

La modélisation dynamique aidée par ordinateur, outil didactique en physique

par Silvia PUGLIESE JONA,
Istituto Tecnico Industriale «C. Olivetti», Ivrea, Italie

1. INTRODUCTION

Dans cet article je m'intéresserai aux possibilités didactiques de la modélisation dynamique en physique à l'école secondaire. L'intérêt pour l'application de cette technique dans le milieu scolaire date des années 70 avec les premières implantations sur les calculettes programmables de poche [1, 2]. Il s'est développé ensuite, surtout en Angleterre, où le premier logiciel pour PC ayant pour but de faciliter l'écriture et le calcul des modèles, apparut en 1984 [3]. La principale caractéristique de ce logiciel est que l'utilisateur s'occupe seulement d'écrire l'algorithme de résolution de son problème et le logiciel s'occupe de tous les aspects d'organisation du calcul (sortie des résultats en tables ou graphiques, etc...). Ce premier logiciel a bientôt été suivi, dans différents pays et pour différents types d'ordinateurs, par d'autres semblables. En même temps, on s'est aperçu qu'il était aussi possible de programmer les tableurs (tels que LOTUS 123, EXCEL, etc...), à l'origine développés pour des utilisations tout à fait différentes, pour l'exécution des calculs récurrents typiques de la modélisation dynamique. Le couple «modélisation dynamique» et «didactique des sciences» n'est donc pas une nouveauté mais, à juger du petit nombre d'articles sur ce sujet dans les journaux spécialisés, sa diffusion semble n'être pas très grande.

J'espère réussir à démontrer que la modélisation dynamique assistée par ordinateur a beaucoup à offrir pour l'apprentissage de la physique. Elle peut donner aux élèves, même assez jeunes, des occasions pour :

- se mesurer avec des problèmes de physique plus complexes, intéressants et plus réalistes qu'à l'ordinaire,
- formuler des hypothèses sur les causes et les modalités de l'évolution des phénomènes, en contrôler aisément les conséquences et en vérifier la vraisemblance,

- enrichir leur expérience scolaire à travers un travail actif et stimulant, qui complète l'enseignement traditionnel.

2. LES MODÈLES DYNAMIQUES

Les modèles dynamiques auxquels je m'intéresserai sont essentiellement des algorithmes où la succession des valeurs d'une ou de plusieurs variables dépendantes est calculée en faisant varier à petits pas la valeur d'une variable indépendante. Du point de vue mathématique, il s'agit d'écrire des relations de type différentiel entre les variables et puis de les résoudre avec des méthodes d'intégration numérique. Si on indique la variable indépendante avec la lettre X , le schéma général du calcul est le suivant :

- 1 - On établit les valeurs initiales de toutes les variables.
- 2 - On calcule les nouvelles valeurs des variables dépendantes pour un incrément dX de la variable X .
- 3 - X devient $X + dX$.
- 4 - Tant que la condition préfixée de sortie du calcul n'est pas satisfaite on revient au point 2.

En physique, l'exemple le plus simple et immédiat est l'application de cet algorithme à l'étude du mouvement. Dans les problèmes de mouvement la variable indépendante est le temps T :

- 1 - On établit :
 - les valeurs de la coordonnée spatiale X , de la vitesse V , de l'accélération A à l'instant $T = 0$,
 - la valeur initiale du temps T et la valeur du pas de calcul dT .
- 2 - X devient $X + V \cdot dT$
 V devient $V + A \cdot dT$.
- 3 - Si A est variable (si elle dépend de X ou V), on calcule la nouvelle valeur de A .
- 4 - T devient $T + dT$.
- 5 - On revient au point 2 tant que la condition de sortie n'est pas satisfaite.

L'intérêt didactique réside dans la possibilité d'effectuer des calculs sur des phénomènes physiques qui peuvent être assez compliqués, avec un

minimum de connaissances mathématiques, mais en utilisant des concepts physiques importants :

- des définitions et lois de la physique bien connues (par exemple, X devient $X + V \cdot dT$, V devient $V + A \cdot dT$, $A = F/M$, etc...),
- des hypothèses, formulées selon le phénomène qu'on est en train d'étudier, sur la loi de variation d'une certaine grandeur clé (par exemple, la force ou l'accélération : $A = \text{constante}$, ou $A = -K \cdot X/M$, ou $A = -K \cdot V/M$, etc...).

Du point de vue qui nous intéresse, c'est à dire l'apprentissage de la physique, il n'est pas nécessaire que les élèves sachent que ce qu'ils sont en train de faire est une opération mathématique aussi complexe que l'intégration d'une équation différentielle ! En effet, mon expérience m'a montré que les élèves s'emparent très naturellement de la logique sous-jacente à la suite de calculs algébriques qui composent les modèles, y compris la logique typiquement informatique du bouclage autour d'une succession de passages arithmétiques.

Ayant affaibli les difficultés mathématiques de la résolution des problèmes, l'attention se concentre sur l'aspect physique des phénomènes qu'ils représentent. Supposons, par exemples, que des jeunes élèves qui ont étudié les lois de Newton observent dans le laboratoire de physique ou dans la vie quotidienne les oscillations d'une masse attachée à un ressort. Comment arriver à relier le mouvement alternatif de la masse aux forces ? Ordinairement ils ne possèdent pas les outils mathématiques pour le faire et la question doit être renvoyée. C'est dommage, parce que leur curiosité est aujourd'hui éveillée et parce que, bien qu'ils soient déjà capables de comprendre la nature de la force et d'exprimer correctement sa dépendance fonctionnelle avec le déplacement de la masse, la majorité ne parviendra jamais à maîtriser les techniques de calcul nécessaires pour trouver la solution analytique du problème. Le passage de la loi de la force, aussi simple qu'elle soit, à la loi du mouvement sera perdu pour la plupart des élèves et, avec cela, une occasion de mieux comprendre l'importance d'une loi physique fondamentale.

Avec l'aide d'un micro-ordinateur, il est très facile d'introduire dans le modèle dynamique une hypothèse sur la nature physique de la force qui modifie le mouvement de la masse et d'en calculer les positions successives. Le contrôle de la vraisemblance de l'hypothèse est presque immédiat. Le modèle dynamique devient alors un instru-

ment pour l'exploration, la modification ou la confirmation des idées des élèves.

Bien entendu, le professeur doit savoir que l'algorithme utilisé peut poser des problèmes. L'algorithme du mouvement décrit ici est la méthode d'intégration numérique nommée «méthode d'Euler» : en effet, il s'agit d'un algorithme Runge-Kutta d'ordre zéro. Sa précision dépend fortement de la petitesse du «pas de calcul» dT . Les problèmes que cela comporte sont bien connus : un pas trop grand peut donner des résultats invraisemblables ou parfois carrément absurdes (par exemple divergents), mais un pas trop petit signifie un temps de calcul long. Dans certains cas on peut augmenter la précision de l'algorithme sans trop le compliquer en y introduisant des grandeurs moyennes (par exemple, la vitesse moyenne dans l'intervalle de temps dT), ce qui équivaut à écrire un Runge-Kutta d'ordre un. Mais on ne doit pas aller plus loin que cela pour ne pas perdre la simplicité qui fait la force didactique du modèle dynamique.

3. APPLICATIONS DANS LE MILIEU SCOLAIRE

Heureusement, à l'école il y a un grand nombre d'applications significatives pour lesquelles l'extrême rapidité et précision de calcul ne sont pas indispensables. Je décrirai par la suite quelques applications faites dans mes classes, qui ont donné à mes élèves des expériences d'apprentissage bien acceptées et utiles pour leur formation générale en physique.

J'enseigne la physique dans les deux premières classes d'un lycée technique italien. Mes élèves ont 14 et 15 ans, et font, pour la première fois, une étude systématique de la physique. L'horaire est de 5 périodes (de 50 minutes) par semaine, dont deux se déroulent en laboratoire. Dans ce type d'école les enseignants de physique ont le pouvoir de prendre des décisions sur l'exact contenu du curriculum, dont le caractère est préparatoire aux matières plus proprement techniques des années suivantes. Depuis 1985 notre Ministère de l'Éducation a encouragé l'utilisation des micro-ordinateurs dans l'enseignement et le laboratoire de physique de mon école possède un nombre de PC suffisant pour les besoins de nos étudiants. En outre, j'ai développé moi-même un logiciel pour aider la modélisation, sur l'exemple du Dynamical Modelling System de Jon Ogborn [4]. Je travaille donc dans une situation très favorable ayant, d'un côté, la possibilité d'organiser

mes leçons avec un certain degré de liberté et, d'un autre côté, la disponibilité des instruments nécessaires.

4. EXEMPLES

Voyons, maintenant, des scénarios didactiques possibles où l'écriture et le calcul d'un modèle dynamique peuvent aider les étudiants.

Exemple 1 : Étude du mouvement

La classe est à sa première expérience de modélisation. Le but du travail n'est donc pas seulement celui de faire des modèles, mais aussi de se familiariser avec le logiciel et avec la méthode de calcul et de se rendre compte de ses avantages et de ses limites. En outre, les élèves feront leur première rencontre avec les nécessités particulières du «medium-ordinateur» :

- la nécessité de lui commander les opérations dans un ordre logique,
- le fait qu'on lui donne les commandes sous une forme qui rappelle l'expression algébrique et le fait qu'il travaille avec des nombres,
- l'exigence de fixer la condition de fin des calculs,
- la possibilité de boucler les calculs sur eux-mêmes,
- bien qu'elle soit prise en charge par le logiciel, la nécessité de commander la sortie des résultats,
- le fait que les résultats sortent sous forme numérique, d'où la nécessité de savoir lire et interpréter tables et graphiques.

Le cheminement le plus rationnel consiste à commencer par le modèle le plus simple possible (le déplacement à vitesse constante) et à compliquer chemin faisant. La facilité de modifier peu à peu ses hypothèses est une des caractéristiques les plus intéressantes de ce type de travail.

- 1 - On établit :
 - les valeurs de la coordonnée spatiale X et de la vitesse V à l'instant initial,
 - la valeur initiale du temps T et la valeur du pas de calcul dT .
- 2 - X devient $X + V \cdot dT$.
- 3 - T devient $T + dT$.
- 4 - On revient au point 2 tant que la condition de sortie n'est pas satisfaite.

Si l'on compare les résultats avec ce qu'on obtient avec le calcul algébrique on voit que l'algorithme donne les mêmes résultats : nous n'en tirons donc pas un vrai avantage !

Compliquons le modèle en introduisant une accélération constante.

- 1 - On établit :
 - la valeur de l'accélération A et les valeurs de la coordonnée spatiale X et de la vitesse V à l'instant initial,
 - la valeur initiale du temps T et de valeur du pas de calcul dT .
- 2 - X devient $X + V \cdot dT$,
 V devient $V + A \cdot dT$.
- 3 - T devient $T + dT$.
- 4 - On revient au point 2 tant que la condition de sortie n'est pas satisfaite.

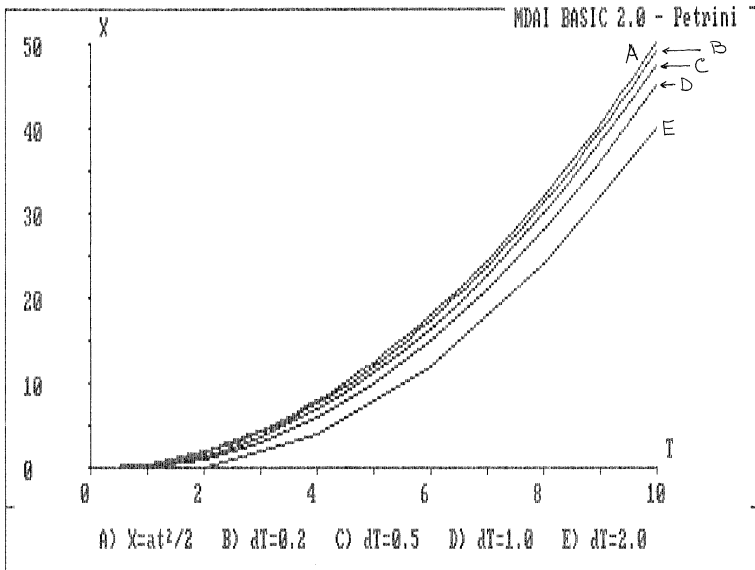


Figure 1 : Mouvement en une dimension avec accélération constante : précision du calcul de la coordonnée spatiale X en fonction du pas de calcul dT (Runge-Kutta d'ordre 0).

Si l'on compare les résultats avec ceux qu'on obtient avec le calcul algébrique on voit que les résultats pour V sont bons, mais les résultats pour X sont mauvais ! Voilà l'occasion d'expliquer l'importance du pas de calcul : en superposant les graphiques obtenus en répétant le calcul avec des pas différents on s'aperçoit que la précision des calculs dépend de la petitesse du pas (figure 1).

Du point de vue de la physique, l'imprécision du modèle est due au fait que « X devient $X + V \cdot dT$ » suppose que V reste constante pendant l'intervalle de temps dT : dans la réalité V est en train de varier. Pour obtenir le bon résultat il faut introduire la vitesse moyenne V_m dans l'algorithme :

- au point 1, calculer $V_{m \text{ initiale}} = V_{\text{initiale}} + A \cdot dT/2$,
- au point 2, X devient $X + V_m \cdot dT$, V devient $V + A \cdot dT$ et V_m devient $V_m + A \cdot dT$.

Avec telles modifications les résultats sont bons pour X aussi et, comme on peut vérifier, indépendants du pas dT (l'algorithme est devenu un Runge-Kutta d'ordre un).

Exemple 2 : On construit une véritable «simulation»

Le but du travail est d'utiliser un modèle pour :

- vérifier des concepts étudiés théoriquement dans une situation idéalisée,
- améliorer l'approximation du modèle et le rendre plus proche des observations quotidiennes,
- voir l'importance fondamentale du système de repère dans la description mathématique des mouvements.

Les deux modèles vus dans l'exemple 1 décrivent des mouvements à une dimension. On peut aisément les combiner entre eux pour obtenir la description d'un mouvement à deux dimensions ! Par exemple, les élèves peuvent simuler le mouvement des mobiles dans le champ de gravité terrestre. Mais, pour le faire correctement, ils doivent appliquer un concept très important en physique auquel, dans les problèmes numériques rencontrés ordinairement, on ne réserve pas toujours l'attention qu'il mérite : la simulation fonctionnera seulement si le signe algébrique de toutes les variables est conforme au système de

coordonnées spatiales préfixé. Si, par exemple, la direction positive de la coordonnée verticale est fixée vers le haut, l'accélération de gravité doit être négative.

1 - On établit :

- les valeurs de la coordonnée spatiale horizontale X et de la vitesse horizontale V_x à l'instant initial,
- la valeur de l'accélération verticale G , de la coordonnée spatiale verticale Y , de la vitesse verticale V_y à l'instant initial,
- la valeur initiale du temps T et la valeur du pas de calcul dT .
- la valeur initiale de la vitesse moyenne verticale

$$V_{ym} = V_y + G \cdot dT/2.$$

2 - X devient $X + V_x \cdot dT$,

Y devient $Y + V_{my} \cdot dT$,

V_{my} devient $V_{my} + G \cdot dT$.

3 - T devient $T + dT$.

4 - On revient au point 2 tant que la condition de sortie n'est pas satisfaite.

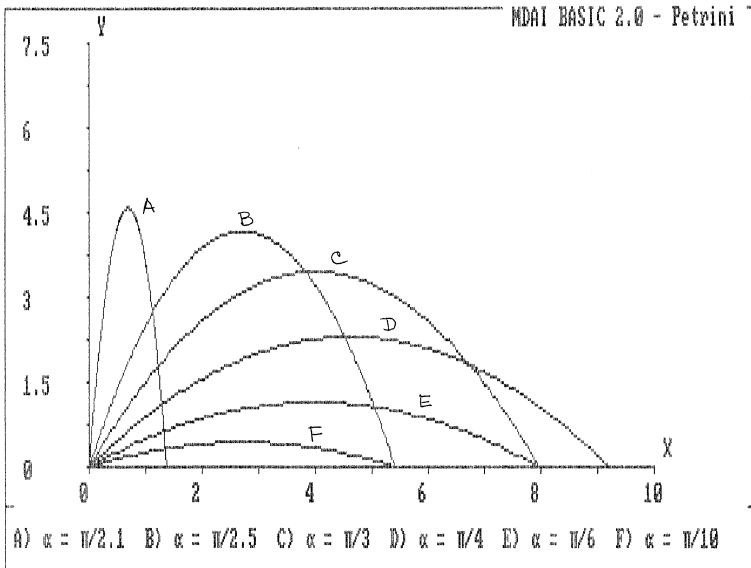


Figure 2 : Portée en fonction de l'angle de tir $V_{\text{initiale}} = 9,5 \text{ m/s}$.

On obtient une véritable simulation du mouvement des mobiles dans l'hypothèse où le frottement de l'air est négligeable. Les élèves peuvent s'en servir pour étudier les propriétés de ce type de mouvement idéal, par exemple :

- si les valeurs initiales de V_x et V_y sont telles que le module de la vitesse V soit constante [$V_y = \sqrt{V^2 - V_x^2}$, ou $V_x = V \cdot \cos(\alpha)$ et $V_y = V \cdot \sin(\alpha)$], ils peuvent étudier la dépendance de la portée de l'angle de tir (figure 2),
- en variant la valeur de G , ils peuvent comparer les trajectoires du mouvement sur différentes planètes (figure 3), etc...

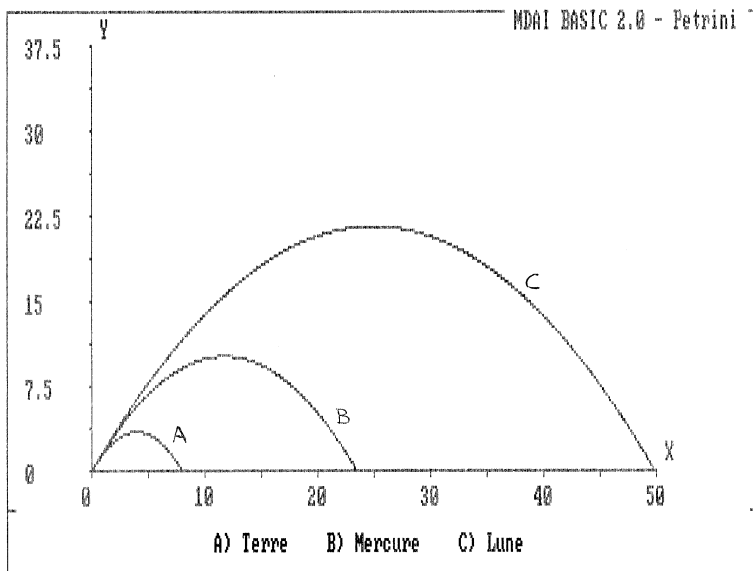


Figure 3 : Portées en fonction de g $\alpha = \pi/3$ $V_{\text{initiale}} = 9,5 \text{ m/s}$.

Comment ramener notre modèle aux résultats réels, qui montrent que la trajectoire d'un corps lancé dans l'air n'est pas une véritable parabole ? Assez aisément, nous pouvons introduire l'idée que l'accélération dépend de la vitesse. Les élèves savent par expérience personnelle que le frottement de l'air croît avec la vitesse et que la direction de cette force est opposée à la vitesse même. Dans une première approximation, ils peuvent modéliser cette dépendance

comme $F_x = -K \cdot V_x$, $F_y = M \cdot G - K \cdot V_y$. Il suffit donc de définir initialement les valeurs de K et de M et d'ajouter quelque ligne à l'algorithme. La nouvelle simulation servira, par exemple, pour comparer les trajectoires dans l'air de billes de masse différente et d'égale dimension (figure 4). Une petite démonstration expérimentale permet de juger de façon qualitative si la nouvelle description simulée est plus proche du phénomène réel.

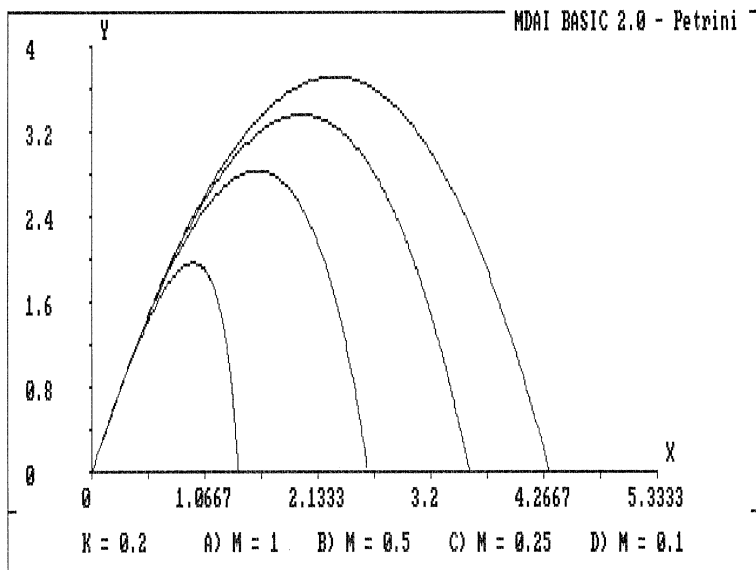


Figure 4 : Effet du frottement sur corps d'égales dimensions et de diverse masse lancés en l'air $\alpha = \pi/2,5$ $V_{\text{initiale}} = 9,5$ m/s.

Avec suffisamment de temps et une classe bien motivée on pourrait maintenant compléter le travail décrit dans les exemples 1 et 2 avec une expérimentation de laboratoire sur des mouvements compliqués comme, par exemple, la descente d'un corps dans un milieu visqueux, les oscillations amorties, etc... [5]. Cela permettrait d'essayer de valider le modèle **quantitativement**, par comparaison avec les données expérimentales : il faut faire des hypothèses sur le type de frottement (laminaire ou turbulent) en fonction de la viscosité du milieu, de la forme du corps, de sa vitesse ; il faut chercher les valeurs numériques des coefficients qui donnent le meilleur accord entre le modèle et l'expérience, etc... On ferait en ce cas une véritable activité de

recherche qui ressemble au travail de recherche des scientifiques. C'est, à mon avis, le type le plus intéressant d'application de la modélisation dynamique. Il s'agit en effet de mettre les lois de la physique et nos idées et suppositions face à face avec la réalité.

Exemple 3 : Circuit RC

Beaucoup de phénomènes très intéressants du point de vue pratique ont une allure exponentielle. En effet, l'allure exponentielle caractérise l'évolution vers l'équilibre, notamment : l'évolution de la différence de potentiel aux bornes d'un condensateur qui est en train de se charger ou de se décharger ; de la température d'un corps chaud ou froid qui est en train d'atteindre la température ambiante ; de la pression d'un gaz sous pression qui sort d'un vase troué et s'échappe vers l'atmosphère, etc... On est mal à l'aise pour parler de cela avec les élèves quand ils n'ont pas encore étudié la mathématique nécessaire. Pour cette raison, en général, notre enseignement néglige ces phénomènes et nous ne sortons pas du domaine des phénomènes stationnaires.

Mais un des travaux pratiques traditionnels des élèves de la seconde classe de mon école est la mesure «au ralenti» (avec des condensateurs de grande capacité) du courant transitoire dans un circuit RC série. Avant l'époque des micro-ordinateurs, les élèves constataient que ce courant possède la singulière propriété de se diviser par deux à intervalles de temps égaux, mais l'interprétation du mécanisme du phénomène était passée sous silence ou était mentionnée de manière très qualitative.

Aujourd'hui, au contraire, avec l'introduction d'un modèle dynamique du phénomène nous pouvons quantifier les conséquences de nos raisonnements en les appuyant sur la base théorique des lois des circuits et valider le modèle par comparaison avec les données expérimentales. Les résultats didactiques sont que la discussion des causes du phénomène acquiert une efficacité beaucoup plus grande qu'auparavant et que la compréhension des lois des circuits est renforcée par leur application à une situation différente de celle envisagée dans les problèmes numériques usuels.

Le modèle du processus de décharge est assez simple :

- 1 - On établit :
 - la valeur de la capacité C du condensateur, de la tension initiale V_C , de la charge initiale $Q = C \cdot V_C$, de la résistance électrique R du circuit,
 - la valeur initiale du temps T et la valeur du pas de calcul dT .
- 2 - On calcule la tension aux bornes de la résistance, $V_r = -V_C$;
On calcule l'intensité du courant, $I = V_r / R$
 Q devient $Q + I \cdot dT$,
 V_C devient Q/C .
- 3 - T devient $T + dT$.
- 4 - On revient au point 2 tant que la condition de sortie n'est pas satisfaite.

Le modèle du processus de charge est légèrement plus compliqué parce qu'il faut tenir compte de la tension du générateur :

- 1 - On établit :
 - la valeur de la capacité C du condensateur, de la tension constante du générateur V_g , de la tension initiale du condensateur $V_C = 0$, de la charge initiale $Q = 0$, de la résistance électrique R du circuit,
 - la valeur initiale du temps T et la valeur du pas de calcul dT .
- 2 - On calcule la tension aux bornes de la résistance,
 $V_r = -(V_g + V_C)$;
On calcule l'intensité du courant, $I = V_r / R$.
 Q devient $Q + I \cdot dT$.
 V_C devient Q/C .
- 3 - T devient $T + dT$.
- 4 - On revient au point 2 jusqu'à quand la condition de sortie n'est pas satisfaite.

En calculant ces modèles on retrouve, avec une précision satisfaisante, les données expérimentales (figure 5). Avec des étudiants plus âgés on pourrait ensuite introduire une loi de variation de la tension du générateur : on obtiendrait alors, par exemple, la possibilité de simuler le fonctionnement du circuit RC en régime sinusoïdal, etc..., en modélisant le transitoire initial aussi.

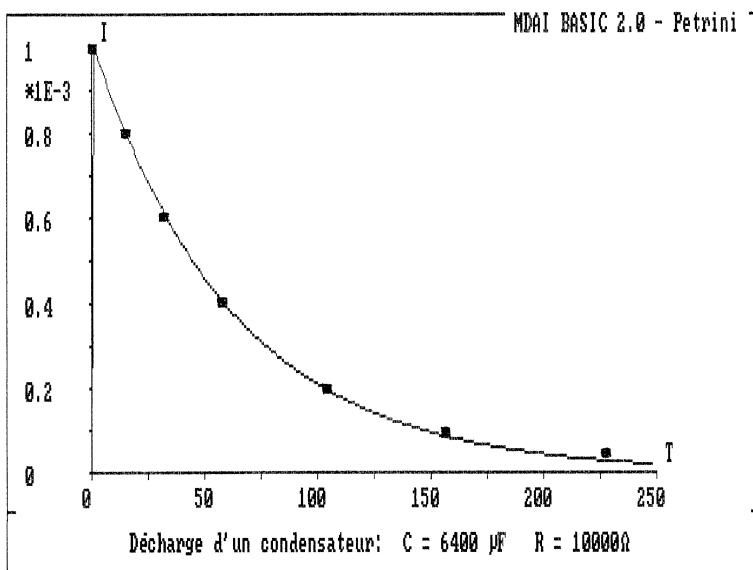


Figure 5 : Transitoire initial de courant dans un circuit RC ($dT = 1$ s).
 ■ Points expérimentaux.

On peut observer en effet que les deux modèles sont un même modèle où les valeurs initiales des variables sont changées. Le calcul de V_r exige d'appliquer de manière rigoureuse la convention des signes de la loi de Kirchhoff, et les valeurs de V_c calculées par le modèle se conforment à cette convention. On peut aussi observer qu'il y a une surabondance de passages qui heurte, peut-être, nos habitudes algébristes pré-informatiques. En écrivant, par exemple, « V_c devient $V_c - (V_g + V_c) \cdot dT/RC$ » l'algorithme devient plus compact. Mais évaluons les avantages et les désavantages pour nos jeunes élèves ! Les calculs gagnent en élégance mais du point de vue de la compréhension de la physique c'est beaucoup moins efficace : en effet les deux passages qui expriment les lois physiques de base du modèle même, la loi de Kirchhoff et la loi de Ohm, restent occultés.

Exemple 4 : La pression atmosphérique

Il n'est pas toujours possible, par manque de temps, de partir de résultats obtenus par les élèves eux mêmes dans le laboratoire de physique. En ce cas le travail peut partir de données « officielles » qu'on tire d'un texte ou d'une encyclopédie. Un exemple : le calcul de la valeur de la pression de l'atmosphère à différentes altitudes.

Pour présenter ce problème à la classe il faut que les étudiants connaissent la loi de Stévin et l'équation des gaz parfaits. La variation de la pression atmosphérique avec la hauteur H peut être modélisée en supposant une montée à petits pas dH dans l'air (figure 6).

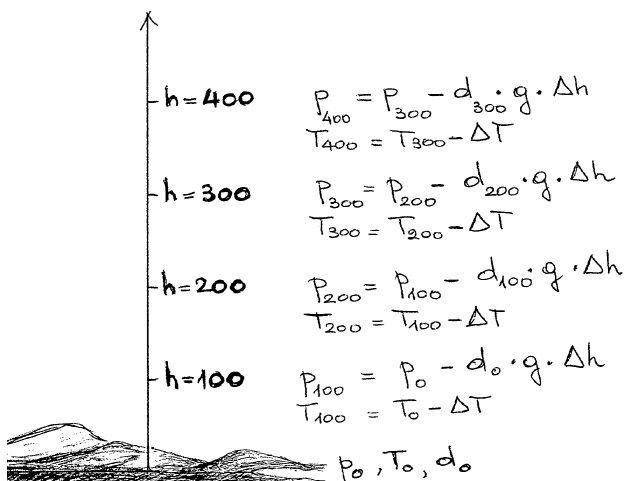


Figure 6 : modèle de la pression atmosphérique.

1 - On établit :

- les valeurs de la pression P , de la température T et de la densité de l'air D au niveau de la mer,
- la valeur de l'accélération de gravité G et du gradient de température dT_{unitaire} (voir Table),
- la valeur initiale de l'altitude $H = 0$ et la valeur du pas de calcul dH .

2 - Avec la loi de Stévin, on calcule la variation de la pression, $dP = -D \cdot G \cdot dH$.

Avec la loi expérimentale de variation de la température, on calcule

$$dT = dT_{\text{unitaire}} \cdot DH,$$

P devient $P + dP$,

T devient $T + dT$.

3 - H devient $H + dH$.

4 - Avec la loi des gaz, on calcule la nouvelle valeur de la densité de l'air.

5 - On revient au point 2 tant que la condition de sortie n'est pas satisfaite.

L'accord entre les résultats calculés et la table de l'air type international dépend, bien sûr, du pas de calcul. Avec un pas de 100 m, l'accord est très bon jusqu'à 10 000 m.

Altitude (m)	Pression (mbar)	Température (K)	Densité (kg/m ³)
0	1 013	288.0	1.225
1 000	899	281.5	1.111
2 000	795	275.0	1.006
3 000	701	268.5	0.909
4 000	616	262.0	0.819
5 000	540	255.5	0.736
6 000	472	249.0	0.659
8 000	356	236.0	0.525
10 000	264	223.0	0.412

Air type international

5. CONCLUSIONS

L'introduction de quelques exemples de modélisation dynamique dans l'expérience scolaire de nos étudiants peut donner l'occasion de discuter, en partant d'un nouveau point de vue, la portée des lois physiques étudiées. Les étudiants peuvent être confrontés à des problèmes plus ouverts que d'ordinaire, dans la résolution desquels il y a place pour une activité de formulation personnelle d'hypothèse sur les phénomènes.

L'existence de logiciels conçus pour faciliter l'écriture et la gestion du calcul des modèles donne la possibilité concrète de faire cela. Une

fois le modèle construit, il est facile de changer la structure de l'algorithme et les valeurs initiales des variables. Cela permet aux élèves d'explorer différentes solutions, de les critiquer, de se rendre compte des conséquences des choix faits.

A mon avis, les modèles dynamiques sont surtout intéressants quand ils sont couplés à l'activité pratique des élèves dans le laboratoire de physique [6, 7]. Dans ce cas on peut comparer les résultats des calculs avec les données expérimentales, déterminer leur degré d'approximation, discuter les causes des différences observées et, éventuellement, les modifier pour les rendre plus proches de la réalité.

Il semble pourtant que, en Italie même, cette méthodologie didactique ne connaisse pas la diffusion que ses avantages potentiels méritent. Il est vraisemblable que la petite diffusion est due à plusieurs raisons :

- la disponibilité de micro-ordinateurs dans l'école n'est parfois pas suffisante,
- la méthodologie est éloignée de l'expérience de formation et professionnelle des professeurs qui, pour l'introduire dans leur pratique d'enseignement, doivent avoir le courage d'aborder un champ nouveau. Il leur faut du temps pour s'approprier cette technique et, en outre, il faut disposer d'un micro-ordinateur et d'un logiciel,
- il faut être préparé à consacrer quelques heures de travail scolaire à enseigner la logique de la méthode aux élèves. Sans doute, on peut le faire plus aisément si le curriculum n'est pas trop prescriptif, c'est-à-dire si les professeurs ont la possibilité d'y introduire un certain degré de flexibilité. Cette situation semble n'être pas fréquente dans la majorité des pays.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] R. BEARE, Programmable calculators - Part 1 : Their use in teaching science ; Part 2 : Their use in applying simple laws in physics to some complex problems, *School Science Review*, 206, septembre 1977 et 207, décembre 1977.
- [2] G. CORTINI, M. FASANO PETRONI, *Fisica e Matematica con il calcolatore tascabile*, Loescher (Italie), 1980.

- [3] J. OGBORN, Modelling with the Dynamical Modelling System, dans P.L. Lijnse (éditeur), The many faces of teaching and learning mechanics, Utrecht, 1984, p. 474.
- [4] S. PUGLIESE JONA, Modelli Dinamici e Algoritmi Iterativi, logiciel et manuels, Petrini (Italie), 1990.
- [5] L. NUVOLI, Real Experiments and Simulations, dans P.L. Lijnse (éditeur), The many faces of teaching and learning mechanics, Utrecht, 1984, p. 537.
- [6] S. PUGLIESE JONA, Expériences et modèles dans les phénomènes thermiques, Quatrièmes Journées Informatique et Pédagogie des Sciences Physiques, Toulouse, 1990, p. 83.
- [7] S. PUGLIESE JONA, Le fonctionnement d'une lampe à incandescence : un exemple d'application multiple de l'ordinateur à l'étude d'un phénomène physique, Cinquièmes Journées Informatique et Pédagogie des Sciences Physiques, Marseille, 1992, p. 99.