

UTILISATION DE CALCULATRICES GRAPHIQUES PROGRAMMABLES EN TRAVAUX PRATIQUES DE SCIENCES PHYSIQUES

Dominique COURTILLOT, Nicole PITHON

Nous voulons montrer que les calculatrices programmables sont des outils informatiques à part entière et qu'elles constituent une aide précieuse pour intégrer le nouvel outil informatique dans notre enseignement. Nous examinerons donc aussi le rapport entre ordinateur et calculatrice.

Nous ne parlerons pas de l'importance de l'informatique en sciences, sujet abordé dans de nombreux articles, mais de la spécificité des calculatrices programmables que nous nommerons machines de poche.

Nos préoccupations sont essentiellement d'ordre pédagogique, ainsi nous voudrions montrer la nécessité d'enseigner à des fins scientifiques l'utilisation de ces outils qui bien trop souvent servent d'"antisèche" aux élèves.

I - REFLEXIONS RESULTANT D'UNE PRATIQUE EN CLASSES DU SECOND CYCLE ET DU SUPERIEUR.

L'ordinateur est un outil de plus dans notre laboratoire. Comme l'oscilloscope, il doit être introduit progressivement. Il faut donc en décomposer les différentes tâches, les faire analyser, comprendre et exécuter par les élèves. Nous réalisons cette progression de la façon suivante :

1. En classe de seconde

En cours, le professeur effectue quelques expériences très simples assistées par ordinateur, en veillant à ne pas dépasser la compréhension des élèves ; en TP, l'ordinateur sert essentiellement de calculateur et de traceur de courbes. Les élèves effectuent les calculs sur leur machine de

poche, calculs qui seront effectués parallèlement sur un ordinateur central ce qui permet un travail de synthèse, de vérification. Un seul poste par salle suffit pour une telle utilisation. Une ou deux séances de TP peuvent être prévues en salle équipée de 8 postes avec acquisition de données, dont l'une doit servir à montrer le rôle d'un ordinateur et surtout ses avantages par rapport à nos autres outils. Pour ce niveau, les logiciels du commerce sont encore parfois trop élaborés pour des élèves moyens.

L'exploitation des mesures, la représentation graphique des mesures doit se faire à la main et à la machine.

Le savoir informatique à acquérir en classe de seconde est essentiellement la programmation de calculs répétitifs.

2. En première et terminale scientifique

La plupart des travaux pratiques se font classiquement, les mesures expérimentales sont traitées, comme en seconde, avec les machines de poche et un ordinateur central, cinq à six séances peuvent se dérouler en salle à 8 postes. Les séances sont préparées pour permettre aux élèves de s'entraîner à l'avance à la programmation des calculs, et pour les plus motivés, d'élaborer déjà de petits programmes permettant d'exploiter très rapidement les mesures. Ces programmes peuvent être repris dans l'option informatique que certains suivent.

Le savoir informatique de base à acquérir est l'exploitation des mesures, les représentations graphiques. Les élèves devraient sortir des salles de travaux pratiques avec leurs courbes expérimentales déjà exploitées.

En travaux dirigés, nous abordons quelques organigrammes de méthodes numériques. Des expériences de plus en plus élaborées sont faites en cours où l'ordinateur est aussi utilisé en simulation, banque de données, etc.

3. Dans le supérieur

Tous les TP devraient être effectués en salle à 8 postes équipés de cartes d'acquisition de données.

En travaux dirigés d'informatique, la plupart des méthodes numériques sont pratiquées d'abord sur machines de poche. Cette étape nous semble indispensable puisque, dans les concours, les élèves doivent

posséder ces méthodes dans leur machine. La traduction des organigrammes en Turbo Pascal, langage officiel en classe préparatoire, se fait ensuite sans aucune difficulté.

En cours, l'ordinateur est bien sûr très souvent sollicité : traceur de courbes, simulation, banque de données, la plupart de ces fonctions peuvent se faire sur machine de poche.

II - EXPLOITATION DE MESURES EN TRAVAUX PRATIQUES (TP) : MODELISATION.

Nous nommons TP "classique" un TP dont le matériel et le déroulement ne font pas appel à l'ordinateur, les moyens informatiques intervenant dans l'exploitation des mesures. La structure d'un tel TP est en général la suivante :

- description et mise en place de l'expérience,
- mesures conduisant à une série de couples (x, y) dans des unités pratiques.
- recherche d'un modèle, ceci consistant à chercher le bon changement de variables conduisant à de nouveaux couples (X, Y) dépendant des couples (x, y) . Dans la plupart des cas, c'est une relation linéaire que l'on cherche.

Nous allons montrer sur des exemples, l'importance des machines de poche dans la troisième étape, la plus importante pour la compréhension de toute démarche scientifique.

La compréhension de ce mécanisme de recherche de modèle nous semble indispensable comme étape d'apprentissage avant d'entreprendre des expériences entièrement assistées par ordinateur. En effet, les logiciels gérant ces expériences de lycée sont assez sophistiqués, les méthodes de calcul n'apparaissent pas clairement et les modèles proposés tiennent parfois, pour les élèves, du miracle ou de la magie.

En TP "classique", les élèves effectuent les calculs répétitifs sur leurs machines. Un ordinateur est toujours présent dans la salle, il sert essentiellement de traceur de graphes. Les élèves les plus rapides entrent leurs mesures, après calculs, ce qui constitue une excellente motivation à la rapidité et à l'efficacité. Nous avons pour principe de toujours conclure collectivement la séance à partir des mesures d'un groupe. L'exploitation individuelle peut être terminée à la maison.

III - QUELQUES EXEMPLES EN CLASSE DE SECONDE : TP "CLASSIQUE".

Pour ces classes très hétérogènes, nous travaillons sur la base de machines programmables non graphiques. Certes, certains élèves possèdent déjà des machines plus performantes, on peut déjà en exploiter certaines possibilités tout en veillant à ne pas exclure ou démotiver les autres élèves, ce qui est un réel danger.

III-1. Première séance de TP : utilisation des machines de poche.

Nous consacrons une séance complète à la démarche générale d'un TP, au rôle des calculateurs et à l'utilisation des machines programmables. Les savoir-faire que nous demandons aux élèves sont les suivants :

- utilisation de quelques touches : nous insistons sur les problèmes que posent, à l'entrée des valeurs et à l'affichage manuel des résultats, les notations des machines qui affichent par exemple : $2.14 \text{ E}03$ ou $2.14 \dots 03$ pour ce que l'on écrit à la main $2,14 \cdot 10^3$ et les erreurs que cela entraîne ;
- changement de mode d'affichage : mode normal, scientifique et ingénieur. Cela permet de rappeler la notion de chiffres significatifs ;
- changements d'unités : degrés-radians, heures-minutes-secondes ;
- régression linéaire qui est toujours incorporée aux machines les plus simples et qui ne nécessite donc pas de programmation proprement dite. On utilise le calcul statistique à deux variables ;
- programmation d'un calcul répétitif : passage en mode écriture, édition du programme, passage en mode exécution et exécution.

III-2. Programmation de calculs répétitifs, en mécanique.

Remarque : bien que la mécanique ne figure plus aux nouveaux programmes de seconde, nous pensons que ces expériences serviront pour les classes supérieures et pour les nouvelles options.

Il nous semble indispensable d'exploiter en TP les mesures du jour (et non pas des documents photocopiés à l'avance), ceci n'est possible bien souvent, et surtout en mécanique où les calculs sont longs, que grâce à l'outil informatique.

Le premier travail des élèves consiste en de nombreux calculs de vitesses sur des documents comportant des points, soit M_i , représentant
D. COURTILLOT, N. PITHON LA REVUE DE L'EPI

les positions d'un mobile à des instants successifs séparés par une durée constante, soit δt . La vitesse de chaque point se calcule en encadrant le point considéré par deux points voisins, soit :

$$V_i = \frac{M_{i-1}M_{i+1}}{2 \delta t} = \frac{D_i}{2 \delta t}$$

Les distances D_i se mesurent en général en cm sur les documents et l'intervalle de temps (δt) entre deux positions est en général mesuré en ms. Les élèves doivent remplir un tableau permettant de calculer les normes des vitesses (et des accélérations) pour les diverses positions. Pour de tels TP, il n'est pas rare de voir effectuer ces calculs plusieurs fois, sans esprit de synthèse, sans simplifications préalables. Dans ce cas, le calcul est tout simplement :

$$V_i \text{ (m/s)} = \frac{D_i \text{ (cm)} \times 10}{2 \delta t \text{ (ms)}}$$

Cette expression est demandée aux élèves.

Voici, en résumé, un exemple de fiche que l'on donne aux élèves, si possible à l'avance :

- description de l'expérience et des objectifs ;
- tableau à remplir ;
- préparation des calculs : établir un programme contenant, en entrées les D_i (cm) et δt (ms) et en sorties les V_i (m/s) ;
- exploitation, confrontation éventuelle expérience-théorie, etc.

Pour le programme, nous enseignons à en écrire d'abord l'organigramme en français, à des niveaux différents, suivant la motivation des élèves. Ce langage ne fait pas intervenir le langage propre à chaque machine, que nous qualifions de "cuisine interne". Voici deux exemples :

- niveau 0, sans boucle, la valeur numérique de δt est écrite dans le programme et ne peut donc changer en cours d'exécution.
 - entrer et stocker un D (cm) ;
 - mémoriser la valeur de δt (ms) ;
 - calculer V
 - afficher V (m/s).

- niveau 1, introduire δt en entrée et faire une boucle avec un test de fin de calculs.
 - entrer et mémoriser la valeur de δt en ms
 - ① : entrer et stocker la valeur de D en cm
 - calculer V en m/s.
 - afficher V.
 - effectuer un test de fin de boucle et retourner éventuellement en début de boucle, en ① .

Dans d'autres TP de mécanique, il s'agit de déterminer la position du centre de masse d'un système, ce qui donne aussi l'occasion de programmer des calculs.

III-3. Recherche de modèle : la régression linéaire en mécanique et en électricité.

La recherche se fait d'abord collectivement. Prenons l'étude du ressort. Les élèves mesurent une force, soit T, et la longueur du ressort, soit L. Un groupe entre ses valeurs expérimentales dans l'ordinateur central pendant que les autres commencent le graphe de $T = f(L)$ sur papier millimétré. La loi $T = k * (L - L_0)$ apparaît clairement, puis à l'aide de leurs machines de poche, les groupes déterminent k en utilisant la régression linéaire sur toutes les mesures. Soit k_m la valeur obtenue par cette méthode. Le travail personnel des élèves reste le tracé du graphe et la détermination graphique de la constante k (technique à posséder en seconde). Soit k_g cette seconde constante qui diffère souvent de la première tout en en restant voisine. Une réflexion est alors menée sur la différence entre ces deux valeurs de k, écart qui doit se réduire considérablement après avoir retiré les éventuels points aberrants que l'on ne peut détecter que sur le graphe : c'est une démarche importante à faire comprendre aux élèves. A cette occasion, nous montrons aussi que la machine peut linéariser n'importe quels couples de valeurs (figure 1) et qu'il y a donc toujours une décision "humaine" à prendre sur la signification de résultats.

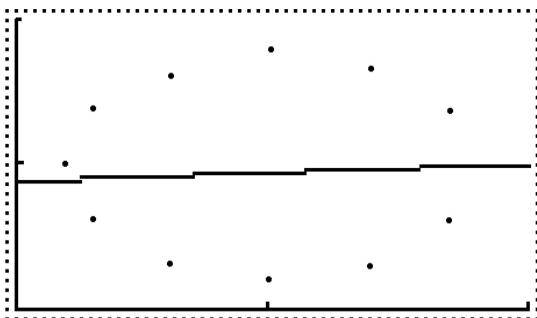


Figure 1 :
la machine linéarise une ellipse !

La technique de régression linéaire est utilisée plusieurs fois en électricité pour les dipôles. Nous rencontrons des droites passant "presque" par l'origine. Vient alors la décision de la faire passer par l'origine, c'est à dire d'identifier à zéro l'un des coefficients donnés par la machine qui ne connaît pas le zéro. Nous abordons ainsi un autre problème lié aux machines, qu'elles soient de poche ou plus importantes.

Figure 2 : caractéristique d'un résistor

```

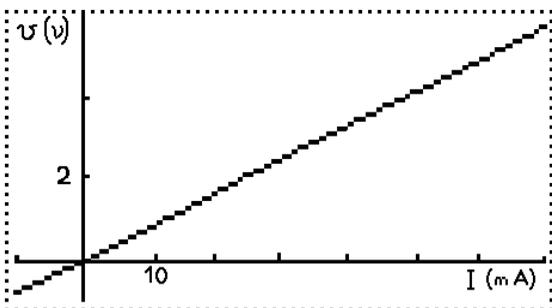
I (mA)  12,5 24,5 37 50 62,5
XXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXX
U (V)   1  2  3  4  5
    
```

$$U = b I + a$$

$$a = 2,84 \cdot 10^{-2} \quad U(V) = b \cdot 10^3 I(A) + a$$

$$b = 7,96 \cdot 10^{-2}$$

Il faut prendre : $a = 0$ car le dipôle est passif ; d'où $R = 79,6 \Omega$



En fin d'année, il est possible, suivant le niveau des classes, d'aborder de manière plus poussée la modélisation sur des dipôles qui s'y prêtent bien, comme la diode.

IV - QUELQUES EXEMPLES EN CLASSES SCIENTIFIQUES.

Pour ces classes, nous travaillons sur des machines de poche graphiques, vivement conseillées, qui font le même travail que l'ordinateur central. Un nouveau savoir-faire apparaît : entrer des couples de points en vue d'un affichage graphique et d'une éventuelle linéarisation. Ceci demande une préparation de la machine consistant à définir l'ordre de grandeur des mesures et de leur intervalle de variation. Ce travail étant fait, dans bien des cas les élèves peuvent suivre à l'affichage graphique sur leurs écrans personnels, l'évolution des mesures et immédiatement reprendre celles qui paraissent aberrantes. Nous avons constaté que, ce faisant, les élèves effectuent les mesures avec davantage de soin car ils peuvent visualiser immédiatement la cohérence des résultats. Ceci ne nécessite aucune programmation.

Progressivement, au cours des années, nous abordons la programmation autorisant l'exploitation de plus en plus rapide des mesures, ce qui nous permet de décomposer, reproduire et donc comprendre les différentes tâches des logiciels utilisés.

En ce qui concerne le travail personnel des élèves, il nous semble que le tracé manuel des graphes doit être progressivement abandonné, les machines réalisant vite et mieux ce travail, au profit d'une plus grande exigence dans l'analyse des résultats. Certains diront qu'alors les élèves ne sauront plus faire de graphes à la main, ce à quoi nous répondons que le tracé à la machine ne se fait pas tout seul, qu'il nécessite aussi un savoir-faire, donc un apprentissage. Nous pouvons aussi répondre à ces critiques en évoquant tous les savoir-faire perdus, comme le calcul de l'extraction d'une racine carrée à la main, le calcul de logarithmes avec les tables, etc.

IV-1. Domaine de validité d'un modèle : réfraction de la lumière.

Considérons le TP "classique" consistant à rechercher la loi entre l'angle d'incidence i_1 et l'angle de réfraction i_2 à la traversée de deux milieux d'indice relatif N . Prenons, pour fixer les idées, la limite entre l'air et le verre.

Les élèves, faisant varier i_1 de 0 à 90° entrent dans leur machine leurs valeurs des couples (i_2, i_1) : la figure 3 ci-contre est une copie
 D. COURTILLOT, N. PITHON LA REVUE DE L'EPI

d'écran d'une machine de poche. Nous distinguons alors très nettement la loi linéaire pour les petits angles.

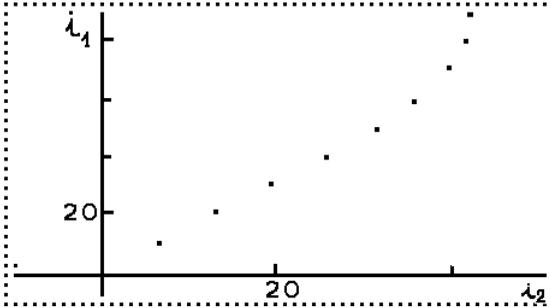
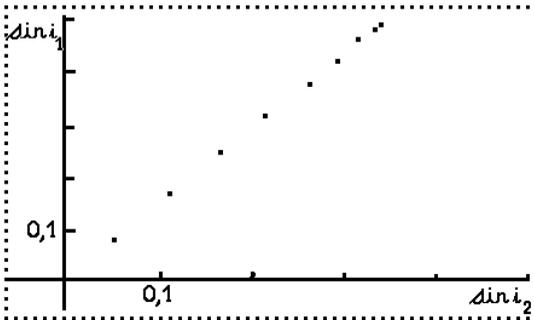


Figure 3

Vient ensuite la loi pour les grands angles. En fonction de leur niveau, les élèves peuvent essayer divers changement de variables, jusqu'à trouver la loi de proportionnalité $\sin(i_1) = N \sin(i_2)$. Ils obtiennent à l'écran les points représentés en figure 4. Signalons que cette recherche peut se faire directement à la machine, sans aucun calcul manuel.

Figure 4 :
avant
linéarisation

La figure 5 est une copie d'écran après linéarisation, la pente de la droite donnée par la machine est de 1,49, c'est l'indice du milieu par rapport à l'air.

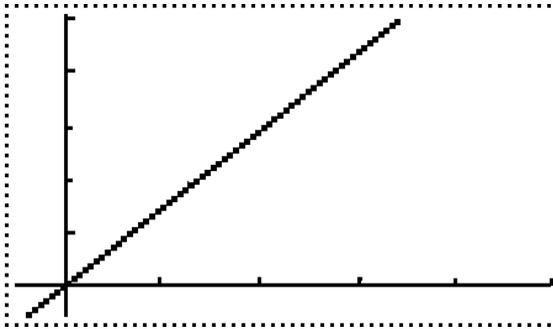
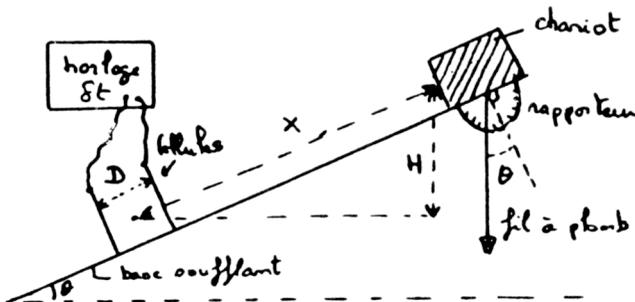


Figure 5 :
après
linéarisation, la
pente de la droite
donne : $N = 1,49$,
indice du milieu
par rapport à
l'eau

Cette démarche nous permet de bien faire comprendre aux élèves le choix des variables que l'on porte sur les axes d'un graphe. Bien trop souvent, ce choix est imposé : tracer $\sin(i_1)$ en fonction de $\sin(i_2)$, par exemple, et pourquoi pas les tangentes ? Les élèves peuvent alors essayer. La séance de TP se transforme en une véritable recherche que les élèves apprécient et qui, à notre avis, contribue à la compréhension. Dans les logiciels que nous utilisons ensuite, les élèves comprennent mieux la signification des nombreux choix de modélisation. Dans ce cas encore, la pratique individuelle nous semble très importante, l'ordinateur plus puissant travaille plus vite mais pas différemment.

IV-2. Exploitation de mesures par programmation : chute sur un banc incliné, simulation

L'expérience est représentée ci-dessous. Le mobile est abandonné sans vitesse initiale, la vitesse acquise V en fonction de la distance parcourue X (cm) est mesurée par deux cellules photoélectriques distantes de D (mm). Soit δt (ms) la durée du passage entre les cellules.



Soit à rechercher la relation entre V et H , hauteur de chute. Le tableau de mesures comporte les couples $(X, \delta t)$, il faut donc effectuer des changements de variables pour passer à V^2 et H . Pour effectuer les calculs il faut mesurer l'angle θ d'inclinaison du banc.

Les calculs sont : $V^2 = (D/\delta t)^2$ et $H = X * 0.01 * \sin(\theta)$. Nous faisons régulièrement varier X , par exemple de 40 à 100 cm par saut de 5 cm.

La loi à vérifier dans ce cas est $V^2 = 2gH$.

Le programme que nous établissons avec les élèves a pour but de réduire au maximum les entrées, il nous donne très rapidement une valeur pour g , champ de pesanteur. En effet, l'un des objectifs de ce TP, outre la vérification du théorème de l'énergie cinétique, est de montrer la nécessité d'une mesure précise de θ , puisqu'une très faible variation de cet angle provoque une importante modification de g . Il faut donc pouvoir reprendre les calculs très rapidement avec les mêmes données expérimentales, en modifiant arbitrairement la valeur de θ . Certes, une autre méthode consisterait à affiner la mesure de l'angle, mais celle-ci reste difficile dans les laboratoires de lycée et nous avons volontairement, dans ce TP, renoncé à cette précision pour aborder, par simulation, un point important de la démarche expérimentale : l'influence de la précision des mesures sur un résultat.

Remarquons qu'il est aussi possible de modifier la distance des cellules, ceci nécessite alors une nouvelle série de mesures, cette étude est effectuée dans un précédent TP dont l'objectif est de faire comprendre la notion de vitesse instantanée comme limite d'une vitesse moyenne.

La structure de base du programme comporte deux parties : l'introduction des mesures et leur exploitation. Dans la plupart des machines de poche, ceci nécessite deux programmes différents pour des raisons de technologie (touches multi-fonctions essentiellement). Nous n'indiquerons que la structure de base de l'organigramme, ce programme pouvant être écrit à de nombreux niveaux.

Première partie : entrée des mesures.

- mémorisation du pas de variation de X , soit P ,
- initialisation de X à la valeur X minimum,
- boucle : entrée des valeurs de δt , mémorisation des couples $(\delta t, X)$.

Deuxième partie : exploitation des mesures.

- entrée des constantes D et θ ,
- calcul et mémorisation des couples (V^2 , H),
- affichage graphique des couples (facultatif),
- linéarisation des couples,
- affichage de g.

Nous sommes à la disposition des collègues désirant obtenir le détail de ces programmes, en particulier nous donnons à nos élèves une structure qui s'applique à tous les TP. Signalons aussi que ce TP est un bon exemple de ce qu'on peut réaliser en collaboration avec les collègues enseignant l'option informatique en classe scientifique.

Signalons que ces expériences peuvent être entièrement automatisées (déclenchement de la chute, mesure des durées, exploitation des mesures), les élèves ayant analysé longuement les différentes étapes, sont, nous semble-t-il, d'autant plus émerveillés par la rapidité d'exploitation d'EAO, tout en ayant les moyens d'en vérifier les conclusions.

IV-3 Etude d'un condensateur, approche de la fonction exponentielle.

En classe de première, on étudie la décharge d'un condensateur (de capacité C), initialement porté au potentiel V_0 , dans une résistance (R).

La résistance est suffisamment grande pour que le condensateur se décharge lentement et que l'on puisse à l'aide d'un chronomètre mesurer la tension U en fonction du temps t. Les mesures ci-dessous correspondent à une capacité de 2200 μF et une résistance de 10 k Ω .

t(s)	0	5	10	15	20	30	40	50	60	70	80	90	100
U(v)	5	4	3,2	2,7	2	1,4	0,9	0,6	0,38	0,25	0,14	0,1	0,05

La figure 6 est une copie d'écran représentant ces couples de points (t, U), elle n'est pas directement linéarisable. Certaines machines (ou logiciels) proposent une régression exponentielle, il s'agit de trouver les coefficients a et b tels que la courbe $U = a e^{bt}$ (ou $a b^t$, pour certaines machines) s'adapte le mieux possible aux points expérimentaux. Pour les mesures précédentes on trouve, après éventuellement remise en forme des coefficients : $U(t) = 5,1 e^{-t/23}$.

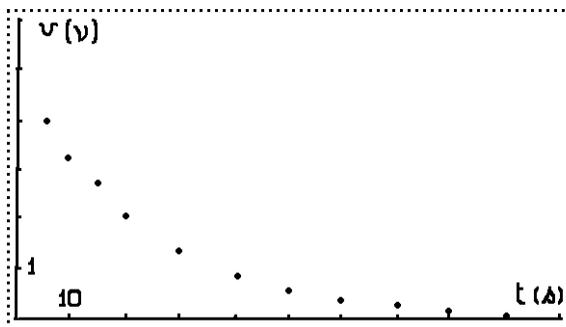


Figure 6

Les élèves de première ne connaissent pas les propriétés mathématiques de cette fonction exponentielle :

- On peut tracer la tangente à l'origine et déterminer graphiquement l'intersection avec l'axe des abscisses qui conduit à la constante de temps : $T = 1/23$ dans notre exemple. (figure 7).
- On peut faire tracer point par point la dérivée par méthode numérique et vérifier qu'en chaque point il y a proportionnalité entre U et sa dérivée, propriété essentielle (pour nous physiciens) de cette fonction :

$$\frac{dU}{dt} = k U \quad (k < 0 \text{ dans ce cas}).$$

- On peut tracer l'intensité qui traverse la résistance, $I = U/R$, et montrer que l'intégrale de I représente la charge qui traverse le circuit.

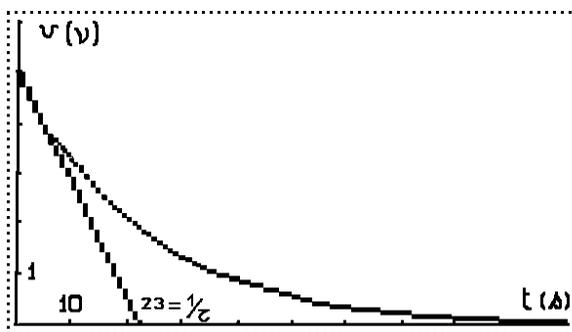


Figure 7

Cet exemple, rapidement décrit, montre comment on peut introduire des notions mathématiques, comme la dérivée ou l'intégrale,

par une approche expérimentale, que chaque élève peut aborder individuellement sur sa machine de poche.

V- A PROPOS DU MATERIEL

Le choix d'une machine pour les élèves n'est pas facile. Le marché, sans cesse changeant, nous envahit de modèles très variables quant aux possibilités et aux prix. Il est souhaitable de travailler en équipe avec tous les professeurs concernés.

Il nous semble aussi urgent d'étudier sérieusement l'utilisation de ces machines en examen, leurs possibilités très inégales ne donnant pas les mêmes moyens à chaque élève. Si cette réflexion n'est pas menée, nous en viendrons peut-être à interdire l'usage des machines en examen, ce qui aboutirait à se priver de méthodes pédagogiques et scientifiques intéressantes.

Notre expérience nous a montré qu'il n'est pas nécessaire que tous les élèves aient les mêmes machines. En effet, en prenant l'habitude de travailler en utilisant des termes généraux d'informatique, les élèves doivent pouvoir facilement repérer les touches correspondantes sur leurs machines.

Pour les professeurs et les élèves, nous conseillons actuellement des machines du type Casio 7000, 7700, 8500, 8800 ou Texas Instruments 81, 82, 85. Certes, chaque année, à prix égal, de nouvelles machines apparaissent et il est facile (plus ou moins) de s'y adapter, mais pas du tout indispensable de les posséder. Les élèves préfèrent souvent les nouveaux produits et sont toujours disponibles pour nous en montrer les nouvelles possibilités.

Toutefois, nous regrettons que les constructeurs, poussés par la nouveauté, ne cherchent pas plus de cohérence entre les modèles, ce qui faciliterait notre travail de formation. Nous regrettons aussi que ces machines soient souvent conçues surtout pour les mathématiques et moins explicitement pour les sciences expérimentales.

VI CONCLUSION : APPORT PÉDAGOGIQUE DES MACHINES DE POCHE.

Les exemples que nous venons d'aborder montrent bien que les machines de poche sont des outils irremplaçables. En TP, elles

D. COURTILLOT, N. PITHON LA REVUE DE L'EPI

permettent une démarche individuelle de chaque élève, indispensable pour la compréhension progressive de la recherche et des logiciels en sciences. En cours ou en exercices, elles permettent de résoudre rapidement des problèmes. Une machine dont les pas de mémoire sont ainsi utilisés ne laisse plus de place à l'introduction des textes d' "antisèche".

Une sérieuse réflexion devrait être menée par les professeurs sur le contenu des machines autorisées aux examens, réflexion que l'on ne peut dissocier de leur remarquable apport pédagogique.

Dominique COURTILLOT
Professeur de Sciences Physiques en Sup TA
Lycée J.B. Dumas à Alès

Nicole PITHON
Professeur de Sciences Physiques
Lycée P. Lamour à Nîmes