extérieures appliquées.
- Choix du repère spatial et de l'origine des dates.
- Présentation complète (coordonnées) de tous les vecteurs connus (forces, vitesse initiale, champs, etc.)
- Expression de la deuxième loi de Newton
  (vectorielle, en version $\vec{F}_{rés} = \sum \vec{F}_{ext} = m \times \vec{a}_G$)
- Ecriture de la deuxième loi de Newton avec les coordonnées des vecteurs (si la loi est valable entre vecteurs, elle sera aussi valable entre les coordonnées de ces vecteurs).
- Exploitation (réalisation de « primitives » à partir des relations obtenues pour arriver à des équations horaires de vitesses et de positions.
- Réponse aux questions posées par le problème.

2) Champ de pesanteur uniforme ? (voir en cours)
3) Exercices, situations diverses (livre + sujets bac)

B – Conservation de la quantité de mouvement d'un système pseudo-isolé (1ère loi) : applications, exemples (tout ne sera pas forcément traité en détail)

1) ***Les mobiles autoporteurs (situations diverses, déjà traitées en séances de TP)***

Où l'on apprendra à considérer la quantité de mouvement d'un système comme la somme (vectorielle) des quantités de mouvement des différentes parties de ce système. Où l'on appliquera la conservation de la quantité de matière d'un système pseudo – isolé. La plus grande attention sera portée au fait que les grandeurs utilisées sont vectorielles et que les additions (de quantités de mouvement de différentes parties d'un système) doivent prendre en compte la direction de chaque vecteur.

- *Eclatement en deux parties (différentes) d'un système initialement immobile.*
- *Choc élastique (ça rebondit) mobile 1 sur mobile 2 initialement immobile.*
- *Choc mou (ça reste collé) mobile 1 sur mobile 2 initialement immobile.*

2) ***La voiture propulsée par un ballon de baudruche en train de se dégonfler*** *(ou, tout simplement, le ballon de baudruche gonflé que l'on abandonne à lui-même, ouvert…)*

Expérience + discussion approfondie :
1ère loi, quantité de mouvement de l'ensemble restant nulle, quantité de mouvement de l'ensemble = somme des quantités de mouvements des deux parties avant puis après expulsion de l'air. Conclusion, application numérique.
Reprise du raisonnement à l'aide de la 3ème loi (+ utilisation de la deuxième loi pour rendre la conclusion vraiment rigoureuse)

3) ***La fusée au décollage (sujet bac blanc 2013)***

Document 1 : Deux extraits du new York Times

-13 janvier 1920 : « *Le professeur Goddard ne connaît pas la loi de l'action et de la réaction et la nécessité de s'appuyer sur autre chose que le vide pour avancer. Ce qu'il dit est absurde. Il semble clair qu'il ignore les connaissances acquises chaque jour à l'école.* »

-17 juillet 1969 : *« Des recherches et des expériences ultérieures ont confirmé ce qu'a trouvé Isaac Newton au 17ème siècle, et il est définitivement établi actuellement qu'une fusée peut fonctionner aussi bien dans le vide que dans l'atmosphère. Le* Times *regrette son erreur.*

Document 2 : Fusées au décollage (« Physique » de Eugène Hecht p 136-137)

« Imaginez que vous êtes sur des patins à roulettes tenant un sac d'oranges. Si vous lancez l'une d'elles vers le nord, vous reculez vers le sud, exactement comme un fusil lorsqu'il envoie un projectile. Pendant le lancement, vous poussez l'orange dans la direction du nord et elle vous repousse avec une impulsion opposée vers le sud, ce qui vous fait reculer. Lancez plusieurs oranges, l'une après l'autre, et vous avez une fusée à oranges ; c'est exactement le comportement d'une fusée. Plutôt que de lancer lentement un petit nombre de grands objets, le moteur d'une fusée éjecte à grande vitesse un très grand nombre de petits objets, des molécules. Par exemple, pendant le lancement, le propulseur à poudre de la navette spatiale américaine éjecte, vers le bas, 8,5 tonnes de gaz par seconde. Par réaction, la fusée est poussée vers le haut. C'est ainsi que les fusées sont propulsées dans l'espace, *et non par une poussée contre le sol ou l'atmosphère,* comme beaucoup de gens le croient encore aujourd'hui… »

D'après ***« Physique » de Eugène Hecht p 136-137***

Travail demandé : à partir de vos connaissances et /ou des documents proposés, expliquer le décollage d'une fusée en utilisant les lois de la mécanique classique.

Corrections :

Version 1 (la base du raisonnement est la première loi de Newton)
- Le système est l'ensemble fusée + carburant
- Il est pseudo-isolé (inventaire des deux forces **extérieures** / loi de newton indiquant que sa quantité de mouvement restera constante.
- immobilité de la fusée : la quantité de mouvement restera constante et nulle.
- A l'instant du décollage : Une partie du système (le carburant) est expulsée à grande vitesse et possède une quantité de mouvement non nulle. La quantité de mouvement de notre système restant constante et nulle (car aucune force extérieure supplémentaire n'est venu agir sur le système) L'autre partie du système (le corps de la fusée) doit posséder la quantité de mouvement exactement opposée à celle du carburant expulsé.
La vitesse du carburant est verticale vers le bas, la vitesse de la fusée est donc verticale vers le haut : il y a décollage.

Version 2 : (la base du raisonnement est la deuxième loi de Newton)

- Il y a deux systèmes : le carburant et le corps de la fusée.
- Les deux systèmes, initialement immobiles, sont tous deux pseudo-isolés (inventaire raisonnables à deux forces qui se compensent pour au moins un des deux systèmes)
- Expulsion du système carburant : il est expulsé vers le bas, il a donc été soumis à une accélération verticale vers le bas. Cela veut dire que la somme (vectorielle) des forces extérieures qui s'exercent sur ce système est elle aussi verticale et vers le bas (deuxième loi de Newton attendue)
- Il y a donc une force supplémentaire s'exerçant sur le carburant de la part de la fusée (puisque les deux autres initialement exercées, s'annulent). Cette force est verticale et vers le bas
- Troisième loi de Newton attendue : simultanément, le système corps de la fusée est donc soumis, lui aussi à une force supplémentaire de la part du carburant, une force verticale et vers le haut (opposée à celle précédemment décrite)
- Cette force constitue la résultante des forces extérieures exercées sur le corps de la fusée, ce système est donc soumis à une accélération verticale et vers le haut : la fusée décolle.

4) La pieuvre

Problématique :

Pour avancer, le rameur prend appui sur l'eau, l'oiseau sur l'air, le piéton sur le sol. Mais comment le poulpe se déplace-t-il sous l'eau ?

Comment se met en mouvement un poulpe sachant que ses tentacules servent essentiellement à guider sa trajectoire et non à le propulser ?

Pistes pour la construction de la réponse :

Piste 1 :

- Système {poulpe + encre} de masse m initialement immobile et pseudo isolé (poids et poussée d'archimède se compensent) sa quntité de mouvement devra rester constante (aucune force extérieure supplémentaire ne va s'exercer sur le système) et sa valeur constante est $\vec{p} = \vec{0}$.
- La pieuvre expulse une masse m_1 d'encre… La pieuvre, maintenant de masse $m_2 = m - m_1$, se met alors en mouvement :

(*fin de l'explication à rédiger*)

Piste 2 :

Il y a deux systèmes à considérer, le système {poulpe} et le système {encre de la pieuvre}. C'est la troisième loi de Newton qui va nous permettre de développer notre explication.

(*explication à rédiger*)

5) Pistolet Lance-fusée

(Amérique du Sud 2014, fin d'exercice, avec modifications)

On a considéré dans le reste de l'exercice un tir avec un pistolet lançant des fusées éclairantes. On supposera ici un tir dans une direction horizontale.

Par souci de simplification, on ne considère que le système {fusée – pistolet} et on s'intéresse à sa quantité de mouvement. La masse du pistolet à vide est $m_p = 0,98$ kg, la masse de la fusée lancée est $m_f = 0,10$ kg.
La fusée est éjectée à une vitesse de valeur $v_0 = 200$ m.s^{-1} dans le référentiel terrestre.

2.1. Exprimer la quantité de mouvement totale $\overrightarrow{p_0}$ du système {fusée - pistolet} avant que la fusée ne quitte le pistolet puis montrer que celle-ci est équivalente au vecteur nul.

2.2. Éjection de la fusée

2.2.1. Que peut-on dire de la quantité de mouvement totale du système {fusée-pistolet} si l'on considère ce système comme un système isolé au cours de l'éjection de la fusée du pistolet ?

2.2.2. En déduire dans ce cas l'expression vectorielle de la vitesse $\overrightarrow{v_p}$ de recul du pistolet juste après l'éjection de la fusée en fonction de la masse du pistolet m_p, de la masse de la fusée m_f et du vecteur vitesse initiale de la fusée $\overrightarrow{v_0}$. Calculer la valeur v_p.

2.2.3. La valeur réelle de la vitesse de recul est beaucoup plus faible que la valeur que l'on obtient à la question précédente. Pourquoi observe-t-on une telle différence ? Justifier la réponse.

Nous avons bien noté que les situations peuvent aussi bien être expliquées avec la 1ère loi qu'avec une combinaison des 3ème et 2ème lois de Newton.