

L'ordinateur pour l'enseignement de la mécanique

par Daniel BEAUFILS, INRP, 92120 Montrouge
Francis FILIPPI, Lycée Bergson, 75000 PARIS
Françoise COUSSON, Lycée Richelieu, 92500 Rueil-Malmaison
Jean-Claude LE TOUZE, INRP, 92120 Montrouge

1. INTRODUCTION

Le domaine de la mécanique a de tout temps attiré les concepteurs de logiciels. La raison en est sans doute les difficultés que l'on rencontre d'une part dans la réalisation de mesures (mesure de vitesse en particulier) et d'autre part dans l'étude de situations «réalistes» et extérieures au laboratoire (trajectoire de satellites, séparation des étages d'une fusée, mouvement de balle, chocs, frottements, etc).

Le premier mode d'investigation qui s'est développé a été la simulation : simulation d'un alunissage (logiciel Alun), simulation de l'action d'un champ électrique ou magnétique sur une charge en déplacement (logiciels Gamma, Sjtj et Ref), simulation de trajectoires dans le champ de pesanteur (Des ailes pour la tortue), etc. Si ce type de logiciel existe toujours (Multiméca, Oscillateur, Linéaire, Mobile, etc), la tendance actuelle est celle d'une utilisation de l'ordinateur pour la mesure et l'analyse de données expérimentales [1].

Les interfaces nécessaires à la mesure ne pouvant lire que des tensions électriques [2], il faut, pour suivre un mouvement, pour connaître une vitesse, pour suivre l'intensité d'une force, etc, utiliser des capteurs qui vont convertir la grandeur mécanique en tension électrique. Nous donnons ci-dessous un aperçu des quelques techniques (tant matérielles que numériques) qui sont actuellement utilisées pour différentes approches de la mécanique.

2. LA PRISE DE DONNÉES EN MÉCANIQUE

2.1. Introduction

La première étape est donc le choix d'un capteur adapté à la grandeur dont on veut suivre l'évolution : longueur, angle, vitesse, force, etc. Il existe bien sûr des capteurs de force (jauge de contrainte) ou de position-déplacement (télémètre à ultrason ou infra-rouge), mais ils sont généralement onéreux et n'ont pas encore été utilisés de façon étendue. Deux types de capteurs sont généralement utilisés : les capteurs photo-électriques et les capteurs potentiométriques.

2.2. Les capteurs photo-électriques et la mesure du temps

Les capteurs photo-électriques sont utilisés en mode «tout ou rien» : ils indiquent le passage d'un mobile par leur changement d'état. En général il s'agit d'un couple opto-électronique de type diode émettrice/phototransistor, qui travaille en réflexion ou en transmission (l'événement détecté étant soit la coupure du faisceau, soit le retour du faisceau).

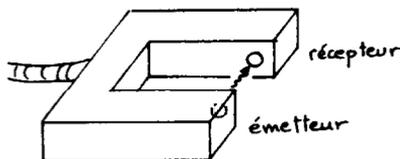


Figure 1

Le capteur ne fournissant que cette information, il est nécessaire, si l'on veut étudier la position au cours du temps, de disposer d'une indication extérieure pour déterminer les coordonnées de chaque capteur et d'utiliser l'ordinateur (l'horloge interne, [3]) pour repérer les dates. On peut noter ici que ce type de capteur ne peut s'utiliser que si la trajectoire est parfaitement connue à l'avance.

Plusieurs possibilités sont exploitées. Dans certains montages des capteurs simples sont positionnés le long de la trajectoire. Dans ce cas la détection du passage du mobile permet d'obtenir les dates de passage d'un point mobile à différentes positions (couples de valeurs t_i , x_i).

La technique «réciproque» existe également. Elle consiste à faire passer un objet muni d'éléments de repérage (évidements ou barres réfléchissantes) devant un seul capteur. Dans ce cas on obtient

également une série de couples (t_i, x_i) , mais où t_i désigne les dates de passage des différents points du mobile repérés par x_i . Dans un mouvement de translation, ceci revient naturellement à connaître le déplacement du centre de gravité (cas de la chute libre [4, 5]).

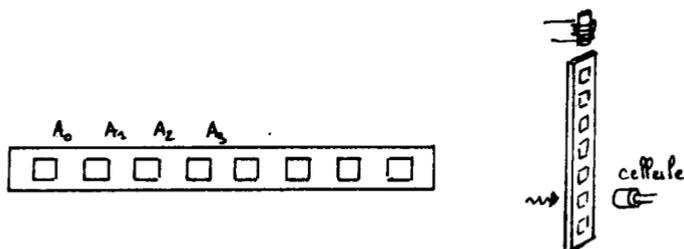


Figure 2

On peut enfin utiliser des capteurs doubles qui facilitent la détermination des vitesses (chaîne Chronociné). Ils sont utilisés pour l'étude de la chute libre, mais aussi pour l'étude des chocs ou des éclatements (logiciels chute et Banc) [6].

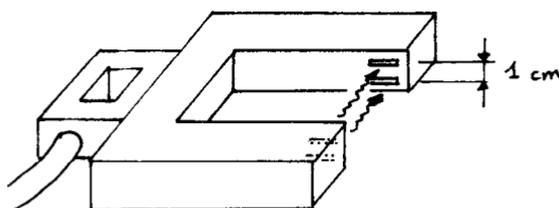


Figure 3

2.3. Les capteurs potentiométriques et la mesure des déplacements

Dans les exemples ci-dessus on mesure en fait le temps «en fonction» de la position. Dans d'autres circonstances il peut être plus facile (techniquement), plus faible (pour les calculs numériques ultérieurs) ou enfin plus pédagogique (pour une meilleure introduction des «lois horaires») de chercher à connaître la position en fonction du temps. Il faut alors disposer d'un capteur qui suive le mouvement et puisse être «interrogé» à intervalle de temps régulier par l'ordinateur (via l'interface).

Le système le plus simple et le plus employé est le potentiomètre, qu'il soit mécanique [7, 8] ou liquide [9], linéaire ou rotatif (le potentiomètre «optique», de bien meilleure qualité restant rare [10]). Le curseur du potentiomètre est relié (directement ou non) au mobile et la tension qu'il renvoie dépend alors de la position.

Pour l'étude du pendule pesant, le système Pendolor est constitué d'un potentiomètre rotatif de bonne qualité sur lequel est fixé directement la tige du pendule. Une tension constante étant maintenue aux bornes du potentiomètre (5 volts par exemple), chaque valeur de la tension correspond à un angle. Il suffit donc de repérer le zéro (position d'équilibre) puis de faire l'étalonnage proprement dit (repérage à 90 degrés) pour connaître l'angle du pendule par rapport à la verticale (logiciel Le Pendule).

Le même principe pourra être employé pour suivre le mouvement d'un oscillateur horizontal (logiciel Oscillateur Harmonique) avec un potentiomètre liquide constitué d'une solution légèrement conductrice dans laquelle plongent deux plaques métalliques et un stylet se déplaçant sur une ligne de champ (dans une zone où les effets de bord peuvent être négligés).

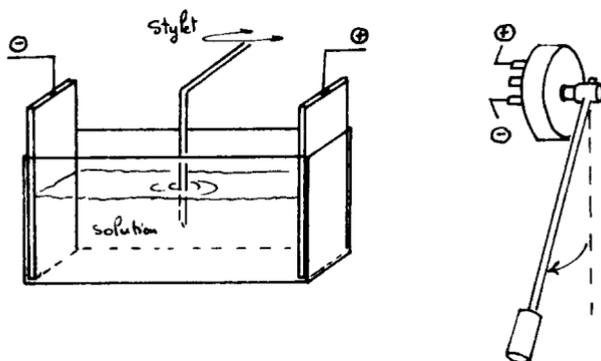


Figure 5

2.4. Un nouveau dispositif

Citons ici un dispositif encore peu répandu mais qui a été présenté aux dernières Journées Informatique et Pédagogie des Sciences Physiques : la tablette à numériser.

Il s'agit d'une tablette de dimension 30×30 cm environ, munie d'un faisceau de fils croisés parcourus par des courants. Un crayon ou un curseur électronique pointé sur la tablette permet de connaître instantanément les coordonnées du point visé. Deux utilisations différentes ont été proposées.

La première consiste à utiliser le crayon comme dispositif de repérage du centre de gravité d'un mobile auto-porteur que l'on fait glisser sur la table [11]. Le logiciel lit les positions envoyées à intervalle de temps régulier et trace quasi instantanément la trajectoire de ce point.

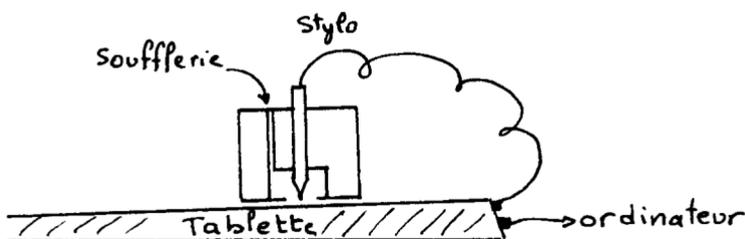


Figure 6

La seconde consiste à utiliser le curseur pour analyser des mouvements enregistrés sur des chronophotographies. On peut ainsi repérer les coordonnées successives de n'importe quel point d'un objet quelconque [12].

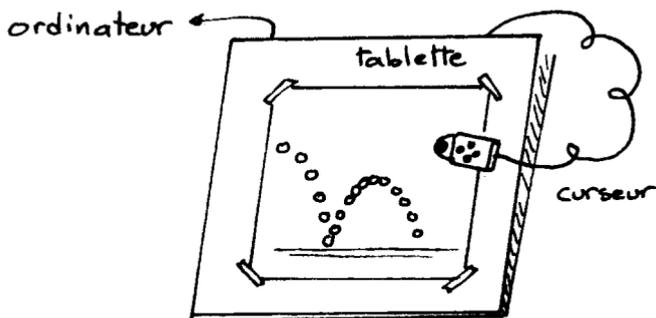


Figure 7

3. ANALYSE DES DONNÉES ET MÉTHODES NUMÉRIQUES

3.1. La définition des grandeurs

L'étude des mouvements nécessite le calcul de grandeurs secondaires à partir des mesures de position et de temps. Si le dispositif d'acquisition fournit directement les valeurs des vitesses (voir ci-dessus) il est facile de calculer toutes les grandeurs intéressantes : v^2 , E_c , W_p , E_p et E_m .

Sinon, il faut déterminer la vitesse par calcul après avoir terminé l'ensemble des mesures. L'accès aux grandeurs intéressantes passe donc par l'utilisation d'une technique de dérivation numérique (qui exige une bonne qualité des mesures : précises et régulièrement réparties) [3].

3.2. La modélisation

Des questions de modélisation mathématique peuvent se poser pour l'enseignement de la mécanique en classe terminale. Sur un plan « empirique » on s'intéresse à la recherche d'une relation entre différentes grandeurs (la vitesse et le temps pour la chute, l'élongation angulaire et le temps pour le pendule pesant). On peut alors utiliser l'ordinateur pour tracer une courbe qui soit représentative des données et ainsi déterminer l'équation correspondante. On notera ici qu'en mécanique le nombre de fonctions réellement utiles à ce niveau est très limité [14].

Sur le plan théorique on est amené à décrire les systèmes et les phénomènes par des équations différentielles. Si l'application de la première relation de la dynamique est facile à faire, les équations différentielles qu'on en déduit ne sont pas pour autant élémentaires (le pendule pesant en est le meilleur exemple). Dans ce cas un module de résolution numérique des équations différentielles du mouvement peut être utilisé. L'équation étant spécifiée, l'entrée des conditions initiales (déterminées empiriquement) permet d'obtenir le tracé du comportement théorique alors directement comparable au tracé expérimental [1].

4. CONCLUSION

Les exemples évoqués ci-dessus montrent les nombreuses possibilités d'utilisation de l'ordinateur pour l'enseignement de la mécanique au lycée (et également au niveau supérieur).

En ce qui concerne les logiciels orientés «outil» [1] on peut remarquer qu'ils constituent un ensemble relativement homogène (Chute, Plan incliné, Oscillateur Harmonique, Le Pendule, Table), et que le domaine de la mécanique offre ainsi la possibilité d'une introduction significative de l'ordinateur au laboratoire. En terminale, il est aisé de mettre en correspondance les contenus et les logiciels :

Cinématique : vitesse et accélération

- Chute (travaux pratiques) : mise en évidence expérimentale des lois horaires,
- Chute (cours) : notion de dérivée et vitesse instantanée ; intégration,
- Plan («travaux dirigés», ou TP) : application de la démarche à un exemple voisin,

Cinématique : mouvement circulaire uniforme

- Table («travaux dirigés») : lois horaires ; trajectoire et coordonnées polaires,

Dynamique : mouvement du centre d'inertie et champ uniforme

- Chute ou Plan (cours) : résolution numérique de l'équation différentielle du mouvement,
- Utilisation de Table en travaux dirigés ou T.P. : étude d'une chute parabolique.

Dynamique : pendule élastique

- Oscillateur Harmonique (travaux pratiques) : étude de l'oscillateur horizontal,
- Oscillateur harmonique (cours ou «travaux dirigés») : étude de l'oscillateur amorti (perte d'énergie mécanique),
- Le Pendule (cours) : exemple d'un oscillateur non harmonique.

Ces exemples pouvant évidemment être complétés par des exemples d'utilisation (en salle d'informatique par exemple) de logiciels

généraux (tableur-grapheurs scientifiques comme Regressi), ou de simulation.

En annexe sont fournies quelques pages tirées de la brochure «Fiches pratiques d'utilisation de l'informatique en classe de physique et chimie» [15] qui présentent une étude de la chute libre mettant en œuvre un dispositif d'acquisition et des outils numériques et graphiques pour la modélisation mathématique.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] Daniel BEAUFILS, Monique SCHWOB, Françoise COUSSON - Du laboratoire à la salle de classe, infra,
- [2] G. TROUILHET, R. CULOS - Acquisition automatique de données, capteurs, interfaces, matériel et logiciel, in Acquisition et analyse de données, U.d.P. - INRP, Paris : U.d.P., 1990, pp 5-58.
- [3] U.d.P. : acquisition de données avec l'ordinateur
- [4] M. AUDE, J.-C. DESARNAUD - Chute libre en classe de première S, in Actes des quatrièmes journées informatique et pédagogie des sciences physiques, Paris : U.d.P. - INRP, 1990, pp 259-265.
- [5] R. RICARD - Mécanique en seconde : étude de la chute libre, in Cours et T.P. de physique et chimie avec ordinateur, Paris : U.d.P. - INRP, 1987, pp 13-20.
- [6] F.M. BLONDEL, J.-C. LE TOUZE, N. SALAME - Ordinateur et activité expérimentale en physique, exemples de mécanique, Bulletin de l'Epi, n°42, 1986, pp 75-82.
- [7] R. JOURNEAUX - Utilisation d'un potentiomètre et d'une interface, Brochure du CARFI, volume 16, L'acquisition et le traitement des données, Versailles : CARFI, 1990, pp 83-84.
- [8] D. BEAUFILS, F. FILIPPI - Le pendule pesant, in Fiches Pratiques d'utilisation de l'informatique et classe de physique et chimie, Paris : U.d.P. - INRP, pp 61-72.
- [9] R. QUER - Pendule de torsion, in Actes des troisièmes journées informatique et pédagogie des sciences physiques, Grenoble : U.d.P., 1988, p. 213

- [10] S. GAZAIX, A. PETERS - Pendule de torsion, guitare et ordinateur, in Actes des troisièmes journées informatique et pédagogie des sciences physiques, Grenoble : U.d.P., 1988, pp 205-212.
- [11] A. MEGEL - La mécanique sur coussin d'air avec une table à numériser, in Actes des quatrièmes journées informatique et pédagogie des sciences physiques, Paris : U.d.P. - INRP, 1990, pp 341-344.
- [12] D. BEAUFILS - Mesurer sur l'image, utilisations de techniques de numérisation pour l'enseignement de la physique, in Actes des quatrièmes journées informatique et pédagogie des sciences physiques, Paris : U.d.P. - INRP, 1990, pp 53-58.
- [13] J.-C. TRIGEASSOU, D. BEAUFILS, J. WINTHER - Méthodes numériques et sciences physiques, in Actes des quatrièmes journées informatique et pédagogie des sciences physiques, Paris : U.d.P. - INRP, 1990, pp 59-128.
- [14] D. BEAUFILS, J.-C. LE TOUZE - Les logiciels Chute et Plan, de l'acquisition de données à la modélisation mathématique, Bulletin de l'EPI n° 1990, pp
- [15] U.d.P. - INRP - Fiches pratiques d'utilisation de l'informatique en classe de physique et chimie, Paris : U.d.P. - INRP, 1990, 203 p.

LOGICIELS ET MATÉRIELS CITÉS

ALUN (logiciel) : alunissage du LEM, CNDP, 1985,

GAMMA (logiciel) : mouvement de particules chargées dans un champ uniforme, CNDP, 1985,

SJJT (logiciel) : déviation de particules positives, CNDP, 1985

Des Ailes pour la Tortue (logiciel + brochure) : CNDP, 1989,

Multiméca (logiciel) : Langage et Informatique, 1989,

Oscillateur Linéaire (logiciel) : disquette U.d.P. n°2,

Oscillateur Harmonique (logiciel) : CNDP et Langage et Informatique, 1989,

Mobile (logiciel) : CNDP, 1988,

Banc (logiciel) : Jeulin,

Chute (logiciel) : Jeulin,

Plan (logiciel) : Jeulin,

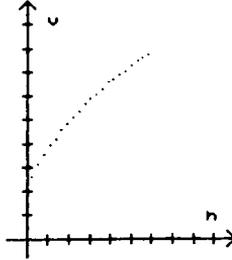
Pendulor (matériel) : dispositif mécanique pour l'étude du pendule pesant, Microlec,

Chronociné (matériel) : chaîne de photo-capteurs, Jeulin,

Le Pendule (logiciel) : CNDP et Langage et Informatique,

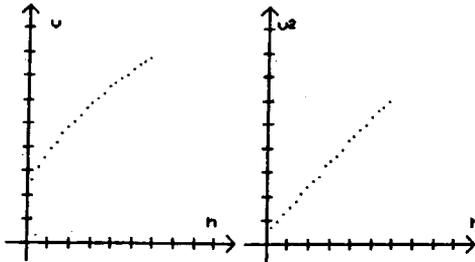
Regressi (logiciel) : Microlec.

- autre groupe : $h = 0,70 ; 0,80 ; 0,90$ m
- les points prennent place, il y a déjà une allure de continuité.
- on revient à : $h = 0,05 ; 0,15 ; 0,25$ m ; continuer jusqu'à 1,05 m ; tous les élèves ont ainsi manipulé.



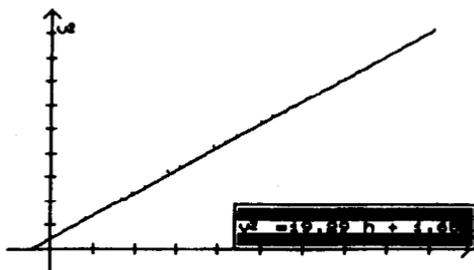
E) Discussion sur la forme de la courbe "passant par" les points : paraît-elle régulière ? Passe-t-elle par l'origine ? A-t-elle une forme simple, droite ou autre ? Puisque la relation $v(h)$ n'est pas du 1er degré, de quel degré peut-elle être ? Quel graphique peut-on faire tracer par l'ordinateur ? Certains élèves proposent $v^2(h)$.

Choisir alors la représentation $v(h)$ et $v^2(h)$: h en U ; v en Y ; v^2 en V. On voit bien que seule la 2e série de points donne une droite.



Pour obtenir le tracé de la droite et son équation, il faut une seule représentation graphique. Revenir alors au menu Espaces1 : effacer U et V par la barre d'espace et sélectionner h en X et v^2 en Y.

Demander le tracé d'une droite moyenne par la commande Régression : on voit apparaître une droite construite sur les points ; on peut avoir l'équation : $v^2 = 19,2 h + \text{constante}$.



Remarque : s'il y a des points nettement en dehors de la droite il faut effectuer leur suppression au préalable.

Discussion sur la valeur 19,2 ($=2g$) et celle de la constante : on peut vérifier $cste = v_0^2 = 2gh_0$ (où $h_0 =$ distance de l'électroaimant à la 1ère cellule) ; conclusion : $v^2 = v_0^2 + 2gh$.

terminer : sauvegarder, sur la même disquette ou sur une autre disquette réservée aux fichiers. Ces résultats serviront pour le T.P. sur les énergies.

Remarques

1) certains élèves peuvent suggérer $v = ah^2 + cste$, cette possibilité n'est pas accessible à l'ordinateur. Il faut donc discuter et leur expliquer leur erreur "à la main".

2) Pour obtenir l'équation d'une droite d'une manière moins "boite noire", avant de demander la régression il est intéressant d'utiliser les commandes Echelles et Tableau pour relever quelques valeurs, qui permettent aux élèves de rechercher "leurs" paramètres a et b. L'utilisation du traceur de courbes (commande Fonction) permet l'ajustement de a et b par "tâtonnement" à partir des valeurs des élèves. On voit qu'il s'agit alors d'une estimation et non de valeurs "sûres".

3) Il faut souligner l'intérêt de l'ordinateur permettant d'avoir rapidement une série de valeurs et de s'appuyer sur les représentations graphiques très variées pour analyser les données. Il faut noter aussi qu'il est nécessaire de montrer des représentations "difficiles" à analyser comme $v(h)$. Les élèves sont alors plus actifs, le T.P. est moins directif et peut se faire en une seule séance.

4) Des résultats peu concluants à l'écran proviennent principalement de la mauvaise position des cellules ou d'une erreur de lecture de ces positions.

CHUTE LIBRE D'UNE BILLE

TC, TD

FICHE 3

Lois horaires

I - OBJECTIF ET PLACE PAR RAPPORT AU COURS

Il s'agit d'une séance de T.P. de 1h30 en 1/2 groupe (18 élèves). L'objectif est l'établissement de la loi horaire $v = f(t)$ et l'obtention de la valeur de l'accélération du mouvement. Cette séance se situe après les cours de cinématique où toutes les notions générales ont déjà été présentées.

II - DEROULEMENT DE LA SEANCE

* Introduire et positionner le problème par rapport à l'acquis de Première ($v^2 = 2gh + v_0^2$) : il s'agit ici de s'intéresser au déroulement dans le temps. On se pose les questions suivantes :

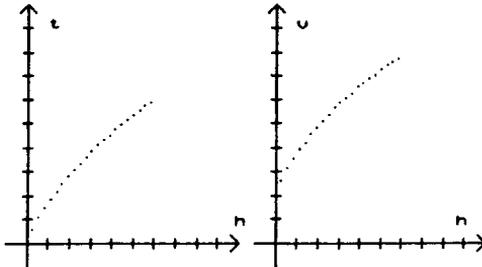
- quelle est la distance parcourue au bout d'un temps t ,
- quelle est la vitesse atteinte pendant le même temps.

* Présenter aux élèves le dispositif expérimental : bille, réglette, électroaimant et cellules. (Insister sur l'origine et le sens de l'axe des z).
Présenter le dispositif informatique.
Introduire le principe d'acquisition des données.
Lancer le programme et vérifier les capteurs.

* Justifier l'apparition sur l'écran des espaces (t, h) et (v, h) : v et h sont des nombres positifs, t et v sont les grandeurs mesurées "en fonction" de h .

* Réaliser une première acquisition, dégager le fait que 3 points ne suffisent pas pour conclure.

* Faire réaliser d'autres acquisitions par les élèves : ceux-ci viennent par groupes de 4, 2 à l'ordinateur (entrée des valeurs de h , déclenchement de l'acquisition, et report des valeurs numériques obtenues pour l'ensemble de la classe), 2 autres au dispositif expérimental.

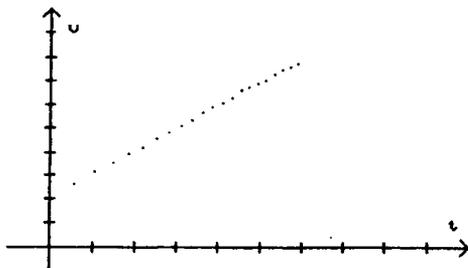


Note : Les directives sont données au 1^{er} groupe qui a également pour charge de les expliquer au groupe suivant. Chaque groupe fait donc une acquisition : les points se placent au fur et à mesure dans les 2 espaces (t, h) et (v, h) .

* Après discussion avec les élèves sur le choix du meilleur graphe pour l'étude du mouvement, leur demander de tracer le graphe $v = f(t)$ sur papier millimétré à l'aide des mesures relevées, et de calculer (une fois la droite obtenue) le coefficient directeur. Discuter avec eux, sur la valeur de v à l'origine.

* Revenir à l'ordinateur et à l'aide du menu Espaces1, demander la représentation de l'espace (v,t) : t en X et v en Y.

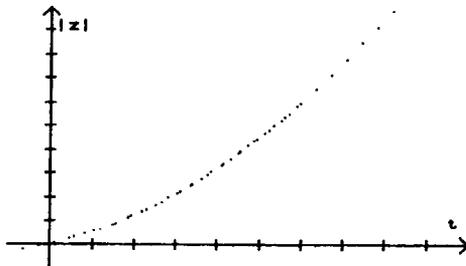
* On peut alors utiliser la commande Regression (menu Traitement) pour obtenir une estimation (automatique et rapide) des paramètres a et b , que l'on peut comparer aux valeurs trouvées par les élèves. Amener ainsi l'idée que $a = g$.



* Demander aux élèves de déterminer alors l'équation $h(t)$.

* Puis, à l'aide du menu Espaces1, demander la représentation de l'espace (t, h) , ou $(t, |z|)$;

* A l'aide de la commande Fonction (menu Modèle), choisir la fonction $y = ax^2 + bx + c$. Entrer les valeurs trouvées par les élèves. On obtient le graphe suivant :



III QUELQUES REMARQUES

Lors de l'acquisition des données, la principale source d'erreurs provient du mauvais positionnement des capteurs (ou de lecture du repérage).

Il convient également de bien préciser aux élèves de ne pas déplacer la colonne (au détriment de la verticalité) et de ne pas toucher le capteur 0 qui sert de déclenchement, donc d'origine des dates.

Si le tracé contient des points "incohérents" on peut les supprimer à l'aide de la commande Suppression du menu Traitement.

Il faut bien sûr sauvegarder les mesures et donner un nom au fichier des élèves pour pouvoir le réutiliser la séance suivante.