

Utilisation d'une force constante autre que le poids pour établir ou vérifier les lois de la dynamique

par P. SAUVECANNE
Lycée Montaury - 30911 Nîmes

1. INTRODUCTION

1.1. Voici un extrait du programme en terminale S

Variation du vecteur vitesse \mathbf{v}_G . Vecteur accélération \mathbf{a}_G . Relation fondamentale de la dynamique (deuxième loi de Newton). Théorème du centre d'inertie. Théorème de l'énergie cinétique. Travail reçu par un solide en translation soumis à une force constante.

1.2. Les applications proposées sont

Chute d'un solide dans le champ de pesanteur uniforme, plan incliné.

1.3. Prenons donc le cas de la chute libre

Que vérifions nous ? ... Que l'accélération \mathbf{a} du solide est constante et voisine d'une valeur égale à \mathbf{g} . Nous avons tous remarqué la perplexité des élèves qui doutent que tous les objets puissent avoir la même loi de chute alors que pour eux la masse devrait intervenir.

Certes nous voyons que la loi $\mathbf{F} = m \cdot \mathbf{a}$ se vérifie puisque la seule force qui s'exerce sur l'objet est son poids $\mathbf{P} = m \cdot \mathbf{g}$ et qu'il suffit de multiplier la relation trouvée expérimentalement $\mathbf{a} = \mathbf{g}$ par m pour retrouver la loi !

Est-ce parfaitement satisfaisant ?

1.4. Prenons maintenant le cas d'un autoporteur sur un plan horizontal tracté par une force constante

1 - On mesure l'intensité de la force à l'aide d'un dynamomètre ou par tout autre moyen.

2 - On vérifie que le solide tracté par cette force possède un mouvement uniformément varié dont on détermine l'accélération a .

3 - On multiplie l'intensité de la force par un facteur k et l'on constate que l'accélération du mobile est multipliée par le même facteur.

On vient de vérifier que l'accélération du mobile est proportionnelle à l'intensité de la force.

4 - On multiplie la masse du mobile par un facteur k' et l'on constate qu'avec une même force l'accélération du mobile est divisée par le même facteur.

On vient de vérifier que l'accélération du mobile est inversement proportionnelle à sa masse.

2. LE DISPOSITIF EXPÉRIMENTAL PERMETTANT D'OBTENIR UNE FORCE CONSTANTE

Ce dispositif très simple, certainement améliorable, donne déjà de bons résultats. Il s'agit d'un tube en matière plastique de masse très faible (tout à fait négligeable devant celle du solide tracté) qu'un courant d'air créé par un aspirateur déplace dans un tuyau de diamètre un peu supérieur au sien. Le dispositif est peu bruyant car l'aspirateur muni d'un système de réglage n'est jamais utilisé à pleine puissance.

La force ainsi obtenue est constante tandis que le tube se déplace dans le tuyau.

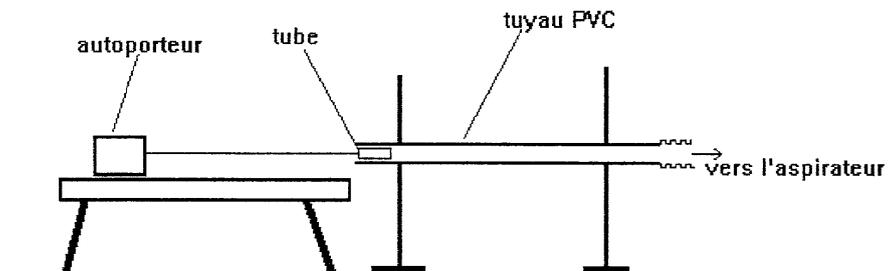


Figure 1

La force, mesurée à l'aide d'un dynamomètre avant d'accrocher l'autoporteur, peut atteindre des valeurs de l'ordre de cinq newtons. Les expériences montrent, que la force ainsi mesurée, est en général un peu supérieure à la force attendue et c'est surtout à ce niveau que le dispositif peut sans doute être amélioré (je suppose que cela est dû à des frottements que je ne suis pas encore parvenu à mieux réduire). Toutefois si la force exercée est supérieure à 1 N cette différence n'induit pas d'erreur supérieure à 5 % ce qui est acceptable. Avec des forces d'intensité supérieure à 1 N il faut prévoir des autoporteurs assez lourds afin de ne pas obtenir des déplacements trop rapides. Les autoporteurs classiques dont la masse est de l'ordre de 0,7 kg, masse qui peut être multipliée par 1,5 à l'aide d'une surcharge, conviennent bien.

Note : ce dispositif ne doit pas être comparé aux systèmes du type figure 2, pour lesquels le mouvement est aussi uniformément varié.

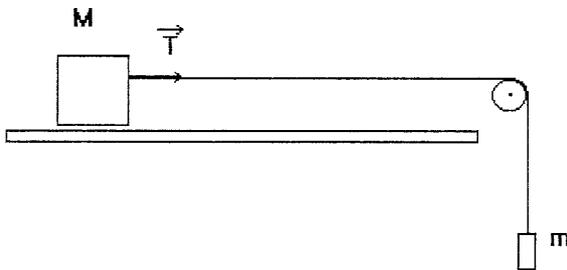


Figure 2

Mais dans ce cas l'accélération a est fournie par la relation :

$$(M + m).a = m.g$$

La force motrice, agissant sur l'autoporteur de masse M , est la tension T du fil : $T = M.a$.

Elle n'est pas mesurable à l'aide d'un dynamomètre.

3. MESURES À L'AIDE D'UNE TABLE À DIGITALISER. RELATION FONDAMENTALE DE LA DYNAMIQUE

J'ai modifié un autoporteur de table à digitaliser pour le rendre plus lourd et pour pouvoir augmenter sa masse facilement. Sa masse ayant

pour valeur initiale 700 g il a été tracté par une force de 1.1 N. Enfin sa masse étant de 1050 g il a été mis en mouvement par une force de 1.1 N puis de 2.2 N. Les mesures ont été traitées dans le logiciel Régressi et une régression linéaire a donné les coefficients directeurs des droites de régression.

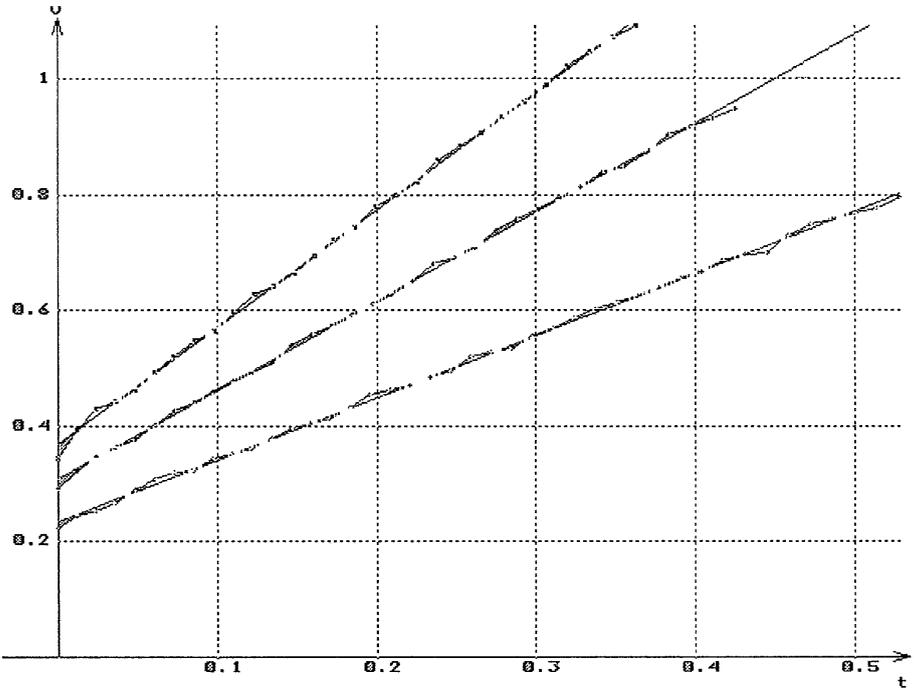


Figure 3 : Vitesses des autoporteurs en fonction du temps : la pente des droites est égale à l'accélération du mobile.

On obtient le tableau suivant en unités S.I.

Masses (balance)	Forces (dynamomètre)	Accélérations (pentes)	F (dynamique) = m.a
0.7	1.1	1.53	1.07
1.05	1.1	1.07	1.12
1.05	2.2	2.02	2.12

On peut par exemple calculer les écarts entre les mesures dynamiques et statiques des forces, ils sont pour les trois mesures de l'ordre de 3 %.

On peut donc ainsi vérifier ou même établir la relation $F = m \cdot a$ dans le cas des mouvements rectilignes.

J'ai également tracé la courbe expérimentale fournissant l'abscisse x de l'autoporteur en fonction de t et j'y ai superposé la courbe modèle obtenue en utilisant l'accélération donnée par la régression linéaire. Les deux courbes se superposent presque parfaitement.

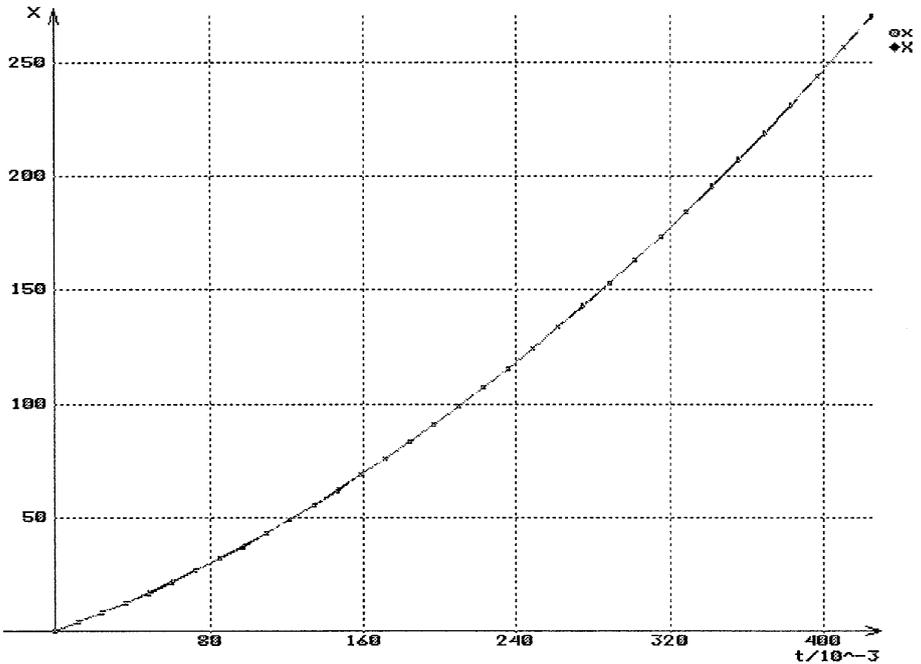


Figure 4 : Courbe expérimentale de $x(t)$ superposée à la courbe modèle :

$$x = 0.5 * a * t^2 + v_0 * t + x_0 .$$

4. MOBILE EN ROTATION AUTOUR D'UN AXE FIXE

Cette partie n'est plus au programme dans le secondaire mais il est intéressant de constater que, là aussi, la méthode peut être utilisée. Pour vérifier indirectement que le produit du moment d'inertie J du solide par son accélération angulaire θ'' est égal au moment C du couple, l'expérience sans doute la plus "simple" consistait à accrocher une masse m à un fil qui en se déroulant sur une poulie de rayon r mettait en rotation le solide de moment d'inertie J . On obtenait la relation :

$$(J + m.r^2).\theta'' = m.g.r !$$

Avec une force constante on peut faire varier à son gré l'intensité du couple d'une part (F et/ou r) et le moment d'inertie du solide d'autre part. On vérifie ainsi directement que $J.\theta'' = C$ avec une très grande facilité.

5. ÉNERGIE CINÉTIQUE ET TRAVAIL D'UNE FORCE

5.1. Deux séances de travaux pratiques à titre d'exemple

Ces expériences peuvent servir en première S à introduire la notion d'énergie cinétique et de travail ou/et en terminale S pour la mise en place du théorème de l'énergie cinétique. Seule, la présentation des résultats, sera modifiée en conséquence. Je donne une rédaction plutôt destinée à des premières.

On utilise l'autoporteur classique qui donne par étincelage un enregistrement sur papier. Sa masse est $m = 710$ g, il a été tracté par une force de 1,5 puis de 3 newtons. Enfin, muni d'une surcharge il a été tracté par une force de 3 newtons, sa masse étant alors égale à 1070 g. L'intervalle de temps séparant deux points est de 20 ms.

Les enregistrements obtenus ont donc l'allure suivante :

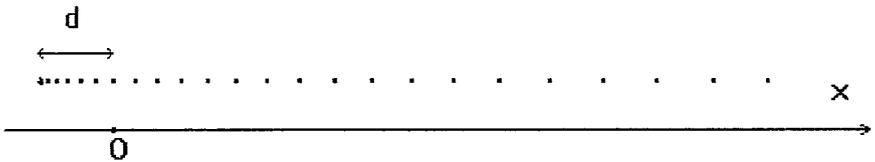


Figure 5

J'ai mesuré et relevé dans un tableur les valeurs de l'abscisse x du mobile à partir d'un point choisi comme origine des espaces. J'ai calculé la vitesse par «dérivation numérique» puis son carré. La distance parcourue par le mobile est égale à x augmenté de la distance d qui sépare l'origine des abscisses du point de départ. Bien entendu on peut aussi traiter ces mesures «manuellement».

5.1.1. Première séance

a - Première expérience

Solide de masse $m = 710$ g - Force de 1,5 N.

x (m)	t (s)	v (m/s)	v au carré	d(m)
0.000	0.000			
0.006	0.020	0.313	0.098	0.025
0.013	0.040	0.355	0.126	0.032
0.020	0.060	0.400	0.160	0.039
0.029	0.080	0.445	0.198	0.048
0.038	0.100	0.493	0.243	0.057
0.048	0.120	0.525	0.276	0.067
0.059	0.140	0.570	0.325	0.078
0.071	0.160	0.625	0.391	0.090
0.084	0.180	0.638	0.406	0.103
0.097	0.200	0.675	0.456	0.116
0.111	0.220	0.738	0.544	0.130
0.126	0.240	0.763	0.581	0.145
0.142	0.260	0.800	0.640	0.161
0.158	0.280	0.845	0.714	0.177
0.175	0.300	0.900	0.810	0.194
0.194	0.320	0.947	0.898	0.213
0.213	0.340	0.975	0.951	0.232
0.233	0.360			

Ce tableau me permet de tracer le graphe de V^2 en fonction du déplacement de l'autoporteur. Les points sont à peu près alignés. La droite correspondante, obtenue par régression linéaire, et dont le coefficient directeur est égal à 4,075 a été tracée (coefficient de corrélation de 0,9993).

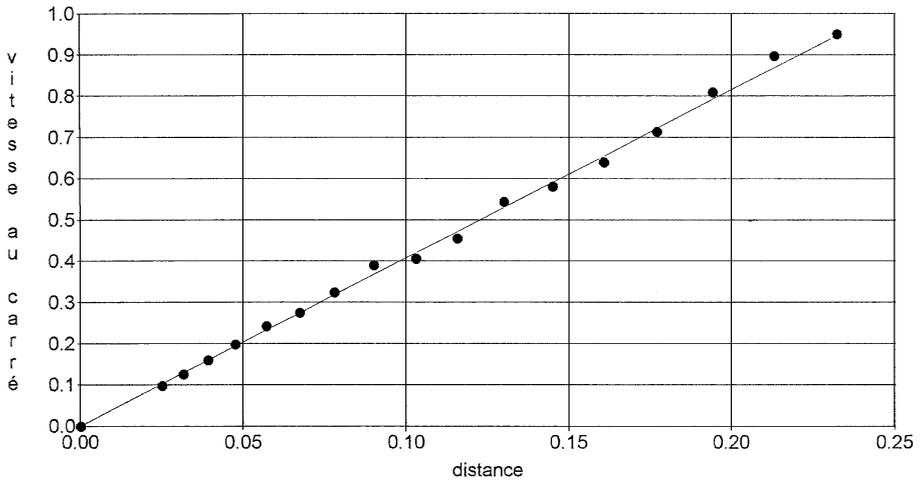


Figure 6

On posera donc : $V^2 = 4,07.d$

b - Deuxième expérience

Solide de masse $m = 710$ g - Force de traction de 3 N.

x (m)	t (s)	v (m/s)	Carré de V	d(m)
0.000	0.000			0.000
0.008	0.020	0.425	0.181	0.022
0.017	0.040	0.513	0.263	0.032
0.028	0.060	0.588	0.345	0.043
0.041	0.080	0.675	0.456	0.055
0.055	0.100	0.750	0.563	0.070
0.071	0.120	0.838	0.701	0.085
0.089	0.140	0.913	0.833	0.103
0.107	0.160	0.988	0.975	0.122
0.128	0.180	1.088	1.183	0.143
0.151	0.200	1.163	1.351	0.165
0.175	0.220	1.250	1.563	0.189
0.201	0.240	1.338	1.789	0.215

Ce deuxième tableau permet de tracer le graphe de V^2 en fonction du déplacement de l'autoporteur alors que la force qui le déplace a son intensité qui a doublé passant de 1,5 à 3 newtons. On obtient de nouveau la droite de régression linéaire, son coefficient directeur est égal à 8,28 (coefficient de corrélation de 0,9998).

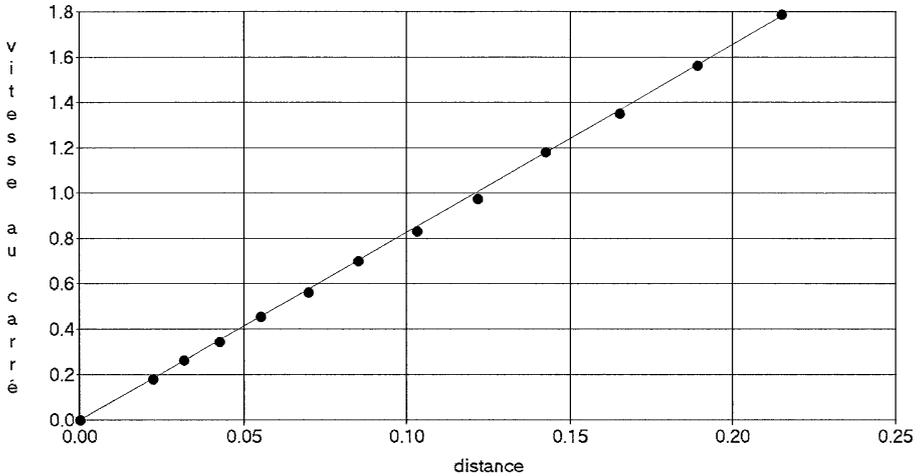


Figure 7

Nous pouvons donc écrire :

$$V^2 = 8,28.d$$

Le fait d'avoir doublé l'intensité de la force a entraîné le doublement du coefficient directeur de la droite.

c - Conclusion

Lorsque le mobile autoporteur est tracté par une force d'intensité constante on constate que le carré de la vitesse qu'il acquiert est proportionnel à l'intensité de cette force et au déplacement qu'elle provoque soit :

$$V^2 = k.F.d$$

avec $k = 2,7 \text{ u.S.I.}$ et $m = 0.710 \text{ kg}$

Le produit $F \cdot d$ qui caractérise l'effet de la force sur le mobile de masse m sera appelé travail de la force F , il sera noté WF .

$$WF = F \cdot d$$

5.1.2. Deuxième séance

a - Expérience

L'autoporteur muni de sa surcharge a maintenant une masse de 1070 g, il est à nouveau tracté par une force de 3N comme dans le cas précédent.

Solide de masse $m = 1070$ g - Force de traction de 3 N.

x (m)	t (s)	v (m/s)	Carré de V	d(m)
0.000	0.000			0.000
0.007	0.020	0.350	0.123	0.020
0.014	0.040	0.375	0.141	0.028
0.022	0.060	0.438	0.191	0.035
0.032	0.080	0.500	0.250	0.045
0.042	0.100	0.538	0.289	0.055
0.053	0.120	0.600	0.360	0.067
0.066	0.140	0.663	0.439	0.079
0.080	0.160	0.725	0.526	0.093
0.095	0.180	0.763	0.581	0.108
0.110	0.200	0.825	0.681	0.124
0.128	0.220	0.875	0.766	0.141
0.145	0.240	0.925	0.856	0.159
0.165	0.260	1.000	1.000	0.178
0.185	0.280	1.038	1.076	0.199
0.206	0.300	1.075	1.156	0.220

Ce troisième tableau permet de tracer le graphe de V^2 en fonction du déplacement de l'autoporteur. La droite obtenue par régression linéaire dont le coefficient directeur est égal à 5,3 a également été tracée (coefficient de corrélation de 0,9990).

On voit donc bien ici l'influence de la masse inerte sur la vitesse du mobile qui, tracté une première fois par une force d'intensité 3N avait acquis plus rapidement de la vitesse.

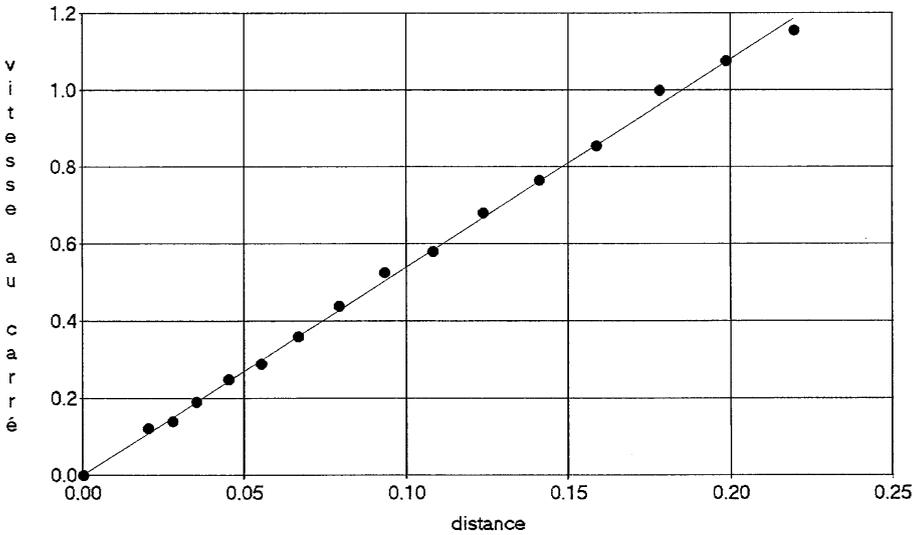


Figure 8

De plus, la comparaison des deux coefficients directeurs fait apparaître une relation simple : on constate que leur rapport $8,28/5,30 = 1,56$ est pratiquement égal au rapport inverse des masses correspondantes $1,070/0,710 = 1,51$.

b - Conclusion

Le carré de la vitesse du mobile proportionnel au travail de la force WF est inversement proportionnel à sa masse. On peut écrire la relation :

$$m.V^2 = K.WF$$

Le coefficient K de la relation précédente peut se calculer en utilisant l'une des trois relations précédentes. On trouve $K_1 = 1,93$, $K_2 = 1,96$ et $K_3 = 1,90$.

En prenant la moyenne de ces trois valeurs on peut alors écrire la relation sous la forme suivante :

$$0,52.m.V^2 = WF$$

On terminera la séance en définissant le terme $0,5.m.V^2$ que l'on nommera énergie cinétique en expliquant que la force F obtenue grâce à une dépense d'énergie d'une autre nature a permis par son travail WF de transférer à l'autopporteur une énergie appelée énergie cinétique de translation.*

6. CONCLUSIONS GÉNÉRALES

On peut lire dans les documents d'accompagnement du programme de physique-chimie de la classe de terminale scientifique :

«A propos de la masse : masses gravitationnelle et inerte

Dans les calculs de mouvements d'objets soumis à un champ de pesanteur ou à un champ gravitationnel, on observe que la masse se simplifie. Dans le cas de la chute libre on énonce souvent la loi selon laquelle le mouvement d'un objet est indépendant de sa masse. GALILÉE l'avait déjà bien compris : la masse intervient de deux façons : comme "composante" du poids, force motrice et comme caractéristique de l'inertie, c'est-à-dire de la «répugnance à se mettre en mouvement». Et augmenter une masse oblige à augmenter l'autre. Finalement, la masse du mobile n'intervient pas.

On peut lire aussi dans ce même document et dans un extrait des «Principia» de Newton :

«II. LOI

Si une force produit un mouvement quelconque, une force double de cette première produira un mouvement double, et une force triple un mouvement triple...».

La méthode que je propose permet donc à mon avis de vérifier de manière simple et formatrice la loi $F = m.a$ dans le cas des mouvements rectilignes. Le théorème de l'énergie cinétique, le travail d'une force constante, sont très bien compris à la suite de ces expériences convenablement exploitées. **Les méthodes qui consistent à faire intervenir le poids des objets ont le grave défaut de ne pas montrer l'influence de la masse.** Bien évidemment l'étude de la chute libre ne doit pas être abandonnée pour autant. Bien au contraire, réalisée après

* L'énergie transformée en énergie cinétique dépend de la source utilisée par EDF pour produire l'électricité.

cette vérification elle pourra donner lieu à une intéressante discussion portant sur le fait qu'il a fallu un bien grand génie à Galilée pour réaliser que c'était parce que la masse intervenait doublement que tous les objets avaient la même loi de chute. Le plan incliné permettra de déterminer le travail d'une force faisant un certain angle avec le déplacement. Les expériences du programme dans lesquelles la masse de l'objet «intervient» (oscillateur harmonique par exemple) sont plus compliquées et ne mettent pas en évidence de manière aussi simple le rôle de ce facteur. J'espère que cette méthode simple et qui donne de bons résultats sera utilisée par les collègues. Je tiens à leur disposition une fiche détaillée sur ce dispositif.