
Bulletin de l'Union des Physiciens

Association des professeurs de Physique et de Chimie

Activités de modélisation dans l'enseignement des sciences physiques

par Jean WINTHER

Chercheur associé au L.I.R.E.S.T., E.N.S. Cachan

RÉSUMÉ

La modélisation est une partie essentielle dans la démarche du physicien et du chimiste. Pourtant paradoxalement, bien qu'un des objectifs de l'enseignement des sciences physiques dans les lycées soit de faire pratiquer aux élèves une démarche scientifique, on constate que les activités de modélisation sont pratiquement inexistantes dans les classes, où l'on se contente d'utiliser les modèles et d'en examiner les limites. Dans ces conditions peut-on réellement qualifier de scientifique un tel enseignement ?

La décennie, qui vient de s'écouler, a été marquée par une formidable extension des moyens de traitement de l'information. L'informatique a pénétré dans le système éducatif sous la forme de calculettes, de micro-poches et de micro-ordinateurs, mettant à la disposition des élèves des possibilités de calculs, de traitements et de représentations des données d'une puissance chaque jour plus importante.

J'ai donc posé l'hypothèse que l'informatique pouvait être un moyen permettant de faire pratiquer au élèves des activités de modélisation en raccourcissant la durée des traitements et des calculs, en multipliant le nombre des représentations et en affranchissant les élèves de la complexité des calculs.

Le travail de recherche [1] que je résume dans cet article a été réalisé depuis une dizaine d'années dans le cadre d'un enseignement de l'électricité et de l'électronique dans des classes de seconde et de première F1.

Son objectif est de déterminer les conditions matérielles, didactiques et pédagogiques qui peuvent permettre de mener des activités de modélisation assistées par l'informatique dans les classes de lycée.

1. LE CADRE THÉORIQUE : MODÈLES ET MODÉLISATION

LA MODÉLISATION DANS L'ENSEIGNEMENT

Quelles sont les directives officielles en matière de modèles et de modélisation ?

Si l'on examine les instructions officielles de la classe de seconde [2] figure une Annexe I intitulée :

L'ÉVALUATION DANS L'ENSEIGNEMENT DES SCIENCES PHYSIQUES

Il est rappelé que l'enseignement des sciences physiques a pour but, entre autres, de faire acquérir des connaissances et des méthodes. L'évaluation permet au professeur et à l'élève de savoir, à chaque étape, dans quelle mesure ce but a été atteint. La rubrique CAPACITÉ À ÉVALUER EN SCIENCES PHYSIQUES est divisée en trois parties :

- posséder des connaissances spécifiques aux sciences physiques,
- utiliser des connaissances et des savoir-faire non spécifiques aux sciences physiques,
- pratiquer une démarche scientifique.

Cette dernière partie se subdivise en :

- observer et analyser,
- *choisir ou élaborer un modèle physique,*

- organiser les étapes de la résolution,
- porter un jugement critique.

Choisir ou élaborer un modèle physique

La résolution qualitative et le traitement mathématique nécessitent, l'un comme l'autre, l'utilisation d'un modèle. L'élaboration d'un modèle en fonction des hypothèses retenues est une phase difficile qui demande une bonne maîtrise des capacités définies en A et un bon esprit de décision : aussi dans beaucoup de contrôle le modèle est-il le plus souvent fourni, implicitement par l'indication des approximations à effectuer, ou explicitement. S'il est difficile d'évaluer la capacité d'élaboration, on peut plus facilement demander à l'élève de faire un choix parmi des modèles connus et de justifier ce choix ; on peut encore plus simplement, demander de préciser la validité du modèle proposé.*

Les instructions officielles permettent donc, dans le cadre de la classe de seconde, d'élaborer des modèles mais l'attention des professeurs est attirée sur les difficultés de l'opération : elle exige la maîtrise de connaissances préalables et elle est difficile à évaluer.

Si la première difficulté est effectivement à prendre en compte, celle concernant l'évaluation est discutable. En effet si l'on juge que la modélisation, dans le cadre de l'apprentissage, est un moyen de rapprocher les pratiques de l'enseignement des pratiques du physicien et que le rapprochement est bénéfique, invoquer la difficulté de l'évaluation n'est pas un argument recevable.

Tout ne peut être évalué dans le cadre d'un apprentissage. Subordonner le contenu d'un apprentissage uniquement à l'évaluation est réducteur.

L'examen du référentiel de sciences physiques de la classe de seconde [3] permet d'avoir une idée de l'application des directives

* Posséder des connaissances spécifiques aux sciences physiques.

1. Des connaissances scientifiques :
 - a) vocabulaire, symboles, unités,
 - b) ordre de grandeur,
 - c) définitions, lois, modèles.
2. Des connaissances de savoir-faire :
 - a) dans le domaine expérimental,
 - b) dans le domaine théorique.

officielles. Il montre que la démarche modélisante proposée est très modeste sinon inexistante. On peut y lire :

CAPACITÉ C (pratiquer une démarche scientifique)

Explications

L'objectif de l'enseignement des sciences physiques est de vous permettre de pratiquer personnellement, de manière autonome, une démarche scientifique, soit dans le domaine expérimental, soit dans le domaine théorique.

Parmi les démarches autonomes à effectuer, en Seconde, vous pourrez avoir à :

- observer et analyser (l'observation permet de dégager des paramètres, l'analyse consiste à faire un tri ; cette analyse s'appuie sur des connaissances antérieures et procède souvent par analogie),*
- utiliser un modèle (après l'avoir éventuellement reconnu ou choisi).*

L'examen des livres et la pratique des classes confirment qu'actuellement dans l'enseignement des sciences physiques on en reste à la reconnaissance et à l'utilisation des modèles.

MODÉLISER OUI ! MAIS QUELS MODÈLES ET POUR FAIRE QUOI ?

• LES MODÈLES

Dès que l'on s'intéresse aux modèles et à la modélisation, on constate la difficulté à définir ce qu'est un modèle. De nombreux chercheurs et philosophes se sont penchés sur cette question et il faut bien admettre que malgré de nombreux travaux, ceux-ci loin de clarifier le problème en ont seulement montré la complexité.

Définition historique du terme de modèle

Le terme de modèle vient du latin *modulus* (diminutif de *modus* : mesure) terme d'architecture qui désigne la mesure arbitraire servant à établir les rapports de proportion entre les parties d'un ouvrage d'architecture. Le terme de *modulus* a donné lieu à deux importations successives, au Moyen-Age et à la Renaissance.

Tout d'abord *modulus* a donné en vieux français *moule*, en vieil anglais *mould* et en ancien haut allemand *model* (avec un seul l). Au XVI^{ème} siècle un emprunt à l'italien *modello* (venant lui-même du latin

modulus) employé par la statuaire, a donné en français modèle, en anglais model et en allemand modell (avec deux l).

Dans la langue courante allemande les deux mots Model, Modell coexistent actuellement, le mot Model (module, moule, matrice) étant un terme de métier. En français le mot moule a subsisté à côté des mots module et modèle. Dès l'origine le terme de modèle oscille entre le sens propre et le sens figuré entre l'objet matériel et la norme abstraite. Modèle peut être compris comme original ou comme copie, comme archétype ou comme simple réalisation.

Certains chercheurs ont tenté de donner **une définition structurale du modèle**. Ainsi pour Suzanne BACHELARD [4] :

Le modèle n'est jamais un objet pris pour soi. Il est toujours relationnel : modèle pour, modèle de, il renvoie à une autre chose que lui-même. Le modèle n'est rien d'autre que sa fonction ; et sa fonction est une fonction de délégation. Le modèle est un intermédiaire à qui nous déléguons la fonction de connaissance, plus précisément de réduction de l'encore-énigmatique en présence d'un champ d'étude dont l'accès, pour des raisons diverses nous est difficile. Mais si l'on ne considère pas le modèle pour soi, on lui demande de fonctionner par soi, comme un automatisme auquel provisoirement nous ne serions pas mêlés.

Un peu plus loin elle écrit :

Le modèle n'est en aucun cas imitation des phénomènes. Il y a dans toute espèce de modèle, une bipolarité du théorique et de l'ostensif. La fonction de modélisation a un caractère abstrait-concret. Le modèle est abstrait en ce sens qu'il a une fonction d'abstraction par rapport au réel. Il représente non pas les propriétés de réel, mais seulement certaines propriétés. Il a une fonction sélective des données ou des pseudo-données de l'expérience ; il en sépare le pertinent du non-pertinent par rapport à la problématique considérée. En ce sens le modèle est un fictif réalisé. Il est un instrument d'intelligibilité d'un réel dont la complexibilité des propriétés ne permet pas l'entière compréhension par la science.

Loin de fonctionner comme copie, le modèle fonctionne comme opérateur sélectif.

Devant la difficulté de définir ce qu'est un modèle, certains chercheurs ont essayé de contourner la difficulté en tentant une classification des modèles. Étudiant les modèles dans les sciences. BLACK (1962) [5] classe les modèles en cinq types : réduit (parfois

appelé iconique), analogique, mathématique, théorique, archétype. Tous les travaux montrent qu'il existe une diversité de modèles. Aussi plutôt que d'essayer d'approfondir la nature des modèles il m'a semblé plus efficace, pour la recherche, de réfléchir, sur la fonction des modèles. Sur cette question il existe un consensus : le modèle est la construction conceptuelle à travers laquelle le scientifique explique la réalité. Pour le même phénomène il peut exister une infinité de modèles et chacun d'eux ne prétend expliquer qu'une partie du phénomène.

C'est à cette conclusion qu'aboutit Suzanne BACHELARD quand elle écrit : *loin de fonctionner comme une copie, le modèle fonctionne comme un opérateur sélectif. Il représente non pas les propriétés du réel mais seulement certaines propriétés.*

Les modèles n'ont donc qu'une seule ambition : montrer qu'un morceau d'une réalité multiforme, c'est ce que Suzanne BACHELARD qualifie de caractère ostensif des modèles.

Autre constatation importante, le modèle résulte d'un apprentissage. Le physicien qui regarde tel modèle le regarde-t-il avec l'œil corporel, ou avec les yeux de l'esprit ? Le modèle qui donne à voir, ne donne à voir qu'à l'initié qui connaît le support conceptuel qui justifie le modèle. Il n'y a pas de modèle figuratif.

Cette conception est partagée par Noël MOULOUUD [6] :

On ne saurait mettre une séparation absolue entre l'usage qui est fait des modèles en mathématiques et celui qu'en font les sciences exactes qui sont des mathématiques appliquées.

Les modèles physiques s'échelonnent entre le plan analytique et le plan descriptif ; et surtout le modèle acquiert ici une fonction expérimentale : il vaut non seulement par sa consistance interne, mais par son adaptation au réel.

En conclusion ayant retenu l'hypothèse de m'en tenir aux fonctionnalités des modèles j'ai élaboré **une définition opérationnelle du modèle** qui permet de rendre compte des aspects comportementaux de ceux-ci.

Un modèle est un «object théorique» résultat d'un traitement de données, susceptible d'être utilisé dans un acte de prévision du comportement du système réel placé dans la même situation que celle où ont été recueillies les données.

Cette définition ne fixe pas le statut de l'object théorique mais aborde les différents aspects de la modélisation :

– l'élaboration du modèle,

- sa place par rapport au réel,
- la finalité du modèle.

Parmi tous les modèles possibles j'ai retenu dans le cadre de cette recherche un seul type de modèle : le modèle mathématique.

• LA MODÉLISATION

La définition opérationnelle retenue induit logiquement un type de modélisation. Les théories modernes de modélisation introduisent la distinction entre «modèle de connaissance» et «modèle de comportement».

Le modèle de connaissance est obtenu par une méthode analytique dont le processus peut se résumer en trois étapes :

- écriture des lois élémentaires,
- mise en équations, c'est-à-dire établissement de relations entre ces lois,
- résolution des équations pour aboutir au modèle de connaissance.

La méthode est donc une méthode déductive.

Le modèle de comportement est obtenu par une méthode expérimentale. Celle-ci passe par les trois étapes suivantes :

- acquisition de données,
- identification, c'est-à-dire reconnaissance d'un type possible de modèle pouvant formaliser le phénomène,
- élaboration du modèle de comportement.

La modélisation expérimentale [8] est constituée par un ensemble de méthodes de recherche de modèles et d'estimation de paramètres à partir de données expérimentales. Ces méthodes sont très diverses et permettent d'accéder progressivement à la loi mathématique décrivant le comportement d'un système.

Parmi ces méthodes il en est certaines que l'on qualifie de directes ou élémentaires. Il ne faut pas voir là un qualificatif péjoratif, mais la possibilité d'obtenir, par une voie directe et sans difficulté majeure sur le plan mathématique, un premier modèle, certes approché, mais capable de donner déjà une certaine description du processus.

J'ai retenu ces méthodes car elles correspondent bien aux connaissances conceptuelles des élèves de seconde et de première.

Trois méthodes ont été utilisées :

- l'identification,
- l'ajustement,
- l'anamorphose.

L'identification

Elle débute par l'observation de la courbe des valeurs expérimentales. L'«allure» de la courbe suggère que l'équation correspondante peut être celle d'une droite, d'une parabole, etc... Après avoir choisi une équation on trace la courbe correspondante et on la compare à la courbe des valeurs expérimentales. En modifiant les coefficients de l'équation on cherche la meilleure coïncidence.

L'ajustement

Dans cette méthode l'équation est obtenue par une méthode mathématique d'ajustement. On choisit un ajustement linéaire, polynomial, etc... La qualité de l'ajustement est évalué par le calcul du coefficient de corrélation linéaire (ou de celui de l'erreur quadratique moyenne). On peut également tracer la courbe correspondant à l'équation et on la compare à la courbe des valeurs expérimentales.

L'anamorphose [9]

Le problème est le suivant : la loi physique $y = f(x)$ qui relie deux grandeurs est a priori d'une forme mathématique absolument quelconque. Mais si l'on peut la transformer en une loi $y = ax + b$, sa mise en évidence puis son utilisation en seront grandement facilitées. C'est cette opération que l'on appelle anamorphose*.

Par anamorphose, on peut transformer un modèle, par exemple de type exponentiel en un modèle «linéaire». Soit par exemple la variation de résistance R d'une thermistance en fonction de la température absolue T . Cette loi de variation est :

$$R = a e^{b/T}$$

* Le Grand Larousse nous indique que ce mot a pour racine ana (en haut) et morphé (forme), et qu'il désigne «une image, une représentation grotesque difforme quand elle est vue d'un certain point». On retrouve cette idée de déformation dans l'utilisation que vont en faire les physiciens.

Alors : $\ln R = \ln a + b/T$.

En définissant $y = \ln R$; $A = b$; $x = 1/T$ et $B = \ln a$, on peut tracer une droite $y = Ax + B$, donc déterminer A et B (avec $b = A$ et $a = e^B$).

D'une manière générale j'ai procédé par une anamorphose avec changement de variable.

L'expérimentateur pose l'hypothèse que la courbe expérimentale correspond à une équation de la forme :

$$Y = A f(x) + B$$

Il change de variable $V = f(x)$

Il trace la courbe correspondant à l'équation :

$$Y = A V + B$$

Si le graphe obtenu est celui d'une droite, l'équation peut être retenue.

Ces trois méthodes peuvent être mises en œuvre sur le papier mais c'est à ce niveau que l'informatique prend toute son importance car en multipliant les représentations, en prenant en charge la complexité des calculs, en diminuant la durée des calculs et des représentations elle permet de réaliser des activités de modélisation dans le temps imparti à une séance de travaux pratiques de sciences physiques.

LES OBSTACLES

La mise en œuvre d'activités de modélisation par des élèves de lycée exige un apprentissage mais aussi la détection de différents obstacles.

Ces obstacles sont de deux ordres :

- mathématiques,
- informatiques.

C'est pour essayer d'en identifier certains de nature mathématique que j'ai réalisé des tests papiers. Leurs objectifs sont d'évaluer les difficultés des élèves à associer une situation physique simple à un tableau de valeurs, une courbe et une équation ; ceci pour des phénomènes linéaires et non linéaires. D'autres tests permettent d'évaluer la reconnaissance de variations sur des courbes tracées à différentes échelles.

Les tests ont été proposés à un échantillon de 150 élèves dans des classes de seconde, première et terminale*.

L'analyse des résultats des différents tests fait apparaître les proportions suivantes sur l'ensemble de l'échantillon :

- pour un phénomène linéaire :
 - 90 % des élèves associent le phénomène à un tableau,
 - 75 % des élèves associent le phénomène à une courbe,
 - 32 % des élèves associent le phénomène à une équation.
- pour un phénomène non linéaire :
 - 42 % des élèves associent le phénomène à un tableau,
 - 50 % des élèves associent le phénomène à une courbe,
 - 35 % des élèves associent le phénomène à une équation.
- pour la reconnaissance d'une variation sur une courbe :
 - 78 % des élèves sont capables d'identifier la plus grande variation sur des courbes tracées à des échelles différentes.

La connaissance de ces obstacles m'a permis de mettre au point une stratégie pédagogique aboutissant à l'élaboration d'un processus d'apprentissage, précédant les activités de modélisation.

2. L'EXPÉRIMENTATION

2.1. Les apprentissages

LES APPRENTISSAGES INFORMATIQUES

Utilisation d'une interface et d'un micro-ordinateur

Lors de l'étude des dipôles électriques il est possible d'utiliser un micro-ordinateur muni d'une interface et d'un logiciel d'acquisition. Grâce à la facilité de mise en œuvre et la rapidité du dispositif il est possible de tracer un très grand nombre de caractéristiques et ainsi de consacrer plus de temps à l'exploitation des caractéristiques qu'à leurs tracés.

L'utilisation de l'informatique dans le cadre d'une classe de sciences

* Lycée technique Raspail Paris XIV^{ème},
Lycée polyvalent Talma Brunoy (91),
Lycée polyvalent Maurice Ravel Paris XX^{ème}.

physiques fait appel à de nouveaux savoir-faire, à acquérir par les élèves.

A côté de la prise en main plus classique de l'ordinateur il existe des compétences techniques et conceptuelles que doivent posséder les élèves pour faire un usage efficace des techniques d'acquisition automatique de données.

Prérequis

- Les élèves possèdent la notion de différence de potentiel, ils savent mesurer une tension avec un voltmètre et un oscilloscope.
- La notion de masse électrique a été étudiée sur différents circuits (ex. : bicyclette, voiture).
- Ils connaissent les numérations binaire et hexadécimale.
- Ils connaissent le principe de fonctionnement d'un micro-ordinateur et savent rédiger un programme simple de quelques lignes, en basic par exemple. Ces éléments d'informatique sont vus par ailleurs en T.S.A.

Les apprentissages

En partant du convertisseur analogique numérique (C.A.N.), élément central de l'interface, les élèves abordent les notions d'échantillonnage du signal, de transformation d'une tension en une grandeur binaire. La rédaction de programmes simples réalisant la lecture des mémoires de l'interface permet alors d'aborder le fonctionnement des logiciels d'acquisition et de représentation pour l'étude des dipôles.

LES APPRENTISSAGES SUR LES REPRÉSENTATIONS

Les activités de modélisation exigent un apprentissage sur les représentations graphiques. Il concerne la lecture et la réalisation de graphes sur des supports papier ou cathodiques (micro-ordinateur ou oscilloscope).

LES APPRENTISSAGES SUR LE TRAITEMENT DES DONNÉES

Les modèles linéaires

Les modèles linéaires sont les plus accessibles aux élèves car ils disposent des bagages conceptuels et mathématiques pour les aborder. En particulier un élève de seconde doit être capable d'identifier sur un graphe une fonction linéaire ou affine, de tracer le graphe à partir de l'équation et de déterminer l'équation à partir du graphe.

Mais en sciences physiques l'expérience fournit des nuages de points dont «l'allure» suggère une variation linéaire. Il faut donc dans le cadre de l'apprentissage, des techniques de modélisation apprendre à traiter ces nuages pour pouvoir parvenir à la droite de régression et aux équations correspondantes.

Pour atteindre la maîtrise de ces différents problèmes j'ai proposé à mes élèves un apprentissage gradué portant sur :

- 1) la maîtrise des fonctions linéaires et affines
- 2) la maîtrise des méthodes d'ajustement linéaire.

Cette maîtrise est le passage obligé pour l'utilisation ultérieure des méthodes basées sur l'anamorphose.

La maîtrise des fonctions linéaires et affines

Tracé du graphe à partir de l'équation

Ceci est fait en collaboration avec le professeur de mathématiques. On y retrouve les problèmes d'échelles et de représentations vus par ailleurs.

Détermination de l'équation à partir du graphe

Cette détermination doit être précédée d'une «lecture» de la courbe qui doit apporter des informations au physicien.

- a) Quel est l'ensemble de définition de la fonction ?

Cette information donne la validité prévisionnelle des modèles qui seront déterminés. La connaissance de cet ensemble est important dans la mesure qu'en dehors de cet ensemble le phénomène n'est peut être plus linéaire. Dans certains cas c'est le phénomène physique qui impose des limites à l'intervalle. Par exemple, la puissance admissible par un composant interdit certaines valeurs.

- b) Quel est le taux de variation de la fonction ?

Avant de faire le calcul du taux qui est vu par ailleurs en mathématiques il est utile d'initier les élèves à une appréciation qualitative des taux de variation. On est alors confronté aux problèmes d'échelles. La pente graphique de la droite ne correspond pas toujours au coefficient directeur de l'équation.

La maîtrise des méthodes d'ajustement linéaire

Nombre d'expériences fournissent un nuage de points dont l'allure suggère une variation linéaire. Par exemple en travaux pratiques le tracé de la courbe caractéristique externe d'un dipôle, la variation de la vitesse en fonction du temps dans une chute libre. Ces nuages déconcertent les élèves et leur première réaction est de joindre les points par des segments.

A ce niveau réside un obstacle conceptuel important de l'apprentissage. Bien que la situation semble apparemment la même que celle rencontrée en mathématiques : tracé d'une fonction sur un graphique, elle est par essence fondamentalement différente. En effet elle exige de l'élève une double démarche :

- 1) identification d'un nuage de points à une courbe continue,
- 2) obtention d'une équation à partir de cette courbe.

Ces deux démarches ne se pratiquent pas dans l'enseignement des mathématiques. Pour le mathématicien (ou plutôt le professeur de mathématiques) une courbe n'est que la représentation graphique de variation d'une fonction.

Dès lors il est fondamental dans la problématique de la recherche d'identifier les difficultés des élèves et de mettre en œuvre les activités qui permettront de surmonter ces deux obstacles. Il est alors nécessaire d'expliquer qu'il existe sur chacune des mesures des incertitudes dont les causes sont variées. Il existe des incertitudes systématiques résultant des appareils employés et des incertitudes accidentelles dues à l'opérateur, par exemple erreur de parallaxe pour les appareils à affichage à aiguille.

L'utilisation d'appareil de mesure à affichage numérique peut induire chez les élèves une impression de certitude sur la valeur des mesures. Il est intéressant à cet égard de parler de la conversion des grandeurs analogiques en grandeurs numériques et des incertitudes qui proviennent de ces conversions.

Ajustement visuel

Comme je l'ai écrit plus haut les graphes formés d'un nuage de points constituent un obstacle important pour les élèves. Le passage du nuage à la courbe continue est la première étape de la modélisation et

il est nécessaire de mener des activités qui permettront de surmonter ce premier obstacle.

Je développe ici une première technique.

On fournit aux élèves un nuage de points dont l'allure est une droite. On leur propose de tracer, avec une règle, la droite qui passe au plus près de chaque point. Ce faisant on détermine la droite barycentrique de cet ensemble de points.

L'œil est l'instrument qui permet de réaliser cet ajustement que l'on qualifie de linéaire. Mais il faut vérifier si cet ajustement est conforme à ce que l'on souhaite. Pour cela il faut affiner la définition proposée : «passer au plus près de chaque point». Cette définition a un sens mathématique précis : il faut que la somme algébrique des distances de chaque point à la droite d'ajustement soit la plus petite possible.

$$\sum_{i=1}^n \pm d_i \text{ minimale}$$

L'élève trace plusieurs droites par ajustement visuel, mesure les distances droite-point, calcule la somme et retient celle qui correspond à la somme minimale.

Dans un deuxième temps on explique que des méthodes mathématiques permettent d'obtenir le même résultat. Ces méthodes existent dans de nombreuses calculatrices ou dans certains logiciels. A partir du nuage de points précédents les élèves réalisent un ajustement linéaire à l'aide d'une machine qui fournit l'équation sous la forme $y = ax + b$. On trace la droite d'ajustement et on calcule la somme algébrique des distances et l'on constate qu'elle est en général inférieure à celle obtenue graphiquement.

Mais il faut alors faire une remarque importante. Ces méthodes mathématiques sont mécaniques.

Si par exemple un point du nuage est manifestement en dehors de «la droite moyenne» il est intégré dans le calcul d'ajustement et son «poids» fait déplacer la droite d'ajustement. Il faut donc tenir compte de ce que l'on appellera les points aberrants. L'ajustement peut être réalisé automatiquement par une machine mais la pertinence de l'ajustement reste du domaine du cerveau humain.

Quand le niveau mathématique de la classe le permet il est possible d'expliquer théoriquement la méthode des moindres carrés. Cela est exclu en classe de seconde.

La méthode des moindres carrés

L'automatisation de la méthode développée précédemment va se faire à l'aide de la méthode des moindres carrés. Compte tenu de la longueur et de la complexité des calculs que sa mise en œuvre entraîne il n'est pas réaliste de la pratiquer sur le papier. Ce sont les raisons pour lesquelles on pourra l'utiliser en T.P. en se servant des programmes implantés sur les calculettes, les micro-poches ou les micro-ordinateurs.

Pour juger de la qualité de l'ajustement l'élève a besoin de critères objectifs.

Ces critères peuvent être numériques : le programme peut fournir le coefficient de corrélation linéaire. L'ajustement sera d'autant meilleur que proche de 1 (ou -1).

Le programme peut également tracer sur l'écran la courbe des valeurs expérimentales et la courbe des valeurs ajustées. L'appréciation de la qualité de l'ajustement sera visuelle.

Enfin à partir de l'équation $y = ax + b$ il est possible de calculer les valeurs ajustées et de les comparer au tableau des valeurs expérimentales

De toutes les façons il est important de comparer l'équation $y = ax + b$ aux valeurs de l'expérience. Il est important d'effectuer l'ajustement des données du type (x,y) puis à un ajustement (y,x) afin de s'assurer de la pertinence de la méthode mise en œuvre par le système informatique.

Remarque

La manipulation de la méthode des moindres carrés doit être faite en connaissance de cause. Avec des élèves dont les connaissances mathématiques sont suffisantes (terminale scientifique) on peut insister sur la validité du coefficient de corrélation.

Il est formateur, même avec des élèves plus jeunes de mettre ce coefficient de corrélation en défaut. C'est par exemple, le cas quand le

nuage de points à l'allure d'une ellipse (la courbe d'ajustement est alors une droite !).

On voit ainsi que la machine peut linéariser n'importe quels couples de valeurs et il y a donc toujours une décision «humaine» à prendre sur la signification des résultats.

Avec les élèves de terminale on peut s'étendre sur le choix du critère quadratique [10].

2.2. Les outils

L'expérimentation a été réalisée entièrement dans le cadre et les conditions d'un enseignement de sciences physiques de classes de seconde et de première F1 (construction mécanique) d'un lycée technique.

Le matériel utilisé a été le suivant :

- un nanoréseau de 8 postes MO5 THOMSON,
- 3 micro-ordinateurs compatibles PC,
- 16 micro-poches TI74 TEXAS,
- 16 calculettes scientifiques programmables graphiques TI81 TEXAS,
- 6 interfaces «MONIQUE» fonctionnant sur un matériel THOMSON,
- une interface CANDIBUS fonctionnant sur un compatible PC.

Pour mener les activités de modélisation j'ai été amené à réaliser un certain nombre de logiciels fonctionnant sur nanoréseau, à utiliser des logiciels commerciaux et des calculettes.

J'ai utilisé ces matériels et ces logiciels à deux niveaux :

- pour l'apprentissage,
- pour la mise en œuvre des activités de modélisation.

LES LOGICIELS DÉDIÉS À L'APPRENTISSAGE

Graphix (J. WINTHER) (nanoréseau)

Grapheur qui permet un apprentissage progressif de la représentation de données.

Questor (J. WINTHER) (nanoréseau)

Le logiciel QUESTOR a le même déroulement que le logiciel GRAPHIX mais il a été modifié pour contrôler l'apprentissage des élèves, en évaluant les valeurs calculées et fournies par l'élève tout au long du travail.

LES LOGICIELS DÉDIÉS AUX ACTIVITÉS DE MODÉLISATION**Lineor** (J. WINTHER) (nanoréseau)

Logiciel qui permet d'obtenir par anamorphose une ou plusieurs équations modélisant le phénomène.

Affinor (J. WINTHER) (nanoréseau)

Ce logiciel suit la même démarche que le logiciel LINEOR mais il offre une option supplémentaire, il permet de comparer la courbe des valeurs expérimentales avec la courbe d'une équation choisie et introduite par l'élève.

Logiciel Traitor^{*} (J. WINTHER) (nanoréseau)

Logiciel qui permet d'obtenir par la méthode des moindres carrés ou un ajustement polynomial une ou plusieurs équations modélisant le phénomène.

Logiciel Courbor (J. WINTHER) (nanoréseau)

Graphueur permettant de créer des grandeurs secondaires, de repérer des points et de mesurer des pentes.

A côté de logiciels que j'ai moi même réalisés j'ai utilisé des logiciels diffusés commercialement.

Parmi ceux-ci je citerai le logiciel DIPÔLES [11] car il s'adaptait bien à problématique de la recherche.

Il permet d'acquérir à l'aide d'une interface installée sur un compatible PC un grand nombre de données tension-intensité sur différents dipôles électriques, de tracer des caractéristiques, de créer de nouvelles grandeurs et de modéliser.

* Union des physiciens - 44, boulevard Saint Michel - 75270 Paris Cedex 06
Logiciel n° 2 disquette 2E.

LES CALCULETTES

En parallèle avec les logiciels j'ai utilisé des calculettes pour des activités de modélisation. Ces dernières années leurs performances ont considérablement progressé.

Avec les calculettes graphiques actuelles le professeur dispose d'un instrument de calcul, de représentation et de traitement de données comparable aux produits développés sur micro-ordinateur.

Elles présentent certains avantages pédagogiques. Le prix modique permet d'avoir un parc important de calculettes, chaque élève peut en avoir une et travailler individuellement (1 micro-ordinateur égal environ 20 calculettes...). Il est possible de les utiliser à tout moment : en classe, en travaux pratiques et à la maison.

CE QUE FONT LES ÉLÈVES

Ils font les mesurages.

Ils observent les courbes.

Ils évaluent les coefficients de corrélation (ou les erreurs quadratiques).

Ils sélectionnent des équations.

Ils proposent des équations.

Ils comparent les courbes expérimentales et les courbes des modèles.

Ils valident les modèles.

Ils modifient les paramètres des modèles et les font fonctionner.

CE QUE FONT LES LOGICIELS ET LES OUTILS INFORMATIQUES

Ils font les mesurages (cas des acquisitions automatiques).

Ils tracent les courbes.

Ils traitent les données.

Ils prennent en charge les calculs complexes et répétitifs.

3. LE DÉROULEMENT ET BILAN DE LA RECHERCHE

Ce travail de recherche commencé il y a 8 ans et a été réalisé de façon approfondie depuis 4 ans dans des classes de seconde du groupe I (option T.S.A), des classes de première F1 (construction mécanique) et des classes de première E.

L'objectif de l'expérimentation n'était pas de comparer systématiquement la différence entre un enseignement traditionnel et un enseignement assisté par informatique mais de voir s'il est possible d'introduire des activités de modélisation assistées par ordinateur, dans le cadre normal d'une classe.

J'ai suivi le programme officiel des classes, en modifiant la forme et non le fond de l'enseignement. Avec cette question en filigrane : l'efficacité des activités menées avec les élèves ne dépend-elle pas pour une part au moins du contenu des programmes ?

Il est difficile de faire une évaluation systématique et objective de l'expérimentation pour plusieurs raisons :

- les activités ont été menées dans plusieurs classes et il aurait fallu suivre les élèves plusieurs années pour apprécier les impacts durables sur leurs acquis.
 - en raison de la contrainte évoquée plus haut, les activités de modélisation n'ont pas été appliquées systématiquement mais en parallèle avec des activités traditionnelles.
 - bien qu'ayant limité l'expérimentation au cours de l'électricité des dipôles j'ai expérimenté la méthodologie dans d'autres parties de la physique qui me semblaient relever de telles techniques : l'optique, la mécanique, les courants sinusoïdaux... sans en faire une analyse systématique.
 - une expérimentation de ce type est fortement conditionnée par les matériels disponibles.
- C'est sur les matériels effectivement présents dans l'établissement que j'ai réalisé les exercices ou les logiciels qui me semblaient adaptés à l'expérimentation.

Ces remarques étant faites, plus qu'une évaluation je tenterai de faire un bilan de l'expérimentation en sériant les aspects positifs et négatifs.

L'objectif central de la recherche était d'expérimenter la possibilité de mener des activités de modélisation dans le cadre d'un enseignement de sciences physiques. Sur ce point le bilan apparaît positif, environ 2/3 des élèves d'une classe arrive à pratiquer en fin d'année de seconde de telles activités. J'entends par là qu'ils sont capables à partir d'un tableau de valeurs, d'obtenir une ou plusieurs équations modélisant le comportement d'un système et de vérifier la pertinence de ces équations soit

par le calcul soit graphiquement. Je note à ce propos que les élèves ont recours plus spontanément au calcul qu'au graphisme.

Bien entendu dans la réalisation de ces activités je leur indique les méthodes à employer. Néanmoins sur une classe de 30 élèves, en moyenne 3 à 4 élèves sont capables spontanément d'utiliser plusieurs méthodes.

Par rapport aux comportements en électricité des élèves soumis à une approche traditionnelle je note chez les élèves qui ont expérimenté, une meilleure compréhension des relations entre les modèles et la réalité. La théorie des dipôles leur permet d'avoir une vision synoptique des phénomènes électriques intervenant dans les réseaux. Il y a là un progrès significatif par rapport à l'enseignement traditionnel qui privilégie trop les éléments résistifs rendant difficile par la suite une appréhension globale de l'électricité et de l'électronique.

Les modèles ayant été introduits dans un souci de répondre à des problèmes et de tenir compte des pratiques sociales en usage dans les laboratoires et les secteurs industriels, les élèves paraissent avoir une vision plus cohérente du cours d'électricité et d'électronique.

Les modèles n'apparaissent pas sui generis tout au long du cours, ils sont élaborés par un élève ou par un groupe d'élèves ce qui les implique dans le processus d'apprentissage. De plus ce type d'élèves, est très intéressé par l'opérationnalité des modèles. Dans cette démarche modélisante centrée sur des pratiques professionnelles ils n'ont pas le sentiment de dresser un catalogue de formules mais de forger un ensemble d'outils leur permettant d'agir sur le concret.

Il n'en reste pas moins qu'un tiers des élèves ont des difficultés pour pratiquer ces activités de modélisation.

Plusieurs causes à ces difficultés.

Ces activités sont basées sur l'utilisation des mathématiques pour traiter les données expérimentales, on retrouve donc chez certains élèves les difficultés rencontrées par ailleurs dans ce domaine. D'autres ont des blocages par rapport à l'informatique et la prise en main des ordinateurs. Leurs difficultés se retrouvent d'ailleurs dans la manipulation de dispositifs expérimentaux. Une pratique de plusieurs années de l'ordinateur dans le cadre d'un enseignement dans les classes

et dans des stages de professeurs me conduit à penser qu'environ 5 % d'individus d'un groupe ne seront pas aptes à dominer l'informatique et le matériel informatique.

Autre constatation : les élèves que l'on qualifie traditionnellement de bons élèves ont tous réussi, à quelques exceptions près, à pratiquer avec succès des activités de modélisation assistées par ordinateur. Mais, et cela à mes yeux est important, un grand nombre d'élèves qualifiés de moyens et même parfois d'élèves en difficulté (et il en existe un certain nombre dans les classes des lycées techniques en raison du système d'orientation) ont su dominer leurs difficultés et tirer parti des activités proposées.

Il me semble que l'aspect informatique des activités les motive fortement. Ce sont en général des élèves qui pratiquent l'informatique en dehors du cadre scolaire. L'utilisation de leurs compétences dans les activités de la classe les valorise et permet de les sortir de leur situation d'échec relatif.

Comme je l'ai écrit la conception des modèles, par les élèves eux-mêmes les rend plus aptes à distinguer la part du formel et la part de la réalité.

Mais il ne faut pas s'y tromper l'informatique est une arme à double tranchant. Le monde où évolue les élèves est un monde de plus en plus virtuel. Les choses perdent leur existence propre pour n'être que des objets virtuels véhiculés par l'écrit, la radio, la télévision, la télématique, etc... A la limite un événement n'existe pas s'il ne s'est pas traduit par une manifestation audiovisuelle. Et des événements n'ayant jamais existé vont avoir une vie propre dans cet univers virtuel...

Dans telles conditions l'ordinateur peut, si l'on n'y prend pas garde, accentuer un tel phénomène.

La réalisation des modèles par les élèves eux-mêmes permet de surmonter cette embûche. Mais elle peut ressurgir au cours de l'utilisation de logiciels de simulation où l'élève a vite fait d'oublier que c'est un cerveau humain qui a placé les modèles dans les programmes.

Il existe une propension des individus à sacraliser l'informatique comme ils sacralisent la chose écrite. C'est là que la présence du

professeur prend toute son importance pour redresser ces errements, poser les problèmes, apprendre à critiquer et, ce qui est la chose la plus difficile, à douter.

Les modèles se représentent sur un écran cathodique et c'est à ce niveau qu'apparaît un nouvel écueil : dans la plupart des logiciels les représentations se font dans un espace à deux dimensions. Dans notre expérimentation ce facteur n'a pas soulevé trop de difficultés. Par contre il n'en est pas de même en mécanique ou pour l'étude des courants sinusoïdaux. En effet la quatrième dimension que constitue le temps est difficile à intégrer dans un ordinateur. Pour beaucoup de phénomènes rapides la simulation animée qui en est faite est plus lente que la réalité et risque d'induire des idées fausses chez les élèves. Si on représente une variation d'une des dimensions de l'espace en fonction du temps la confusion est grande entre une telle représentation et une représentation dimension de l'espace en fonction d'une autre dimension de l'espace.

4. CONCLUSION

Ce travail de recherche a montré que la mise en place d'activités de modélisation dans un enseignement de sciences physiques est possible que la réussite est conditionnée par un apprentissage des techniques de modélisation, de représentation et par une maîtrise des outils informatiques.

Mais cette recherche n'a pas résolu toutes les questions.

Tout en restant dans l'élaboration de modèles mathématiques de comportement elle demande à être approfondie par des équipes plus importantes, sur des élèves de différents niveaux et dans d'autres domaines de la physique et de la chimie. A cet égard les I.U.F.M. pourraient apporter une contribution importante à une telle réflexion. Il reste également à étudier les processus qui permettraient de relier les modèles de comportement aux modèles de connaissance.

Enfin la mise en œuvre des modèles en sciences physiques mais aussi en sciences biologiques et dans les matières professionnelles telles que l'électronique, l'électrotechnique ou la mécanique est un champ de recherche encore peu exploré.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] Étude didactique de l'informatique pour la modélisation et la manipulation de modèles en sciences physiques.
Thèse de doctorat, Jean WINTHER, 17 avril 1992.
L.I.R.E.S.T. - E.N.S. de Cachan, 61 avenue du Président Wilson,
94230 CACHAN.
- [2] Horaires/objectifs/programmes/instructions 1986.
Sciences physiques classes de seconde, première et terminale.
Annexe I.
L'évaluation dans l'enseignement des sciences physiques.
- [3] Utiliser des objectifs de référence en classe de seconde, SCIENCES
PHYSIQUES
Ministère de l'Éducation Nationale D.L.C., 1989.
- [4] Quelques aspects historiques des notions de modèles et de justification
des modèles (Suzanne BACHELARD, Université Paris I -
Sorbonne et Institut d'Histoire des Sciences et des Techniques).
- [5] M. BLACK 1962, Models and metaphors : studies in language and
philosophy (Cornell University Press : New-York).
- [6] Modèles et réalités dans les sciences exactes, Noël MOULOUD.
- [7] Actes des 11^{èmes} Journées de Chamonix janvier 1989, Mise au point
d'outils informatiques pour la modélisation de données expérimentales
en électricité dans le second cycle des lycées.
Jean WINTHER.
- [8] Recherche de modèles expérimentaux assistée par ordinateur.
Jean-Claude TRIGEASSOU.
Technique et documentation.
Lavoisier 1989.
- [9] La physique du hasard.
Charles RUHLA
Liaisons scientifiques, Hachette C.N.R.S., 1989.
- [10] Acquisition et analyse de données, mars 1990, page 71.
J.-C. TRIGEASSOU, D. BEAUFILS, J. WINTHER.
Union des Physiciens.
- [11] Langage et informatique.
Parc aéronautique de Toulouse Colomiers,
8, avenue E. Serres - B.P. 11 - 31771 COLOMIERS Cedex.