Chapitre E **Mouvements**

La cause du mouvement est la force
L'effet de la force est le mouvement

Ce chapitre trouve en fait sa place à la suite des chapitres A et B.

En effet :

- ***Chapitre A : forces, interactions et champs**, exemples de forces, modèle du champ, …*

Ce chapitre nous sera utile dans la mesure où nous savons désormais comment considérer une action en train de s'exercer sur un système : nous désignons une force, nous la caractérisons avec un vecteur force correspondant (valeur, direction, sens, point d'application)

- ***Chapitre B : Fluides (au repos)**, lien entre force et pression, lien entre pression et position, …*

Ce chapitre nous a permis de comprendre que l'observation d'un système et le modèle le décrivant peuvent être diffèrents selon l'échelle. La notion de pression est macroscopique et permet de décrire un fluide macroscopiquement immobile.
A l'échelle microscopique, ce sont des particules (atomes, molécules, etc.) en mouvement qui viennent frapper d'autres particules (constituant par exemple les parois d'un récipient) générant en permanence des interactions.

***Dans ce chapitre E, nous étudions les mouvements de systèmes matériels**. Nous employons le terme « système » plutôt que, par exemple le terme « objet ».*

- *Ces systèmes sont « macroscopiques », c'est-à-dire, pour simplifier, visibles à l'œil nu.*
- *Ces systèmes sont matériels (faits de matière), ils peuvent donc être caractérisés en particulier par la valeur de leur masse.*
- *Ces systèmes seront indéformables : les distances entre les atomes qui les constituent ne varient pas, ce qui est une façon de mettre de côté les forces internes, les forces entre atomes au sein des systèmes étudiés. C'est un point crucial, car ainsi, lorsque nous décrivons les forces qui s'exercent sur le système étudié nous ne considérons que les forces dites extérieures.*
    - *Un exemple : je (« je » est le système) suis soumis à mon poids, c'est une force extérieure dans la mesure où c'est la Terre, qui ne fait pas partie du système, qui exerce cette force.*
    - *Nous comprenons à ce propos qu'il est important de bien désigner, de bien délimiter le système étudié.*

I – Un mouvement qu'est-ce que c'est ?

1) Introduction

Nous disposons d'une vidéo (fichier disponible) 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 ?

Comment modéliser cette « connaissance » du mouvement du ballon ?

Avec des graphes ?

Avec des équations ?

2) 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 de masse du système, c'est toujours G qui a le mouvement le plus simple.
Film « marteau »
c. **Conséquence : modèle du point matériel**
Nous choisissons de nous inéresser uniquement au mouvement d'une point G sans nous préoccuper du mouvement des autres points (qu'ils décrivent, ou non, le même mouvement que G).
Nous allons plus loin : nous affectons toute la masse du système en G, nous considérons donc quelque chose qui se trouve localisé en un point (le centre de masse G) et qui possède la même masse que le système réellement étudié : **Un point matériel**.

d. **Choisir très clairement ce par rapport à quoi sera décrit le mouvement : 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 classe).*

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

- Dans le temps ?

Avec une unité (la seconde si nous travaillons dans le S.I.U.) et une origine, une date t = 0 s que nous choisissons.

- Dans l'espace ?

Nous présenterons les positions (du centre de masse) 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,$\vec{i}$, $\vec{j}$) (coordonnées x et y) ou (O, $\vec{i}$, $\vec{k}$) (coordonnées x et z) Nous pouvons aller plus loin et considérer **le vecteur position** $\overrightarrow{OG}$ dont les coordonnées sont aussi (x, y). $\boldsymbol{\overrightarrow{OG} = x\vec{i} + y\vec{j}}$

Nous pouvons envisager de construire des graphes :

- temporels : coordonnées x en fonction de t, y en fonction de t
- Purement spatial : y en fonction de x. Ce graphe d'espace permet de visualiser la trajectoire du (centre de masse du) système : ensemble des positions occupées au cours du mouvement (sans se préoccuper du temps mis pour que se réalise celui-ci)

3) La vitesse, le vecteur vitesse

a. introduction

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 $m.s^{-1}$.
- Considérant un système en mouvement ayant parcouru une distance d pendant une durée Δt, nous pouvons calculer la valeur de la vitesse (mais c'est une vitesse moyenne pendant l'intervalle de temps Δt) à l'aide de la formule : $v = \frac{d}{Dt}$.
- Nous retrouvons dans cette formule, qui divise une distance par une durée, l'unité de vitesse (le $m.s^{-1}$).

- Cette expression de v 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**.

b. Vecteur vitesse

Si nous considérons l'exemple du lancer de ballon de basket, nous comprenons que la grandeur physique « vitesse » n'est pas qu'une simple valeur, elle ne fait pas qu'augmenter, diminuer ou rester constante, elle doit aussi traduire le fait que le système monte ou descend, passe par un sommet, etc.

La distance d parcourue n'est, à ce stade, qu'une valeur, mais nous pouvons envisager de la préciser en la considérant comme une variation de position, c'est-à-dire comme une différence entre une position d'arrivée et une position de départ.

Si le système se déplace d'un point G_1, de coordonnées (x_1, y_1) à un point G_2 de coordonnées (x_2, y_2), nous pouvons décomposer le parcours en considérant des variations de coordonnées :

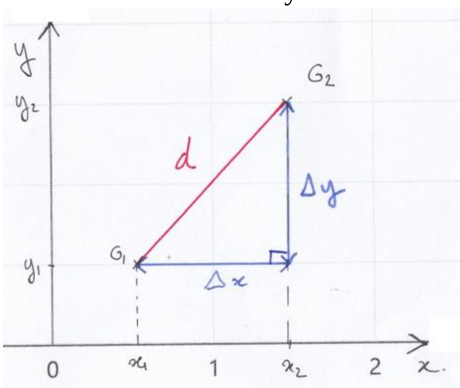
$\Delta x = x_2 - x_1$ et $\Delta y = y_2 - y_1$

Associées à la durée $\Delta t = t_2 - t_1$

Nous sommes en train de construire un vecteur.

Il s'agit du vecteur déplacement $\overrightarrow{G_1G_2}$ de coordonnées $(\Delta x, \Delta y)$. Il permet de clairement définir la direction et le sens du mouvement.
Ce vecteur a une valeur (sa norme) égale à d nous pouvons la retrouver en utilisant le théorème de Pythagore (***voir schéma***) :

$$d^2 = \Delta x^2 + \Delta y^2$$



Nous divisons le vecteur $\overrightarrow{G_1G_2}$ par Δt,

nous obtenons alors le vecteur vitesse $\vec{v}$ de mêmes sens et direction que $\overrightarrow{G_1G_2}$.

$$\vec{v} = \frac{\overrightarrow{G_1G_2}}{\Delta t}$$

Cela reste une vitesse moyenne, nous ne l'oublions pas et cela peut poser problème.

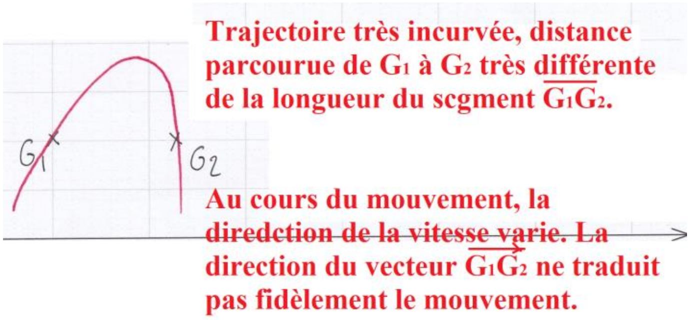
c. Coordonnées du vecteur $\vec{v}$

D'après tout ce qui précède, les coordonnées de ce vecteur dans le repère (O, $\vec{\imath}$, $\vec{\jmath}$) sont : $v_x = \frac{\Delta x}{\Delta t}$ et $v_y = \frac{\Delta y}{\Delta t}$

d. Comment pouvoir considérer une vitesse comme une vitesse instantanée fiable ?

Pourquoi y a-t-il un problème ?

Considérons un mouvement entre deux positions G_1 et G_2 situés à la même hauteur y, mais tel que la trajectoire pour aller d'un point à l'autre est très incurvée (***voir schéma***).



Le vecteur vitesse moyenne va être horizontal et ne traduira pas du tout le mouvement réel.

Comment disposer de vecteurs vitesse qui traduiront plus fidèlement le mouvement réel de G_1 vers G_2 ?

Réponse :

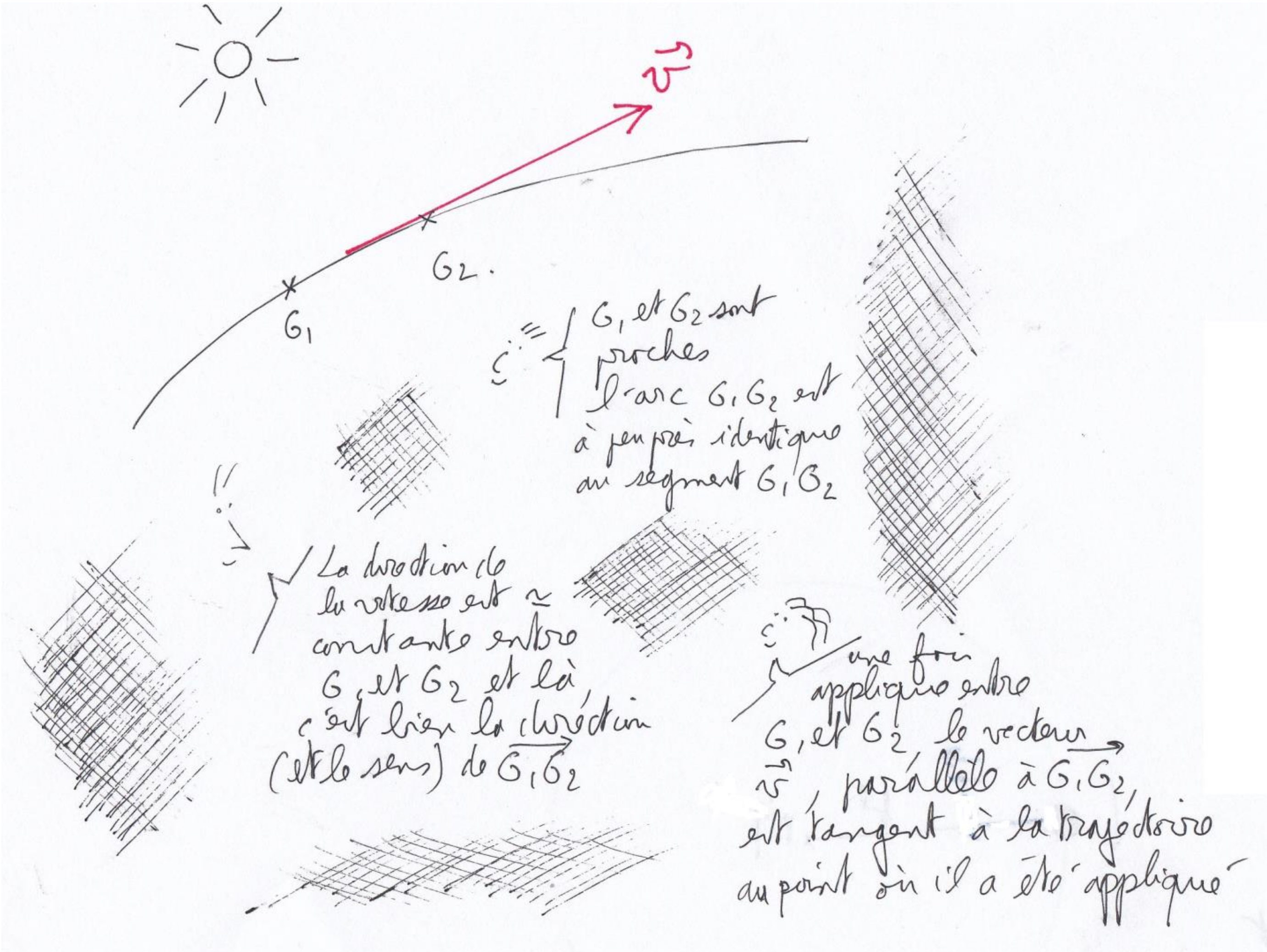
- En resserrant l'intervalle entre G_1 et G_2 et en considérant la durée $\Delta t = t_2 - t_1$ suffisamment petite pour admettre que pendant cette durée, la vitesse ne peut pas (n'a « pas le temps » de) beaucoup varier (aussi bien en valeur qu'en direction ou en sens) et que la valeur $\frac{d}{\Delta t}$ obtenue peut représenter la valeur à tout instant entre les instants t_A et t_B.

- En resserrant l'intervalle entre G_1 et G_2, nous pouvons confondre la valeur d de la distance réellement parcourue sur la portion de trajectoire allant de G_1 à G_2 et la longueur (en ligne droite) du segment G_1G_2 (***voir schéma***).

- Nous pouvons alors tracer un vecteur vitesse appliqué au point se trouvant à mi-chemin entre G_1 et G_2 et parallèle au segment G_1G_2.

- Si l'intervalle G_1G_2 est suffisamment petit, nous constatons que la direction du vecteur vitesse est tangente à la trajectoire au point où nous avons choisi d'appliquer ce vecteur.

- Nous pouvons extrapoler mathématiquement : si nous avions infiniment rapproché G_2 de G_1, si les deux points se confondent en G_1, nous pouvons considérer que nous sommes à l'instant t_1, et que la vitesse est définie par le vecteur $\overrightarrow{v_1}$ tangent à la trajectoire en G_1 dans le sens du mouvement (***voir schéma***).



II Variation de vitesse et force exercée sur le système

1) Introduction

Qu'appelle-t-on « variation de vitesse » ?

Nous considérons à nouveau le mouvement se réalisant entre deux positions G_1 et G_2.

Le terme « variation » doit être, à ce stade, pris au sens habituel : différence entre deux valeurs, valeur finale moins valeur finale, symbole « Δ ».
La variation de la position, caractérisée par la distance parcourue d, est encore mieux définie par les variations de coordonnées Δx et Δy.
Comment considérer une variation de vitesse qui sera manifestement une grandeur vectorielle (puisque la vitesse est une grandeur vectorielle) ?
Si nous considérions la grandeur $\Delta v = v_2 - v_1$ il faudrait l'appeler « variation de **valeur** de vitesse »…
Il faut que nous définissions la grandeur $\overrightarrow{\Delta v}$ variation de vitesse.

Aucune difficulté : $\overrightarrow{\Delta v} = \overrightarrow{v_2} - \overrightarrow{v_1}$

L'obtention de ce vecteur $\overrightarrow{\Delta v}$ se fera graphiquement à partir d'exemples.

2) Variation de vitesse et force extérieure exercée sur le système.

a. Exemple n°1

La situation est la suivante :

Un mobile solide modélisé par son centre de masse G et sa masse m est accroché à un fil inextensible de longueur L et posé sur un support horizontal. Autre extrémité du fil est fixée en un point O.

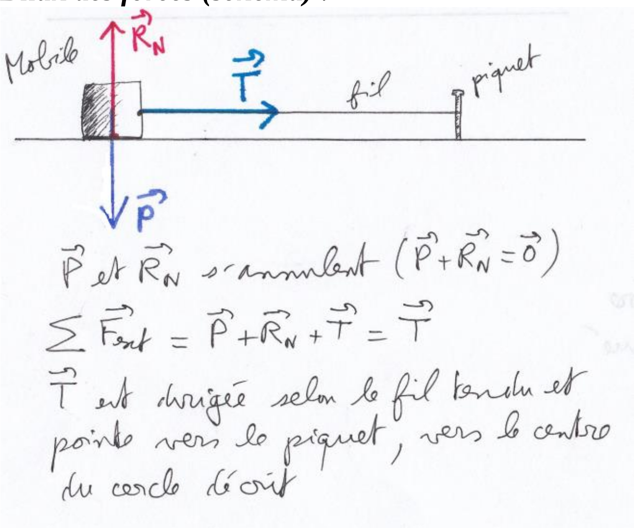
Le mobile est lancé et décrit logiquement un arc de cercle de centre O et de rayon L.

On considère que le mobile glisse sur le support sans frottements.
On néglige aussi les frottements avec l'air.

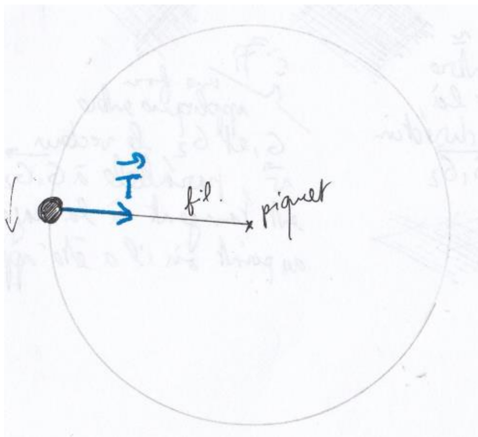
A intervalles de temps réguliers (τ = 10 ms), la position du mobile est marquée.

On obtient l'enregistrement page suivante, après les explications (il est partiellement exploité) :

Bilan des forces (schéma) :



vue de dessus :

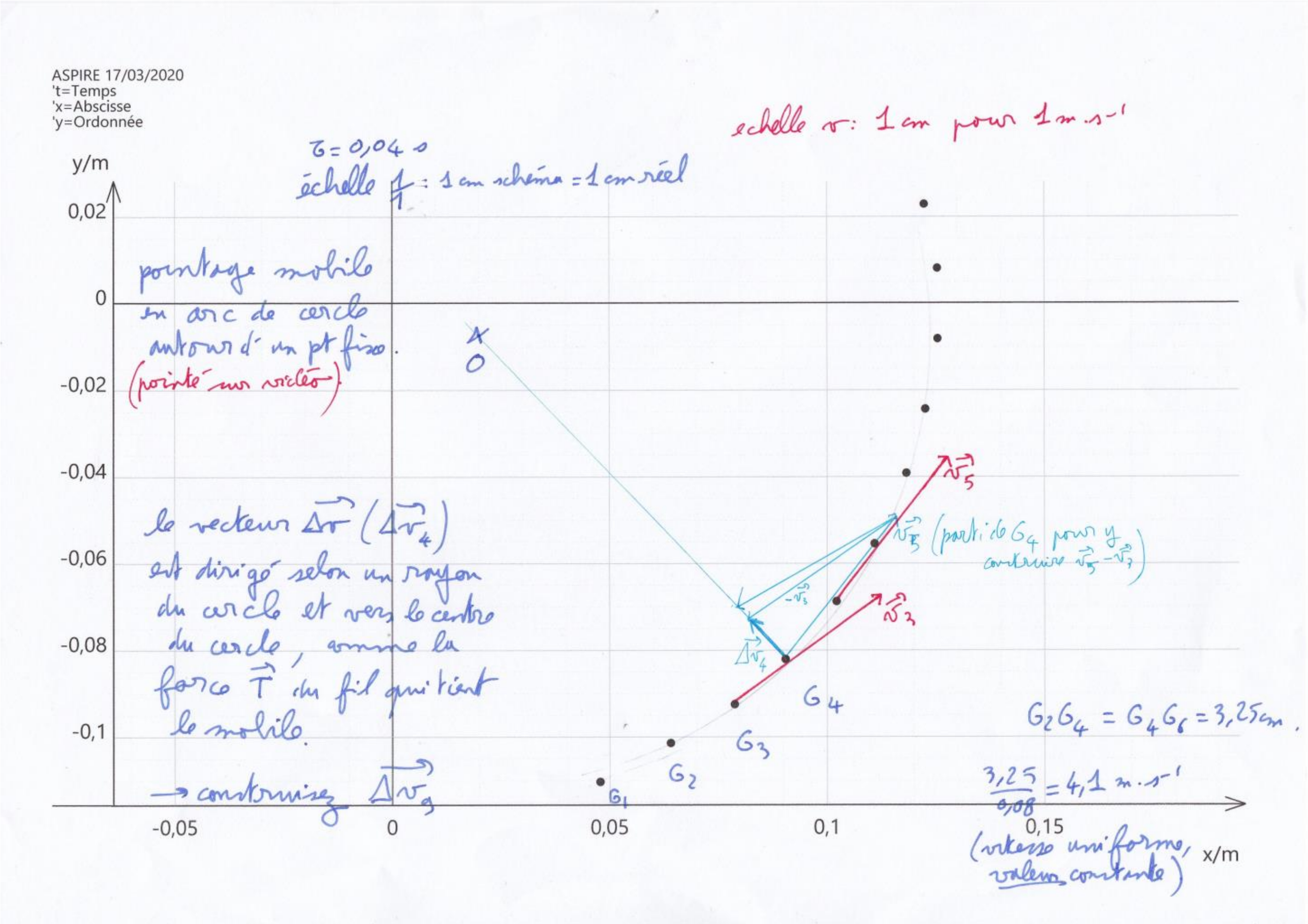


Le poids et la réaction normale s'annulent dans la mesure où le support est horizontal.
Le bilan des forces, la somme des forces exercées est ici la tension $\vec{T}$ du fil.

Construisons le vecteur $\overrightarrow{\Delta v}$ au point G_5 :

- Nous considérons d'abord le déplacement G_3G_5 afin de tracer le vecteur $\overrightarrow{v_4}$
  - Nous mesurons la distance G_3G_5, nous la divisons par la durée du déplacement qui vaut $\Delta t = 2\tau$ (τ pour aller de G_3 à G_4, τ pour aller de G_4 à G_5), nous obtenons ainsi la valeur de la vitesse v_4
  - Nous traçons le vecteur $\overrightarrow{v_4}$: appliqué au point G_4, tangent à la trajectoire, longueur d'après valeur calculée et échelle proposée (cm pour 1 $m.s^{-1}$)
- Nous considérons maintenant le déplacement G_5G_7 afin de tracer le vecteur $\overrightarrow{v_6}$ (même principe)
- Nous utilisons convenablement les deux vecteurs $\overrightarrow{v_4}$ et $\overrightarrow{v_6}$ pour construire le vecteur $\overrightarrow{v_6}$ - $\overrightarrow{v_4}$ en partant du point G_5. **Nous avons construit $\overrightarrow{\Delta v_5}$**

Voir construction page suivante, Attention, l'image que vous voyez a été réduite par rapport au document papier que j'ai utilisé pour réaliser les exploitations à la main… il y a donc un changement d'échelle à maitriser si vous exploitez le document.



Que constate-t-on ?

Le vecteur $\overrightarrow{\Delta v}$ et la somme des forces exercées sont deux vecteurs de même sens et de même direction !

Allons plus loin :

b. Exemple n° 2

Mouvement du ballon de basket.

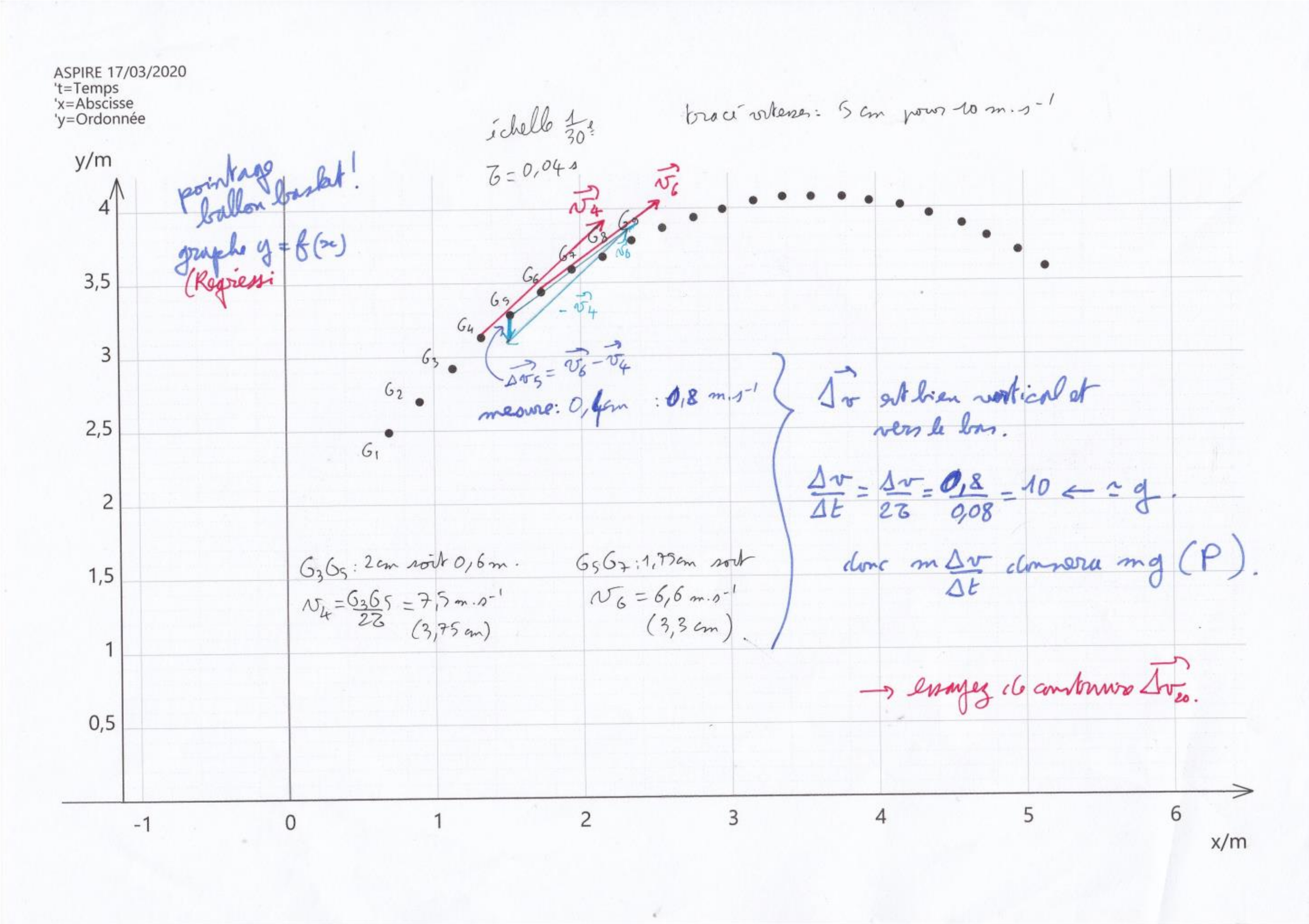
Les actions de l'air sont négligées,

la phase de lancer ainsi que celle d'arrivée sur le panier ne sont pas étudiées :

une seule force s'exerce : le poids du ballon (vertical, vers le bas, de valeur P = mg)

(g = 9,8 N.kg^{-1}, m =)

Exploitons la portion de trajectoire fournie et traçons des vecteurs $\overrightarrow{\Delta v}$ en deux points au choix (en appliquant le même protocole que dans l'exemple n°1). *Attention, ici aussi, l'image que vous voyez a été réduite par rapport au document papier que j'ai utilisé pour réaliser les exploitations à la main…*



Les vecteurs $\overrightarrow{\Delta \boldsymbol{v}}$ sont verticaux, vers le bas et de même valeur (j'en ai fait un vous pouvez en faire un autre…)

Calculons la valeur $\frac{\Delta v}{\Delta t} = \frac{\Delta v}{2\tau}$ … C'est la valeur de g !

On peut aussi dire : multiplions $\frac{\Delta v}{\Delta t}$ par la masse m du système, nous obtenons la même valeur que la force qui s'exerce (le poids, de valeur P = mg)

Les vecteurs m $\frac{\overrightarrow{\Delta \boldsymbol{v}}}{\Delta t}$ et $\vec{P}$ sont égaux (mêmes direction, sens et valeur)

c. Généralisons

La somme des forces extérieures qui s'exercent sur le système en mouvement est égale au produit de la masse du système par le vecteur variation de vitesse de son centre de masse.

$$\sum \overrightarrow{F_{ext}} = m \times \frac{\overrightarrow{\Delta \boldsymbol{v}}}{\Delta t}$$

d. Utilisations de la relation

Cette relation contient 4 grandeurs : force, variation de vitesse, durée et masse.

Cette relation vectorielle peut aussi être présentée en version « valeurs » : la valeur de la force qui s'exerce est égale au produit de la masse de système par la variation de vitesse divisée par la durée associée.
Attention toutefois à la détermination des valeurs de grandeurs à l'origine vectorielles :

- La valeur associée à la force résultante (qui est la somme vectorielle de toutes les forces qui s'exercent) n'est pas égale à la somme des valeurs des différentes forces exercées (sauf si toutes les forces sont de mêmes directions et sens).
- La valeur de la variation de vitesse n'est pas égale à la différence des valeurs de vitesse (sauf si ces vitesses sont de même direction et sens). Elle s'obtient en mesurant la longueur du vecteur $\overrightarrow{\Delta v}$ et en lui appliquant l'échelle choisie.

Donc, une fois que vous maitrisez cet aspect du problème toutes les questions sont possibles :

- Connaissant $F_{rés}$ (valeur de la force résultante), m et Δt, déterminer la valeur de la variation de vitesse.
- Connaissant Δt, Δv, et m, déterminer la valeur de la force qui s'est exercée sur le système.
- Etc.

e. Restrictions

Cette relation n'est valable que dans certains référentiels…

Le référentiel terrestre, pour une expérience ne durant pas trop longtemps, convient…

Contre exemple :

Vous êtes assis dans une voiture qui passe sur un rond-point. Vous êtes immobile dans la voiture et vous le restez car êtes en contact avec la porte extérieure, d'ailleurs vous sentez qu'elle appuie sur vous.

- Vous êtes donc immobile dans le référentiel voiture.
- Faites le bilan des forces qui s'exercent sur vous.
- La relation $\sum \overrightarrow{F_{ext}} = m \times \frac{\overrightarrow{\Delta v}}{\Delta t}$ s'applique-t-elle ?
- Conclure quant au référentiel « voiture ».

f. Remarque

Et si $\sum \overrightarrow{F_{ext}} = \vec{0}$?

Alors le vecteur $\overrightarrow{\Delta v}$ est lui aussi nul. La vitesse ne varie pas, la vitesse est caractérisée par un vecteur constant, toujours de même sens et direction, toujours de même valeur : le mouvement est rectiligne uniforme.

Un cas particulier de cette situation : l'immobilité.

Nous venons de retrouver le principe d'inertie validé en classe de 2^{nde}.

g. Conclusion

L'effet d'une force sur un système est bien de modifier son mouvement, cette modification se présentant sous la forme d'une variation du vecteur vitesse du centre de masse du système.

Si le vecteur vitesse du centre de masse ne varie pas (immobilité ou mouvement rectiligne uniforme) c'est qu'aucune force extérieure ne s'exerce sur le système ou que les forces qui s'exercent s'annulent entre elles, se compensent.