

---

---

BUP PRATIQUE – BUP PRATIQUE – BUP PRATIQUE – BUP PRATIQUE

---

---

## Nouvelles expériences de mécanique utilisant une force constante

par Pierre SAUVECANNE

Lycée Montaury

51, avenue Georges Pompidou 30210 Nîmes

Mél : Pierre.Sauvecanne@wanadoo.fr

<http://perso.wanadoo.fr/pierre.sauvecanne/>

---

### RÉSUMÉ

*Les expériences classiques pratiquées dans l'enseignement de la mécanique sont des expériences de chute libre et de mouvement sur un plan incliné. Ces expériences ont l'inconvénient majeur de ne jamais montrer l'influence de la masse sur le mouvement. on trouvera dans cet article des expériences réalisées avec un dispositif qui permet d'obtenir une force constante (autre que le poids). La deuxième loi de NEWTON, les théorèmes de l'énergie cinétique et de l'énergie mécanique sont ainsi illustrés avec plus de pertinence.*

### 1. INTRODUCTION

Dans le BUP n° 782 de mars 1997 j'ai essayé de montrer qu'il était possible, en utilisant un dispositif fort simple, d'obtenir une force d'intensité constante (autre que le poids). J'ai donné quelques exemples d'expériences permettant de mieux faire comprendre aux élèves les lois fondamentales de La Mécanique Newtonienne.

Cet appareil a été présenté en novembre 1997 au Concours d'Études et de Réalisations pour la Valorisation des Outils Didactiques (CERVOD). Ce concours, parrainé par les Ministères de l'Emploi et de la Solidarité et celui de l'Éducation Nationale, se tient chaque année dans le cadre du salon ÉDUCATEC. Je voudrais encourager les collègues qui conçoivent un appareil ou toute autre réalisation à caractère pédagogique à y participer. Si à l'issue de ce concours leur réalisation est récompensée (malheureusement on ne peut obtenir qu'un accessit ou une mention si l'on est pas en partenariat avec

---



---

 BUP PRATIQUE – BUP PRATIQUE – BUP PRATIQUE – BUP PRATIQUE
 

---



---

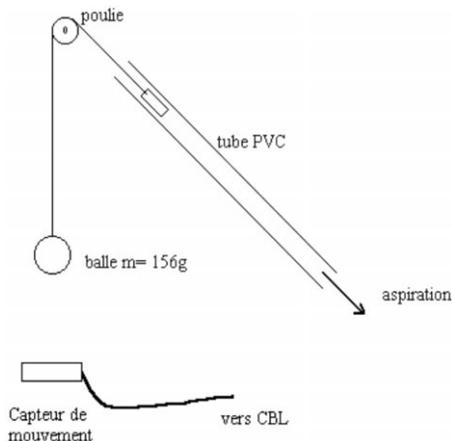
une entreprise !) ils auront moins de difficulté à trouver des industriels ou des organismes qui s'intéresseront à leur travail.

Les expériences qui sont présentées ci-dessous ont été élaborées avant que ne paraisse le document du Groupe de Physique-Chimie (Inspection Générale) intitulé «Les travaux pratiques, leur mise en œuvre et leur évaluation». En allant butiner sur mon site Internet on pourra trouver d'autres expériences, qui sont je crois plus conformes, à ce qui nous est demandé. On peut retrouver également quelques commentaires susceptibles de lancer une discussion sur le site UDP :

<http://www.cnam.fr/hebergement/udp/nouveautes/pedagogie/nouveau.htm>

## 2. RÉALISATION DE MOUVEMENTS VERTICAUX

### 2.1. Dispositif expérimental



Le tube relié à l'aspirateur est placé comme l'indique le schéma ci-dessus. Pour réaliser la force constante, on suspend au fil une masse  $m_0$  et on modifie le réglage de l'aspiration pour immobiliser cette masse. La force exercée vers le haut a pour intensité  $F = m_0 \cdot g$ . On remplace la masse  $m_0$  par l'objet de masse  $m$ , celui-ci se déplacera vers le haut ou vers le bas suivant les valeurs respectives de  $m$  et  $m_0$ . On libère donc le mobile, et on effectue les mesures. J'ai utilisé ici un capteur de mouvement relié à un CBL, lui-même connecté à une TI82. (On peut utiliser un dynamomètre à la place de la masse  $m_0$ ).

### 2.2. Résultats obtenus

#### 2.2.1. Première expérience : force constante de 0.98 newton vers le haut

##### 2.2.1.1. Mode opératoire

J'ai suspendu au fil une masse de 100 g et j'ai réglé l'aspiration à l'aide de l'alternostat pour que la masse soit immobile. Puis, la masse a été remplacée par une balle en matière plastique de masse  $m = 156\text{ g}$ , j'ai libéré le dispositif après avoir déclenché les mesures effectuées par l'ensemble : capteur, CBL et TI82.

---



---

 BUP PRATIQUE – BUP PRATIQUE – BUP PRATIQUE – BUP PRATIQUE
 

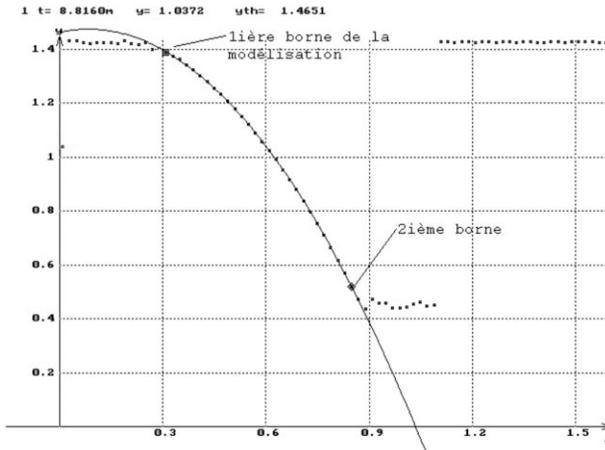
---



---

Pour la méthode, se reporter par exemple à l'article de P.NÉEL dans le BUP n° 789 cahier n°2 à la page 131. (Pour avoir les mesures directement en mètres, on modifiera la 6<sup>e</sup> ligne du programme BALLTROP en : {1,11,2} > L1).

### 2.2.1.2. Courbe donnant $y(t)$



### 2.2.1.3 L'étude du mouvement. Vérification de la deuxième loi de Newton

Les listes obtenues avec la calculatrice ont été transformées en un fichier pour Régressi afin de fournir ici une meilleure présentation. La modélisation de la partie intéressante de la courbe (réalisée dans Régressi) donne une accélération négative  $a_y = -3,25 \text{ m.s}^{-2}$  avec un écart relatif sur  $y$  de 0.12 %. La partie modélisée de la courbe apparaît entre les deux délimiteurs, on constate qu'elle se superpose parfaitement aux points expérimentaux. Cette accélération permet, en utilisant la deuxième loi de NEWTON, de calculer la valeur de la force créée par l'aspiration.

On obtient :

$$F = m * (g + a_y) \text{ soit ici } F = 0.156 * (9.81 - 3.25) = 1.02 \text{ N.}$$

La différence est de 0.04 N par rapport à la valeur attendue égale à 0.98 N. La deuxième loi est vérifiée avec une précision de 4 %. Un calcul d'incertitude montre qu'il faut éviter de comparer la valeur de l'accélération calculée en utilisant l'intensité

---



---

BUP PRATIQUE – BUP PRATIQUE – BUP PRATIQUE – BUP PRATIQUE

---



---

de  $F$  mesurée au départ ( $0.98\text{ N}$ ) à la valeur de l'accélération réellement obtenue. Cette comparaison n'est envisageable que si  $P$  est au moins deux fois supérieur à  $F$ .

#### 2.2.1.4. **Énergie mécanique et travail de la force de freinage**

Lorsqu'un objet, en chute libre, n'est soumis qu'à son poids, on sait qu'il y a conservation de l'énergie mécanique du système { Terre, objet }. Ici la force constante qui s'oppose au mouvement fait décroître cette énergie mécanique *comme le ferait une force de frottement*. La connaissance de l'intensité de cette force permet de vérifier que la variation de cette énergie mécanique est bien égale au travail de la force.

On doit vérifier que :

$$(Ep_2 + Ec_2) - (Ep_1 + Ec_1) = Wf$$

J'ai calculé (Régressi) :

$$Ec = 0.5 * m * v^2, Ep = m * g * y + Cte, Em = Ec + Ep$$

et enfin :

$$Wf = F * (y - y_0)$$

(L'axe  $Oy$  est orienté vers le haut et  $y_0$  correspond à l'ordonnée du début de l'arc de parabole, donc ici  $y < y_0$  donne bien un travail négatif).

#### 2.2.1.5. **Courbes de $Em(t)$ , $Wf(t)$ et de la différence $Dif(t) = Em(t) - Wf(t)$**

On peut constater combien ces courbes sont «parlantes». Elles seront comparées aux courbes obtenues lorsque l'objet est en chute libre. Le théorème de l'énergie mécanique prendra alors tout son sens.

---



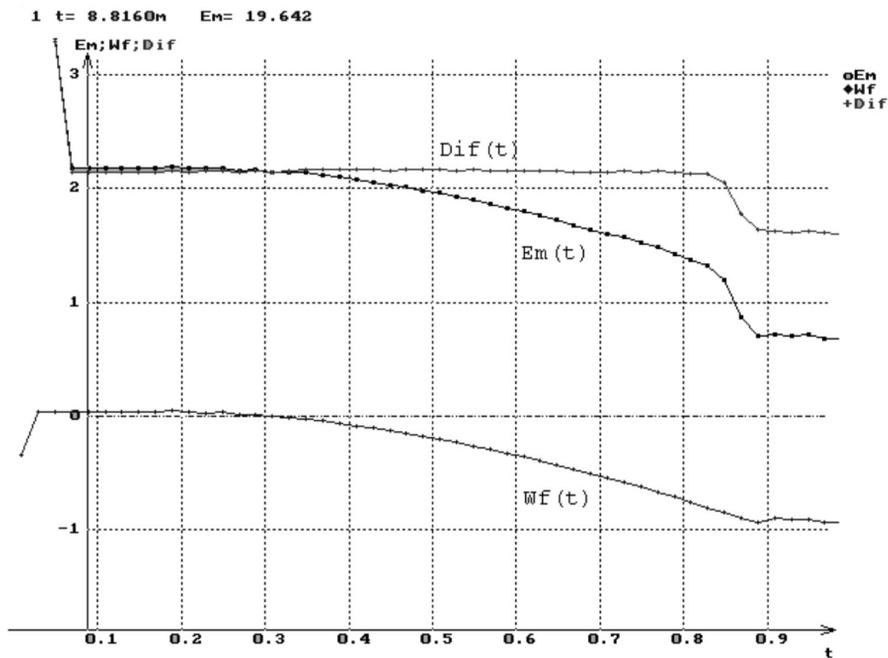
---

 BUP PRATIQUE – BUP PRATIQUE – BUP PRATIQUE – BUP PRATIQUE
 

---



---



## 2.2.2. Deuxième expérience : force constante de 1.96 newton vers le haut

### 2.2.2.1. Mode opératoire

La méthode est identique mais, maintenant, je vais régler le dispositif pour obtenir une force supérieure au poids de la balle. J'accroche donc, pour le réglage de l'aspiration une masse  $m = 200$  g. Je remplace la masse de 200 g par la balle de 156 g et je la libère pour qu'elle s'élève.

---



---

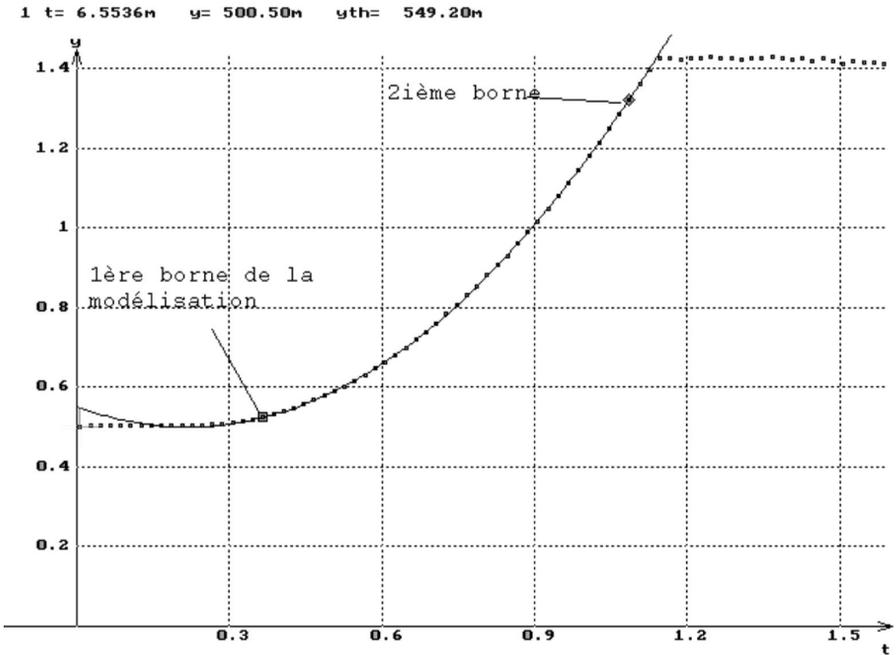
 BUP PRATIQUE – BUP PRATIQUE – BUP PRATIQUE – BUP PRATIQUE
 

---



---

### 2.2.2.2. Courbe donnant $y(t)$ .



### 2.2.2.3. L'étude du mouvement. Vérification de la deuxième loi de Newton

La modélisation de la partie intéressante de la courbe (réalisée dans Régressi) donne une accélération positive  $a_y = 2.21 \text{ m.s}^{-2}$  avec un écart relatif sur  $y$  de 0.11 %. Cette accélération permet, en utilisant la deuxième loi de NEWTON de calculer la valeur de la force créée par l'aspiration.

On calcule la force :

$$F = m * (g + a) \text{ soit ici } F = 0.156 * (9.81 - 2.21) = 1.88 \text{ N.}$$

---



---

 BUP PRATIQUE – BUP PRATIQUE – BUP PRATIQUE – BUP PRATIQUE
 

---

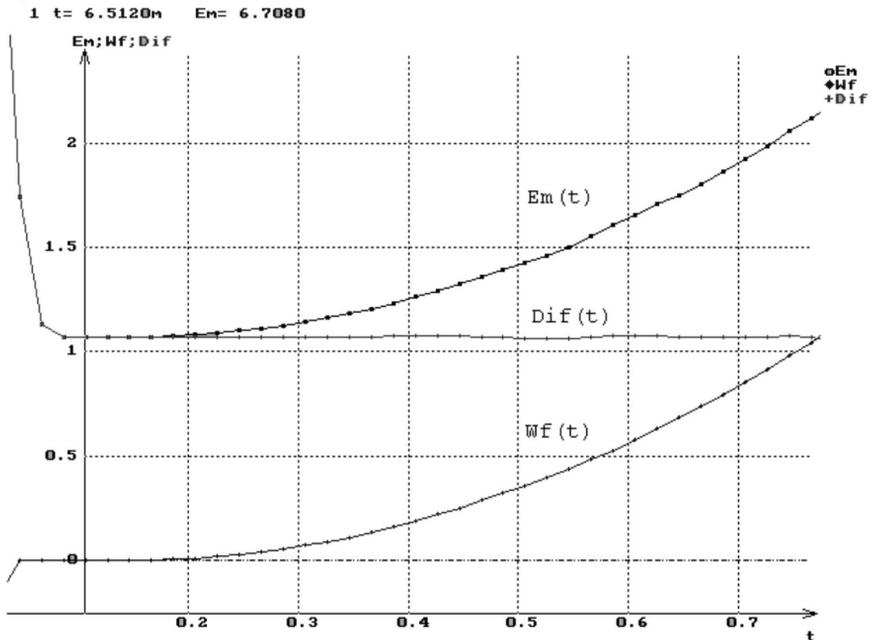


---

### 2.2.2.4. Énergie et travail de la force motrice

Étudions ici encore comment varie l'énergie mécanique tandis que la force qui s'exerce sur le mobile effectue maintenant un travail positif. Le travail de la force est calculé à l'aide de la même formule, soit  $Wf = F * (y - y_0)$ , mais ici  $y > y_0$  le travail de la force est maintenant positif. On constate à nouveau que la différence entre  $Em$  et  $Wf$  reste bien constante, tandis qu'ici  $Em$  croît. Que l'on veuille bien comparer ces résultats expérimentaux à ces explications extraites d'un manuel : «Une caisse est soulevée, verticalement, à vitesse constante sous l'action d'une force  $F$  ...» et des calculs suivent. On remarquera la restriction : «à vitesse constante». Ici point de discours, des faits exploitables. La force constante qui élève l'objet fait croître l'énergie potentielle de pesanteur du système et son énergie cinétique. On vérifie que la variation de l'énergie mécanique du système est bien égale au travail de la force.

### 2.2.2.5. Courbes de $Em$ , $Wf$ et de la différence $Dif(t) = Em(t) - W(f)$



### 2.3. conclusion

Ces expériences très simples à réaliser permettent :

1. De faire une **véritable** vérification de la 2<sup>e</sup> loi de NEWTON.

Les expériences de chute libre permettent d'obtenir un mouvement uniformément varié d'accélération  $a = g$ . Elles ne montrent pas que la masse du mobile intervient. Les dispositifs utilisant une masse qui se déplace verticalement en tractant un mobile sur une table horizontale donnent lieu à une étude théorique infiniment plus complexe pour aboutir à une relation du type machine d'Atwood :  $a = (m/(m + M)) * g$ . La difficulté des calculs occulte la loi physique. Ici les calculs nécessaires sont relativement simples mais instructifs, car les deux forces en jeu sont de sens contraires et l'on est amené à considérer une accélération algébrique. Le phénomène est enfin très «visuel» et capte fortement l'attention des élèves. Il est évident que la compréhension de la deuxième loi de Newton est nettement améliorée.

2. De faire une étude énergétique fort instructive.

La conservation de l'énergie mécanique, lorsque seules des forces dérivant d'un potentiel s'exercent sur le système, est généralement facile à mettre en évidence. Mais, bien souvent, cette énergie mécanique ne se conserve pas car d'autres forces agissent sur le système. Ici, on montre bien que ces autres forces peuvent, par leur travaux, faire décroître cette énergie mécanique comme le font par exemple les forces de frottement, ou la faire croître comme le ferait la force s'exerçant sur une fusée. Les deux travaux, de signes contraires, des forces  $F$ . pourtant toutes deux dirigées vers le haut, sont à exploiter.

---



---

 BUP PRATIQUE – BUP PRATIQUE – BUP PRATIQUE – BUP PRATIQUE
 

---

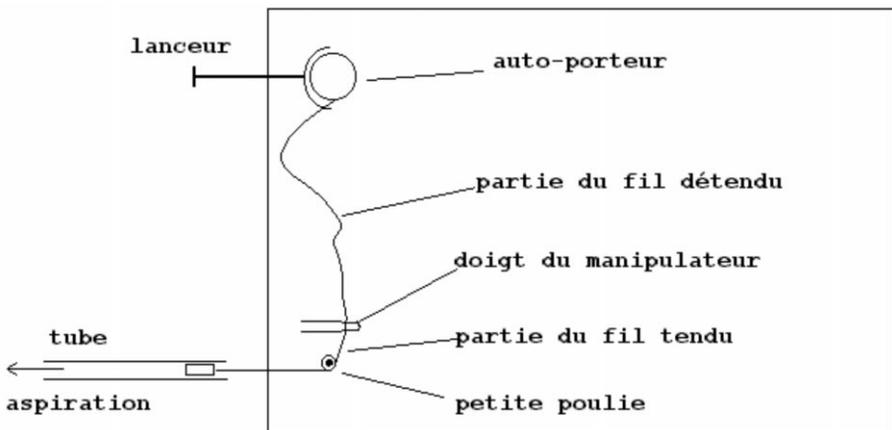


---

### 3. RÉALISATION DE MOUVEMENTS CURVILIGNES DANS LE PLAN

#### 3.1. Dispositif expérimental

On utilise un autoporteur sur une table qui, mis en mouvement par un lanceur, subit brusquement l'action de la force constante. La mise en place du dispositif est un peu plus complexe mais tout à fait réalisable. Voici le schéma correspondant à l'une des possibilités que j'ai expérimentées. Au lieu de tenir le fil avec le doigt on peut aussi bloquer l'autoporteur avec une tige courte, le fil étant alors tendu. Le lanceur libère le mobile en lui communiquant sa vitesse.



#### 3.2. Résultats obtenus

##### 3.2.1. Mode opératoire

La force exercée par le dispositif est mesurée à l'aide d'un dynamomètre afin d'être réglée à la valeur souhaitée. Le lanceur que j'utilise a été livré avec les autoporteurs Jeulin, tandis que la table est une table à digitaliser de Mirelec. Le lanceur est réglé pour fournir une vitesse colinéaire à l'axe  $Ox$  de la table. Tandis que l'on déclenche le lanceur, on tient le fil pour que la force ne s'exerce pas sur le mobile. Dès que celui-ci a parcouru quelques centimètres, on libère le fil, et la force d'intensité constante s'exerce. La présence de la petite poulie donne à cette force les caractères d'une force centrale. Elle est placée pour que cette force centrale soit dirigée vers le point  $O$ , origine

---



---

BUP PRATIQUE – BUP PRATIQUE – BUP PRATIQUE – BUP PRATIQUE

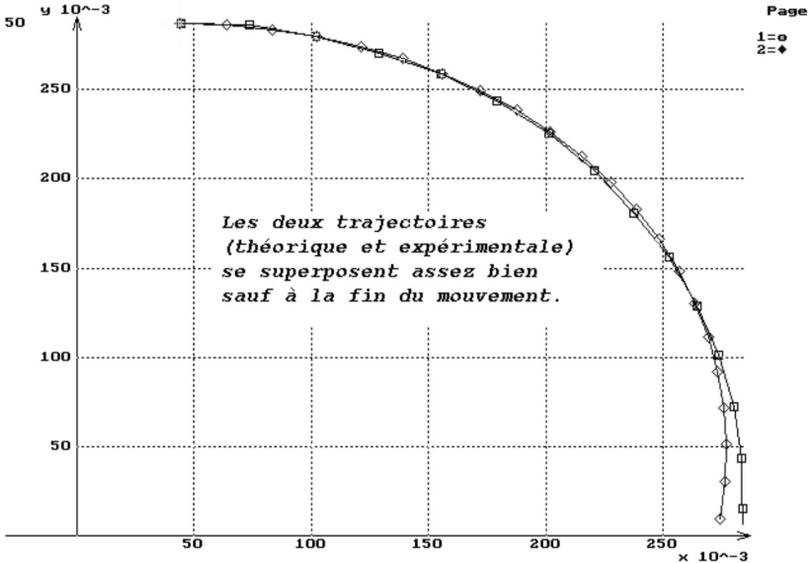
---



---

du repère de la table. Contrairement à ce que l'on peut supposer, l'expérience est facile à réussir.

### 3.2.2. La trajectoire obtenue



On peut observer deux trajectoires quasiment superposées. L'une de ces trajectoires correspond au mouvement réellement obtenu, l'autre a été obtenu par intégration (voir ci-dessous).

### 3.2.3. Traitement des résultats

#### 3.2.3.1. Méthode par dérivations successives

Il est possible à l'aide du tableur de Régressi de calculer successivement les dérivées  $v_x$ ,  $v_y$ ,  $a_x$ ,  $a_y$  et enfin de déterminer  $a = \text{sqrt}(a_x^2 + a_y^2)$ . On peut vérifier alors que l'on obtient pour l'accélération une valeur voisine de  $F/m$  ( $F$  force constante mesurée

---



---

 BUP PRATIQUE – BUP PRATIQUE – BUP PRATIQUE – BUP PRATIQUE
 

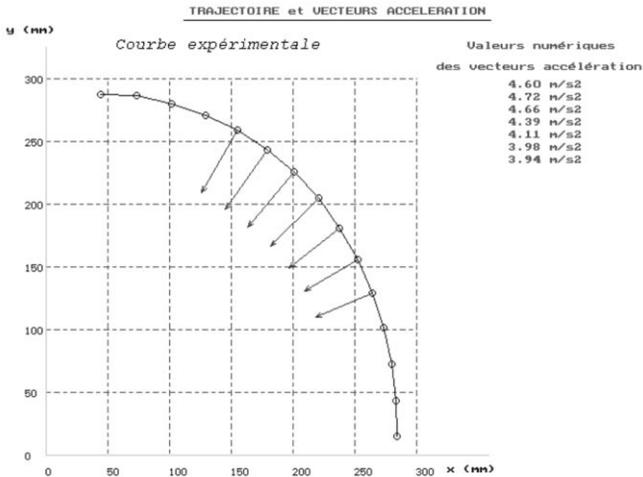
---



---

et  $m$  masse de l'auto-porteur). On peut aussi obtenir la représentation des vecteurs accélération et observer qu'ils sont centripètes comme le montre le document suivant (graphique obtenu par un programme en Turbo-Pascal plaçant après calculs les vecteurs sur la trajectoire).

### 3.2.3.2. Trajectoire et vecteurs accélération sur la trajectoire expérimentale



### 3.2.3.3. Méthode par intégration suivant la méthode d'Euler

J'ai déterminé, dans le tableau des mesures, les valeurs de  $v_x$  et de  $v_y$  à l'instant où la force s'exerce ainsi que les coordonnées  $x_0$  et  $y_0$  du point correspondant. J'ai écrit un programme pour calculette TI 85 qui détermine les valeurs de  $x$  et de  $y$  successives lorsque l'on fournit l'intensité de la force, la masse,  $x_0$ ,  $y_0$  et enfin  $v_x$  et  $v_y$ . Ce sont ces valeurs portées dans le tableur qui permettent de tracer la trajectoire théorique qui coïncide très bien avec la trajectoire expérimentale. Il est facile d'imaginer le plaisir que peut procurer aux élèves l'obtention d'un tel résultat. Bien entendu, il faut prendre un peu de temps (et nos programmes sont trop longs) pour expliquer la méthode.

Voici le listing du programme que j'ai utilisé :

: **Prompt X,Y,vx,vy,F,M,delt,div**

: **While (Y>0)** (Inutile de chercher des positions hors de la table)

---



---

 BUP PRATIQUE – BUP PRATIQUE – BUP PRATIQUE – BUP PRATIQUE
 

---



---

:  $\delta t/\mathbf{div} \rightarrow dt$ : **For(i,l,div,l)**:  $-F/M \cdot (X / \sqrt{x^2 + y^2}) \rightarrow ax$  Voir explications ci-dessous.:  $-F/M \cdot (Y / \sqrt{x^2 + y^2}) \rightarrow ay$ :  $vx + ax*dt \rightarrow vx$ :  $vy + ay*dt \rightarrow vy$ :  $X + vx*dt \rightarrow X$ :  $Y + vy*dt \rightarrow Y$ : **End**: **Disp X,Y**: **Pause**: **End**

$\delta t$  est l'intervalle de temps entre deux «observations» et **div** permet de déterminer l'incrément **dt**. On peut prendre  $0.02$  soit  $20\text{ ms}$  pour  $\delta t$  et  $20$  pour **div**, plus ce nombre est grand plus sont longs les calculs. Les valeurs de  $X$ ,  $Y$ ,  $vx$ ,  $vy$  sont lues dans le tableur lorsque l'on constate que la force s'exerce ( $y$  commence à varier).  $F$  est l'intensité de la force mesurée au dynamomètre et  $M$  la masse du mobile.

Pour le calcul des composantes de l'accélération on constate que la force  $F$  est dirigée du mobile (dont la position est repérée par ses coordonnées  $X$  et  $Y$ ) vers l'origine du repère. Le vecteur position fait avec l'axe  $Ox$  un angle égal à celui que fait le vecteur accélération avec cette même direction (angles géométriques).

Les données initiales seront par exemple (unités S.I.) :  $X = 0.05$  (le mobile a parcouru quelques centimètres quand on libère le fil),  $Y = 0.2$  (dépend de la position du lanceur),  $vx = 1$  (dépend du réglage du lanceur et de la tension de son ressort),  $vy = 0$  (si le lanceur est bien placé),  $F = 1$ ,  $M = 0.25$ ,  $dt = 0.02$  et enfin  $div = 20$ .

---



---

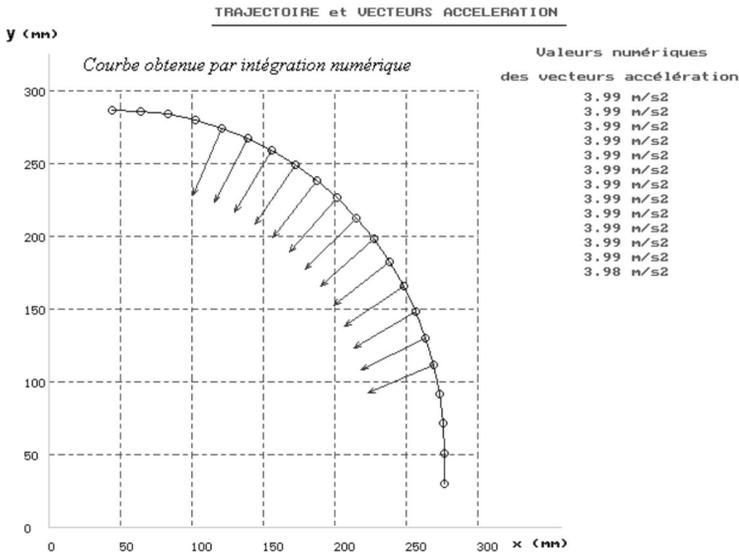
 BUP PRATIQUE – BUP PRATIQUE – BUP PRATIQUE – BUP PRATIQUE
 

---



---

### 3.2.3.4. Trajectoire et vecteurs accélération la trajectoire obtenue par intégration.



## 4. Détails matériels

J'utilise maintenant un tube en PVC «surchloré» qui remplace les tuyaux de cuivre dans les installations domestiques. Ce tube, intérieurement très lisse, a un diamètre extérieur de 25 mm et intérieur de 20 mm. Je l'ai acheté à Castorama sa marque est «Tubb'O ». Il faut prévoir une longueur d'environ 1,2 mètre pour les mouvements verticaux, 70 cm sont suffisants pour les mouvements sur table. Le petit tube qui glisse à l'intérieur doit avoir un diamètre de 18 mm environ, j'ai utilisé un marqueur métallique «Velleda» dont j'ai enlevé le fond et l'intérieur. Il faut prévoir en fin de parcours dans le grand tube, un arrêt pour que l'aspirateur n'avale pas le petit tube. Un fil élastique placé en travers, en perçant deux trous opposés dans le grand tube, peut convenir. Enfin un aspirateur alimenté par un alternostat permet d'obtenir une aspiration réglable. On peut diminuer les frottements en vaporisant le petit tube avec un lubrifiant siliconé. Pour tous renseignements complémentaires et commentaires on peut me contacter à l'adresse indiquée en début d'article.