

Images et nouvelles technologies pour l'enseignement de la physique

par Daniel BEAUFILS et Jean-Claude LE TOUZE
Institut National de Recherche Pédagogique
Département Technologies Nouvelles et Éducation
92120 Montrouge

L'évolution des technologies en matière d'informatique et d'imagerie (table à numériser, carte d'incrustation et de numérisation, CD-ROM, CDI, etc.) rend envisageable, dans l'enseignement de la physique (niveaux secondaire et supérieur) la construction d'activités élaborées fondées sur l'analyse de phénomènes accessibles par des images ou séquences d'images. Le travail de recherche se situe alors nécessairement sur plusieurs plans : analyse de la place des images dans la physique et son enseignement, réflexion théorique sur la transposition de pratiques prises en référence, réalisation d'outils informatiques, constitution de banques d'images et expérimentation auprès d'élèves ou d'étudiants. Le domaine de la mécanique newtonienne (cinématique et dynamique) a fait ainsi l'objet d'un travail mené à l'Institut National de Recherche Pédagogique («Activités expérimentales sur l'image, assistées par ordinateur, pour l'enseignement de la physique») et est présenté dans cet article¹.

1. L'UTILISATION DES IMAGES EN QUESTIONS

1.1 L'imagerie scientifique : quelques repères

Dès 1830, J. PLATEAU qui utilisait un disque de carton percé de fentes pour observer des mouvements écrivait : «...l'appareil que j'ai indiqué permettra :

- de déterminer la forme de l'objet en réduisant celui-ci à une apparente immobilité,
- d'observer toutes les particularités du mouvement [...],

1. Plusieurs publications intermédiaires figurent dans les actes des Journées Informatique et Pédagogie des Sciences Physiques (U.d.P.-INRP 1988, 1990 et 1992).

– enfin de trouver la vitesse réelle de l'objet [...] au moyen de deux observations et d'une formule». (Cf. SADOUL 1973).

En 1870 Jules MAREY avait, pour étudier le mouvement du cheval, inventé un dispositif capteur-enregistreur composé de poires en caoutchouc placées sous les sabots et reliées par des tubes à un enregistreur, tenu par le cavalier... Mais en 1878, il abandonne ses systèmes mécaniques au profit de l'approche photographique. En 1882, il réalise son fusil photographique, puis construit une cabine mobile pour faire des photos aujourd'hui célèbres : marcheur, sauteurs, chutes et rebonds de balles, envol d'oiseaux, etc. (Cf. FRIZOT 1983).

Les utilisations de la photographie et du film bénéficient aujourd'hui des progrès de l'électronique, depuis les flashes (inventés par Edgerton en 1930), les caméras ultra-rapides, jusqu'à l'enregistrement numérique et le dépouillement par ordinateur (Cf. LIFE 1973, CNRS 1987 et 1991). La commission «Images rapides et ultra-rapides» de l'Association Nationale pour la Recherche Technique (ANRT) organise régulièrement des colloques qui font le point sur l'état de ces techniques. Sur la plaquette de présentation on trouve ainsi : «l'examen ultérieur de ces enregistrements permet d'observer un ralenti des phénomènes, d'en figer un aspect instantané... Des mesures sur ces images, soumises éventuellement à des traitements appropriés, conduisent à une analyse fine des phénomènes évolutifs pour mieux les comprendre et en révéler les particularités».

Parmi les principaux domaines d'utilisation scientifique de l'image pour l'étude de mouvements² on peut citer l'astrophysique, la mécanique des fluides (hydrodynamique des rivières, étude des écoulements turbulents, météorologie), la balistique et la détonique (étude des déflagrations), la sécurité automobile (étude des mouvements et des déformations lors de chocs violents), et bien sûr, l'analyse du mouvement dans le domaine sportif (CNRS 1992). Ce dernier domaine a constitué pour nous une référence privilégiée (comme nous l'explicitons dans la suite) puisque, aussi bien pour l'étude des trajectoires de balles (DUREY 1987) que pour l'étude du mouvement des sportifs eux-mêmes (DUBOY et al. 1988, LEARD 1998, BIO 1988), la méthode utilisée est le relevé des coordonnées des points caractéristiques de l'objet ou du sujet et leur analyse physico-mathématique, ces deux

2. D'autres domaines de recherche, de plus en plus nombreux et variés, intègrent également l'imagerie (CNRS 1987 et 1991).

étapes mettant en œuvre des moyens de numérisation et des méthodes informatisées.

1.2. L'imagerie scientifique dans l'enseignement de la physique

L'étude de phénomènes par l'image (photographies ou films) a déjà été exploitée : films-boucles venus des États-Unis, films S8 ou 16 mm du CNDP, photos stroboscopiques dans les manuels scolaires, reproduction de clichés de chambre à bulles, etc. Mais l'évolution des productions pédagogiques se sont détournées progressivement des idées originelles, la «dérive» se situant à la fois sur le plan des technologies et sur celui des utilisations de l'image.

Ainsi, l'utilisation de la photographie stroboscopique placée au centre des cours du HPP (HPP 1971) et du PSSC (PSSC 1973) et son équivalent dans les manuels scolaires français des années 1980 n'ont guère perduré. Les difficultés rencontrées dans la mise en œuvre de ce type d'approche, en situation de classe normale, ont été en effet de deux types : la difficile obtention d'enregistrements valables et le caractère fastidieux et approximatif des relevés de coordonnées et des constructions graphiques.

La difficulté de réaliser les clichés a eu comme première conséquence de rechercher de nouveaux dispositifs techniques. On a utilisé, par exemple, des mobiles munis de lampes (parfois clignotantes) ; mais, sur les clichés ainsi réalisés, l'objet lui-même n'est parfois *pas reconnaissable*... Ainsi, le mouvement d'un point de la roue de bicyclette donne un cercle ou une cycloïde où la roue n'est plus visible et où toute indication temporelle a disparu ! Ensuite, l'invention des mobiles laissant des traces par étincelage a conduit à réduire les études à celles de mouvements d'un ou deux points particuliers, et ce sur des *objets très particuliers* (et généralement placés dans des conditions bien particulières...)

La seconde conséquence porte sur le rôle resté aux images qui figurent dans les manuels scolaires. La plupart d'entre-elles ont perdu leur valeur scientifique pour ne garder qu'une *valeur illustrative* et sont essentiellement censées évoquer chez les élèves un phénomène connu par ailleurs et justifier (?) implicitement l'étude de telle ou telle notion. Outre le fait que les chronophotographies, en particulier, ont ainsi *perdu toute indication d'échelle d'espace et de temps*, l'interrogation générale à propos de ces «images de phénomènes de référence» vient de ce qu'il n'y a *jamais de retour* : lorsque la photo du choc raquette-balle,

par exemple, a été montrée en introduction de la leçon sur la quantité de mouvement, on n'en parle plus ; ne sont ensuite confiés aux élèves que des documents où ne figurent plus que des points «décharnés» ! (BEAUFILS 1990).

Du côté des films pédagogiques, la situation est très voisine. Très souvent le point de vue adopté est celui de la visualisation-observation, de sorte que les conditions de prise de vues ne sont pas «calibrées» : point de vue en perspective, caméra mobile, absence de repère d'échelle ou de temps... Dans d'autres cas les images proposées sont souvent devenues des images *pré-traitées* qui montrent bien le phénomène mais qui - par le choix d'un objet spécifique, son pré-marquage ou par des astuces de prise de vues, de traitements d'images (jeux de couleurs, surimpression graphique, etc.) - *montrent d'abord «ce qu'il faut voir»*.

2. L'APPORT DES NOUVELLES TECHNOLOGIES DANS L'ENSEIGNEMENT DE LA PHYSIQUE

2.1. De l'ordinateur outil de laboratoire à l'imagerie scientifique

L'une des caractéristiques de l'évolution actuelle des technologies «grand public» est la fusion des techniques audiovisuelles et informatiques. D'un côté, les moyens d'enregistrement ont non seulement évolué en performance classique (portabilité, qualité d'image, réglages multiples, etc.), mais également en nature : vidéodisque, CDI, photographie numérique, etc. De l'autre, les ordinateurs eux-mêmes ont évolué de façon spectaculaire (sur le plan des capacités graphiques en particulier) et les périphériques se sont diversifiés : lecteur de CD-ROM, tablette à numériser, scanner, cartes de numérisation d'images vidéo, etc.

L'ordinateur lui-même est déjà présent dans l'enseignement des sciences physiques depuis plusieurs années ; son introduction repose sur l'idée d'une «transposition d'outils existant actuellement dans l'industrie et la recherche» (DUREY 1987) et ses utilisations concernent le mesurage, la représentation graphique et l'analyse des données. Mais il faut noter ici que certains dispositifs d'acquisition automatique ne facilitent ni l'analyse ultérieure ni la compréhension même de ce qui est mesuré : l'utilisation de cellules photoélectriques pour la détection d'un passage conduit à une approche du mouvement comme «temps fonction de la distance» ; l'utilisation de dispositifs du type «peigne» ou «barre perforée» ne favorise pas l'introduction de la mécanique *du point*. A ceci, il faut ajouter que certains dispositifs, soit perturbent le

phénomène (amortissement dû à la présence d'un capteur analogique), soit limitent les phénomènes accessibles à des objets particuliers (une bille d'acier par exemple) animés de mouvements unidimensionnels (BEAUFILS 1990 b).

Notre alternative est en quelque sorte un retour à l'imagerie comme méthode scientifique : à l'instar de J. MAREY qui quitta ses capteurs pour utiliser la photographie, nous proposons ainsi de laisser une partie des dispositifs compliqués pour les remplacer par l'étude des phénomènes photographiés ou filmés. Le choix de l'appareil photographique et de la caméra tient ici au fait qu'ils constituent des capteurs particulièrement intéressants puisque, non seulement ils ne perturbent pas le phénomène, mais de plus, ils permettent d'étudier des mouvements plans, non rectilignes, et de points quelconques d'objets quelconques.

C'est donc également un retour aux images à la manière des cours du PSSC, mais *avec des moyens technologiques rendant réalistes les tâches de mesure et d'analyse* ; le réalisme étant à la fois celui de la faisabilité technique ainsi offerte, et celui des activités (telle la modélisation mathématique) plus proche dans leur nature de celle du physicien chercheur. De plus, la référence à des pratiques de laboratoire (comme la physique du sport) peut être conservée, et la proposition d'activités expérimentales sur l'image s'inscrit alors bien dans le «paradigme ordinateur outil de laboratoire».

Des activités d'investigation scientifique

La référence indiquée ci-dessus à l'ordinateur «outil de laboratoire» doit cependant être précisée, le seul transfert des outils utilisés dans les laboratoires n'étant pas suffisant pour spécifier la nature des activités transposées à l'enseignement secondaire. La problématique du choix d'une (ou plusieurs) pratique(s) de référence pour la définition des activités accompagnant les outils et méthodes est un point délicat. Le point de vue que nous avons privilégié est celui qui a été développé dans un travail didactique plus général (BEAUFILS 1991 et 1992), où la «*science normale*» - avec les concepts de paradigme, de résolution d'énigmes et de conviction (KUHN 1983, FOUREZ 1988) - a été choisie comme «modèle épistémologique» général pour ce qui concerne la nature des activités de référence, et où la «*modélisation expérimentale*» (TRIGEASSOU, 1988) a été choisie par ce qui concerne les méthodes informatisées d'analyse de résultats de mesure. L'objet n'est

pas ici de reprendre le détail de ces propositions, mais d'en indiquer les idées-forces.

Ainsi, en référence au fonctionnement «épistémologique», le rôle de l'enseignant est-il d'abord de montrer comment à l'heure actuelle le physicien interprète tel ou tel phénomène, avec quelle théorie et avec quelles méthodes ; en travaux pratiques, l'activité correspondante de l'élève sera alors centrée sur la résolution de ce que nous appelons «*questions de physique*», c'est-à-dire des problèmes «non élémentaires» dont la réponse ne peut être donnée qu'en mettant en œuvre les outils et méthodes du physicien : la tâche de l'élève est de montrer que les (ses) connaissances de physique correctement appliquées permettent bien de décrire ou d'interpréter tel ou tel phénomène, et la question doit être présentée comme telle (BEAUFILS 1992 et 1992 b). L'accessibilité de la solution et le réalisme de la tâche sont, pour nous, des conséquences de la puissance et de la rapidité de l'ordinateur.

La référence à la «modélisation expérimentale» permet de préciser les différents types d'outils et de modélisation que l'on peut proposer aux élèves, et a déjà présidé à des réalisations logicielles voisines (pour l'étude de la chute verticale, du glissement sur un plan incliné ou des oscillations mécaniques (BEAUFILS 1990 c, TRIGEASSOU et BEAUFILS 1990). Nous avons été ainsi conduits à considérer deux types de démarches :

- la «mise en évidence» et la formalisation d'un comportement empirique : l'objectif est de trouver une *description mathématique* d'un ensemble de résultats de mesures (les données expérimentales),
- l'interprétation d'un comportement empirique : l'objectif est de chercher l'*interprétation théorique* d'un comportement étudié expérimentalement, par application des relations générales de la physique et d'hypothèses spécificatrices.

En relation avec ces démarches, nous avons défini un ensemble d'outils numériques réparti en trois classes :

- *le calcul et la représentation de grandeurs* : fonctionnalité de base qui permettent de choisir les grandeurs adaptées et les représentations pertinentes,
- *le traceur de courbes et l'écart quadratique* : pour obtenir les tracés de fonctions mathématiques pouvant décrire des points expérimentaux (confrontation par superposition),

– *la résolution numérique d'équations différentielles* : pour obtenir les solutions d'équations que les élèves peuvent écrire mais ne peuvent pas résoudre analytiquement (et dont la représentation graphique est également superposable aux points expérimentaux).

Dans le schéma général d'une activité expérimentale sur l'image, le point de départ est l'image (ou le film) d'un phénomène à propos duquel une question de physique se pose, et dont la réponse passe une analyse quantitative : prise de données par relevé de points sur l'image (numérisation partielle ou totale), calculs de grandeurs, confrontation graphique et numérique avec des prédictions théoriques (descriptives ou interprétatives) calculées à partir de fonctions mathématiques ou d'équations différentielles. Les questions de physique peuvent concerner des mouvements simples comme celui d'un ballon léger dans l'air (quel modèle de frottement ?), ou plus complexes comme celui du centre d'inertie d'un sportif lors d'un plongeon (trajectoire parabolique ?).

3. DES IMAGES ET DES LOGICIELS

Depuis quelques années déjà, l'utilisation de l'image prend un nouvel aspect grâce aux nouveaux supports et à leur exploitation par ordinateur. Ainsi, un groupe d'enseignants-chercheurs du Cambridge College of Arts and Technology a réalisé un ensemble vidéo-disque + logiciel permettant l'étude quantitative de divers mouvements (depuis le passage d'une roue de bicyclette jusqu'au crash d'un train, en passant par l'épaulé-jeté d'un haltérophile) (GLOVER 1989, GRAHAM 1991). Le vidéo-lecteur est piloté par l'ordinateur et l'utilisateur peut sélectionner sa séquence et la faire défiler image par image. Les coordonnées sont relevées par incrustation sur l'image et peuvent être analysées ensuite. Par ailleurs, The Video Encyclopedia of Physics Demonstrations (Educational Group, Los Angeles) met à la disposition des enseignants l'enregistrement de 600 expériences de physique (et leurs commentaires) sur un ensemble de 25 vidéodisque³. La réalisation concerne non seulement les mouvements classiques mais également des prises de vues plus rares comme le tir vertical dans un référentiel accéléré, le rotor d'hélicoptère, etc.

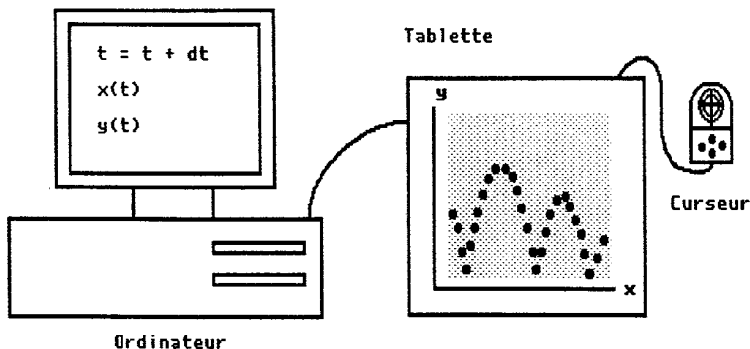
3. Cet ensemble a été présenté en particulier lors des Cinquièmes Journées Informatique et Pédagogie des Sciences Physiques ; l'édition d'une version française est envisagée.

En France, le logiciel OVNI (LECARPENTIER et LAURET 1992) exploite les possibilités d'analyse de mouvements filmés et numérisés image par image. L'utilisateur peut alors faire des relevés de coordonnées sur des mouvements variés : chutes verticales, lancers de ballons, de poids, etc. Il peut ensuite soit modéliser directement la trajectoire par des outils de tracé graphique de droite et de parabole (ajustement graphique de la forme de la courbe aux points expérimentaux) ou exporter les données vers d'autres logiciels pour visualiser le calcul de grandeurs telles que l'énergie totale.

Dans le cadre de la recherche menée sur ce thème à l'Institut National de Recherche Pédagogique, deux logiciels ont été également réalisés. Le premier exploite les possibilités d'analyse de chronophotographies grâce à une tablette à numériser (BEAUFILS 1990 b, BEAUFILS et LE TOUZE 1992), le second permet l'exploitation d'images numérisées obtenues par scanneur ou numérisation vidéo (LE TOUZE et BEAUFILS 1992). Tous les deux sont dédiés à l'étude de mouvements dans le champ de pesanteur ; un bref descriptif en est donné ci-dessous.

3.1. Un logiciel pour l'étude de chronophotographies de mouvements plans dans le champ de pesanteur

Une tablette à numériser est un périphérique constitué d'une surface «active» sur laquelle on peut relever les coordonnées de tout point grâce à un curseur. Une chronophotographie étant fixée sur la tablette il suffit d'effectuer un premier relevé (avec le curseur) de l'origine du repère choisi sur la photo puis de fixer l'échelle en cliquant un point dont l'abscisse connue est entrée au clavier ; l'ordinateur lit alors la valeur correspondante et calcule le facteur d'échelle. Dès lors, tout repérage d'un point de la photo donne une valeur immédiatement convertie en *coordonnées «réelles»*.



Dans le logiciel TABLE réalisé pour ordinateur compatible-PC (carte graphique EGA-VGA), la saisie est effectuée selon ce principe et les points représentatifs des mesures apparaissent directement dans l'espace de représentation choisi par l'utilisateur. Par défaut l'affichage se fait dans les espaces $x(t)$ et $y(t)$ qui correspondent au mode d'acquisition. Les données, dites *primaires*, ainsi obtenues constituent un ensemble de triplets (t, x, y) et sont utilisées dans les calculs de grandeurs dites *secondaires* et les représentations graphiques correspondantes. Il est possible en particulier d'obtenir le calcul et les représentations graphiques (éventuellement superposées) des énergies :

X1 = t	Y1 =	X2 =	Y2 =
t : temps	(seconde)	:	t
x : abscisse	(mètre)	:	x
y : ordonnée	(mètre)	:	y
Ec : énergie cinétique	= $\frac{1}{2}mv^2$	(mJ) :	Ec
Ep : énergie potentielle	= mgy	(mJ) :	Ep
Em : énergie mécanique	= $Ec + Ep$	(mJ) :	Em

Deux ensembles de commandes (menus TRAITEMENT et MODÉLISATION) permettent, respectivement, des calculs sur les grandeurs expérimentales et l'analyse par modèles mathématiques (figure ci-dessous).

Représent.	Traitement	Modélisation
	Tableau Impression Lissage Chgt. origine Mvt. relatif Barycentre Dérivation Intégration	

Traitement	Modélisation
	Fonction Ecart (a) Ecart (b) Régression Remplacement Simulation Effacement

Dans le second menu, la commande FONCTION permet d'obtenir le tracé point par point d'une *fonction mathématique superposée aux points expérimentaux, quel que soit l'espace de représentation* choisi. Cette fonctionnalité est adaptée à la recherche d'un modèle mathématique «de comportement» qui vise à décrire quantitativement les données expérimentales. La commande SIMULATION permet de résoudre numériquement les équations différentielles (méthode de Runge-Kutta 4^{ème} ordre) tirées de la relation fondamentale de la dynamique. Au fur et à mesure du

calcul le logiciel place les points correspondants dans le (ou les) espace(s) représenté(s). *Les grandeurs utilisées pour la représentation peuvent être différentes de celles utilisées dans la définition des équations différentielles et tout changement d'espace entraîne le retracé correspondant du comportement théorique.* Ainsi, le mouvement défini par les équations différentielles sur x et y ayant été confronté aux points expérimentaux de la trajectoire, il est possible d'effectuer la confrontation modèle/données du point de vue énergétique en demandant les représentations de $E_c(t)$, $E_p(t)$ et/ou $E_m(t)$.

3.2. Un logiciel pour l'exploitation d'images numériques

Une image numérique peut être affichée sur un écran d'ordinateur et le relevé de coordonnées peut alors s'effectuer directement à l'aide de la souris. Outre le fait qu'une chronophotographie (ou un film) une fois numérisée, peut ainsi être étudiée sans recourir à une tablette, le recours aux images numériques est justifié par deux apports fondamentaux.

Le premier est *la possibilité ainsi offerte de travailler l'image.* Il est en effet possible d'intervenir sur la palette pour modifier les couleurs et faire ainsi disparaître certains détails du fond ou rehausser certaines zones. Il ne s'agit pas évidemment de «trafiquer» une image, mais de faciliter les repérages ultérieurs et concrétiser le *passage de l'objet reconnaissable à la forme schématisée* dont on suivra l'évolution ; ces possibilités permettent donc de *réaliser une «modélisation graphique»*, étape générale et fondamentale, même si elle n'est pas toujours explicitée en tant que telle.

Le second apport est la possibilité *enfin réalisée*, de superposer à l'image elle-même des ensembles de points expérimentaux, des schémas géométriques et des courbes théoriques. Parce que image et graphique sont ainsi mis au même «format», parce qu'il est possible de superposer un tracé théorique à l'image et non plus seulement aux points de mesures préalablement extraits (et isolés), *l'écran n'est plus seulement l'espace de la confrontation modèle/données, mais aussi celui de la confrontation directe modèle/phénomène.* De plus, le comportement théorique peut lui-même être représenté avec l'image de l'objet ! (Voir figure ci-après).

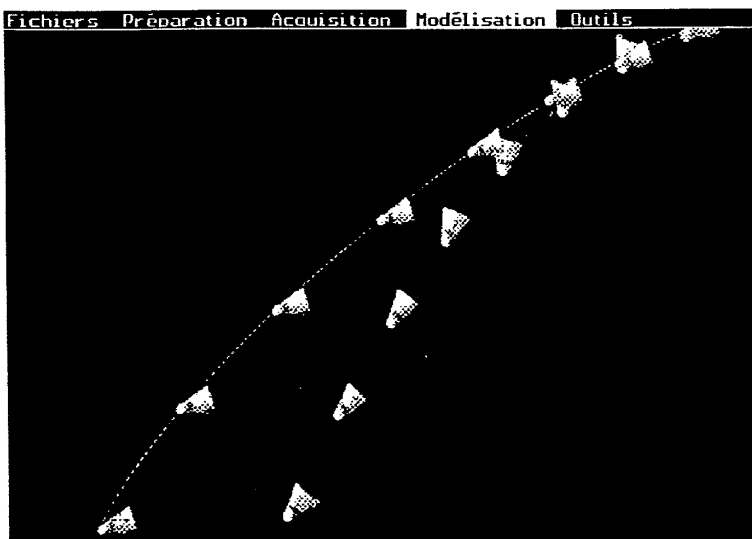
Le logiciel IMAGE a été conçu dans cet esprit et fonctionne sur ordinateur compatible PC muni d'une carte VGA standard. Il permet,

à travers le jeu de cinq menus : l'affichage de toute image (ou série d'images) numérisée au format VGA-LBM ou VGA-BMP, le relevé des coordonnées de tout point de celle-ci, et la confrontation de modèles théoriques aux trajectoires réelles. Il s'agit par ailleurs d'un logiciel ouvert dans le sens où il est possible à l'utilisateur d'exploiter ses propres images et où il est également possible d'exporter des mesures sous différents formats pour une éventuelle analyse avec d'autres logiciels.

Une image (ou une série d'images) étant affichée à l'écran, l'utilisateur peut spécifier les conditions de son relevé de coordonnées (menu PRÉPARATION) ; ainsi le jeu sur la palette de couleurs permet-il de préparer les conditions de mesurage (amélioration du contraste et mise «en relief» de la zone dont on veut suivre le mouvement) ; de même, *le choix du pointeur correspond au choix de l'instrument de mesure, au choix du capteur* ; l'utilisateur peut ainsi choisir entre une forme géométrique et *l'image de l'objet lui-même* qui sera attachée à la souris. La mesure est ensuite réalisée suivant un protocole «classique» mais directement à l'aide de la souris et du pointeur attaché : choix du zéro, spécification de l'échelle, puis relevé des coordonnées des points successifs.



Le menu MODÉLISATION qui figure dans ce logiciel comporte les possibilités d'obtenir, superposés à l'image elle-même, *les tracés théoriques issu d'une modélisation*, qu'il s'agisse d'une représentation de la trajectoire (commande FONCTION) ou de l'interprétation théorique du mouvement (commande ÉQUATIONDIFFÉRENTIELLE). Ces commandes sont équivalentes à celles qui figurent dans le logiciel TABLE ; toutefois le travail ne portant que sur l'image, seul l'espace (x, y) est accessible à la représentation. Conformément aux arguments présentés ci-dessus, le tracé de la trajectoire peut être superposé à l'image et ce, soit de façon «classique» (sous forme quasi continue), soit en «mode calé sur les mesures» avec la représentation de l'objet lui-même :



3.3. Préalable : la réalisation des images

Le choix des moyens technologiques de prise de vue est naturellement fonction des informations recherchées. La photographie permet l'étude de figures planes (câble suspendu, interférences à la surface d'un liquide, jet d'eau continu, etc.), ou de certaines trajectoires (mouvement d'un point lumineux pris en pose, par exemple). Le film permet de réaliser la décomposition d'un mouvement en une succession d'états, et donne ainsi accès aux lois horaires. Quant à la chronophotographie, elle est un moyen en quelque sorte «intermédiaire», puisqu'il y a à la fois décomposition du mouvement et enregistrement de la trajectoire.

Ces trois domaines «techniques» présentent chacun leurs avantages mais aussi leurs inconvénients. Dans tous les cas il y a bien évidemment les exigences scientifiques : précision de l'échelle de temps (calibrage du stroboscope ou de la vitesse de défilement du film) et d'espace (minimisation des effets de perspective sur le repère d'échelle), positionnement de l'appareil par rapport au plan de la trajectoire (cas de prises de vues en extérieur en particulier).

La caméra de cinéma permet des prises de vues à diverses vitesses (25 et 50 im/s avec une caméra Super 8, 100 à 120 im/s avec une caméra 16 mm) et le réglage de l'obturateur (au 1/1000 s par exemple). La difficulté majeure est ici de se placer dans des conditions d'éclairage précises, la réussite de l'enregistrement devant être immédiate. L'enregistrement vidéo, lui, offre beaucoup plus de souplesse (visualisation immédiate de l'enregistrement, coût peu élevé) et donc l'avantage incomparable de pouvoir corriger immédiatement certains paramètres. Mais, il n'offre que le réglage de l'obturation, les prises de vues étant fixées à 25 im/s et ne pouvant donc être utilisées que pour des mouvements lents.

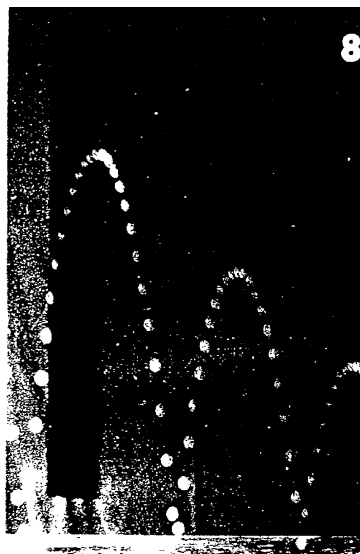
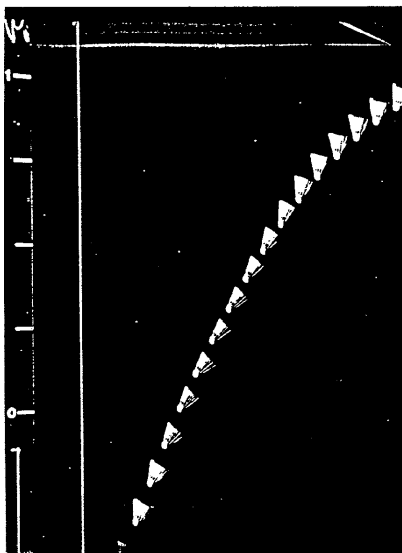
La prise de vues photographique, «simple» ou avec éclairage stroboscopique, permet d'obtenir des enregistrements réduits à un unique cliché. En ce qui concerne la réalisation de chronophotographies, la difficulté est liée au réglage de l'éclairage et de la cadence des flashes nécessaires à l'obtention d'un document comportant suffisamment de positions d'un objet restant reconnaissable⁴.

La réalisation des photographies et des films ne constitue pas la dernière étape d'obtention des documents-images. Il faut en effet les mettre au format correspondant au mode d'exploitation envisagé. Les documents photographiques doivent faire l'objet d'un tirage au format A4 pour être directement exploitables avec une tablette à numériser courante. En ce qui concerne la numérisation, la contrainte porte également sur la mise au format final. Un scanneur ou une carte de numérisation vidéo fournit souvent par défaut des fichiers avec un format spécifique (TIF, PCX, PIC, etc. (Cf. SPINER 1991)), et il faut donc en dernière étape utiliser une fonction d'exportation ou un utilitaire de conversion pour obtenir des images au format LBM ou BMP. Notons ici que le format LBM est utilisé par le logiciel DELUXEPAINT

4. C'est-à-dire non réduit à une tache non représentative de l'objet...

(Electronic Arts) et il peut être intéressant d'utiliser celui-ci pour travailler certaines images sur le plan des couleurs ou des contrastes.

Deux exemples de chronophotographies (parmi les douze clichés fournis avec le logiciel TABLE) sont reproduits ci-dessous à titre d'exemple. Il s'agit d'une part de la trajectoire semi-parabolique d'un volant de badminton (masse : $5 \text{ g} \pm 1 \text{ g}$, intervalle de temps : $27.5 \text{ ms} \pm 0.3 \text{ ms}$), et d'autre part du rebond d'une balle de golf (masse : $45 \text{ g} \pm 1 \text{ g}$, intervalle de temps : $36,0 \text{ ms} \pm 0.5 \text{ ms}$).



4. DES UTILISATIONS AVEC ÉLÈVES ET ÉTUDIANTS

Des essais ont été effectués avec des élèves de classes terminales scientifiques de lycées, et avec des étudiants de DEUG dans le cadre de leur stage de 2^{ème} année. Outre les résultats des observations et leur prise en compte dans l'amélioration des logiciels, ces expérimentations ont permis la réalisation de documents pédagogiques (inclus dans diverses brochures ou dans les documentations de logiciels). Nous ne donnons ci-dessous que le schéma de quelques unes des séances⁵.

5. Le détail est donné par ailleurs dans le rapport de recherche (INRP, 1992).

4.1. Exemple en classe de première : étude du rebond d'une balle

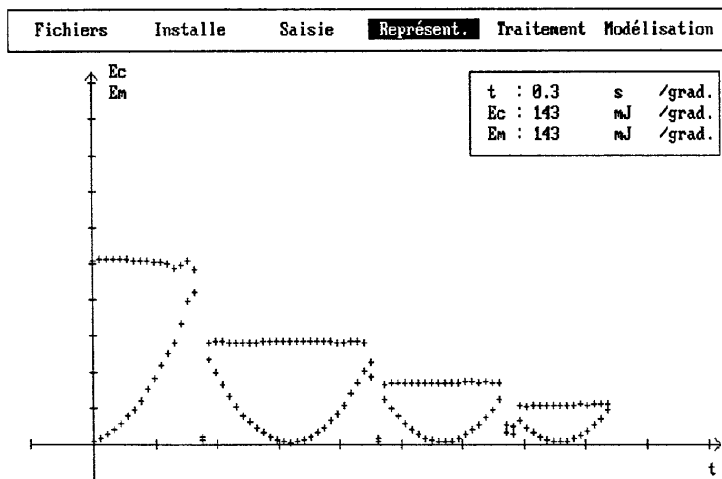
En classe de première S, les mouvements sont étudiés sur le plan énergétique. Les élèves apprennent l'utilisation des différents concepts d'énergie, et savent qu'un système conservatif possède une énergie mécanique constante. A propos d'une chronophotographie d'une balle rebondissante (du type de celle reproduite ci dessus), la double question suivante a été posée aux élèves :

1 - Peut-on négliger le freinage dû à l'air dans la partie aérienne ?

2 - Comment peut-on caractériser le rebond ?

Pour répondre à ces questions, les élèves ont utilisé le logiciel TABLE, effectué le choix d'une origine, spécifié l'échelle de la photographie, puis réalisé le relevé des coordonnées des positions successives de la balle. Leur objectif était clair dès le départ, et ils ont cherché à représenter les énergies, et en particulier l'énergie mécanique.

Parmi les représentations qui ont été considérées comme pertinentes par les élèves, figure celle où les tracés (*progressifs*) de l'énergie mécanique et de la trajectoire sont effectués *simultanément*. Le graphique final ci-dessous (ici sans les couleurs) leur a permis de mettre en évidence d'une part les paliers d'énergie et de conclure que le système pouvait être considéré comme conservatif dans la phase aérienne, et d'autre part la perte d'énergie (cinétique) lors des rebonds. Les élèves ont spontanément cherché à caractériser ces passages par le calcul du pourcentage de perte énergétique.



Énergies cinétique et mécanique (logiciel TABLE).

4.2. Exemple en terminale : étude du mouvement d'un volant

En fin de cours de mécanique, les élèves de terminale (C) peuvent étudier le mouvement d'un volant de babminton. Ils ont alors à vérifier, à partir d'une chronophotographie (Cf. § 3.3.), l'existence de frottements et à voir si le modèle proposé d'une force proportionnelle à la vitesse est acceptable (dans ces conditions).

Les élèves ont utilisé le logiciel TABLE (pendant une séance de cours qui précédait le T.P.) pour relever les positions successives du centre d'inertie du volant. Tous les fichiers des élèves ont été convertis en fichier REGRESS⁶ par le logiciel TABREG⁷ puis recopiés sur leurs disquettes. Un rappel des méthodes numériques utilisées pour la résolution des équations différentielles avait été fait avant la séance⁸.

Les élèves ont calculé, avec le logiciel REGRESSI, les nouvelles «variables» V_x et V_y en utilisant les fonctions CALCUL puis DERIVE et ont demandé ensuite les graphes de $V_x(t)$ et de $V_y(t)$. Ils ont ensuite introduit la définition de l'énergie mécanique E et demandé le graphe de $E(t)$.

L'étude théorique leur a été proposée sous forme de modélisation par étapes :

1 - première hypothèse : le volant se déplace sans frottement ; alors V_x doit être une fonction constante et V_y une fonction affine de t ; l'énergie mécanique du volant doit rester constante ; mais aucun des ces résultats ne se retrouve dans les tracés expérimentaux ;

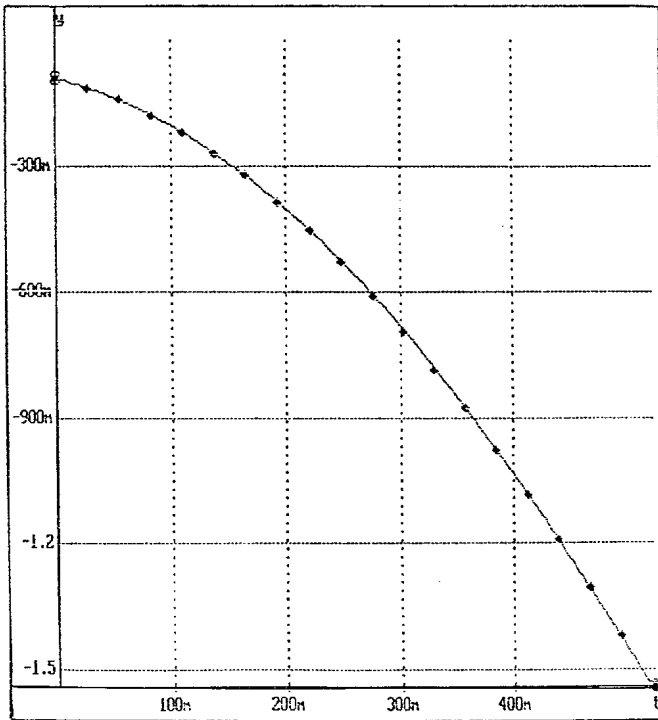
2 - seconde hypothèse : le volant se déplace avec des frottements équivalents à une force constante f ; alors V_x et V_y doivent être des fonction affines de t ; ce qui n'est pas vérifié ;

3 - troisième hypothèse : les frottements sont équivalents à une force f qui varie proportionnellement à la vitesse v : $f = -k \cdot v$; l'étude théorique conduit à deux équations différentielles qui par le logiciel utilisé (REGRESSI) sont résolues indépendamment. Le graphe de chacune des fonctions passe au mieux par les points expérimentaux : le modèle choisi décrit correctement les lois horaires de la chute du volant.

6. Micrélec, Coulommiers.

7. Utilitaire de conversion fourni avec TABLE.

8. Pour compléments : Cf. (CARFI, 1992).

Logiciel REGRESSI : modèle et données en $y(t)$.

4.3. Exemple en DEUG : mouvement d'un gymnaste (soleil à la barre et sortie en salto tendu)

Le descriptif ci-dessous est extrait d'un travail proposé à des étudiants de DEUG 2^{ème} année, dans le cadre de leur stage de physique⁹. A partir de la donnée des questions de physique, les étudiants avaient à conduire un travail de recherche complet : analyse théorique, définition d'un protocole expérimental, réalisation des prises de vues, numérisation, relevés de coordonnées, analyse, communication des ré-

9. Organisé et suivi par Alain GUILLON Université Cergy-Pontoise (INRP 1992).

sultats. A propos du mouvement d'un gymnaste effectuant un soleil à la barre fixe suivi d'une sortie en salto tendu, les questions ont été :

1 - Le mouvement du centre de masse est-il bien circulaire d'abord, parabolique ensuite ?

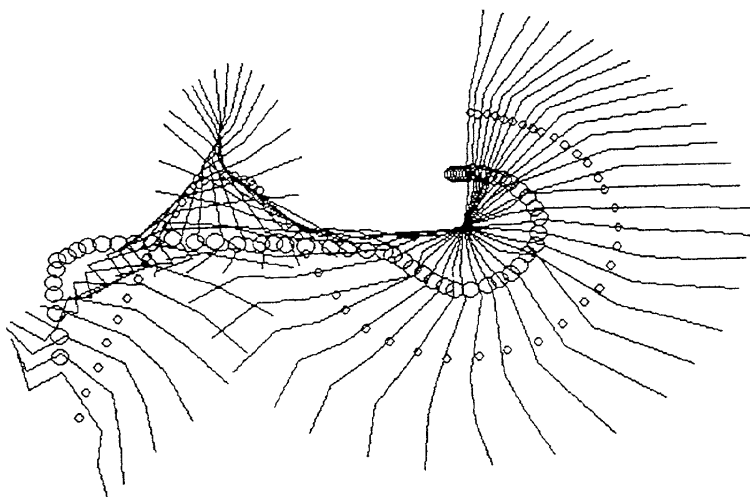
2 - Quelle est l'évolution des diverses énergies au cours du mouvement ?

La phrase théorique a porté sur la manière de modéliser le corps humain pour pouvoir calculer la position du centre de masse du gymnaste et sur le moment d'inertie (pour en déduire l'énergie cinétique de rotation). Le modèle retenu pour les centres d'inertie des différentes parties d'un corps humain de masse M et de taille h est le suivant :

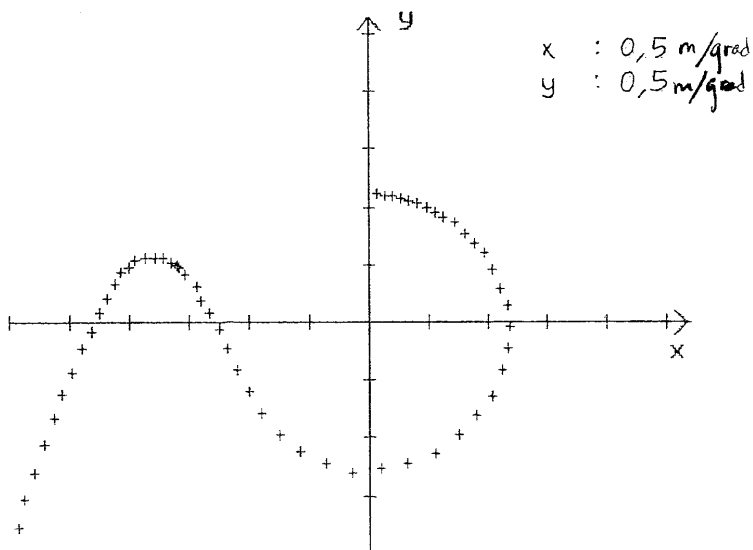
	Masse	Longueur	Position de G
Bras	$0,100 \times M$	Épaule $\rightarrow$ Main	$0,53 \times h$
Corps	$0,497 \times M$	Hanche $\rightarrow$ Épaule	$0,50 \times h$
Tête	$0,081 \times M$	Épaule $\rightarrow$ Sommet tête	$0,72 \times h$
Jambes	$0,322 \times M$	Talon $\rightarrow$ Hanche	$0,447 \times h$

Pour la prise de vues, l'axe de la caméra a été aligné sur la barre fixe et positionnée à environ 9 mètres du gymnaste. Pour chaque exercice deux essais ont été filmés. L'exploitation a commencé par le pointage de la tête, de la main, du coude, de l'épaule, de la hanche, du genou et du talon. Puis un programme complémentaire (GYM, écrit par les étudiants), a permis de fusionner les différents fichiers, de représenter le mouvement du gymnaste par une silhouette fil de fer (kinogramme, voir ci-dessous) et de calculer les coordonnées du centre de masse sauvegardées dans un fichier au format TABLE.

Les deux phases du mouvement ont été alors étudiées séparément. La modélisation des trajectoires n'a pas soulevé de difficulté particulière. L'étude des énergies a été ensuite commencée avec TABLE puis, la rotation ne pouvant être prise en compte, l'étude a été complétée avec REGRESSI. Pour cela on détermine d'abord avec TABLE le mouvement relatif des épaules par rapport au centre de masse, la vitesse angulaire étant calculée ensuite avec REGRESSI. Pour l'énergie cinétique de rotation, le gymnaste, au cours du salto tendu a été assimilé à une tige homogène. Enfin l'énergie mécanique totale est calculée et représentée graphiquement.



Tête, segments corporels et centre de gravité (logiciel GYM).



Trajectoire du centre d'inertie (logiciel TABLE).

5. PERSPECTIVES

Premiers logiciels de ce type, et donc prototypes à ce titre, les deux logiciels TABLE et IMAGE ont évidemment des limites et des insuffisances dont quelques-unes sont d'ores et déjà connues. Mais ces limitations sont liées à deux contraintes fixées par le cadre de la recherche : la première est l'adéquation aux programmes des classes de physique des lycées (et donc l'exclusion des mouvements avec rotation et la limitation des études de systèmes non conservatifs) ; la seconde est celle de la compatibilité avec l'équipement des établissements scolaires (écrans VGA standard).

Les limitations matérielles peuvent être dépassées (écrans 1024×768 en 256 couleurs et supports de stockage CD-ROM, en particulier), et une extension des utilisations à d'autres domaines de la physique (thermique, étude de formes et de déformations, d'images hors du visibles, etc.) peut être envisagée pour une transposition à différents niveaux d'enseignement¹⁰.

Mais deux questions fondamentales devront rester au premier plan. La première concerne la définition générale des activités expérimentales (depuis la mise au point guidée d'un unique protocole expérimental jusqu'à la réalisation libre d'un projet complet), la seconde concerne l'apprentissage des outils informatisés (écart quadratique, résolution numérique des équations différentielles, image numérique, etc.).

De façon générale en effet, les difficultés des élèves et des étudiants concernant la mise en œuvre d'une démarche scientifique et l'organisation des diverses étapes d'un travail semblent liées à une méconnaissance de ce qu'est une démarche scientifique et nous pensons qu'un enseignement incluant des apports de connaissance de nature épistémologique (sur les divers types de modèles et leurs rôles dans les démarches scientifiques) serait à même d'y remédier.

Par ailleurs, que ce soit dans l'hypothèse d'une évolution des programmes ou dans le cas d'une introduction de l'ordinateur dans l'enseignement actuel, une intégration effective de l'utilisation de l'informatique doit aller jusqu'à la définition de compétences exigibles (et leur évaluation) : on devrait en effet pouvoir attendre qu'en fin de parcours, les élèves des sections scientifiques des lycées aient quelques

10. Une nouvelle recherche a été commencée dans ce sens à l'INRP.

savoirs et savoir-faire relatifs aux méthodes numériques (la résolution numérique des équations différentielles en particulier), et qu'ils soient capables de conduire une activité de résolution de question de physique passant par la mise en œuvre d'outils informatisés (tels que la simulation).

BIBLIOGRAPHIE

D. BEAUFILS (1988) - *«Images assistées par ordinateur : avec des images faire de la physique d'abord»*, in Actes des Troisièmes Journées Informatique et Pédagogie des Sciences Physiques, U.d.P.-INRP, 117-122.

D. BEAUFILS (1990) - *«Activités expérimentales sur l'image pour l'enseignement de la mécanique»*, in Ateliers Informatiques, 38^{èmes} Journées Nationales de l'U.d.P., Paris : U.d.P., 7-12.

D. BEAUFILS (1990, b) - *«Mesurer sur l'image, utilisation de techniques de numérisation pour l'enseignement de la physique»*, in Actes des Quatrièmes Journées Informatique et Pédagogie des Sciences Physiques, Paris : U.d.P.-INRP, 53-58.

D. BEAUFILS (1991) - Ordinateur outil de laboratoire dans l'enseignement des sciences physiques, propositions pour la construction d'activités, première analyse des difficultés et des compétences requises chez les élèves de lycée, thèse nouveau régime, UER Didactique, Paris VII, 402 pages.

D. BEAUFILS (1992) - *«L'ordinateur outil d'investigation scientifique au lycée : implications didactiques et pédagogiques»*, in Actes des Journées Informatique et Pédagogie des Sciences Physiques, Paris : U.d.P.-INRP, 105-110.

D. BEAUFILS (1992 b) - *«Constructions d'activités scientifiques en classe de lycée : à propos de l'ordinateur outil de laboratoire»*, in Actes du colloque «Recherches en didactique des disciplines : contribution à la formation des maîtres», Paris : INRP, 183-199.

D. BEAUFILS et J.-C. LE TOUZE (1990) - *«Analyse de données expérimentales, quelle démarche, quels outils»*, in Actes du deuxième congrès international de Robotique Pédagogique, Montréal : Université de Montréal, 237-248.

D. BEAUFILS et J.-C. LE TOUZE (1992) - *«Un logiciel pour l'étude expérimentale des mouvements dans le champ de pesanteur»*, Bulletin de l'E.P.I., 67, 105-123.

BIO (1988) - Actes du symposium «*Sport et technologies Nouvelles*», Ministère de la Jeunesse et des Sports, Lyon.

B.U.P. (1991) - Bulletin de l'Union des Physiciens, numéro spécial «*Informatique et enseignement des sciences physiques*», n° 731, février.

CARFI (1992) - Une nouvelle approche de la mécanique, Brochure CARFI, n° 42, Versailles : CARFI, 120 p.

CNRS, (1987) - Imagerie scientifique, Courrier du CNRS, numéro spécial 66-67-68.

CNRS (1991) - *Signaux et Images*, Le Courrier du CNRS, n° 77.

CNRS (1992) - La recherche et le sport au CNRS, CNRS Info, n° spécial, juin 1992.

J. DUBOY, A. JUNQUA et M. LEARD (1988) - «*Images, sport et mécanique*», in Actes des Troisièmes Journées Informatique et Pédagogie des Sciences Physiques, Paris : U.d.P.-INRP, 123-128.

A. DUREY (1987) - Vers des activités didactiques de mise au point de modèles de physique avec des micro-ordinateurs, Thèse, Université Paris VII, 320 pages.

G. FOUREZ (1992) - La construction des sciences, Bruxelles : De Boeck Université, Coll. Le point philosophique, 235 pages.

M. FRIZOT (1983) - Etienne-Jules Marey, Paris Centre national de la photographie, coll. Photo-poche.

D.-M. GLOVER, G.-R. GRAHAM et R.-M. MACDONALD (1989) - «*The CCAT videodisc - a new resource for physics education*», Phys. Educ., vol. 24, 5, 304-308.

G.-R. GRAHAM (1991) - «*Let's see it for real - a new medium for an old message*», Phys. Educ., vol. 26, 6, 355-358.

HHP (1971) - Concepts du mouvement, tome 1, Canada.

INRP (1992) - «*Activités expérimentales sur l'image avec l'ordinateur : enseignement de la physique*», INRP-TECNE, rapport interne n° 92-4-09, 160 pages.

T. KUHN (1983) - La structure des révolutions scientifiques, Paris : Flammarion, coll. Champs, 285 p.

M. LEARD (1988) - «*Images et sciences physiques*», in Journées Informatique et Sciences Physiques, Actes des 3^{èmes} Journées, U.d.P.-INRP : Grenoble, 39-46.

P. LECARPENTIER et G. LAURET (1992) - «*Mesures informatiques sur des images vidéo*», in Actes des Cinquièmes Journées Informatique et Pédagogie des Sciences Physiques, Paris : U.d.P.-INRP, 261-262.

J.-C. LE TOUZE et D. BEAUFILS (1992) - «*Des images numérisées en physique ?*», in Actes des Journées Informatique et Pédagogie des Sciences Physiques, Paris : U.d.P.-INRP, 75-80.

LIFE (1973) - Les Techniques Photographiques, LIFE, TIME-LIFE International, Coll. La photographie.

PSSC (1973) - Physics, 3^{ème} édition, Heath and Co, Massachusetts.

G. SADOUL (1973) - L'invention du cinéma, Paris : Denoël, Histoire générale du cinéma, vol. 1, 446 pages.

J.-M. SPINER, «PIC, IFF, IMG, PCX, TIFF... (1991) - «*Une expédition dans la jungle des formats graphiques*», La Revue de l'Utilisateur PC, n° 71, 72, 73.

J.-C. TRIGEASSOU (1988) - Recherche de modèles expérimentaux assistée par ordinateur, Paris : Tec & Doc Lavoisier, Toulouse : Langage et Informatique, 368 p.

J.-C. TRIGEASSOU et D. BEAUFILS (1991) - «*Analyse de données, méthodes numériques et sciences physiques*», Bulletin de l'Union des Physiciens, n° 731, 297-308.

U.d.P. (1990) - Acquisition et analyse de données, Paris : U.d.P., 128 p.

U.d.P. (1991) - Propositions pour une harmonisation des logiciels d'acquisition, de traitement de mesures et de simulation, Paris : U.d.P., 62 pages.

U.d.P.-INRP (1986, 1988, 1990, 1992) - Actes des Journées Informatique et Pédagogie des Sciences Physiques, Paris : U.d.P.-INRP.