





# SUR LA MÉTHODE EXPÉRIMENTALE

Michel Develay

*La terminologie pédagogique use de vocables tels que méthode scientifique ou méthode expérimentale, démarche scientifique ou démarche expérimentale, mais aussi expérimentation, expérience, manipulation et même manip pour caractériser les mêmes activités d'apprentissage des élèves.*

*L'article vise à une clarification de ces substantifs au plan didactique, en les analysant conséquemment au plan épistémologique et au plan psychologique.*

la méthode  
expérimentale,  
un mythe au plan  
méthodologique ?

Un oxymoron est une figure de rhétorique formée par un couple de contraires, comme dans les expressions neige brûlante, feu glacé, soleil froid.

Pour René Thom la locution "méthode expérimentale" est un oxymoron (1) :

- l'idée de méthode (du grec meta "vers" et hodos "chemin") caractérise une direction définissable et régulièrement suivie dans une opération de l'esprit, un programme réglant d'avance une suite d'opérations à accomplir et signalant certains errements à éviter. Méthode a donné sens à méthodique.

- l'idée d'expérience renvoie par contre à l'idée d'hypothèse. L'expérimental impose l'existence d'une hypothèse. Or il n'y a pas d'hypothèse sans un certain nombre d'entités imaginaires dont on postule l'existence et qui constitueront la théorie une fois l'hypothèse vérifiée.

une ou des  
méthodes  
expérimentales ?

On le voit, c'est plus qu'un débat de rhétorique formelle : l'épistémologie de la méthode expérimentale est en cause à travers deux approches contraires.

Soit la méthode expérimentale est du côté du méthodique, d'une préconception réfléchie d'un plan à suivre.

Soit la méthode expérimentale ne peut être découverte que dans une opération effective, qui ne peut se trouver qu'en marchant.

C'est un débat doctrinal important, toujours d'actualité dans la communauté scientifique (2), mais aussi nous le supposons dans la communauté enseignante qui traduit ses divergences en utilisant des termes tels que méthode (ou démarche) expé-

(1) René THOM "La méthode expérimentale : un mythe des épistémologues (et des savants ?)", in *La philosophie des sciences aujourd'hui*, sous la direction de Jean Hamburger. Paris. Gauthier-Villars. 1986.

(2) On se reportera au livre précédemment cité et aux réponses à René Thom de divers scientifiques contemporains tels que Gilles Granger, Pierre Jacob ou Antoine Danchin.

de la  
méthodologie à  
la psychologie

rim mentale ou scientifique, expérience, expérimentation, manipulation et même manip, pour envisager cette activité de construction du savoir dont C. Bernard disait que "*plus qu'une activité qui montre, elle est une activité qui instruit*" (3).

La première partie de cet article se propose d'aborder ces ambiguïtés et incertitudes terminologiques au plan pédagogique, en lien avec un positionnement épistémologique.

Une seconde manière d'apprécier la méthode expérimentale est d'en envisager pour l'apprenant les caractéristiques au plan psychologique.

Quelles capacités ou compétences sont en jeu à travers les différentes phases qui la constituent ?

En prenant comme référence la notion d'opération mentale qu'utilise P. Meirieu (4) et que nous préférons nommer mode de pensée, nous envisagerons dans une seconde partie l'intérêt de la méthode expérimentale au niveau des apprentissages.

Alors pourrions-nous dans une troisième partie aborder successivement quelques "pathologies" de la méthode expérimentale.

Notre propos est donc triple : épistémologique, psychologique et pédagogique.

## 1. APPROCHES ÉPISTÉMOLOGIQUES

La méthode renvoie à un itinéraire balisé par des étapes prévisibles dans un parcours intellectuel. Il y eut un "*Discours de la méthode*".

La méthode avec un m majuscule est d'abord un concept philosophique.

La démarche, qui fait partie du langage commun renvoie à un cheminement, à une tentative pour réussir une entreprise, sans a priori d'étapes prédéterminées. La démarche est d'ailleurs du côté du tâtonnement.

méthode ou  
démarche ?

Ainsi pourrait-on parler de **méthode expérimentale** au plan pédagogique lorsque l'itinéraire que les élèves auront à emprunter est largement prédéterminé.

Une **démarche expérimentale** à l'inverse rendrait compte d'une conduite de la pensée plus vagabonde, et donc moins contrainte par des indications d'actions de la part de l'enseignant.

(3) Claude BERNARD, *Introduction à l'étude de la médecine expérimentale*, Paris. Garnier Flammarion. 1966.

(4) Philippe MEIRIEU, *Outils pour apprendre en groupe*, tome 2. Lyon. Chroniques sociales. 1984.

expérimentation,  
expérience,  
manipulation :  
synonymes ou  
antonymes

**L'expérimentation** ne constitue qu'une étape au cours de la méthode (ou de la démarche) expérimentale. Celle au cours de laquelle va être mise en train une expérience. Ainsi l'expérimentation est à la méthode expérimentale ce que le temps de la rédaction est au travail d'écriture.

L'expérimentation constitue le processus qui conduit à partir de l'émission de l'hypothèse à la réalisation d'une expérience et à l'analyse de ses résultats.

**L'expérience** est à l'expérimentation ce que le texte couché sur le papier est au travail d'écriture : la face visible d'une activité intellectuelle souterraine généralement beaucoup plus riche et dont elle ne conserve qu'une partie. Et comme le travail d'écriture peut entraîner une refonte de l'activité qui l'a généré, les résultats de l'expérience peuvent interagir sur la méthode. L'expérimentation correspond au processus, l'expérience au produit.

**La manipulation**, parce qu'elle met l'accent sur le caractère manuel de l'activité, valorise la dimension psycho-motrice de l'expérimentation. Du reste lorsque dans les séances de travaux pratiques on parle de manipulation, on ramène bien l'activité de l'apprenant à une dimension d'exécution. Celle-ci est particulièrement évidente pour certaines "manips" au matériel contraignant (respiromètres, chromatographes au lycée). A l'Université les exemples seraient encore plus nombreux à citer.

La démarche expérimentale au niveau méthodologique peut être caractérisée par diverses étapes, identifiées tout autant par leur situation dans une chronologie que par l'ensemble des interactions qui les unissent en un système cohérent.

**Ainsi peut-on caractériser au cours de la méthode expérimentale :**

### 1.1. La phase de formulation du problème

On sait la difficulté qu'il y a à bien poser un problème. Et c'est parfois au terme d'une activité qui cherchait à résoudre un problème que se trouve correctement posé ce dernier.

Formuler un problème à résoudre peut être lié à une volonté de connaissance gratuite du réel sans demande sociale a priori. A contrario la recherche peut être motivée par une exploration exhaustive du réel avec l'espoir de détecter une anomalie significative, de faire une observation surprenante qui aboutira à une hypothèse féconde, voire de trouver ce que l'on ne cherchait pas. C'est ce que l'on observe souvent dans les laboratoires de recherche.

l'importance de  
la formulation du  
problème

Formuler un problème à résoudre en situation d'apprentissage scolaire (de la maternelle à l'Université) est en lien avec la capacité de l'apprenant à se poser des questions, à comparer une situation nouvelle avec une situation connue, à envisager -grossièrement sans doute en première approximation- le sys-

tème dans lequel étudier le phénomène en cause, à mettre ensuite en place une stratégie du détour.

En gardant présent à l'esprit ce que dit G. Canguilhem à propos de la question : *"une question ne paraît jamais bien posée qu'au moment où elle reçoit une solution, c'est-à-dire au moment où elle s'évanouit comme question"*, on peut dire que cette étape souvent absente du processus d'apprentissage est une étape particulièrement importante si les finalités d'un enseignement scientifique visent à une activité de la pensée et pas seulement à une forme de l'action, l'activité scientifique s'exprimant par une curiosité toujours éveillée au contact des faits.

## 1.2. L'émission d'une hypothèse

Elle conduit à prolonger le réel par l'imaginaire. Il n'y a pas d'hypothèse sans une certaine forme de théorie, et cette théorie implique toujours des entités imaginaires dont on postule l'existence.

le rôle de  
l'imaginaire

L'hypothèse est au départ une conjecture douteuse mais vraisemblable, par laquelle l'imagination anticipe sur la connaissance, et qui est destinée à être vérifiée ultérieurement.

L'hypothèse occupe une place privilégiée dans la construction de la connaissance parce qu'elle est d'abord invention. Aussi la part d'éléments irrationnels à son propos a été soulignée. La notion d'insight des psychologues de la forme, l'illumination vécue plus que dirigée par son auteur dans un état de rêve ou de demi-sommeil (Kekulé pour la découverte de la forme cyclique de la molécule de benzène, F. Jacob pour la régulation de la biosynthèse des protéines rapportée dans *La statue intérieure*) en rendent compte.

Mais à côté de cet imaginaire on pourrait aussi trouver à la source de l'hypothèse une vaste majorité d'événements quotidiens qui préparent cette hypothèse.

Quoi qu'il en soit des fondements de l'hypothèse, elle emprunte au domaine de la créativité, elle constitue un pari à démontrer, une incertitude sur l'issue attendue, elle anticipe sur l'action qu'elle rend indispensable, elle est irremplaçable pour l'accès de l'élève, par delà un enseignement scientifique, à la prévision des événements et à l'action sur eux.

la nécessité  
d'isoler un  
système

L'hypothèse est fondamentale aussi parce qu'elle conduit à isoler le système sur lequel on souhaite agir, nécessitant ainsi de faire abstraction de toutes les dimensions de la situation qui ne sont pas touchées par la transformation que l'expérimentateur envisage. L'hypothèse définit à partir du problème à résoudre le champ de la recherche.

Cette place centrale de l'hypothèse dans l'enseignement biologique est pratiquement difficile à mettre en œuvre à cause de la densité des programmes, des difficultés à mettre en actes des expériences avec du matériel simple... Et dans le second cycle les élèves ont souvent plus à réfléchir aux hypothèses des autres qu'à celles qu'ils pourraient eux-mêmes formuler.

### 1.3. La vérification de l'hypothèse

vérifier ou justifier  
une hypothèse ?

Elle conduira dans une démarche scientifique à une multitude de cheminements qui correspondront à une observation du réel, à une expérimentation (que C. Bernard définit comme une observation provoquée), mais aussi à des recherches documentaires, à des enquêtes, utilisant des techniques diverses pour le recueil des données et leur traitement.

La démarche scientifique n'est pas l'apanage des sciences expérimentales, elle s'applique aussi aux sciences sociales et humaines. Par contre la démarche expérimentale ne se rencontre qu'au sein des sciences expérimentales.

L'expérimentation correspond à la phase de vérification de l'hypothèse par une expérience appropriée et son interprétation. Si nous utilisons le terme de vérification, c'est en fait un abus de langage. Une hypothèse ne peut jamais être vérifiée. Entre l'hypothèse et ses conséquences soumises à vérification il n'existe pas de liaison nécessaire. L'interprétation que propose l'hypothèse n'est qu'une des interprétations possibles. Rien ne prouve qu'une interprétation qui n'a pas été envisagée ne s'accorderait pas avec les faits observés. Il serait peut être plus correct de parler de justification de l'hypothèse que de vérification de l'hypothèse. Nous conserverons cependant le mot vérification.

La dimension créative précédemment soulignée pour l'émission d'hypothèse se retrouve à l'occasion du montage de l'expérience ; on sait dans les laboratoires comment parfois des morceaux de ficelle permettent de créer des dispositifs géniaux. Il en va de même souvent en classe.

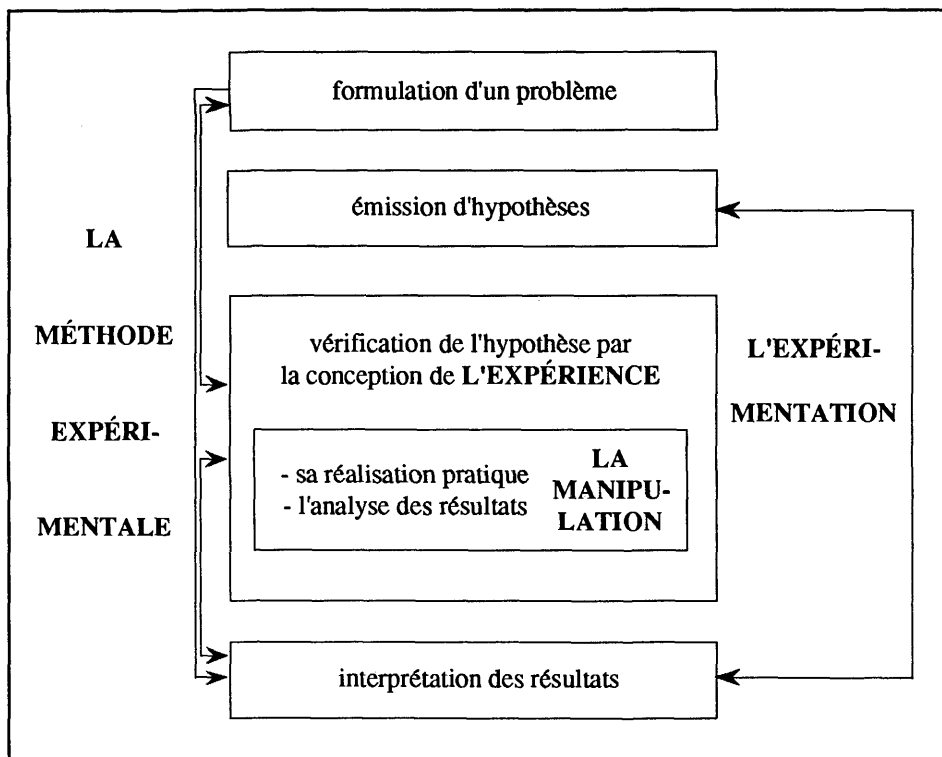
Une phase de mesure est souvent mise en œuvre au cours de cette étape de vérification de l'hypothèse qui pose des questions de techniques, d'outils mathématiques, d'inférences statistiques.

### 1.4. L'interprétation

Au terme de la vérification de l'hypothèse par l'expérimentation c'est une des étapes qui conduit à l'infirmité (rare) et plus souvent à la confirmation des pré-supposés initiaux. Elle conduit à la construction de concepts, de lois, de théories, de modèles. Parfois elle débouchera sur une nouvelle question.

la méthode : un  
système  
davantage  
qu'une  
chronologie

Le schéma que nous proposons ci-après matérialise les différentes étapes de la méthode expérimentale dans des situations d'enseignement, étapes dont nous avons dit qu'elles ne sont pas tant à penser chronologiquement que interactivement. Ainsi l'émission d'hypothèses n'existe parfois que parce que le sujet a présent à l'esprit les conditions de mise à l'épreuve de cette expérience, parce qu'il envisage, en même temps qu'il propose une hypothèse, l'expérience qu'il pourra conduire pour la confirmer. L'expérience aussi n'est parfois rendue possible que parce que les conditions de son interprétation sont réunies



avant qu'elle ne soit mise en œuvre.

Pour René Thom qui s'intéresse à la structure générale du fait expérimental dans le domaine de la recherche, il y a lieu de distinguer l'expérimentation, l'observation et l'exploration.

Ces trois notions voisines ont en commun quelques étapes de la démarche ci-dessous :

1. On isole un domaine de l'espace-temps, aux parois réelles ou fictives : le laboratoire ;
2. Selon un protocole de préparation on le remplit de divers éléments (êtres vivants, substances chimiques...) qui constituent le système à étudier ;
3. On perturbe ce système en lui envoyant à partir de sources dûment contrôlées des flux de matière ou d'énergie ;
4. On répertorie les réponses du système grâce à des appareils spécifiés dans le protocole d'expérience.

Pour René Thom l'observation conduit à la mise en œuvre de la phase 4 seulement ; l'exploration à 1, 2 et 4 ; l'expérimentation à 1, 2, 3 et 4.

Comme on le constate, René Thom emploie le terme d'expérimentation quand nous parlons de méthode expérimentale et ses références sont différentes de ce qui se passe en classe parce

méthode  
expérimentale  
dans la classe et  
le laboratoire de  
recherche



qu'elles relèvent d'un plus grand formalisme : on expérimente d'abord pour voir, un peu au hasard, pratiquement en l'absence de toute théorie constituée, afin "de trouver ce que l'on n'a pas cherché".

## 2. APPROCHES PSYCHOLOGIQUES

Nous nous proposons maintenant d'analyser la méthode expérimentale par rapport à la notion de **mode de pensée** que nous préférons à celle d'opération mentale utilisée par P. Meirieu.

Ainsi passerons-nous au crible les différentes étapes que l'on peut identifier au cours d'une démarche expérimentale dans le but d'identifier quels modes de pensée, à chaque occasion, sont en jeu. Les exemples proposés reprennent des propositions de Y. Ginsburger-Vogel.

### 2.1. La notion de mode de pensée

Nous considérerons la notion de mode de pensée comme la résultante d'un ensemble d'opérations mentales. Nous parlerons en effet de mode de pensée pour indiquer que le traitement de l'information peut s'effectuer selon différentes procédures parmi lesquelles les plus fréquentes au niveau d'une macro-analyse (cette fréquence renvoyant et justifiant l'idée de mode avec son sens statistique) sont les modes de pensée inductive, déductive, divergente, dialectique et analogique.

Un mode de pensée regroupe ainsi diverses opérations mentales qu'une micro-analyse permettrait de caractériser. Par exemple, se demander si le ver de terre respire et chercher à le savoir en observant si son corps est soumis à des mouvements permanents qui rappelleraient les mouvements respiratoires des vertébrés correspond à une démarche déductive pour des élèves auxquels on aurait enseigné que la respiration est d'abord ventilation. Le sujet se place du point de vue des conséquences d'un principe qu'il connaît : respirer correspond à un mouvement de ventilation permanent du corps pour un animal.

Ce mode de pensée déductif qui est identifiable au niveau d'une macro-analyse est lui-même la résultante de diverses opérations mentales analysables au niveau d'une micro-analyse : la capacité à observer un mouvement, la capacité à se définir un laps de temps déterminé pour envisager la reproductibilité rythmique d'un événement, la compétence à caractériser la respiration par un mouvement de ventilation...

Nous empruntons à P. Meirieu la caractérisation des modes de pensée inductif, déductif, dialectique et divergent, même si cet auteur parle plutôt d'opération mentale.

Avec J.P. Astolfi nous ajouterons le mode de pensée analogique.

mode de pensée  
et opération  
mentale

## 2.2. Reconsidérons ces modes de pensée

### • La pensée déductive

déduire

Elle amène à se placer au niveau des conséquences d'un fait, d'une propriété ou d'une loi dans le but d'en inférer les conséquences au niveau de situations particulières.

Enoncer une règle de grammaire ou un théorème de mathématiques et aussi indiquer les principes d'une classification zoologique pour ensuite utiliser la règle dans l'écriture d'une phrase, appliquer les données du théorème à une situation mathématique ou caractériser le groupe zoologique d'un animal donné correspondent à l'usage de la pensée déductive.

D'une manière générale, la pensée déductive conduit à passer d'un cas général à des situations particulières qui s'expliquent par celui-ci. Par exemple, si à propos de la communication animale le professeur présente d'abord le schéma simplifié de la théorie de l'information (*cas général*).

émetteur ——— information ———> récepteur

il proposera ensuite de vérifier si cette loi se vérifie dans le monde animal (*cas particulier*).

### • La pensée inductive

induire

Elle peut être considérée comme l'inverse de la pensée déductive. Elle fait passer d'un ensemble d'observations particulières à une proposition générale (un concept, une règle, une loi).

Elle conduit à une logique des classes à partir d'inférences toujours discutables.

Si le professeur dit : "comparons le comportement alimentaire de la tique, du crotale, du requin (*cas particuliers*), voyons ce qu'ils ont en commun" et que l'observation comparée fasse apparaître des points communs entre ces êtres vivants, on parviendra à un schéma commun, voire à une loi (*cas général*). J.P. Astolfi (5) rappelle que la pensée déductive fonctionne grâce à des inférences rigoureuses, alors que la pensée inductive utilise des inférences probables.

L'induction constitue, non pas à proprement parler un raisonnement, mais un moyen heuristique ou algorithmique pour découvrir du nouveau, pour inventer, pour généraliser. Aussi si la déduction est rigoureuse, elle ne permet pas d'étendre la connaissance, sa conclusion ne faisant qu'explicitier ce qui était présent dans les prémisses.

---

(5) Jean-Pierre ASTOLFI, Modes de raisonnement et démarches de pensée. In tiré à part : *Compétences méthodologiques en sciences expérimentales*. Septembre 1986.

En situation de classe, la comparaison de diverses phrases qui relèvent d'une règle commune peut permettre de caractériser cette règle. En biologie, l'observation des comportements de divers animaux peut conduire à la construction d'un concept éthologique donné.

- La pensée dialectique

mettre en relation  
pour construire  
quelque chose  
de nouveau

Elle examine les rapports entre des situations, des énoncés, des principes explicatifs distincts, appartenant à des champs de référence différents dans le but de construire un nouvel énoncé, un nouveau principe explicatif, un nouveau système intellectuel. Philippe Meirieu explique qu'il utilise le mot dialectique au sens platonicien de l'art de confronter et d'organiser les concepts.

Lorsque au cours de ses études d'économie un élève met en relation des données de géographie physique, d'histoire, de géopolitique, pour en voir la cohérence et se construire ainsi un système intellectuel donné, cet élève met en jeu un mode de pensée dialectique. La capacité d'un élève à confronter des données de biochimie, de physiologie, d'histologie lui permettant de construire un système explicatif cohérent du fonctionnement d'une ultrastructure au niveau tissulaire relève du même mode de pensée dialectique.

- La pensée divergente

Elle permet de produire des formes nouvelles, des relations imprévues, de lier des éléments considérés généralement comme indépendants.

La pensée divergente, c'est la faculté créatrice, l'imagination, la fantaisie pour Beaudot, la fluidité, la flexibilité, l'originalité pour Guilford (6).

créer, inventer

La capacité d'émettre des hypothèses fait largement appel à la pensée divergente.

Lorsque le professeur demande à ses élèves de proposer diverses manières de rendre compte d'une observation et qu'un texte, un schéma, un dessin, une bande dessinée, un organigramme sont encouragés, la pensée divergente est valorisée.

- La pensée analogique

Elle repose sur la transposition d'une relation d'un domaine connu à un domaine inconnu. Elle fait largement appel aux images, aux comparaisons, à la métaphore dans des raisonnements de type symétrique. La pensée analogique est celle qui conduit à dire : ça me fait penser à..., c'est comme....

---

(6) rapporté par André PARÉ, *Créativité et pédagogie ouverte*. Tome 2. Québec, Éditions NHP. 1980.

### 2.3. La démarche expérimentale analysée par rapport à la notion de modes de pensée

- La formulation d'un problème

la formulation  
d'un problème  
et la capacité à  
s'étonner

Elle correspond à la capacité à s'étonner devant l'inconnu, le non caractérisable, le non assimilable à une structure explicative que l'on maîtriserait déjà.

Ainsi cette phase relève tout à la fois de la difficulté à faire fonctionner la pensée analogique ("ce n'est pas ou pas tout à fait comme"), de l'incapacité momentanée à mettre en œuvre une pensée déductive (la situation problème ne peut pas s'expliquer par un référent déjà maîtrisé), de l'embarras à rapprocher en totalité l'événement considéré d'un événement identique, (les deux ayant suffisamment de points communs pour s'expliquer par le même référent théorique), de la résistance à envisager une relation entre cet événement et une autre situation dans un autre domaine pour accéder à une conceptualisation mettant en cohérence dialectique ces deux données.

La formulation d'un problème dit cette incapacité à trouver un principe explicatif déterminé dans une situation donnée, et la nécessité d'envisager un détour pour lever l'obstacle qui sera identifié au terme de la résolution du problème.

- Émettre une hypothèse

l'hypothèse, une  
explication pour  
voir

C'est entrevoir une explication potentielle. La pensée divergente autorise un maximum d'hypothèses pour une situation déterminée. La pensée divergente permet d'élargir au maximum le champ des investigations possibles. Mais parmi l'ensemble des hypothèses possibles certaines seront sélectionnées qui correspondent à une expérimentation possible parce que d'emblée elles sont considérées plus valides, plus plausibles que d'autres.

Ainsi non seulement l'émission d'hypothèses fait référence à la pensée divergente, mais elle fait aussi appel à la pensée déductive. Il ne peut pas y avoir d'hypothèse indépendamment d'une théorie de référence préalable.

Tout l'enjeu d'une démarche expérimentale sera d'envisager au moment de l'émission d'hypothèse le niveau de corrélation possible entre une théorie explicite ou implicite préalable et les résultats prévisibles de l'expérimentation.

Cette phase de l'émission d'hypothèse, parce qu'elle conduit à puiser aux modes de pensée divergente et déductive, constitue une phase de l'apprentissage extrêmement riche pour les élèves.

- La vérification de l'hypothèse

Elle conduit à concevoir une expérience, à la mettre en œuvre et à en analyser les résultats.

imaginer pour la  
vérifier

La conception de l'expérience met en jeu à la fois la pensée divergente (imaginer un dispositif conduit souvent à une véritable activité de création) et la pensée déductive (on conçoit un dispositif en relation avec un système explicatif que l'on possède). Mais la pensée analogique opère aussi parfois.

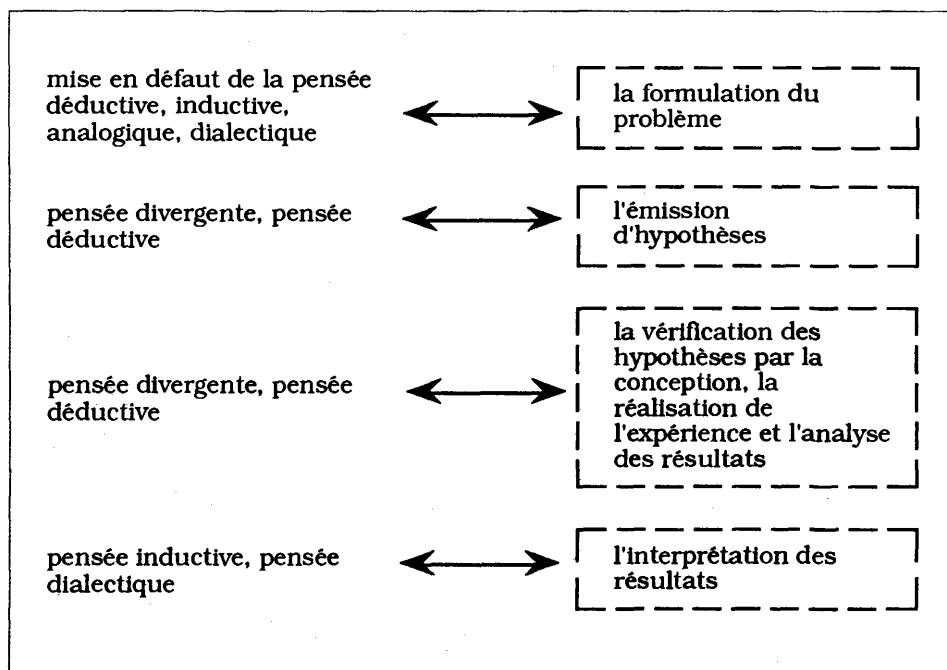
C'est en lien explicite ou implicite avec des situations, des dispositifs voisins mais différents empruntés à d'autres domaines, à d'autres données, que l'expérience est réfléchie.

L'analyse des résultats de l'expérience suppose l'usage de techniques, de méthodes de traitement et d'analyse des données au cours desquelles la pensée déductive sera largement privilégiée.

- L'interprétation

Elle conduira à unir les résultats obtenus avec des résultats déjà connus pour créer ou user d'un concept, d'une relation, d'un système déjà connus. Selon que ce rapprochement se fera entre deux domaines voisins (deux classes d'équivalence) ou non, on fera appel à la pensée inductive ou dialectique.

Le tableau ci-après résume la liaison entre les différentes étapes de la démarche expérimentale et les modes de pensée :



Il est intéressant de constater l'extrême richesse au niveau des modes de pensée de la démarche expérimentale qui conduit à valoriser pensée inductive, déductive, dialectique, divergente et analogique. C'est peut-être une des raisons pour lesquelles au plan de l'apprentissage elle constitue une référence pour la plupart des disciplines enseignées.

### 3. QUELLES PATHOLOGIES DE LA MÉTHODE EXPÉRIMENTALE DANS L'ENSEIGNEMENT ?

le moment de  
poser le  
problème

Fréquemment en situation d'enseignement la formulation du problème est à l'initiative de l'enseignant pour des raisons de temps didactique dirait Y. Chevallard (7), à moins que ce ne soit pour satisfaire aux injonctions du système d'inspection pour lequel l'enseignement parfois se résout en termes de minutage de chapitres. De sorte qu'il est de l'ingéniosité de l'enseignant de présenter au moment qu'il ne choisit pas, pour des élèves qui sont censés être en appétit permanent de découvertes scientifiques, une situation problème qui s'achèvera avec la sonnerie horaire.

son intérêt pour  
l'élève ?

G. Bachelard disait déjà qu'il est aussi important de bien poser les problèmes que de les résoudre. Quels élèves ont la possibilité en situation de classe scientifique de poser des problèmes qu'ils chercheront à résoudre, ou à mieux poser ? Problèmes en lien avec des situations quotidiennes qui leur confèrent du sens ? Quand dira-t-on suffisamment l'importance à penser en termes d'apprentissage avant de légiférer en termes d'enseignement ?

son occultation

Lorsque la méthode expérimentale ne conduit pas les élèves à émettre des hypothèses, lorsque l'on ne peut plus que parler de "manip", l'apprenant est réduit à un rôle d'exécutant de tâches manuelles et à l'analyse des résultats. C'est le cas de certaines séances qui, très pratiques, s'apparentent à des séances de travaux manuels. Il arrive alors que certains élèves soient munis d'une fiche de travaux pratiques sur laquelle ils n'ont plus qu'à inscrire les résultats d'une expérience préparée devant eux, sans avoir à s'interroger sur les fondements de ce qui leur est proposé.

Où alors peut-on situer la fécondité au plan des apprentissages de la méthode expérimentale ?

Nous avons précédemment dissocié analyse des résultats et interprétation des résultats. L'analyse des résultats conduit à leur compréhension dans le cadre de l'expérience conduite.

---

(7) Yves CHEVALLARD, *La transposition didactique*. Grenoble. La pensée sauvage. 1985

analyser les  
résultats pour  
ensuite les  
interpréter

afin de créer un  
sens nouveau

On pourrait parler de validité interne. Soit un montage expérimental sur l'influence des conditions d'humidité pour le développement de moisissures. J'analyserai les résultats si je conclus au vu des expériences réalisées que l'humidité X est la plus favorable au développement de la moisissure Y. J'interpréterai ces résultats si je parviens à les mettre en relation avec d'autres situations pour m'interroger par exemple sur les caractéristiques des moisissures en général qui ont tant besoin d'eau pour se développer, ou si je me demande s'il existe une relation entre le développement des moisissures à l'humidité et à l'obscurité (ce second facteur peut-il éliminer les effets du premier dans l'industrie alimentaire). Interpréter c'est donner du sens, c'est chercher une validité externe à l'expérimentation.

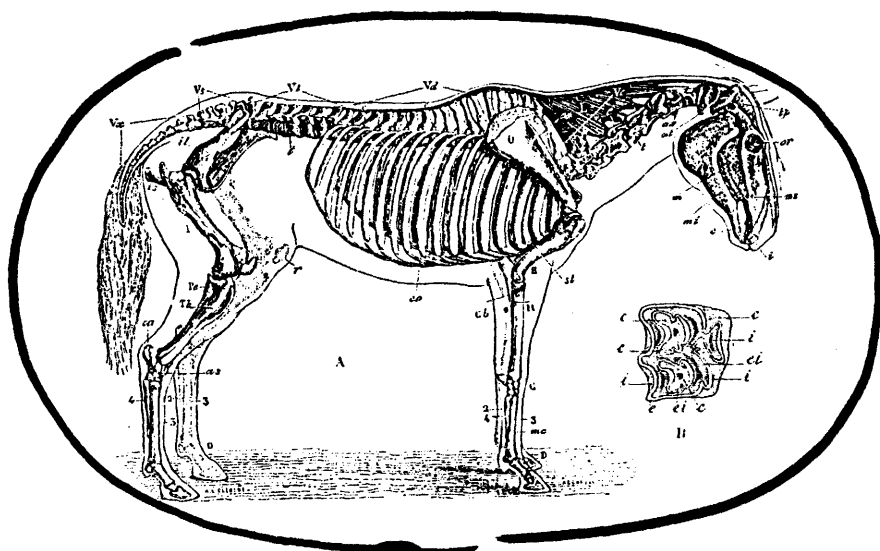
Aussi est-il important que la méthode expérimentale n'ait pas pour unique objectif d'analyser les résultats de l'expérience qu'elle a induit, mais qu'elle ait aussi comme intention d'en interpréter les résultats afin de les mettre en relation avec d'autres phénomènes, dans le but de créer un sens nouveau. Du reste, il arrive que l'interprétation des résultats n'ait pas lieu parce qu'elle préexistait à la démarche même de recherche. C'est le cas lorsque l'enseignant en cours énonce un concept, une loi, une théorie que l'expérience ensuite va vérifier en travaux pratiques. Ceux-ci conduisent à chercher ce que l'on sait déjà !

On pourrait sans doute relever d'autres pathologies de la démarche expérimentale. Notre propos ne visait pas à les identifier toutes. On montrerait sans doute, par davantage d'exhaustivité dans l'analyse de séances dites expérimentales, le cryptodogmatisme qu'elles recèlent, dans le même temps où de nombreux enseignants considèrent comme fondamental pour l'accès à la rationalité que leur élèves vivent un enseignement expérimental.

Nous avons dit la responsabilité des structures institutionnelles qui réclament davantage de participation des élèves dans l'élaboration de leur savoir, davantage d'initiatives des enseignants pour aller dans ce sens, dans le temps où elles décident à la demi-heure près des durées d'enseignement.

Il serait utile aussi de s'interroger sur les représentations qu'ont les enseignants de la méthode expérimentale (alors que la grande majorité d'entre eux n'ont pas eu à conduire d'activités de recherche), de la fonction qu'elle leur paraît avoir dans la formation scientifique de l'enfant. Alors découvrirait-on peut-être un nouvel oxymoron constitué des mots enseigner et apprendre.

Michel DEVELAY  
École Normale, Bourg-en-Bresse  
Équipe de didactique des sciences  
expérimentales, INRP





# "PRENDRE LE BATON DE L'EXPÉRIENCE..."

Geneviève Lacombe

*Le statut de l'expérience au XVIII<sup>e</sup> siècle peut-il nous aider à relativiser l'image que nous en donnent les Instructions Officielles inspirées de Claude Bernard ?  
Comment peut-on faire, en biologie, dans le second cycle, l'expérience de l'expérimentation ?*

S'il existe une "méthode biologique" (1), et c'est ce que semble montrer l'histoire des sciences ou ce que l'on peut montrer à partir d'elle (2), le but de l'enseignement de la biologie dans le second cycle doit-il être :

- de faire comprendre l'originalité de cette méthode qui a permis à la recherche de progresser (3) ?
- de faire pratiquer aux jeunes cette méthode ?

Apprendre les sciences expérimentales, est-ce apprendre :

apprendre les sciences expérimentales...  
Comment ?

a) comment, par une démarche spécifique, ces sciences ont abouti aux connaissances d'une époque à un moment donné ?

b) à utiliser cette démarche :

- b1) pour "redécouvrir" ce qu'au cours des siècles passés des chercheurs ont découvert ? L'ontogenèse (de l'élève) récapitule alors la phylogenèse, l'histoire étant alors linéaire et cumulative.

- b2) pour réellement "découvrir" du nouveau !

des documents qui pourraient servir à d'autres

J'aimerais montrer qu'en escamotant a), et en privilégiant b1), on empêche, ou on ne soupçonne même pas l'intérêt de b2).

Il ne s'agira pas ici d'un exposé exhaustif sur la place de l'expérience telle qu'elle apparaît dans l'histoire des sciences, ni d'un discours de didactique de la biologie. Je voudrais seulement présenter de façon un peu synthétique quelques documents qui ont pu servir à des praticiens empiriques et qui peuvent être utiles à d'autres.

---

(1) Roger BAJA. *La méthode biologique*. Paris. Masson. 1969.

(2) En est-il encore de même dans la biologie moderne ? cf. DAGOGNET. *Le vivant*. Paris. Bordas. 1988, page 140 : "notons cette nouveauté : la néo-biologie expérimente moins qu'elle ne suppose !"

(3) Voir aussi ce qu'il en est dans les sciences physiques. cf. René LECLERC *La méthode expérimentale, son histoire, ses tendances actuelles*. Les conférences du Palais de la Découverte. 12.12.1959.

## 1. LA PLACE DE L'EXPÉRIENCE DANS L'ENSEIGNEMENT DU SECOND CYCLE EN BIOLOGIE

De l'expérience-bricolage à l'expérience-spectacle, nous avons, tous, tout essayé dans nos classes, et cela avec plus ou moins de bonheur.

un recueil de  
textes historiques

Je ne ferai pas ici l'analyse du statut de l'expérience dans les manuels scolaires (4), ou dans les sujets de baccalauréat. Les recueils proposés aux élèves des classes de Terminale, en philosophie, seraient certainement un excellent sujet de réflexion et d'analyse. Pour tenter de définir ce que l'institution attend de l'expérience dans l'enseignement de la biologie dans le second cycle, j'ai relu un recueil de textes historiques qui me semble assez bien refléter l'esprit des Instructions Officielles de ces vingt dernières années ; il s'agit de "La méthode biologique" de Roger Baja (voir note 1).

### 1.1. Les différents statuts de l'expérience d'après Baja

Tout un chapitre de l'ouvrage (p.82 à 135) est consacré à l'"expérimentation" et les "différents types d'expériences" y sont inventoriés de façon systématique (p.90 à 120). Les textes proposés sont de longueur inégale ; certains, assez longs, peuvent faire l'objet d'analyses en classe avec les élèves, à condition d'être replacés dans leur contexte historique.

Cet inventaire, dont le tableau 1 constitue une synthèse, peut-il nous aider à mieux comprendre le statut que nous attribuons à l'expérience dans nos cours ? (5)

quelles  
expériences ?

Les "expériences pour voir" ne sont-elles pas les seules qui, spontanément, se mettraient en place dans nos classes si on y laissait un peu d'autonomie ? Toute autre expérience, entrant dans le jeu de la "redécouverte" n'a plus de valeur heuristique ; isolée de son contexte et de sa problématique, elle risque de n'être plus qu'une commémoration dérisoire.

Au moins dira-t-on, même si l'expérience faite en classe est faussée au départ, sa mise en place, son analyse, sa réalisation développeront des qualités qui lui sont spécifiques et qui participeront au développement de compétences méthodologiques

(4) Voir aussi ceux de philosophie.

(5) Gabriel GOHAU "Pour un poppérisme relatif". *Bulletin de l'APBG* n°1. 1984.

Gabriel GOHAU "Plaidoyer pour un inductivisme modéré". *Bulletin de l'APBG* n°4. 1985.

**TABLEAU 1 :**  
**LES DIFFÉRENTS TYPES D'EXPÉRIENCE**  
**d'après Roger Baja "La méthode biologique" 1969**

les différents types d'expériences	les auteurs cités	les ouvrages donnés en extrait
a. Expériences ayant pour but la vérification d'une hypothèse	1° Démonstration de la circulation du sang par HARVEY (p. 91-95) 2° Démonstration de la loi de la pollinisation croisée par DARWIN (p. 95-98)	"Du mouvement du cœur et du sang chez les animaux" 1628. "Les effets de la pollinisation directe et croisée dans le règne végétal".
b. Expériences provoquées par une observation	* Claude BERNARD (le suc pancréatique émulsionne la graisse) (p. 98-99)	"Exemple d'investigation expérimentale physiologique". "Introduction à l'étude de la médecine expérimentale" 3 <sup>e</sup> partie
c. Expériences ayant pour but de répondre à une question	* RÉAUMUR "Où l'on examine ce que l'on doit penser de la constitution et où l'on explique les moyens dont on s'est servi pour les faits qu'on rapporte". (p. 99-101)	"De l'histoire des abeilles". in "Mémoires pour servir l'Histoire des Insectes". Tome 5.
d. Expériences ayant pour but l'étude d'une exception et des problèmes qu'elle pose	* RÉAUMUR - Les travaux de BONNET et la parthénogenèse des pucerons. (p. 101-105)	"Addition à l'histoire des pucerons". in "Mémoires pour servir l'Histoire des Insectes. 13 <sup>e</sup> mémoire
e. Expériences ayant pour but la critique d'une théorie	1° Travaux relatifs à la théorie de la génération spontanée * SPALLANZANI (p. 106-108) * PASTEUR (p. 108-111) 2° Rôle des théories de la Préformation et de L'Epigenèse dans les débuts de l'embryologie expérimentale * CAULLERY (p. 111-113)	"Observations et expériences faites sur les animalcules des infusions" Opuscules de Physique animale et végétale". 1776 "Conférence du 7 avril 1864 aux soirées scientifiques de la Sorbonne". "Les débuts de l'embryologie expérimentale" in "Progrès récents de l'embryologie expérimentale"
f. L'expérimentation comme vérification d'une induction anatomique	* Claude BERNARD sur le rôle de l'anatomie dans la découverte des fonctions (p. 113-117)	"Leçons de physiologie expérimentale appliquée à la médecine" 1855-1856
g. Expérience "Pour voir"	* Claude BERNARD (p. 117)	"Introduction à l'étude de la médecine expérimentale" Première partie.

chez les élèves. Ce sont ces savoirs que Baja répertorie en dressant la liste des "qualités requises" que nous avons regroupées dans le tableau 2 en regard des expériences historiques qui illustrent ces catégories.

TABLEAU 2 : "LES QUALITÉS REQUISES" d'après Roger Baja " <i>La méthode biologique</i> " 1969		
Les formulations de BAJA	les scientifiques cités	les publications choisies
a. Principe essentiel de l'expérimentation : faire varier les facteurs séparément	* RÉAUMUR La digestion, acte chimique. (p. 120-122)	"Histoire de l'Académie Royale des sciences" 1752
b. Nécessité de multiplier et de varier les expériences avant de formuler une conclusion	* SPALLANZANI Sur la digestion. (p. 122-129)	"Opuscules de physique animale" 1787. "Expériences sur la digestion des différentes espèces d'animaux"
c. Nécessité des expériences-témoin.	* Claude BERNARD (p. 129)	"Introduction à l'étude de la médecine expérimentale"
d. Importance de l'esprit critique	* Claude BERNARD (p. 129-130)	"Introduction à l'étude de la médecine expérimentale"
e. Rôle du hasard dans la découverte	* Découverte de l'anaphylaxie par RICHET et PORTIER * Découverte de la vaccination par germes atténués par PASTEUR (p. 130-133)	"Introduction à l'étude de la médecine expérimentale"

Faire l'expérience de l'expérimentation, ce serait aussi accéder à une réflexion sur l'expérience, sa valeur, son rôle. C'est certainement vrai, et c'est peut-être là l'intérêt (le seul ?) de nos expériences traditionnelles. Encore faudrait-il revoir le type de classification proposé par Baja dont on retrouvait l'esprit dans les Instructions Officielles des années 60 : "faire varier les facteurs séparément..." peut-être est-ce nécessaire dans un premier temps mais ensuite comment prendre en compte les interactions ? "multiplier et varier les expériences avant de formuler une conclusion...", certes, mais cette démarche est sans doute plus facile quand les expériences sont mises en

place par plusieurs personnes essayant soit de démontrer des théories opposées soit de convaincre des pairs réticents...

## **1.2. L'expérience bernadienne et le schéma OHERIC privilégiés par les textes officiels**

A la suite des deux exemples cités ci-dessus, on pourrait dresser un inventaire des failles qui séparent l'"idéal" de la réalité, et le domaine de la recherche du domaine pédagogique.

Peu sensibles à ces ruptures, nos textes officiels ont longtemps dressé une statue à la méthode bernadienne (Observation, Hypothèse, Expérience, Résultat, Interprétation, Conclusion), ce qui pouvait laisser supposer tout à la fois:

- qu'avant Claude Bernard il n'existait point de démarche expérimentale, ou, du moins, pas de démarche expérimentale réfléchie ;

- qu'en travaillant "comme" Claude Bernard, la classe active expérimentait, avec toutefois une différence de taille : il ne s'agissait plus alors que de chercher ce qui avait déjà été trouvé. En fait, cette redécouverte laissait la classe passive, docile aux incitations du maître, qui tout à la fois coryphée et détective, connaissant "la" solution, pouvait "éclairer" les expériences.

C'est ce constat qui nous a amené à rechercher des documents éclairant la place de l'expérience avant ce sacro-saint "milieu du 19<sup>e</sup> siècle". Cette piste de travail, tout à fait d'actualité en cette époque de célébration du Bicentenaire de la Révolution, pourrait se concrétiser dans des activités interdisciplinaires en classe de Première.

C'est un travail de ce type qui nous avait conduit à lire "*Les sciences de la vie dans la pensée française du 18<sup>e</sup> siècle*" de Jacques Roger (6) et "*L'institution de la science et de l'expérience du vivant*" de Claire Salamon-Bayet (7)

## **2 - Y A-T-IL UN STATUT DE L'EXPERIENCE AVANT CLAUDE BERNARD ? : LE XVIII<sup>e</sup> SIECLE**

### **2.1. Le primat de l'observation**

"En français", nous dit Claire Salomon-Bayet, "expérience" est donné comme datant du 13<sup>e</sup> siècle, "expérimenter" de 1372 et

(6) Jacques ROGER. *Les sciences de la vie dans la pensée française du XVIII<sup>e</sup> siècle*. Paris. Armand Colin. 1971.

(7) Claire SALOMON-BAYET. *L'institution de la science et l'expérience du vivant*. Paris. Flammarion Science. 1978.

O.H.E.R.I.C.,  
certes...

et au XVIII<sup>e</sup>  
siècle ?

"expérimentation" de 1503.

Le 18<sup>e</sup> siècle proclamera la nécessité de l'expérience comme moyen d'approfondir la connaissance de la nature. Mais cette proclamation maintes fois répétée, par exemple par La Mettrie : "Prenons le bâton de l'expérience" (8) ne dissocie pas toujours l'expérience de l'observation.

Toutes deux traduisent, de toute évidence, le culte du fait : *"Ce culte du fait, dont Valéry dira qu'il suffit à définir la barbarie, va si loin que l'observation est systématiquement privilégiée au regard de l'expérience : voie royale de la connaissance, puisqu'elle ne fait ni ne contrefait les phénomènes, qu'elle les laisse paraître tels qu'ils sont, alors que l'expérience décompose et combine, produit un artéfact qui mine et fausse les résultats naturels. "Nous remarquerons en passant que les connaissances acquises par ce moyen sont bien médiocres et bien imparfaites, pour ne pas dire absolument nulles" (Encyclopédie, article "observation"). Cette affirmation date du milieu du XVIII<sup>e</sup> siècle, et marque un thème déjà démenti par les faits : l'expression "digestion artificielle" a été employée par Réaumur, dans son second mémoire "sur la digestion des oiseaux", en 1752, comme une expérience à tenter et comme une démonstration acquise, en cas de réussite. Cette dépréciation de l'expérience, a l'intérêt d'être l'écho d'affirmations antérieures de plus de trois générations."*(9)

On se rappelle que pour Descartes qui, par a priori métaphysique, a décidé de ne trouver dans les phénomènes vitaux que matière et mouvement, l'expérience **vérifie** l'exactitude des conséquences qu'il tire de ses principes (6). Entre l'expérience et l'observation, pendant longtemps c'est l'observation qui aura le dessus. Il y a dans la nature un ordre que Dieu a mis et que la science peut atteindre. Donner à voir et à revoir, c'est donner à comprendre...

Il est certes des expériences, au sens moderne du terme, dès le 17<sup>e</sup> siècle et Claire Salomon-Bayet rappelle à ce propos l'expérimentation harveyienne (1628) :

*"Expérimental, il mène l'expérience quasi sans instrumentation, ce qui ajoute à l'élégance de la démonstration et limite la portée de l'enquête, en particulier au niveau des capillaires pour lesquels il faudra Malpighi et son microscope"* (10)

Tout le 18<sup>e</sup> siècle sera animé par un débat autour des problèmes que soulève "l'aveugle-né" :

*"Supposez un aveugle de naissance, qui soit présentement homme fait, auquel on ait appris à distinguer par l'attouchement un globe et un cube de même métal et à peu près de la même*

(8) LA METTRIE.

(9) *ibid* (8) p.172.

(10) *ibid* (8) p.192.

*grosneur, en sorte que lorsqu'il touche l'un et l'autre il puisse dire quel est le cube et quel est le globe. Supposez que le cube et le globe étant posés sur une table, cet aveugle vienne à jouir de la vue : on demande si, en les voyant sans les toucher, il pourrait les discerner et dire quel est le globe et quel est le cube'. (11)*

## 2.2. L'expérience prend le pas sur l'observation

expérience de  
pensée

Avec ce problème, c'est une autre conception de l'expérience qui apparaît et pour le résoudre Merlan (12) proposera une "Expérience de pensée", expérience imaginée et imaginaire : que se passerait-il si on privait de lumière une population d'enfants dès la naissance ?

Quelques années auparavant, Maupertuis avait, lui aussi proposé ce même type d'expérience : on aurait isolé dès la naissance deux ou trois enfants *"pour savoir la parole naissante, le surgissement du langage naturel, universel, borné sans doute, mais pur"* (13).

la Métrie :  
"prenons le bâton  
de l'expérience"

Feintes philosophiques, feintes expérimentales, expériences réelles, la frontière est mince entre ces différents approches qui s'enrichissent mutuellement. Cette évolution peut être mise en relation avec le fait, rappelé par Roger, qu'après 1745 ce sont des "hommes venus d'ailleurs" qui vont révolutionner l'histoire naturelle. Maupertuis et Buffon font des mathématiques, La Mettrie est médecin puis philosophe, Diderot est écrivain et philosophe. L'expérience va alors changer de sens et le rapport de prééminence entre l'observation et l'expérience va s'inverser. *Jusqu'en 1730, en effet "l'observation et l'expérience n'ont jamais rien décidé, même si elles ont mis en évidence un certain nombre de phénomènes, à l'exception des expériences de Redi, ultérieurement réactivées et contestées par Needham appuyé de Buffon, à l'exception des expériences de Harvey dont le modèle, plus logique que mécanique n'a pas entraîné l'adhésion de tous immédiatement"* (7).

Or, non content d'observer, et souvent fort minutieusement, le 18<sup>e</sup> siècle va expérimenter.

expériences-  
manipulation

Il y a les expériences-manipulations dont les plus célèbres aujourd'hui sont celles de Bonnet à propos de la parthénogénèse, celles de Réaumur sur la digestion, celles de Trembley sur la régénération des polypes. Mais c'est aussi un regard nouveau qui s'efforce de faire émerger de l'histoire naturelle une véritable science, comme le souligne Claire Salomon-Bayet à propos de Maupertuis.

(11) MOLYNEUX 1692.

(12) MERIAN. "8<sup>ème</sup> mémoire" in : *Les nouveaux mémoires de l'Académie royale des sciences et belles-lettres de Berlin*. 1770-1780.

(13) *ibid* (8) p.204.

de l'histoire  
naturelle...

"Sur le plan de la méthode, il a transporté l'esprit d'expérience dans ce qui jusqu'alors était l'objet de l'observation (...) Il porte un nouveau regard sur des séries, de phénomènes qui sont comme autant d'expériences sûres, décisives et **toutes faites**. Expérience n'est plus le synonyme ni la redondance de l'observation" (14).

Maupertuis lui-même écrit :

"Mais une expérience plus sûre et plus décisive se trouve toute faite. Cette singularité de doigts surnuméraires se trouve dans l'espèce humaine, s'étend à des races entières ; et l'on voit qu'elle est également transmise par les pères et par les mères... Je ne crois pas que personne prenne la continuation du sexdigitisme pour un effet du pur hasard" (15)

...à la science...

Si l'histoire naturelle change de statut et devient une science, pour Buffon son but ne sera plus "seulement de faire descriptions exactes" mais aussi "de combiner les observations, de généraliser les faits, de les lier ensemble par la force des analogies" (1749).

...bien avant  
Claude Bernard

De son côté, en 1754, Diderot désigne "les trois étapes nécessaires à la connaissance scientifique : l'observation de la nature, la réflexion, l'expérience. L'observation recueille les faits, la réflexion les combine, l'expérience vérifie le résultats de la combinaison".

Dans l'annexe, nous proposons une illustration de ces propos à travers les bandes dessinées d'aujourd'hui qui elles aussi véhiculent une conception de la science et de l'expérience.

Ces séduisantes affirmations, moins connues que les assertions bernadiennes méritent tout autant notre attention à condition de les nuancer en les replaçant dans leur contexte comme le fait Joseph Schiller dans l'extrait que nous citons ici :

"On a affirmé que dans **De l'Interprétation de la nature** Diderot "cache l'audace de ses idées sous l'obscurité de ses propos". Cela est possible mais, pour ce qui est de la méthode expérimentale, l'obscurité des propos vient de l'obscurité des idées, trop soumises aux généralisations d'une pensée qui entre en conflit avec les particularités d'une praxis qu'il aurait pu trouver chez ses contemporains, Réaumur, Trembley, Haller et Fontana, qui lui étaient connus, sans parler du classique Galilée. La méthode expérimentale ne peut éclore que d'une confrontation de la théorie avec la pratique. Or, la praxis était étrangère à Diderot, qui n'était pas naturaliste et encore moins expérimentateur. **L'Esquisse de physique expérimentale** témoigne des rêveries d'un esprit confus qui se perd dans le vague des généralités, d'où aucune méthode ne peut résulter. Il n'en reste pas moins que Diderot a eu l'intuition de la méthode expérimentale, et Claude

Diderot et la  
méthode  
expérimentale

(14) *ibid* (8) p.306.

(15) MAUPERTUIS, "Lettres, XIV", in : *Oeuvres*. Lyon. 1756. Vol. II. p.308.



*Bernard aurait relevé avec plaisir une remarque où il se serait reconnu : la philosophie expérimentale est souvent confrontée avec l'inattendu ; on peut découvrir un phénomène qu'on ne prévoyait pas et ne pas découvrir l'attendu". (16)*

désacralisons  
l'expérience...

Ainsi, une réflexion sur le statut de l'expérience au 18<sup>e</sup> siècle, qu'il faudrait bien sûr approfondir, nous oblige à avoir un regard nouveau, par la distance qu'elle met entre le 19<sup>e</sup> siècle et nous, mais aussi pour relativiser la mise-en-statue de l'expérience.

### 3 - QUE POUVONS-NOUS TENTER DANS NOS CLASSES ?

#### 3.1. Introduire une analyse historique

Se donner les moyens, avec une classe, d'une analyse historique sur le statut de l'expérience à une époque donnée me semble une voie féconde pour mieux comprendre ce qu'est une science expérimentale. Cette analyse ne peut être fructueuse qu'en interdisciplinarité.

Toutefois cette analyse historique présente le danger d'un culturel livresque qui de surcroît risque de "passer" difficilement auprès des élèves, c'est pourquoi nous avons cherché une autre façon d'aborder l'expérience.

#### 3.2. Expérimenter "en vraie grandeur"

...tout en  
expérimentant

En parallèle à cette étude historique, il s'agit de mettre en place une expérimentation "vraie" ; mais que chercher qui ne soit déjà trouvé, où une classe puisse se mettre réellement en situation de recherche, y trouver de l'intérêt et où l'enseignant soit impliqué ?

Il y eut, en 1984-85, l'expérience "**1000 élèves, 1000 chercheurs**", proposée aux enseignants de biologie et de physique. Des chercheurs s'offraient à travailler avec des classes dans leur domaine de compétence. Pour une fois, les élèves avaient d'autres perspectives que celle de trouver une réponse déjà connue. Il y eut de nombreuses tentatives plus ou moins fructueuses...

En 1972 alors que la mode était à l'étude des rythmes biologiques et que nombreux ouvrages étaient publiés sur les rythmes scolaires, nous avons en interdisciplinarité, lancé un travail de

---

(16) Joseph SCHILLER. *La notion d'organisation dans l'histoire de la biologie*. Paris. Maloine. 1978, p.52.

une démarche  
expérimentale ?

recherche en ergonomie scolaire avec une classe de Première D. Un problème existait : dans le lycée pourtant neuf, l'architecture ne permettait aux élèves ni de trouver des lieux de vie satisfaisants (salles, couloirs, foyers), ni des lieux propices au travail (bruits, lumière, tableaux...).

Un chercheur en ergonomie de l'Université Paul Sabatier de Toulouse mit à notre disposition une documentation très riche en ergonomie industrielle. En effet, depuis longtemps, les chefs d'entreprise se préoccupent des conditions de travail car elles ont une incidence sur le rendement ; qu'en est-il à l'école ?

Nous avons analysé des situations, élaboré des hypothèses, multiplié les observations, testé et affiné nos hypothèses, cherché des modèles, éclairé nos résultats par une analyse critique de nos méthodes de travail, par des confrontations avec des résultats obtenus dans d'autres situations, nous avons dialogué avec "notre" chercheur universitaire...

...ou un roman  
policier...

Nous avons tiré des conclusions qui, dans la pratique, hélas, n'ont rien changé. Nos lycées à couloirs rectilignes (surveillance oblige), à tables et chaises toutes identiques pour des jeunes de 1,60 m à plus de 1,80 m, à tableaux à craie plus ou moins usés, mal éclairés (lisibilité non garantie), à cloisons fragiles permettant d'entendre plusieurs cours en même temps, ne tiennent guère compte des travailleurs qu'ils hébergent... Malgré tout cette analyse fut fructueuse, comme toute démarche expérimentale elle se situait dans un contexte dont elle ne saurait s'exclure et enfin nous avons eu l'impression de jouer "pour de vrai" et de faire oeuvre utile.

En dehors de ce type de situation, et plutôt que faire semblant d'expérimenter avec des moyens de plus en plus dérisoires, je pense, comme Gabriel Gohau (17) que tout compte fait, faute d'une réelle réflexion sur notre enseignement, mieux vaut encore analyser, et pourquoi pas écrire, des romans policiers qui développeront chez nos élèves le raisonnement hypothético-déductif.

Et c'est en rappelant ce que Piaget écrivait que nous concluons :

*"Les méthodes d'avenir devront faire une part de plus en plus grande à l'activité et aux tâtonnements des élèves ainsi qu'à la spontanéité des recherches dans la manipulation de dispositifs destinés à prouver ou à infirmer les hypothèses qu'ils auront pu faire d'eux-mêmes pour l'explication de tel ou tel phénomène élémentaire. Autrement dit, s'il est un domaine où les méthodes*

---

(17) Gabriel GOHAU. "Difficultés d'une pédagogie de la découverte dans l'enseignement des sciences". Aster 5. 1988.

*actives devront s'imposer au sens le plus complet du terme, c'est bien celui de l'acquisition des procédures d'expérimentation, car une expérience qu'on ne fait pas soi-même avec toute liberté d'initiative n'est par définition, plus une expérience, mais un simple dressage sans valeur formatrice faute de compréhension suffisante du détail des démarches successives.*

*En un mot, le principe fondamental des méthodes actives ne saurait que s'inspirer de l'histoire des sciences et peut s'exprimer sous la forme suivante : comprendre, c'est inventer, ou reconstruire par réinvention, et il faudra bien se plier à de telles nécessités si l'on veut, dans l'avenir, façonner des individus capables de production ou de création et non pas seulement de répétition"(18).*

Geneviève Lacombe  
Professeur Lycée St Gaudens

---

(18) Jean PIAGET. *Où va l'éducation*. Médiations. 1948-1972.



# LE RAPPORT A L'EXPÉRIMENTAL DANS LA PHYSIQUE DE L'ENSEIGNEMENT SECONDAIRE

Samuel Johsua

*La relation à l'expérimental est massivement présente dans l'enseignement secondaire de la physique, mais ce rapport est essentiellement ambigu. Il est profondément marqué par l'inductivisme, lequel est à la fois une option épistémologique concernant la physique, et une option pédagogique proprement dite.*

*Dominante depuis le début du siècle, cette option s'est épanouie dans les années 60 avec la formulation d'une "méthode naturelle" d'apprentissage largement mythique.*

*En fait, la prédominance de l'inductivisme, combinée avec les difficultés spécifiques de l'approche de la physique, conduit à une pratique d'enseignement fortement typée, où tout est bâti de manière à contourner, gommer ou nier les relations forcément complexes entre l'expérience et la modélisation. Et cela, à son tour, conduit, paradoxalement, à un très net appauvrissement de la fonction et du contenu du rapport à l'expérimental en situation scolaire.*

*Le présent article fournit une description générale des conséquences de l'inductivisme, avant d'aborder plus en détail le fonctionnement effectif du rapport à l'expérimental au collège et au lycée.*

## 1. INTRODUCTION

Le rapport à l'expérimental apparaît comme permanent et massif dans l'enseignement de la physique au niveau secondaire.

On peut, sans grande audace, avancer l'hypothèse que, pour une majorité de pédagogues, l'enseignement de la physique se confond avec celui de la "méthode expérimentale", et cela jusqu'à nos jours. Cette finalité fixée à l'enseignement de la physique va le plus souvent de pair avec la réduction de la "méthode expérimentale" elle-même aux processus d'induction.

Il y a là une option lourde concernant l'épistémologie de la physique qui fut majoritairement admise dès la deuxième moitié du XIX<sup>e</sup> siècle et n'a cessé de s'approfondir depuis. Vers le milieu de ce siècle, cette option a cessé de concerner uniquement la physique elle-même, pour englober les processus d'apprentissage des enfants, qui, eux aussi, seraient de caractère inductif.

Loin d'être une donnée récente, comme on le croit souvent, la lutte contre le "formalisme" et le "dogmatisme" est une donnée

une idéologie  
bien précise :  
l'inductivisme

permanente de la littérature pédagogique française concernant la physique. Il est vrai, en revanche, que la mise en oeuvre sur une grande échelle des préceptes didactiques découlant d'une telle option a été plus lente.

Cette mise en oeuvre s'est généralisée -en France au moins- à l'occasion des débats "réformateurs" des années 70, et, en même temps, l'option idéologique inductiviste est entrée en crise. Pourtant l'inductivisme constituait un paradigme commun à tous les pédagogues de la physique. Il avait l'avantage d'homogénéiser l'épistémologie de la physique, le mode d'apprentissage des enfants et les finalités de l'enseignement de la physique. Cette homogénéité s'est brisée quand ces trois questions ont été, séparément dans un premier temps, soumises à de vigoureuses analyses critiques. En particulier, la prétention des physiciens à rénover l'enseignement dans la perspective d'une physique "structurelle" s'est révélée difficilement compatible avec l'idéologie inductiviste. Celle-ci repose en effet sur la croyance que l'observation et la mesure sont à la base de la "mise en évidence" des lois physiques, et qu'il est possible de créer un cadre scolaire artificiel où l'élève, bien dirigé, serait apte à faire, en raccourci, ce même cheminement.

Cette opinion, déjà contestable en général, rencontre des difficultés insurmontables quand la physique qu'il faut atteindre par ce biais n'est plus une phénoménologie descriptive simple, mais une modélisation relativement complexe.

Ceci, en définitive, se traduit par une pratique "expérimentale" en situation scolaire très particulière, dont nous décrivons ci-après les caractéristiques principales.

## 2. LA MISE EN PLACE DU "MYTHE NATURALISTE"

un mythe  
unitariste

A partir du milieu des années 50, les options inductivistes, qui avaient toujours été dominantes dans les préceptes pédagogiques propres à la physique (1), vont maintenant englober les processus les plus généraux de la connaissance et *prétendre à l'unité enfin trouvée entre l'enfant, la nature concrète qui l'entoure, et la finalité éducative de l'enseignement.*

C'est cette vision globalisante -qui, entre autres, marque bien la fin d'une phase défensive où il fallait justifier une discipline

- 
1. LIARD, M.L. Les Sciences et l'Enseignement secondaire. *Conférences du Musée Pédagogique* - Imprimerie Nationale, Paris, 1904.  
LIPMANN, G. Le but de l'enseignement des Sciences Expérimentales. *Conférences du Musée Pédagogique*. Imprimerie Nationale, Paris, 1904.  
JOHSUA, S. Contribution à la délimitation du contraint et du possible dans l'enseignement de la physique (essai de didactique expérimentale). Thèse d'Etat, Aix-Marseille II, 1985.

nouvelle et le début d'une phase de prétentions plus vastes- que nous appelons le "*mythe naturaliste*".

Son exposition la plus systématique est due à Lazerges (2), dont l'influence idéologique fut grande, au point que le ministère décida de distribuer ses conférences à tous les nouveaux professeurs. Ce sont ces positions que nous exposons ci-dessous.

## 2.1. Centrage sur l'élève

Première rupture avec les options passées : c'est l'élève lui-même, ses processus de pensée, ses attitudes, qui doivent *déterminer* les choix et non seulement les conditionner : "*L'enfant, notre élève, même au terme de l'adolescence, n'est ni un adulte en miniature, ni un adulte inachevé, mais un être différent, ayant d'étape en étape une structure mentale propre et, par conséquent, des intérêts spontanés, une logique, un verbalisme même, différents de ceux de l'adulte, parce que la nature a voulu qu'il soit enfant avant que d'être homme*".

Cette affirmation de facture plagétienne et de résonance assez moderne, est toutefois intimement liée à une option lourde sur les processus d'apprentissage de la physique.

- "L'effet Jourdain"

"Les enfants qui entrent en Seconde font de la physique ou de la chimie depuis longtemps sans le savoir, très exactement comme M. Jourdain faisait de la prose. Il ne s'agit que de les rendre conscients. Toutes les notions de physique étudiées en Seconde, depuis le poids d'un corps jusqu'à la vaporisation, appartiennent, en effet, à la connaissance ancestrale ou quotidienne des enfants de cet âge".

- "La "redécouverte""

Lazerges a la dent assez dure contre toute assimilation entre la "redécouverte" (dont il est un adepte, comme on l'a vu) et les processus scientifiques réels : "*On croit alors qu'il s'agit de faire découvrir par un enfant telle ou telle loi située en dehors de toute connaissance préacquise, ou de lui faire inventer tel ou tel appareil de physique..., en sorte que cette prétendue redécouverte n'est qu'une nouvelle forme du dogmatisme... Ce dogmatisme qui s'ignore n'a pas sa place dans notre enseignement, ne serait-ce que parce qu'il est un mensonge intellectuel*".

Mais alors, comment cette redécouverte peut-elle contribuer à la formation de connaissances reconnues comme telles (au moins partiellement) par le physicien ? Là n'est pas le problème, dit Lazerges, car là n'est pas l'objet de l'enseignement : "*On peut*

les enfants font  
de la physique  
comme  
M. Jourdain de  
la prose

---

2. LAZERGES, G. *Conférences de Sèvres*. CNDP, Paris, 1953.

*souhaiter en même temps, il est vrai, que les élèves conservent de leurs études certaines connaissances, mais ces connaissances nous seront données par-dessus et par la force des choses sans que nous ayons à les rechercher. C'est dire qu'elles ne sont pas tenues pour négligeables, et je ne le laisserai que trop voir, mais elles sont une fin secondaire en ce sens qu'elles sont acquises spontanément, silencieusement pour ainsi dire, et très largement, si notre fin principale, telle qu'elle vient d'être définie, anime vraiment notre pédagogie".*

L'affirmation va donc loin : non seulement elle reprend l'opposition entre acquisition des connaissances et acquisition de méthodes (présente dès le début du siècle), mais l'auteur affirme que sa "redécouverte" permet en réalité l'acquisition de ces connaissances, et que cela peut se faire sans un traitement spécifique en ce domaine ("*par la force des choses et sans que nous ayons à les rechercher*").

En effet, l'enfant disposant déjà en fait de ces connaissances, reste à les lui révéler (effet Jourdain), et surtout à le doter d'une méthode apte à les organiser : "*Son but n'est pas tant de donner à nos élèves les connaissances qui sont indispensables pour la compréhension du monde d'aujourd'hui, si fortement marqué par les progrès de la science et de la technique, que de développer, chez eux, certaines qualités intellectuelles et même morales*".

## 2.2. L'induction

Dans la "redécouverte" du début du siècle, l'induction jouait déjà le rôle décisif. Il en est de même ici, mais quelques traits nouveaux apparaissent :

- L'enfant doit y être "actif".
- Ceci n'est possible que si "*nous ne les décourageons pas à notre tour par des discours abstraits*", car "*ils vont rester assez longtemps encore d'ordre intellectuel concret*".
- Mais ce concret n'est pas toujours celui de l'adulte : "*C'est l'éducation que nous avons reçue qui nous permet de passer inconsciemment, comme par un mouvement réflexe, du concret à l'abstrait ou inversement, en sorte que bien des exercices, que nous croyons concrets parce qu'ils évoquent des opérations matérielles, sont en réalité des abstractions pour des élèves de Seconde*".

Et la nécessité de la manipulation pratique par l'élève lui-même (postulat pédagogique dès le début du siècle) trouve ici une justification dans le mécanisme même de l'induction : "*Un fait n'est concret pour un enfant que dans la mesure où il le connaît par son expérience personnelle*". "*Les enfants mettent plus de croyance dans les expériences qu'ils ont faites eux-mêmes que dans celles qu'ils ont vu faire*".

l'induction,  
moment central



### 2.3. A la recherche des faits

Mais ce processus inductif, nécessitant la *"pratique prolongée du réel"* ne saurait admettre *"le fait"* comme une donnée (comme au début du siècle). Au contraire, il faut noter *"... la complexité et la difficulté du réel..."*.

La mise en évidence des "faits" eux-mêmes est désormais un objectif de la méthode. Ceux-ci doivent partir de la réalité elle-même, globale par définition.

Et voilà que s'introduit l'*idée du milieu naturel* comme base de départ, à propos duquel, à nouveau, doit s'exercer surtout la *faculté d'observation*, productrice unique des faits : *"C'est donc de l'univers global et qualitatif, tel qu'il s'offre à l'enfant, que l'enseignement doit partir à la recherche des faits eux-mêmes, qui sont des fragments que l'esprit prélève dans le chaos complexe et incohérent de nos sensations. L'étude du milieu naturel, dont les organisateurs des classes nouvelles ont compris toute la valeur pour remédier à cette fragmentation artificielle du savoir en disciplines indépendantes et trop souvent ignorantes les unes des autres, fournit le point de départ de ces sciences d'observation, au sens le plus large du mot, où le physicien, le naturaliste, comme le géographe, trouveront leur part"*.

### 2.4. La "méthode naturelle"

Voilà donc ce que Lazerges appelle (après Duhem qui lui donnait cependant un contenu plus restreint) la méthode *"que l'on pourra qualifier de naturelle puisqu'elle sera la conséquence nécessaire de faits incontestés"*.

En conséquence donc, Lazerges définit *une chaîne continue, sans ruptures ni contradictions, entre des domaines différents*. C'est la chaîne "naturaliste" schématisée ci-dessous :

**finalités éducatives - activité de l'enfant - méthode expérimentale - concret - milieu naturel global - interdisciplinarité.**

## 3. LA VALIDATION OPÉRATOIRE

### 3.1. Une coupure inévitable

Pour autant, cette façon d'aborder la question peut avoir une pertinence didactique. Dans l'élaboration des connaissances en physique, expérience et théorie n'entretiennent pas de stricts rapports d'antériorité, mais s'entremêlent, se nourrissent réciproquement d'une manière assurément complexe.

La situation didactique introduit une contrainte tout à fait particulière dans ce rapport, puisqu'il s'agit de transmettre des connaissances à un novice, lequel est, par définition, loin de

des contraintes  
didactiques au  
secours d'une  
option  
idéologique

posséder le modèle canonique qui serait en relation avec les expériences. Par nature, la situation didactique exige un "début" et une "fin" qui n'existent nullement en physique savante, et selon le type de coupure que l'on choisit, on crée une épistémologie "scolaire" très particulière.

Si, par exemple, on décide de "partir de l'expérience", on devra présenter certaines des caractéristiques de cette dernière comme des données indépendantes (au moins fictivement) de la théorie que l'on développera à son propos.

Des contraintes, de nature didactique, peuvent ainsi venir renforcer des options de nature clairement idéologique.

### 3.2. La "monstration"

Mais ce n'est que didactiquement que le "phénomène" peut se présenter comme un "donné". Sa présence en classe est l'aboutissement d'un travail didactique complexe, qui se traduit souvent par une "monstration" *expérimentale*. Celle-ci a deux fonctions intimement liées : elle permet la proposition du problème, elle établit le phénomène de départ.

- La proposition du problème

La monstration permet de résoudre à la fois la question de la présentation d'un problème et celui de sa transmission comme problème non du professeur, mais de la classe. Les sources de la monstration peuvent être diverses, sans affecter pour autant le mécanisme : montrer qu'il y a un problème. Ainsi, le professeur fait-il constater qu'un objet pesant lâché d'une certaine hauteur va (en général...) tomber vers le sol. Ceci, qui était connu de tous, mais n'était pas un "problème", le devient par sa simple énonciation en classe de physique.

introduire un  
questionnement....

Le professeur construit (ou fait construire) un circuit de simple allumage pile/ampoule : il désigne par là un problème qui n'existait nullement auparavant, en tout cas pas sous son aspect de problème de physique. Par la même démarche, d'un seul mot parfois ("pourquoi", "comment"), cela devient le problème de la classe, et deviendra l'objet du discours.

*La monstration permet donc de réaliser ce pas si important, pouvoir dire : "Voilà un problème, et c'est désormais le nôtre".*

- La désignation du phénomène

La monstration permet en même temps une présentation du *phénomène*, qui le désigne comme pertinent, au milieu d'une multitude d'autres phénomènes possibles. Ce qui ne serait pas possible par un discours l'est ici par la monstration.

Cette monstration se suffit à elle-même pour désigner le couple référent/signifiant et, en même temps, elle distingue le référent de tous les autres possibles. Ce processus n'a pas besoin de

grammaire particulière qui donnerait un sens ("syntaxique") au signifiant.

• Les contraintes didactiques sur la monstration

Toute monstration n'est pas apte à réaliser correctement une introduction du problème et une désignation de phénomène. Il y a à cela des conditions qui sont autant de contraintes à respecter.

- La première tient à la possibilité de *reconnaissance* de la monstration par la classe. Celle-ci n'avait pas repéré un problème dans le phénomène montré avant qu'il ne le soit, mais elle doit pouvoir le reconnaître dès qu'il l'est. Pour cela, il est nécessaire que la monstration se présente comme un *lien* entre le connu et l'inconnu. Les éléments de la monstration doivent relever du connu (s'ils ne le sont pas, ils devront d'abord faire eux-mêmes l'objet d'une monstration ou d'une construction cognitive). L'agencement des éléments représente lui le nouveau, l'inconnu : le problème. C'est comme cela que l'on peut comprendre toutes les insistances que l'on a pu noter sur la nécessité de partir de phénomènes "familiers". Autrement dit, nous avons ici une transposition de la nécessité de situer le phénomène en liaison avec un modèle, mais seulement, dans le processus de monstration, le modèle de base duquel on part est tout simplement la structure cognitive supposée de l'élève (le "connu").

- La seconde tient à la possibilité de *l'admission du problème*, à la possibilité de sa transformation en problème de la classe. Pour cela, il est nécessaire que le phénomène montré ne soit ni étranger à l'élève, ni surtout en référence avec un objet d'enseignement trop *vieilli*. Au premier chef, le risque est celui d'un vieillissement didactique de la situation expérimentale: la même situation peut difficilement servir à introduire de nouveaux problèmes (alors que c'est très souvent physiquement possible). Mais il concerne aussi le recours à des appareils, des techniques, un vocabulaire "du passé", qui "ne peuvent pas être" des problèmes d'aujourd'hui.

- La troisième contrainte concerne la structure du phénomène lui-même. Celui-ci doit concerner une situation relativement simple, ou décomposable aisément en situations simples. Il faut donc qu'il y ait une *correspondance* entre la monstration d'une situation et le phénomène que l'on veut exhiber.

De la même façon, il ne faut pas que des éléments non pertinents de la monstration puissent venir perturber la prise de conscience des éléments pertinents. Et ceci doit être présent dès la monstration elle-même (sans besoin de précisions supplémentaires, compte tenu du niveau cognitif des sujets).

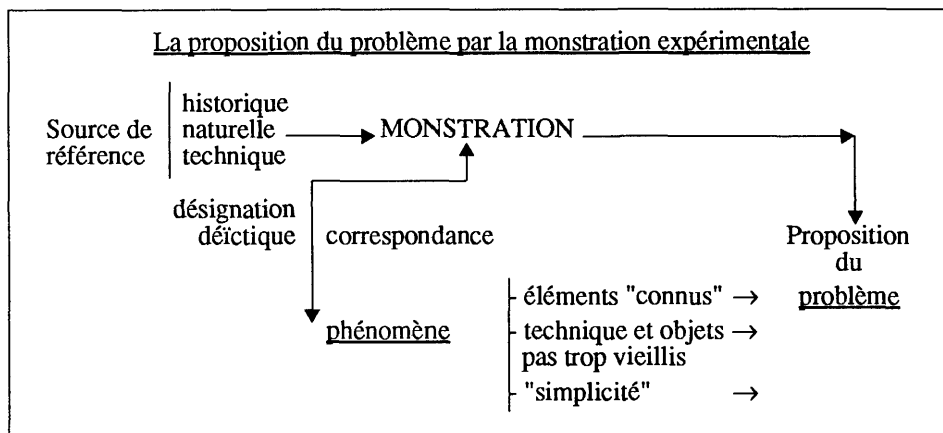
Ainsi, a priori, une infinité d'éléments pourraient jouer un rôle dans la perception d'un montage pile/fils/ampoules : des éléments extérieurs au circuit lui-même d'abord (la température ambiante de la classe, le bruit, etc...), des éléments du

.... dans des  
conditions bien  
précises

circuit lui-même (la couleur des fils par exemple) ; mais une monstration est surtout efficace par ce qu'elle élimine sans le dire, et pour cela, elle doit à nouveau être "simple".

C'est que l'objectif de la monstration ne réside pas en elle-même ; la manifestation du phénomène est un moment éphémère vers le dégagement de bases observationnelles communes à la classe (les "faits" de la démarche positiviste).

Nous présentons ci-dessous un schéma récapitulatif du mécanisme de la monstration.



### 3.3. La validation "opératoire"

Les mécanismes de la "monstration" sont en fait communs à une série d'options dont, bien entendu, l'option inductiviste. En revanche, ce qui est bien spécifique de cette dernière, c'est le type de passage entre la monstration et l'établissement du modèle. Tout se passe comme si les contraintes spécifiquement didactiques étaient redoublées par un choix de coupure fondamentale entre "expérience" (moment non seulement premier, mais fondateur) et "théorie". Le plus souvent, cela se traduit par un mécanisme que nous nommons "validation opératoire".

L'objectif - transférer le sous-modèle à l'élève - est perçu dans un sens restreint. On va se contenter du fait que l'élève admette et mette en pratique un sous-modèle ou des éléments de modèle. Sur cette base, la place de l'expérimental sera en fait relativisée dans le processus de transmission du modèle et des sous-modèles. Elle jouera :

- comme entrée en matière, monstrative, qui permettra d'entrer dans le *discours expositif* du sous-modèle (3). A chaque étape,

3. Ce discours peut parfaitement s'appuyer sur des activités pratiques, comme des mesures.

à chaque difficulté du dit discours, la référence à l'expérience initiale viendra fournir des arguments qui autoriseront le maître à faire avancer la classe et la construction du sous-modèle. L'expérience initiale devient donc une *expérience de référence* qui permet à la classe de faire crédit au maître de ce qu'il va avancer. Dans ces conditions, le maître avance en proportion de la capacité qu'il a de faire admettre la *plausibilité* du sous-modèle (et de chacune des étapes d'exposition) en relation avec l'expérience de référence. La relation avec le réel est une relation avec le réel didactisé de la classe, avec l'expérience de référence, mais cette relation peut être suffisante pour le cheminement que nous indiquons.

- comme sortie du discours expositif. Une fois le sous-modèle considéré comme plausible, un pas important vers la transmission est accompli, mais une partie du chemin reste à faire. Il reste à le faire passer sous la responsabilité des élèves. Cela, au contraire des processus initiaux, peut se dérouler sur le plan des exercices mathématiques, mais cela peut se faire en recourant à d'autres types d'expériences que nous appellerons "*expérience de confirmation*" et "*expérience de renforcement*". Les premières interviennent quand le doute existe encore et qu'il faut établir plus solidement la plausibilité du modèle ou de sous-modèles ; on va alors montrer qu'une autre "expérience de référence" peut être redevable du même traitement, ce qui tend à montrer la "solidité" du sous-modèle. Les secondes interviennent quand le maître a jugé que la transmission est allée assez loin pour que les élèves renforcent leur adhésion au modèle ou aux sous-modèles en le pratiquant (et alors, soit dans des situations semblables à celles du départ -mais dont le sens est transformé-, soit dans des situations nouvelles).

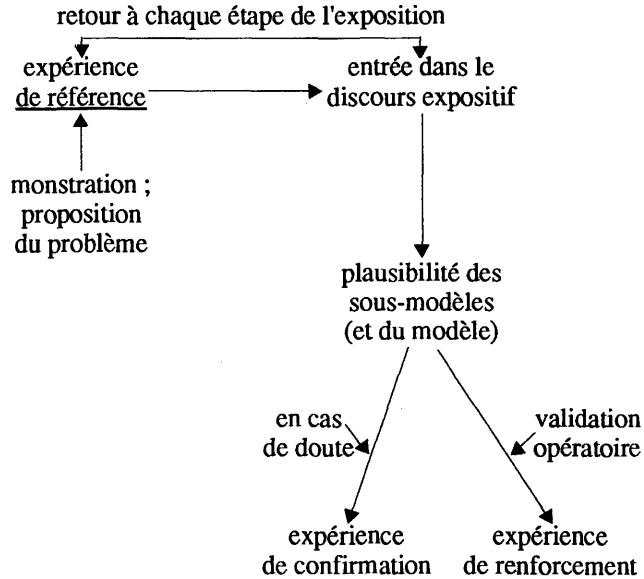
En définitive, le modèle ou le sous-modèle sont admis (ils deviennent un objet collectif dans la classe, et non seulement l'apanage du maître), mais *leur validation demeure implicite*. Elle se résume en fait à :

- la vérification de la correspondance du modèle ou de sous-modèles à l'expérience de référence et aux expériences de confirmation éventuelles ;
- la mise en pratique du modèle ou de sous-modèles (ou de certaines de ses implications) dans des expériences de renforcement.

Les éléments concernant la transmission du modèle dans le mode de validation opératoire sont regroupés dans le schéma ci-après.

faire admettre la  
plausibilité d'un  
modèle

### L'expérimental dans la transmission du modèle (modèle admis)



## 4. CARACTÉRISTIQUES PRINCIPALES DES OPTIONS INDUCTIVISTES

Nous allons ici émettre quelques hypothèses sur ce qui nous paraît être des éléments rémanents de la pratique didactique réelle de ce genre d'option (au moins dans l'enseignement français), en essayant, de plus, d'éliminer ce qui nous paraît contingent (le manque de moyens matériels, par exemple).

### 4.1. L'expérience prototypique

Concernant la présentation du problème, le point marquant paraître être une valorisation extrême du point de départ de la monstration, l'expérience de référence. Comme l'inférence inductive est un processus aléatoire, ses partisans -qui veulent au contraire en établir la primauté- sont conduits à se donner les meilleures chances de départ. Une expérience de référence trop lâche, permettant trop d'inférences diverses, est un danger pour l'ensemble du processus. La monstration se doit donc d'abord d'être parlante et simple, et de permettre une *correspondance stricte avec "le" phénomène*.

Par ailleurs, le dégagement "du fait" ne doit souffrir d'aucun

l'option  
inductiviste  
modèle  
fortement le type  
d'expériences  
étudiées

doute. Il s'agit de donner aux élèves "*le sentiment inébranlable qu'il est là dans le domaine des faits*" (comme disait Liard).

Ainsi donc, l'expérience de référence ne doit pas seulement montrer, elle doit déjà *fonder* le fait, comme une donnée d'évidence. Ceci exclut en pratique -sinon en principe- le recours à des monstrations multiples visant à introduire le même fait. Si *une* monstration ne suffit pas à établir *un* fait, le doute peut s'installer sur l'ensemble de la démarche.

Pour que le fait soit parlant de lui-même, il faut que sa présence soit naturalisée elle aussi, banalisée. Il relève de l'effet Jourdain : on le connaissait presque, ou on aurait pu le connaître, s'il s'agit d'un objet technique non familier.

Plusieurs manifestations pour un seul fait (bien que ce soit théoriquement parfaitement compatible avec l'inductivisme) sont *didactiquement* non praticables dans le cadre de cette option, car cela mettrait en évidence des difficultés constitutives que l'on doit fictivement éliminer. Ce qui pratiquement caractérise cette démarche, c'est le refus de laisser entrer (dans l'acte d'enseignement) une parcelle de contestation de son bien-fondé.

C'est pourquoi certaines propositions de Lazerges restent sans concrétisations. Partir d'un phénomène complexe ("naturel"), et c'est toute une démarche de modélisation que l'on introduit par la bande. De même, doit-on refuser la multiplicité de monstrations pour dégager "un fait" : ce serait déjà le *construire* et remettre donc en cause la "naturalité" de l'induction.

Que ni Lazerges, ni les partisans de la méthode naturelle ne perçoivent une telle difficulté semble évident. *Mais le système didactique, lui, ne peut s'en accommoder* : la classe conduite sur ces bases de départ, et avec le postulat inductiviste, ne pourrait se dérouler dans de bonnes conditions et la présentation du problème s'en ressentirait.

## 4.2. Deux tendances

Mais la monstration n'est pas une fin en soi ; elle doit conduire à une entrée en matière, une entrée dans le discours expositif. Dans l'option inductiviste, si le fait doit apparaître sans contestation possible, il doit aussi "parler" le plus aisément possible. Autrement dit, la monstration doit non seulement avoir une forte "correspondance" avec les faits, mais elle doit aussi exhiber *les outils de la modélisation dans l'optique inductive*.

Cela concerne principalement deux nécessités :

i) La liaison entre éléments pertinents du phénomène (prélude qualitatif à la transmission de la loi) doit affleurer dès la monstration. Il y a donc une tendance à présenter des expériences prototypiques "riches", en ce sens qu'elles présenteraient déjà une organisation assez complexe entre éléments pertinents. Cela, bien entendu, dans les strictes limites tracées ci-dessus, qui sont les contraintes de base (simplicité, naturalisa-

tion du fait, unicité du prototype).

On peut ainsi chercher à introduire *plusieurs faits* avec une *seule* monstration. Quand c'est possible, compte tenu des limites décrites, cela présente l'avantage de se dispenser du travail de relier plusieurs expériences prototypiques entre elles, où, par exemple, un même fait apparaîtrait dans des cadres différents et risquerait donc de relever de plusieurs "fondations".

Il y a ainsi une tendance à ce que l'expérience prototype du "fait" s'élargisse jusqu'à devenir un *prototype d'un pré-modèle*. Cette tendance n'est limitée que par la nécessité de conserver l'aspect prototypique de l'expérience de référence.

ii) Permettre une introduction opérationnelle claire des concepts mis en jeu et, en particulier, fournir dans l'expérience prototype elle-même des *moyens de mesure* des grandeurs introduites.

La monstration prototypique tend dans ces conditions non seulement à "montrer" une grandeur nouvelle par ses effets phénoménologiques, mais à permettre d'emblée l'opération de base de l'option inductiviste : la mesure. Là encore, il y a des limites qui sont toujours fixées par les contraintes de la prototypisation, mais la tendance est présente.

Si ces descriptions concernant l'expérience de référence dans la pratique effective de l'option inductiviste sont correctes, on admettra que la distinction, si souvent faite entre introduction par le professeur et pratique préalable de l'élève, n'est pas essentielle. La prototypisation joue aussi bien dans l'une et l'autre situation. Si cela est le cas, on comprendra aussi la profonde unité de la démarche inductiviste à travers tout le siècle, unité repérée dans les descriptions précédentes malgré des différences pratiques indéniables.

#### 4.3. Validation opératoire

L'expérience prototypique permettant de faire affleurer un pré-modèle déjà organisé est l'expérience centrale dans l'optique inductiviste. Au-delà, la transmission du modèle sera du type opératoire.

En effet, non seulement la possibilité d'interprétations diverses ou contradictoires d'une même expérience de référence n'est pas recherchée, mais l'existence même d'un tel doute est un signe d'échec.

Le point central de toutes les opinions émises par les inductivistes pourrait bien être d'ailleurs celui-là : bien introduit, le *modèle* ou au moins le sous-modèle, *devient la conséquence inévitable de l'expérience prototypique*.

La *validation opératoire* peut seule servir de cadre à une telle pratique. Elle peut, de plus, être traitée sur deux modes extrêmes :



- La mise en évidence

Le premier consiste en une réduction supplémentaire du discours d'exposition. Celui-ci sera réduit dans l'exacte proportion où l'expérience parlera d'elle-même, dans l'exacte proportion où le discours du maître sera remplacé par la manifestation "évidente", "naturelle" de la vérité.

la "mise en évidence", nec plus ultra de l'option inductiviste

C'est pourquoi le processus de prototypisation est ici le phénomène premier, puisqu'il conditionne à la fois la transmission du modèle sur le mode opératoire et le court-circuitage de la partie d'exposition pour aboutir, dans le cas théorique idéal, à remplacer ce dernier par une simple "mise en évidence" de la loi.

Les techniques majeures qui paraissent être liées à ce mode de transmission sont celles de la constatation qualitative et surtout de la *mesure* sous ses diverses formes, quand elle est possible. On a alors un schéma de transmission du modèle ou sous-modèle compatible avec le schéma de validation opératoire, mais où les étapes sont encore simplifiées, ramassées :

**expérience prototypique → mise en évidence → renforcement**

- Autres cas

Il arrive cependant que ce mode soit plus difficilement praticable. C'est par exemple le cas quand, malgré les efforts didactiques, on ne dispose pas d'une expérience prototypique suffisamment explicite pour rendre "naturel" le cheminement de la transmission de "la loi" par sa "mise en évidence".

C'est la situation où l'on se trouve quand il faut fournir un modèle interprétatif et non (ou non seulement) une description en terme de "loi". On ne peut alors se contenter d'une simple "mise en évidence", et il faudra avoir recours à tous les éléments du schéma de la validation opératoire et, en particulier, à des expériences de confirmation.

Mais, comme nous l'avons indiqué précédemment, on touche là aux limites du fonctionnement didactique de la démarche inductiviste. Même dans le cadre d'une validation opératoire, le crédit accordé par la classe pour permettre le discours expositif doit être négocié pas à pas et la démarche inductiviste est mise en péril à chaque étape.

Ce mode de fonctionnement - bien que compatible lui aussi avec les options inductivistes - est un mode périlleux. Celui de la "mise en évidence" correspondrait au contraire plus nettement à un fonctionnement harmonieux de la démarche inductiviste.

- Le renforcement

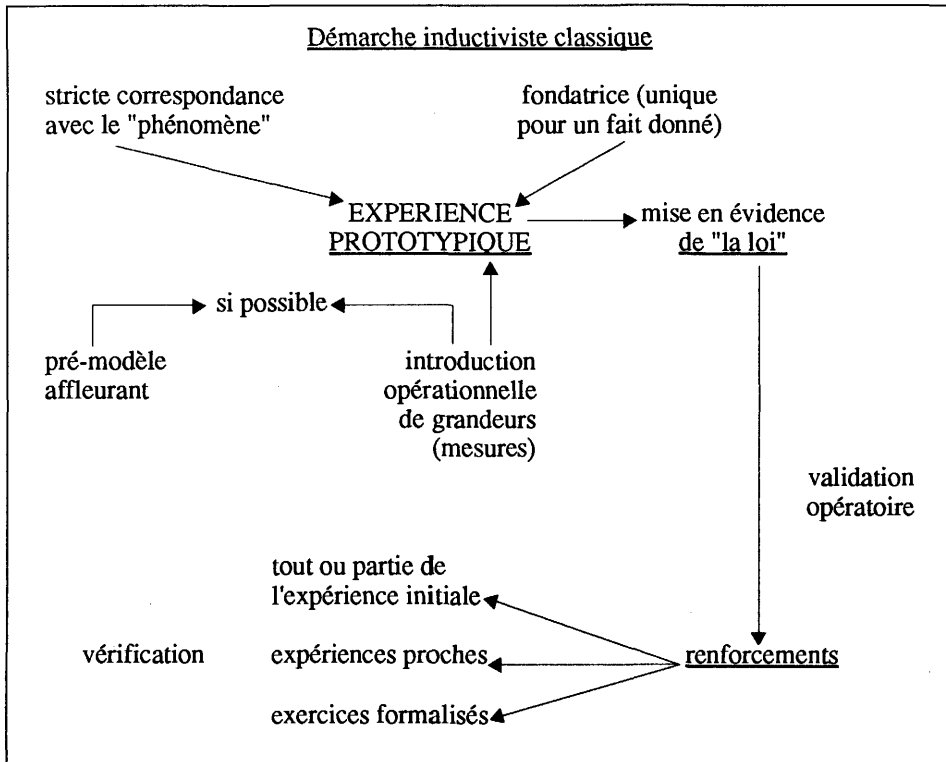
La présentation du problème par validation opératoire sur le mode de la mise en évidence permet, de plus, de conduire les expériences de renforcement sur le même registre.

L'expérience prototypique conduit naturellement à la loi. Elle la montre en même temps que les faits, les grandeurs et les

moyens de mesurer ces dernières. Facilement mise en évidence, elle sera immédiatement "mise en application" :

- soit dans des répétitions de tout ou partie de l'expérience de référence ;
- soit dans des situations différentes, mais où "la loi" s'applique tout aussi naturellement qu'elle fut issue de l'expérience prototype ;
- soit dans des exercices formalisés (non expérimentaux).

La loi, non questionnée dans de véritables expériences-tests (dont l'existence est décisive dans le paradigme positiviste lui-même) montrera sa validité par la répétition de son utilisation. Elle sera, au mieux vérifiée. Ce processus paraît être un moment décisif, peut-être même le cœur de la validation opératoire dans la démarche inductiviste pratique.

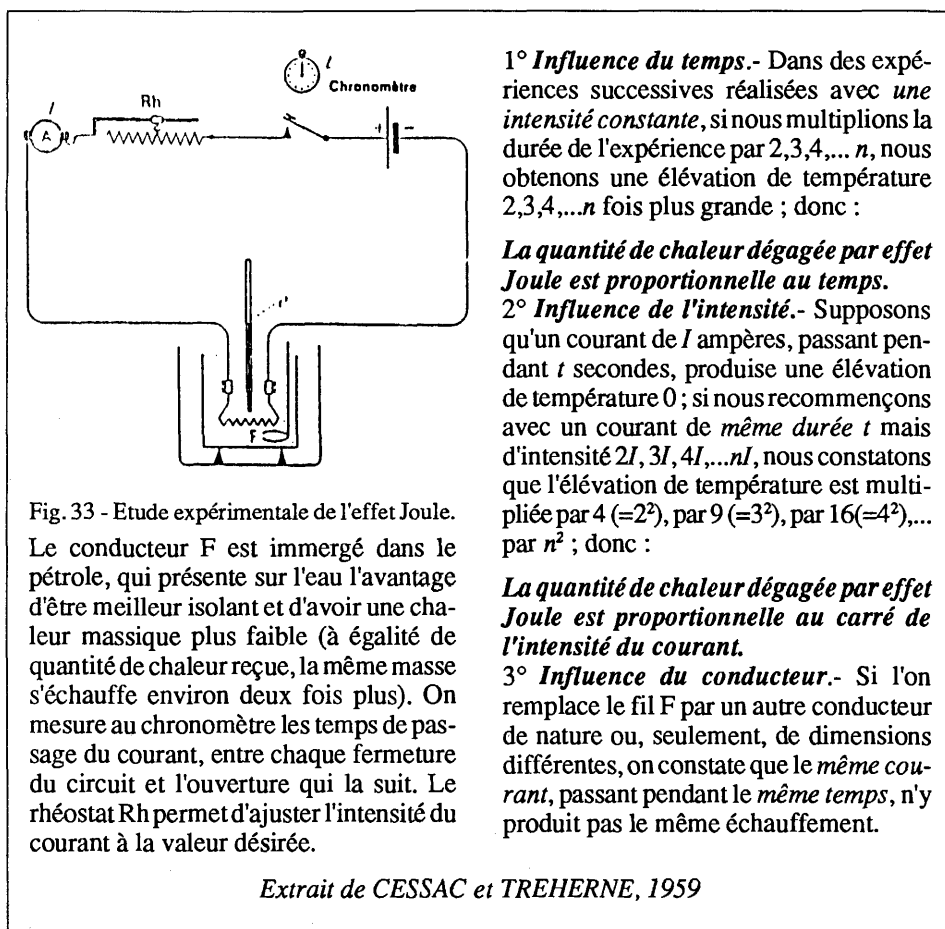


#### 4.4. Un exemple : la "mise en évidence" de la loi de Joule

un exemple parlant

La loi de Joule fournit un bon exemple de "fondation prototypique". L'exemple est ici pris dans un ouvrage déjà ancien, mais

demeure significatif (4).



**1° Influence du temps.**- Dans des expériences successives réalisées avec une intensité constante, si nous multiplions la durée de l'expérience par 2, 3, 4, ...,  $n$ , nous obtenons une élévation de température 2, 3, 4, ...,  $n$  fois plus grande ; donc :

**La quantité de chaleur dégagée par effet Joule est proportionnelle au temps.**

**2° Influence de l'intensité.**- Supposons qu'un courant de  $I$  ampères, passant pendant  $t$  secondes, produise une élévation de température  $\theta$  ; si nous recommençons avec un courant de même durée  $t$  mais d'intensité  $2I, 3I, 4I, \dots nI$ , nous constatons que l'élévation de température est multipliée par 4 ( $=2^2$ ), par 9 ( $=3^2$ ), par 16 ( $=4^2$ ), ... par  $n^2$  ; donc :

**La quantité de chaleur dégagée par effet Joule est proportionnelle au carré de l'intensité du courant.**

**3° Influence du conducteur.**- Si l'on remplace le fil F par un autre conducteur de nature ou, seulement, de dimensions différentes, on constate que le même courant, passant pendant le même temps, n'y produit pas le même échauffement.

On peut y prendre la mesure de toutes les hypothèses implicites dans l'introduction du pré-modèle.

i) Dépendance linéaire du temps : l'expérience n'est parlante que si la force électromotrice est aussi indépendante du temps, de même que  $I$  et  $R$ . Pour cette dernière, la variation avec la température au cours de l'expérience doit donc être négligée.

4. CESSAC ; TREHERNE. *Physique - Premières A', C, C', M, M'*. Nathan, Paris, 1959.

ii) Pour la dépendance du carré de l'intensité, il faut supposer que la tension aux bornes du générateur ne dépend pas de  $I$  quand le circuit est fermé. Donc que nous avons affaire à un générateur de tension idéal.

iii) Enfin, on doit supposer que la résistance ne dépend que du conducteur et non du couple  $V/I$  qui lui est appliqué. Ceci est lié à la loi d'Ohm, qui sera "démontrée" plus tard à l'aide, justement, de la loi de Joule.

Ces remarques ne visent nullement à laisser supposer qu'il serait possible de parvenir à une modélisation idéale, sans implicites, surtout en situation scolaire. D'une certaine façon, nous avons ici un exemple de conséquence de la coupure modèle/expérience, consubstantielle à l'option analytique pour l'enseignement de la physique.

En revanche, on pourra remarquer que la validation fonctionne bien sur le mode opératoire : pas de prévisions liées à une démarche de preuve, pas d'expérience test.

La loi sera renforcée par son utilisation pour "définir" la force électromotrice et la différence de potentiel ; elle sera utilisée aussi dans une série d'exercices formels, numériques en particulier ; elle ne sera mise en question ni dans sa "mise en évidence", ni dans son "application".

## 5. LA PRATIQUE ISSUE DE LA RÉFORME DES ANNÉES 1970

### 5.1. Introduction

Dans la masse d'objectifs et de finalités nouveaux, un point va nettement surnager dans les diverses réformes à travers le monde, et les réformes françaises de la fin des années 70 en particulier : la volonté d'atteindre aux "fondements" de la physique, à sa structure.

Cela conduit comme on l'a vu à une relativisation de la place centrale accordée auparavant -du moins au niveau des proclamations- à la démarche expérimentale. Mais, malgré des remises en cause nombreuses, la pression inductiviste demeure forte. Elle l'est encore plus parmi les professeurs qui viennent à peine de pouvoir la mettre réellement en pratique. Cette option va largement demeurer à la base des nouveaux programmes, mais la liaison naturelle de la période précédente entre méthode inductive et objet de la méthode, entre l'approche phénoménologique, l'observation, la mesure et "la loi" n'est plus que partiellement possible : l'objectif est maintenant "la structure" de la physique qui, dans aucune théorie épistémologique, ne se laisse ramener à ce genre de "lois" descriptives.

On va ainsi assister à ce que nous appelons "*le grand écart*" entre méthode et démarche inductive d'une part, la volonté de

le grand écart  
entre premier et  
second cycle

*renovation des contenus et la mise en ordre du jour de la vision structurelle de la physique de l'autre.*

Le signe le plus net de ce grand écart va être, compte tenu de la possibilité (nouvelle) de diviser l'enseignement en *cycles distincts*, la division des tâches et des rôles entre les deux cycles.

*"1° L'enseignement de la physique serait découpé en deux cycles, le passage de l'un à l'autre étant situé au voisinage de 15 à 16 ans :*

- a) au cours du premier cycle, l'enseignement de la physique serait surtout orienté vers une étude phénoménologique ;*
- b) au cours du second cycle, cet enseignement serait orienté de plus en plus vers une étude structurelle de cette branche"(5).*

*"L'enseignement des sciences physiques doit donc commencer beaucoup plus tôt : au minimum en 4ème, mais peut-être en 6ème, voire dans l'enseignement primaire. Il va de soi que ce ne peut être, alors, et au moins dans une première phase, un enseignement formalisé, mais essentiellement descriptif et expérimental" (6).*

## 5.2. La méthode "naturelle" au premier cycle

- L'option de base.

Présentée jusqu'alors comme découlant de l'essence de la physique et de la méthode expérimentale, l'option inductiviste sera désormais justifiée au nom des processus mentaux supposés des élèves. Des deux niveaux, celui de la physique et celui de l'enfant, qui concouraient à une option inductiviste -c'était le premier qui dominait dans la première moitié du siècle- c'est le second qui va désormais le faire.

le premier cycle,  
domaine  
privilegié de la  
méthode  
"naturelle"

Des travaux de l'Ecole piagétienne, on retiendra la division en stades cognitifs génétiques, l'enfant à cet âge étant "au stade concret". Mais on ne retiendra pas l'apport décisif de cette école, montrant que le mode de raisonnement dépend de la structure psychocognitive, laquelle détermine strictement les inductions "observationnelles" ; le "concret" est au contraire directement lié à l'inductif chez tous les partisans de la méthode "naturelle".

5. Actes du Colloque International sur la réforme et la coordination des enseignements de mathématiques et de physique. *Dialectica*, 21 - Lausanne, 1968.

6. Rapport de la Commission Enseignement de la SFP (1970) - *Bulletin de l'Union des Physiciens*, octobre 1977.

De nombreux textes de la commission Lagarrigue manifestent clairement une telle tendance (7).

Mais, même pour le premier cycle, la dite commission maintient des objectifs autres que la démarche expérimentale réduite à l'induction ; en voici un résumé (pour la classe de sixième) :

- aider les élèves à acquérir des éléments de méthodes scientifiques ;
- développer chez les élèves une attitude scientifique vis-à-vis de leur environnement naturel et technique ;
- les aider à acquérir divers savoir-faire de nature scientifique ;
- les initier à un certain nombre de concepts fondamentaux.

L'Institution va trancher dans un autre sens : *"La formation de l'esprit scientifique s'accomplira surtout grâce à l'initiation à la démarche expérimentale... Les qualités d'imagination, l'esprit de création seront cultivés, particulièrement par l'apprentissage de l'expérimentation... L'attitude expérimentale permet de choisir entre le très vraisemblable et le peu vraisemblable, ceci non en partant d'axiomes, mais de la réalité elle-même"*.

*"L'élève sera entraîné à prendre une attitude active qui lui permettra d'utiliser le savoir et la méthode acquis dans des situations concrètes"* (8).

Les "méthodes scientifiques" sont réduites à l'expérimental, où d'ailleurs la "réalité" parle d'elle-même...

La conclusion des Instructions manifeste un peu plus d'ambition : *"...culture équilibrée comportant l'appréhension progressive de la méthode expérimentale et l'acquisition de connaissances, attitudes, savoir-faire permettant de comprendre quelques aspects du monde actuel, au lieu d'en subir les contraintes"*.

Mais les rédacteurs de manuels ne s'y trompent pas ; ils vont à l'essentiel : *"Essentielles pour la formation de l'esprit par le contact qu'elles imposent avec le réel, les sciences physiques sont des sciences expérimentales et doivent être enseignées comme telles. On ne cherchera pas dans cet enseignement des théories et des formules"* (9).

*"L'enseignement des sciences physiques est avant tout expérimental. Il doit vous permettre d'acquérir le sens du concret, le savoir-faire et l'habileté indispensables"* (10).

---

7. Bilan de la Commission de Réforme pour l'enseignement des Sciences Physiques (commission Lagarrigue) (1977). *Bulletin de l'Union des Physiciens*, octobre 1977.

8. *Instructions pour l'initiation aux Sciences Physiques dans les Collèges*. CNDP, Paris, 1978.

9. SAISON ; MALLEUS ; HARSANY ; SEYFRIED ; HUBER. *Manuel de 6e*, Nathan, Paris, 1980.

10. MICHAUD, Y ; LE MOAL, Y. *Manuel de 4e*. Magnard, Paris, 1979.

On sera peut-être frappé par la similitude de telles déclarations (tout à fait représentatives des manuels français) avec les déclarations de la première moitié du siècle. La continuité paraît totale et nous avançons l'hypothèse qu'elle l'est effectivement au niveau de l'idéologie qui sous-tend ces options.

- Correspondances et différences avec la "méthode naturelle"

Le point central des conseils de Lazerges, le cours/T.P., devient la règle, comme d'ailleurs l'activité pratique des enfants. La "redécouverte" peut se développer. Encore une fois, ceci est indépendant du degré de directivité dans "la découverte". Chez Lazerges lui-même, ce point n'est pas clairement tranché, mais il y a des différences :

i) Contrairement aux vœux de Lazerges, le dégagement de "faits" au travers de l'observation de phénomènes complexes n'est jamais pratiqué. Le "fait", point de départ de l'induction, est unique et simplifié de manière à permettre une "observation" efficace. Dans ce cadre, d'ailleurs, le degré de directivité est en fait assez fort ("j" 'expérimente, "j" 'observe, "je" conclus...).

ii) Le contenu même du phénomène à observer a tendance à devenir de *nature technique*. C'est évidemment assez loin des phénomènes "de la nature" auxquels se référerait Lazerges. Cela ne modifie d'ailleurs en rien le processus inductif lui-même. Mais, d'une part, c'est une façon de répondre aux prescriptions multiples qui insistaient sur l'importance du rapport à la technique et aux objets techniques, de l'autre, dégagé de la complexité obligée de "la nature", cela permet (en élargissant les possibilités de choix perçus comme légitimes) au "fait" d'être "simple" à loisir.

iii) L'objectif du processus est aussi bien différent. Loin des "formules", la classe de premier cycle n'a pas pour but de dégager "une loi" (du moins en général). Elle pourrait avoir celui de revenir "à l'expérience", c'est-à-dire, dans ce cadre, à l'objet technique, à la résolution de problèmes physico-techniques, mais, bien que cela soit présent dans nombre de manuels, il ne semble pas que cela soit effectivement réalisé dans les classes.

L'objectif est ici :

- *descriptif* pour l'essentiel, mais comme on ne va pas jusqu'à "la loi", les éléments relationnels entre les facteurs en cause dans une situation ne sont pas l'objet de la description. La description est elle-même de type phénoménologique, et non analytique ;

- *interprétatif* d'après les instructions elles-mêmes. Là, la différence avec la méthode naturelle est patente. Les enfants doivent accéder à certaines théories explicatives, au premier rang desquelles les théories liées au niveau microscopique.

avec des  
difficultés  
profondes

La rupture de méthode est totale : il n'y a aucun moyen "naturel" de passer d'un "fait" (unique qui plus est) à des modèles interprétatifs aussi complexes.

Le décalage pourrait être rempli par le recours à la vulgarisation (11), mais cela est en fait inexistant. La résistance ici n'est pas d'ordre pratique (du moins pas seulement) ; elle est d'ordre idéologique : l'option inductiviste exige à la fois que tout discours découle de l'expérience et en soit issu par induction.

Cet autre aspect du "grand écart", caractéristique de la situation actuelle, est d'ailleurs commun au 1er cycle et au 2ème cycle, que nous allons décrire maintenant.

### 5.3. Le "grand écart" au second cycle

- Instructions et manuels

Ainsi que nous l'avons indiqué ci-dessus, le premier cycle héritant du versant phénoménologique, le second, lui, sera présenté comme essentiellement "structurel", mais, là encore, le pas est dur à sauter et les Instructions officielles (12) demeurent relativement oecuméniques :

On note le *"caractère indissociable de l'approche théorique et de l'approche expérimentale"* et on précise que ce programme n'est *".... pas conçu pour former prioritairement de futurs physiciens et chimistes, mais pour amener le plus grand nombre d'élèves à prendre conscience de la valeur culturelle des sciences physiques, les faire participer aux démarches intellectuelles et expérimentales caractéristiques de cette discipline, leur faire acquérir un savoir et un savoir-faire, enfin leur permettre d'interroger efficacement un monde parfaitement marqué par l'omniprésence des produits de la technique"*.

On note l'importance de *"la possession des grandes lois physiques qui permettent de comprendre le monde"*.

En revanche, comme pour le 1er cycle, la vulgarisation scientifique est abordée de manière plus que réticente où dominant garde-fous et mises en garde (critique des "faux semblants").

Cependant, en entrant dans le détail des programmes, on se rend compte (1ère S et E) que si les mises en garde contre le formalisme, la "formalisation excessive", la "déduction axiomatique" abondent, l'option inductiviste concernant la partie expérimentale demeure intacte : *"pour interpréter les résultats des expériences et des phénomènes observés dans la vie quotidienne,.... faire appel très largement à l'intuition et au sens physique des élèves"*.

---

11. HULIN, N. (1971). Remarques préliminaires relatives à l'enseignement dit de "Technologie". *Bulletin de l'Union des Physiciens*, octobre 1977.

12. *Instructions officielles pour le Second Cycle*. CNDP, Paris, 1982.



Selon un processus que nous avons rencontré plusieurs fois déjà, les rédacteurs de manuels vont accentuer unilatéralement cet aspect, réalisant ainsi un choix décisif dans le maquis des objectifs cités : *"Nous avons voulu lui donner un caractère résolument expérimental. Les notions fondamentales de mécanique et d'électricité qu'il présente sont issues de l'observation quotidienne de la nature et des réalisations techniques de l'homme. Elles sont précisées grâce à l'interprétation d'expériences souvent réalisables par les élèves"*.

*"La mathématique n'intervient que pour donner aux lois suggérées par l'expérience (nous soulignons, SJ), une expression simple" (13).*

Ainsi donc, l'option idéologique phénoménologique (réservée en principe au 1er cycle) et inductiviste est pleinement maintenue, mais elle doit, au second cycle, conduire surtout à "l'essence structurelle" de la physique, d'où le terme de "grand écart" que nous avons utilisé à son propos.

C'est que deux mouvements se développent en même temps : le premier pousse à une application effective et à la généralisation des préceptes de la méthode "naturelle" ; le second pousse à la réélaboration des objectifs mêmes de l'enseignement, où la "structure" de la physique figure en première place.

#### • Les éléments nouveaux

La tentative de résorber le "grand écart" que nous avons décrit va conduire à des modifications du contenu de "l'expérimental".

#### **Naturalisation du structurel**

Ainsi que nous l'avions déjà vu pour le 1er cycle, l'idéologie inductiviste exclut tout élément de rupture et de relations dialectiques entre le donné phénoménologique et la conséquence de l'analyse scientifique de ce donné. Quand cette conséquence est de type "loi descriptive" (obtenue par "des mesures" par exemple), la fiction de cette continuité est déjà difficile à défendre, mais cela tend vers l'impossible quand il faut atteindre à des théories, ou plus simplement des modèles interprétatifs.

Ainsi, Cessac et Treherne (14) introduisent-ils l'attraction terrestre : *"Pour soulever et maintenir un corps quelconque, nous devons faire un effort : nous avons la sensation très nette que le corps est tiré vers le sol. Si le corps est lâché, il tombe, c'est-à-dire qu'il se rapproche du sol. Des observations familières de ce genre montrent que les corps sont attirés par la terre. Cette action de la terre sur la matière est la pesanteur"*.

13. BOTTARO ; LACOURT ; ROUZAUD. *Manuel de Seconde des Lycées*. A. Colin, Paris, 1981.

14. CESSAC ; TREHERNE. *Manuel de Secondes C et F*. Nathan, Paris, 1973.

comment  
atteindre une  
structure cachée  
en observant  
l'observable ?

trois évolutions  
marquantes

On se demande, dans ces conditions, pourquoi des observations si "familières" n'ont conduit à la notion d'attraction terrestre (et plus généralement d'attraction universelle) qu'il y a quelques centaines d'années.

Ainsi aussi [voir note 13] : *"L'expérience d'Edison 1884 montre qu'un métal chauffé expulse des électrons dans le vide"*. La dite expérience ne "montre" évidemment rien de tel ! (15) et "l'interprétation" (coulant de source, "naturellement") en est la suivante : *"l'électron est un constituant universel de la matière. Un métal contient des électrons très nombreux, peu liés, appelés électrons libres, animés de mouvements incessants et désordonnés (agitation thermique). Si celle-ci devient assez élevée, les électrons sont expulsés du métal"*.

Les exemples abondent de ce genre de raccourcis. Ce que nous voulons surtout souligner ici, c'est que cette dimension sera inévitablement amplifiée à partir du moment où il s'agira de sortir du domaine de l'observation immédiate et de "la mesure" (cas des "interprétations" microscopiques).

### **Didactification approfondie des situations expérimentales**

Une des façons d'échapper à ces difficultés est de construire des situations expérimentales de telle manière que le trou béant entre le phénomène et son interprétation soit autant que possible réduit. La nature et les phénomènes naturels, complexes par essence, sont en général réticents à un tel traitement. On va donc se tourner :

i) vers des *objets techniques*, qui de par la finalisation même de leurs fonctions sont souvent producteurs ou patients de phénomènes relativement délimités (cas typique des résistances, diodes, etc... en électricité) (cf. ci-dessus : "1er cycle").

ii) vers la création de *situations artificielles* et c'est évidemment beaucoup plus spectaculaire. Le processus de didactification de la situation expérimentale est là poussé à son terme. Il ne s'agit plus de "phénomènes judicieusement choisis" dans la nature, ni même d'une transposition-reconstruction de situations inspirées par des phénomènes naturels, l'histoire des sciences ou le fonctionnement d'objets techniques. Il s'agit bien de situations perçues et présentées comme des créations ex nihilo, et non redevables d'une quelconque transposition à partir d'un domaine non didactique.

L'exemple le plus typique est celui des *tables à coussin d'air* pour l'introduction de la mécanique en classe de seconde. En se débarrassant largement des frottements, ce genre de mani-

---

15. Les travaux de Crookes sur la nature matérielle du rayonnement cathodique datent de 1893. Ceux de Perrin sur la nature électriquement négative du rayonnement de 1897, de même que ceux de Thomson précisant la masse de l'électron.

pulations se débarrasse du même coup des humiliants tours de passe-passe conduisant de phénomènes avec frottements aux lois des mouvements sans frottements.

C'est dans un sens aussi large qu'il fallait sans doute comprendre la phrase *"les notions fondamentales de mécanique... sont issues de l'observation quotidienne de la nature et des réalisations techniques de l'homme"* (op cité), au rang desquelles il faut alors ranger les tables à coussin d'air...

Mais l'objet d'une telle didactification n'est pas comme on le croit souvent de se "débarrasser" de l'expérience et du "concret". Elle vise au contraire à *sauvegarder l'option inductiviste*, durement touchée par le "grand écart", quitte à passer par un "concret" un peu spécial...

### **L'opérationalisme**

Les nouveaux objectifs fixés à l'enseignement de la physique conduisent donc à de substantiels changements de contenus des situations expérimentales, mais il y a aussi des modifications plus subtiles :

i) L'insistance mise sur "les fondements" de la physique concerne, on l'a vu, les grandes théories, mais elle concerne aussi, plus modestement, l'approfondissement de certains concepts-clés, et, de proche en proche, un plus grand intérêt porté aux aspects relationnels et fonctionnels entre concepts (plus, donc, que l'aspect descriptif des "Lois").

Si l'on se rapporte à certains documents de la commission Lagarrigue, cela pourrait aller de pair avec une plus grande importance donnée à la modélisation, mais ceci est contraire à l'option inductiviste. Comment donc concilier l'objectif nouveau avec la méthode ancienne ?

Une des possibilités est *l'opérationalisme*. Les concepts vont être désignés (en général en situation expérimentale) d'une manière isolée des autres concepts, mais ils vont fonctionner, "opérer". L'ensemble désignation/opération constituera alors une tentative pour sauvegarder la fiction d'une base expérimentale (toujours unique) à l'introduction d'un concept et la fiction d'un approfondissement conceptuel par la répétition de son utilisation.

*"L'expérience est la source première des connaissances ; ainsi, il faut convaincre nos élèves qu'un résultat établi par l'expérimentation l'est aussi solidement que s'il l'a été après une suite de calculs rigoureux ; il n'a pas besoin d'être "démonstré". En particulier, la définition opératoire d'une grandeur peut être utilisée aussi bien que sa définition théorique (16).*

---

16. MARCK, P. Projet de programme pédagogique. *Bulletin de l'Union des Physiciens*, février 1972.

L'auteur ne perçoit que deux modes d'introduction opposés, opératoires versus théorique (qui renvoie aux oppositions inductif/déductif et concret/abstrait). C'est une limitation que nous avons le plus souvent rencontrée dans les périodes précédentes, mais surtout ici, cela permet de prétendre à une solution originale, relativement nouvelle, pour résorber la distance démarche inductive/approfondissement conceptuel.

Cette méthode, quand elle se combine avec la proposition de situations expérimentales très artificielles, peut, le cas échéant, conduire certaines parties du programme à un fort degré d'abstraction (ainsi l'enseignement de la mécanique en seconde).

ii) Le second aspect qui est lié à l'opérationalisme est celui de l'utilisation de certaines méthodes d'analyse et de description. Il s'agit principalement du recours au *tracé graphique*. D'un côté, cela permet une rénovation des méthodes classiquement utilisées, en général considérées comme vétustes au regard de l'état des techniques savantes ou technologiques ; de l'autre, et surtout ici, il s'agit de remplacer l'ancien aspect "mesure" dans la démarche inductive, en diversifiant considérablement les techniques. Ceci se relie à l'option opérationaliste car cela permet de remplacer une effective interrogation relationnelle sur certaines grandeurs par une multiplication des occasions de les citer et de les mesurer.

Ainsi, en Seconde, le tracé des caractéristiques courant/tension prend-il une importance spectaculaire.

## 6. QUELQUES CONCLUSIONS

L'étude que nous avons menée nous a permis de montrer que le recours didactique à l'expérimental remplit deux fonctions principales :

i) Il joue un rôle important -souvent décisif- dans la proposition du problème physique à étudier. Le moyen le plus utilisé à cette fin est celui de la monstration, processus permettant à la fois de désigner l'objet d'étude et d'en présenter la phénoménologie. Bien que se présentant aux élèves comme une donnée brute, la monstration est le résultat d'une construction didactique minutieuse et complexe.

ii) Le recours à l'expérimental joue un rôle dans l'introduction du modèle. Celui-ci n'est ni "établi", ni "démonstré" ; il est, au mieux, admis par la classe comme un cadre plausible qui permet de rendre compte de la phénoménologie désignée par la monstration.

Dans ce cadre très général, plusieurs options demeurent possibles. L'une d'elles est l'option inductiviste. Demeurée essentiellement théorique pendant plusieurs dizaines d'années en France, elle s'est lentement développée dans la pratique,

avant de s'imposer complètement : pendant tout ce temps, elle est restée la référence obligée des pédagogues et des professeurs de physique.

Dans cette option, toute connaissance est réputée découler de la monstration initiale. Dans ces conditions, le moment principal est celui de "l'observation" et de la "mesure". La conséquence attendue est la "mise en évidence" des lois.

L'option inductiviste prétend traiter tout objet à enseigner sur ce mode (elle se montre ainsi hostile à la vulgarisation scientifique). Elle va alors avoir tendance à bâtir un type de rapport à l'expérimental tout à fait spécifique, où le traitement qu'elle préconise puisse se dérouler sans coup férir.

Les traits les plus saillants en sont les suivants :

i) la tendance à avoir recours à des "expériences fondatrices", dans lesquelles :

- la correspondance apparaît forte entre le phénomène étudié et les "faits" pertinents à considérer ;
- le maximum de "faits" est présent dans la même expérience (de manière à éviter d'avoir à les relier ultérieurement), pour peu que la monstration reste simple ;
- le modèle à introduire affleure presque de l'expérience ("mise en évidence").

L'ensemble de ces traits conduit alors à l'utilisation systématique d'expériences prototypiques.

ii) Bien que grandement facilitée par le recours à ce genre d'expérience prototypique, le passage de l'observation à la loi demeure délicat. C'est pourquoi l'option inductiviste tend à présenter le plus rapidement possible la "loi", quitte à en vérifier ultérieurement la validité.

iii) Cette option rencontre enfin des difficultés supplémentaires (parfois insurmontables) si l'on vise une physique plus structurée que descriptive.

Dans ce processus de *validation opératoire*, le rapport à l'expérimental est ainsi fondamentalement diminué, contrairement justement au projet des défenseurs de l'option inductiviste.

Pourtant, même dans le cadre des contraintes générales pesant sur une utilisation de l'expérimental en situation didactique, d'autres options pourraient être envisagées, comme celles qui sont centrées sur une démarche hypothético-déductive et les processus de modélisation. Ces dernières font d'ailleurs l'objet de nombreux travaux dans la recherche en Didactique de la Physique, mais, il faut le reconnaître, demeurent encore fortement marginales dans l'enseignement courant en France.

Samuel JOHSUA  
Faculté des sciences,  
Université de Luminy,  
Marseille



# QUELLES ACTIVITÉS EXPÉRIMENTALES AVEC LES ORDINATEURS DANS L'ENSEIGNEMENT DES SCIENCES ?

Daniel Beaufils  
Naoum Salamé

*L'apport de l'informatique à l'enseignement des sciences physiques, de la biologie, et de la géologie en France, est examiné en fonction du renouvellement des approches expérimentales et du niveau des activités intellectuelles qui peuvent être proposées aux élèves. Le travail sur de nouveaux dispositifs d'expérimentation, l'exploration et la construction de modèles, le traitement statistique de banques de données sont analysés, et la complémentarité de ces approches pour l'étude de phénomènes complexes est mise en évidence. L'augmentation du niveau d'initiative des élèves, l'extension des méthodes d'analyse et la place des représentations graphiques sont soulignées.*

années 60 :  
l'informatique  
entre dans  
l'enseignement  
des sciences

émergence  
d'utilisations  
spécifiques dès  
les années 70

années 80 :  
évolution  
importante des  
matériels

Les modalités d'utilisation des ordinateurs dans l'enseignement des sciences expérimentales font l'objet d'investigations depuis le milieu des années soixante. Peu après les initiatives américaines (à Stanford et à Irvine) les premiers projets lancés en France - dans l'enseignement supérieur - ont porté en particulier sur la médecine, la biologie et les sciences physiques (1). Ces travaux ont continué avec l'introduction des ordinateurs dans l'enseignement secondaire au début des années soixante-dix en Grande Bretagne et en France, mettant en évidence des utilisations spécifiques des disciplines scientifiques : recours aux capacités de calcul pour la vérification ou la mise en évidence de lois en physique, constitution et exploitation de banques de données en biologie, modélisation et simulation dans les deux disciplines (2). Au début des années quatre-vingt, la présence de l'informatique dans l'éducation devient plus significative avec l'apparition des micro-ordinateurs. L'évolution des caractéristiques de ces matériels favorise le développement de nouvelles approches : l'application étendue de méthodes numériques élaborées (résolution d'équations), l'expérimentation assistée par ordinateur rendue possible par l'existence d'interfaces de communication et d'instruments de mesure adaptés, l'utilisation du graphisme, et l'ex-

(1) Hôpital St Louis (puis CHU Cochin) et Faculté des Sciences de l'Université de Paris.

(2) *Dix ans d'informatique dans l'enseignement secondaire. 1970-1980.* Recherches Pédagogiques. n° 113. INRP. 1981.

exploitation des images numériques prises par les satellites (3). Nous nous proposons d'examiner rapidement dans un premier temps comment le contexte général des idées sur l'enseignement des sciences permet d'expliquer l'intérêt que suscite l'introduction des ordinateurs. Ensuite, quelques exemples typiques de leurs utilisations actuelles dans les lycées en France nous permettront de montrer comment l'informatique peut être la source d'une réflexion sur les activités expérimentales en sciences physiques et en biologie, conduisant à faire évoluer ces activités et à les renouveler (4).

## **1. LES ORDINATEURS DANS L'ÉVOLUTION DE L'ENSEIGNEMENT DES SCIENCES EXPÉRIMENTALES**

L'enseignement des sciences évolue sur le plan des pratiques pédagogiques du fait de l'apparition de matériels didactiques nouveaux (en particulier dans l'équipement des laboratoires). Il évolue également sur le plan des contenus et des méthodes d'investigation du fait de l'acquisition de connaissances nouvelles (intégrant de manière spécifique l'évolution des technologies). L'insertion de l'informatique dans cet enseignement s'est réalisée progressivement, alors que par ailleurs un certain scepticisme entoure la faisabilité de la démarche expérimentale et l'apport réel des travaux pratiques.

### **1.1. L'ordinateur pour résoudre les problèmes de l'expérimentation**

Sur le plan des pratiques pédagogiques, l'affirmation du caractère "avant tout expérimental" de l'enseignement des sciences a contribué à la recherche de possibilités d'ancrage des connaissances à enseigner sur des faits observables, mesurables et analysables, et a abouti à la réalisation et à l'utilisation de dispositifs ad hoc plus ou moins sophistiqués (tel que le banc à coussin d'air en physique). Cela a contribué à l'augmentation de la partie expérimentale des cours, mais a conduit, inversement, à une réduction des TP. En effet les dispositifs sont devenus moins accessibles aux élèves, que ce soit en raison de

dans la  
recherche  
d'améliorations  
des expériences

- 
- (3) Cette évolution a débouché récemment sur des actions nationales d'équipement des laboratoires de sciences des lycées, et des programmes de développement centrés sur les utilisations de l'ordinateur comme outil de laboratoire et sur l'exploitation des images de télédétection.
  - (4) Nous avons conservé le regroupement des disciplines adopté dans le rapport *Technologies de l'Information et Apprentissages de Base*, fascicule *Les concepts scientifiques et technologiques*. OCDE-CERI. Paris. 1986.



leur unicité dans le laboratoire (du fait de leur coût) ou en raison de difficultés de mise en oeuvre (fragilité, complexité des réglages, etc).

On conçoit dans ce contexte l'importance prise récemment par l'ordinateur outil de laboratoire comme aide didactique. La tendance est actuellement de construire en priorité des outils devant apporter à l'expérience de laboratoire des qualités supérieures, tant sur le plan de la valeur scientifique (accès à des phénomènes plus nombreux et plus proches de la réalité, meilleure estimation des grandeurs mesurées, facilitation de l'analyse de données grâce aux possibilités d'acquisition automatique, de traitement numérique, et de représentation graphique), que sur le plan de "l'impact médiatique" auprès des élèves (simultanéité des mesures et des représentations, qualité des graphiques, etc).

## 1.2. L'ordinateur nouvel élément à intégrer dans les contenus enseignés

Sur le plan des contenus, l'évolution technologique a conduit en physique, d'une part à introduire de nouveaux objets d'étude tels que la diode puis l'ampli-opérationnel, et d'autre part à inscrire plus tôt dans le curriculum des notions ou des concepts qui y sont associés, comme le codage binaire ou les fonctions logiques (5). L'influence des dispositifs technologiques de plus en plus élaborés sur les méthodes et les savoir-faire pratiqués dans l'enseignement est encore plus marquée. Ainsi, dans le domaine des appareils de mesure on est passé des dispositifs à aiguille, à l'oscillographe et au multimètre numérique, puis récemment à la centrale de mesure automatisée.

En biologie, l'évolution des connaissances fondamentales et des applications intervenue au cours des deux dernières décennies est le facteur le plus remarquable : les explications scientifiques des phénomènes se situent maintenant dans les mécanismes cellulaires et moléculaires, les transformations physico-chimiques, les relations systémiques. Les programmes enseignés ont intégré cette évolution sans que l'instrumentation nécessaire soit toujours accessible : on peut noter par exemple que, si beaucoup d'établissements sont équipés de matériels d'électrophysiologie, le besoin de nouveaux matériels se fait sentir pour la spectrophotométrie, l'électrophorèse et même pour les méthodes isotopiques (utilisées de manière croissante dans de nombreux secteurs mais dont le transfert dans l'enseignement reste difficile à envisager) (6).

(5) Cette introduction est faite dans les programmes de mathématiques, mais les notions sont considérées comme des prérequis dans l'enseignement des sciences physiques.

(6) Le rapport pré-cité de l'OCDE parle des "conséquences dramatiques" de cette évolution sur l'enseignement de la biologie.

l'ordinateur est  
devenu un outil  
de laboratoire

en relation avec  
l'évolution des  
techniques

et des savoirs

c'est aussi un  
objet d'étude

et un moyen de  
transfert de  
nouvelles  
méthodes

la pratique de la  
démarche  
expérimentale  
n'étant pas  
simple

Les ordinateurs sont donc entrés dans l'enseignement comme suite logique de l'évolution technologique, à la fois en tant qu'outils et en tant qu'objets d'étude : ceci s'est concrétisé par la création des "Options Sciences Physiques et Informatiques" où l'ordinateur est considéré comme outil de mesure, de contrôle de processus et de traitement numérique, et dont le principe de fonctionnement (de la circulation de l'information dans les circuits électroniques jusqu'à la programmation dans un langage évolué) fait partie des connaissances à acquérir au même titre que celui d'un oscillographe.

Les ordinateurs sont également apparus comme des facteurs susceptibles de rapprocher l'enseignement de l'évolution technique en cours dans la société et plus précisément comme des moyens permettant d'introduire les méthodes et les instruments utilisés dans l'enseignement supérieur et dans la recherche. Dans les typologies des utilisations des ordinateurs, trois modalités que l'on rencontre fréquemment dans les publications nous intéressent particulièrement : la saisie de données (acquisition automatique ou semi-automatique), le traitement des données (calculs de grandeurs secondaires, méthodes statistiques, traitement d'images), la simulation de phénomènes.

### 1.3. Mais des interrogations sur les activités expérimentales subsistent

La réflexion sur les utilisations pédagogiques de l'ordinateur en classe de sciences a conduit à s'interroger plus fondamentalement sur la nature et l'importance des activités expérimentales. En effet, les espoirs mis dans l'informatique sont intervenus alors que, après une période où cet enseignement était considéré comme la simple transmission d'un ensemble de connaissances constitué, l'accent a été mis sur l'enseignement de la science à travers ses méthodes (ou l'idée qu'on s'en faisait) : observer, faire des hypothèses, concevoir et réaliser des expériences, rassembler des résultats expérimentaux, analyser et interpréter les résultats, conclure. La pratique de cette démarche a été parfois critiquée, parce que, considérée strictement, elle ne correspondait pas au travail réel des chercheurs dont elle n'était qu'une reconstruction. Sa mise en oeuvre s'est heurtée, en outre, à des problèmes de faisabilité technique et pédagogique et à des limites dans la compétence des élèves (7). De plus, les études menées sur les objectifs spécifiques des travaux pratiques ou des expériences, conduisent à plus de

---

(7) La conduite de cette démarche dans des situations d'exploration ouverte, laissant place à une part d'initiative des élèves et évitant le dogmatisme, s'est également avérée difficile, peut-être parce que n'existaient pas encore des dispositifs appropriés. Voir à ce sujet les travaux de : J.P. ASTOLFI, A. GIORDAN, G. GOHAU, etc.

et l'importance  
des travaux  
pratiques  
discutée

modestie quant à leur rôle effectif (8). Ces études avancent que la nécessité du travail sur le "concret" dans l'enseignement des sciences expérimentales, tient peut-être plus du dogme qu'il n'est fondé sur des avantages prouvés, ce qui bouscule les idées communément admises. Moore et Thomas (9) font état de recherches qui montrent que la manipulation d'objets réels pourrait même constituer un obstacle à l'abstraction ; ils émettent l'hypothèse que les travaux pratiques pourraient être une survivance fossile de la vision du scientifique habile manipulateur d'appareillages du 19ème siècle. Richmond (10) constate que certains pays développés ont peu ou pas du tout de travaux pratiques dans leurs enseignements scientifiques. Il n'est pas besoin de rappeler les critiques portant sur les conditions de réalisation des expériences de laboratoire, et sur les limites de l'expérience unique généralement pratiquée, à la fois comme preuve et comme facteur d'apprentissage.

De plus, si les auteurs reconnaissent généralement l'efficacité des travaux de laboratoire pour installer des habiletés manipulatoires et des comportements, ceux-ci ne revêtent plus l'importance qui leur était accordée précédemment. De différentes publications (11) il ressort que trois arguments peuvent être sérieusement avancés en faveur des travaux pratiques :

- 
- (8) R.T. WHITE, R.P. FISHER : "Research on natural sciences", in *Second handbook of research on teaching*. 1985. pp. 874-905.  
R. MILLAR : "Towards a role for experiment in the science teaching laboratory". *Studies in Sci. Educ.* 14. 1987. pp. 109-118.  
R. MILLAR, R. DRIVER : "Beyond Processes". *Studies in Sci. Educ.* 14. 1987. pp. 33-62.
  - (9) J.L. MOORE, F.H. THOMAS : "Computer simulation of experiments : a valuable alternative to traditional laboratory work for secondary school science teaching". *SSR*. 1983. pp. 641- 655.
  - (10) P.E. RICHMOND : "Who needs laboratories ?". *Physics Education*. 1979. pp. 349-50.
  - (11) voir notamment :  
G.C. BATES : "The role of the laboratory in secondary school science programs". *NSTA commission on professional standards and practices*. Washington. 1978. pp. 55-81.  
A. HOFSTEIN, V.N. LUNETTA : "The role of laboratory in science teaching". *Review of Educational Research*. Vol. 52. n° 2. 1982. pp. 210-217.  
J.W. LAYMAN : "Un appareil de travaux pratiques : le micro-ordinateur", in *Tendances nouvelles de l'enseignement de la physique*. Vol. 4. UNESCO. 1986. pp. 211-213.  
K. TOBIN : "Secondary science laboratory activities". *European Journal of Science Education*. Vol. 8. n° 2. 1986. pp. 199-211.  
J. SOLOMON : "Learning through experiment". *Studies in Sci. Educ.*, 15. 1988. pp. 103-108.  
C.T. OPIE : "Developping scientific thinking through the use of computer monitoring", in *Actes 5ème Conférence Internationale, Technology and Education*. Edinburgh. Mars 1988. Vol 2. pp. 97-100.

- les activités expérimentales ont un rôle de motivation, les expériences suscitant l'intérêt des élèves pour le phénomène étudié,
- les activités expérimentales constituent un des éléments perceptifs, complémentaires des énoncés linguistiques, nécessaires à la compréhension et l'assimilation du discours enseigné,
- l'expérimentation constitue l'une des façons d'impliquer les élèves dans l'apprentissage (apprentissage actif).

## **2. CONTRIBUTIONS DE L'INFORMATIQUE A L'ÉVOLUTION DES ACTIVITÉS EXPÉRIMENTALES**

il faut s'en tenir à  
des objectifs  
réalistes

Le survol de l'évolution des idées dans le domaine de l'enseignement des sciences expérimentales nous amène à essayer d'analyser les apports spécifiques de l'informatique à ces disciplines, en focalisant notre attention sur la manière dont celle-ci permet d'envisager des solutions aux problèmes centraux que pose l'expérimentation. En particulier, il nous paraît important de montrer ses capacités à :

- maintenir dans l'enseignement des expériences concrètes, les améliorer et les renouveler, multiplier les exemples différents qui illustrent un phénomène ou certains de ses aspects ;
- proposer aux élèves des activités intellectuelles de haut niveau, en relation avec ce qui est requis des formations scientifiques (planification et contrôle des expériences, traitement et analyse des données, etc.) ;
- aider et guider les élèves dans les activités qui leur sont proposées, et contribuer à évaluer leurs savoir-faire et leurs capacités de raisonnement, évaluation qui pose actuellement problème.

Nous essayerons de cerner ces apports à partir des activités qui peuvent être développées avec les environnements évoqués précédemment, et qui sont déjà installés dans les pratiques pédagogiques : les dispositifs expérimentaux, les simulations de phénomènes, les banques de données.

### **2.1. Le travail avec des dispositifs expérimentaux**

Les séances autour de dispositifs expérimentaux (TP ou TP-cours) sont censées conduire à des activités scientifiques généralement résumées dans la courte liste suivante, empruntée à L.T. Rogers (12) : manipulation d'appareils, observation, inter-

---

(12) L.T. ROGERS : "The computer assisted laboratory". *Physics Education*. n° 22. 1987. pp. 219-224.

l'ordinateur  
facilite  
l'expérimentation

rogations, mesures, collecte de données, analyse de données, émission d'hypothèses, communication des résultats. Nous avons montré que les ordinateurs pouvaient prendre en charge des aspects techniques importants à travers la facilitation de l'acquisition de données (rapidité, meilleure qualité de la mesure, collecte automatique), et l'aide à l'analyse (calculs de grandeurs, d'équations, affichages graphiques automatiques, etc.).

mais pour quelles  
activités ?

Si les dispositifs qui permettent la visualisation de caractéristiques des systèmes étudiés (potentiel d'action le long d'une fibre nerveuse, relation courant-tension pour un dipôle, etc.) ne sont pas dénués d'intérêt pour la présentation des concepts par l'enseignant, ils ne sont pas directement porteurs d'activités notables pour les élèves. Or les questions qui viennent alors au premier plan portent précisément sur ces activités : des données plus nombreuses et plus précises, pour quoi faire, dans quelle démarche ? Quelles activités sont laissées aux élèves lorsque l'expérience est contrôlée par l'ordinateur ? La disparition de certaines d'entre elles est-elle compensée par d'autres plus intéressantes, plus riches ? etc.

Dans les deux disciplines qui nous concernent ici, les exemples qui illustrent les potentialités de l'ordinateur au laboratoire, exploitent les mêmes avancées techniques (capteurs, sondes, télémesure) et ont recours aux mêmes fonctionnalités (acquisition, visualisation, traitement), conduisant ainsi à des activités en partie identiques. Néanmoins, des finalités sensiblement différentes sont poursuivies, tenant compte de l'esprit et des contraintes propres à l'enseignement de chacune des disciplines.

en physique

Pour illustrer la tendance des travaux en sciences physiques, trois exemples pris parmi les ensembles matériels et logiciels qui sont représentatifs de l'utilisation actuelle de l'ordinateur au laboratoire, seront principalement évoqués : le logiciel BANC (13) conçu pour l'étude quantitative de la quantité de mouve-

(13) Le dispositif d'acquisition est constitué d'un ensemble de capteurs photoélectriques (2 cellules par capteurs), d'une interface de mesure, et d'un ensemble de logiciels spécialisés, pour mesurer les dates et les vitesses des mobiles sur le banc (réalisation INRP-DP5). Des utilisations pédagogiques sont décrites dans :

D. BEAUFILS, F.M. BLONDEL, J.C. LE TOUZE, N. SALAME : "Mécanique en Seconde avec un banc et un ordinateur". in *Cours et TP de physique et chimie avec ordinateur*. Paris: UDP-INRP. 1987. pp. 21-39.

D. BEAUFILS : "Conception et manipulations de physique avec ordinateur : apport d'une expérimentation". in *Communication, Education et Culture Scientifiques et Industrielles. Actes des Xèmes Journées Internationales sur l'Education Scientifique*. Université Paris VII. 1988. pp. 379-386.

ment et de l'énergie cinétique lors d'éclatements ou de chocs, et les logiciels CHUTE (14) et PENDULE (15) qui permettent une étude cinématique, dynamique et énergétique du mouvement (d'une bille en chute libre pour le premier, d'un pendule pesant ou de torsion pour le second) et dont les versions les plus récentes proposent des fonctionnalités de représentation graphique des mesures et des calculs, de tracé de fonctions, et de simulation numérique pour des activités de modélisation mathématique.

On peut analyser les activités des élèves avec ces logiciels, en détaillant plusieurs points :

l'observation

1 - l'observation de phénomènes : on sait que cette activité est en fait très fortement liée, d'une part, à la tâche dévolue à l'élève, et d'autre part, aux connaissances qu'il possède par avance et aux informations qui lui sont apportées au moment de l'observation. Le premier point relève presque exclusivement du rôle de l'enseignant, alors que les deux autres peuvent s'appuyer sur l'interaction avec l'ordinateur. Ainsi, la saisie automatique de données avec affichage des valeurs numériques ou de représentations graphiques, quasiment en temps réel, constitue un apport d'information qui peut jouer un rôle primordial. Dans un logiciel comme PENDULE, les représentations graphiques de la vitesse angulaire ou de l'énergie cinétique, par exemple, peuvent être obtenues "en direct" avec le phénomène visible, et la superposition graphique de plusieurs séries de mesures sur un même mouvement permet d'étudier la périodicité des oscillations. L'idée développée ici n'est pas seulement que les informations envoyées par l'ordinateur sont plus riches que le simple suivi des grandeurs physiques visibles, mais bien que la présence simultanée de ces informations entraîne en

---

(14) Le dispositif (capteurs photoélectriques, interface, logiciels) permet de mesurer les dates et les vitesses de passage d'une bille, en fonction de la hauteur, et de calculer toutes les grandeurs dérivées utiles (réalisation INRP-DP5).

D. BEAUFILS, J.C. LE TOUZE : "L'ordinateur graphique, un outil didactique pour la modélisation expérimentale en classe de physique des lycées ?", in *Actes des XIèmes Journées Internationales*, 1989, à paraître.

(15) Ce logiciel permet l'acquisition très rapide d'un grand nombre de mesures de l'angle d'un pendule au cours du temps, grâce à un dispositif potentiométrique lié à l'axe du pendule. Logiciel et documentation co-édités par le Centre National de Documentation Pédagogique et Langage et Informatique.

et la  
comparaison de  
phénomènes  
réels

retour une meilleure observation du phénomène lui-même (16). Plus généralement, l'activité peut être centrée sur la comparaison des comportements d'un système dont on modifie la valeur d'un paramètre (comparaisons plus nombreuses facilitées par les affichages numériques ou graphiques).

le contrôle de  
l'acquisition des  
données

2 - la prise de mesures : si l'ordinateur peut la réaliser, il ne se charge pas du choix des variables à mesurer. Or contrairement à un dispositif classique de mesure qui impose le mode de suivi (donc de modélisation), l'emploi de l'ordinateur au laboratoire permet d'accéder à tout le jeu des grandeurs dérivées (comme la vitesse ou l'énergie potentielle à partir des grandeurs longueur et temps). De ce fait, on peut proposer aux élèves des activités d'analyse modélisante d'un phénomène qui explicitent, en particulier, le mode de description du phénomène, puis le choix des grandeurs à étudier et à mesurer, et du mode de représentation. Ainsi dans CHUTE on peut travailler directement dans l'espace énergie cinétique/travail du poids pour étudier le comportement énergétique du système.

et le choix par  
l'élève des  
méthodes  
d'analyse

3 - l'analyse : l'ordinateur permet d'affranchir les élèves (lorsque cela n'est l'objectif visé) du travail de compilation des données, de calcul et de représentation graphique des résultats, et de leur proposer des activités d'interprétation, mettant en oeuvre des compétences différentes. Là également, si l'ordinateur peut effectuer certaines déterminations automatiques de paramètres ou d'équations à partir de données expérimentales, le choix des représentations, des outils numériques et du moment de leur utilisation, de même que l'interprétation de la signification et des limites des résultats ainsi obtenus sont à la charge de l'utilisateur, et peuvent (en partie) être confiés aux élèves.

numériques

et statistiques

Les méthodes statistiques (calculs de moyenne et d'écart-type, de corrélation, régression polynomiale) ont donné les premiers outils informatiques d'analyse de données. Mais les notions ainsi introduites sont délicates et les utilisations parfaitement justifiées restent limitées dans la pratique. En particulier, il convient d'être prudent quant à l'utilisation de ces possibilités pour une meilleure vérification de lois.

---

(16) F. SOURDILLAT : "L'ordinateur synthétiseur d'images et auxiliaire du discours pédagogique dans une démarche expérimentale", in *Signes et discours dans l'éducation et la vulgarisation scientifiques. Actes des VIèmes Journées Internationales sur l'Education Scientifique*. Université Paris VII. 1984. pp. 69-72.

R.K. THORNTON : "Tools for scientific thinking : microcomputer-based laboratories for physics teaching". *Physics Education*. 22. 1987. pp. 230-238.

H. BRASELL : "The effect of real-time laboratory graphing on learning graphic representations of distance and velocity", *Jour. Res. Sc. Teach.* vol 24. n°4. avril 87. pp. 385-395.

J. MOKROS, R. TINKER : "The impact of micro-computer-based labs on children's ability to interpret graphs", *Jour. Res. Sci. Teach.* vol 24. n°4. 1987. pp. 369-384.

pour la  
modélisation  
mathématique

Les capacités graphiques ont contribué à l'extension d'une autre méthode où l'élève a plus le contrôle de l'analyse mathématique. En effet les possibilités d'obtention rapide du tracé représentatif d'une relation mathématique entre deux variables définies par l'utilisateur, permettent d'une part l'accès à des modèles mathématiques (modèles de comportement ou de représentation) (17) autres que la fonction linéaire, et d'autre part de proposer une activité de mise au point de modèle par confrontation des tracés théoriques et des points expérimentaux. Ces possibilités sont proposées par des logiciels-outils généraux (18), mais on trouve aujourd'hui ces fonctionnalités incluses dans des logiciels dédiés à une étude particulière. Dans le logiciel CHUTE il est ainsi possible de déterminer le comportement de la bille décrit par la vitesse et le temps ( $v = 9.8 \cdot t$ ) à partir d'une série de résultats expérimentaux. Là aussi l'accès à un estimateur numérique de l'écart entre les deux ensembles de données peut aider à obtenir une meilleure adéquation.

Ajoutons ici que la présence de l'expérience et la connaissance du dispositif matériel et logiciel utilisé (estimation des imperfections du montage ou des manipulations effectuées par l'utilisateur) sont indispensables à l'analyse des données expérimentales recueillies. En effet, que ce soit pour mener une analyse qualitative (tendance générale d'une évolution, existence d'une corrélation entre deux grandeurs) ou pour chercher une estimation plus rigoureuse d'une grandeur (par la mise en oeuvre de méthodes statistiques), il faut pouvoir revenir à tout moment sur la mesure soit pour vérifier un résultat déjà acquis, soit pour obtenir une nouvelle valeur venant compléter l'ensemble déjà constitué.

bénéficient des  
représentations  
graphiques

Il nous semble que l'ordinateur est, actuellement, l'élément permettant de ramener dans un même ensemble l'acquisition et l'analyse de données. Dans le logiciel CHUTE, il est possible, dans l'espace des énergies, d'exécuter une première analyse visant à déterminer l'équation d'une droite représentative des premiers points obtenus, puis de réaliser une nouvelle série de mesures avant de revenir à l'analyse. La disponibilité d'outils numériques d'estimation peut également contribuer à un meilleur souci de la qualité de l'expérimentation. On a observé que des élèves, disposant d'un indicateur de corrélation, retournaient vers l'expérience pour tenter d'affiner leurs mesures et d'améliorer la valeur de cet indicateur (19).

(17) J.C. TRIGEASSOU : *Recherche de modèles expérimentaux assistée par ordinateur*. Collection Informatique. Tec Doc / Lavoisier. Paris. 1988.

(18) Par exemple : GRAPHIX (Institut de Recherche sur l'Enseignement des Mathématiques, Marseille) et TGM (Centre National de Documentation Pédagogique).

(19) R. RICARD : "Mécanique en 2de : étude de la chute libre", in *Cours et TP de physique et chimie avec ordinateur*. INRP-UDP. 1987. pp. 13-20.



en biologie.

En biologie, la connexion des ordinateurs à des oxymètres, photomètres, thermomètres, hygromètres, tensiomètres, etc., aboutit actuellement à l'émergence de deux orientations principales.

renouvellement  
des domaines  
d'expérimentation :

Les nouveaux dispositifs constituent un support à l'enseignement de la physiologie et sont complétés par des représentations graphiques pour visualiser l'anatomie et le fonctionnement des organes du corps humain. Les réalisations typiques développées en Grande Bretagne dans le domaine de la santé et de la physiologie humaine (20) portent sur la mesure du rythme cardiaque, du rythme respiratoire et de la température, dans différentes conditions d'activité (sportives notamment). Ces mesures sont effectuées sur les élèves eux-mêmes, qui analysent et comparent leurs données respectives.

données  
recueillies sur les  
élèves eux-  
mêmes

Cette connexion fournit des indices et des informations utilisables dans la recherche d'éléments explicatifs des phénomènes étudiés : en France, le métabolisme respiratoire chez l'Homme (et chez la Souris) a également donné lieu à des réalisations, mais avec une insistance moindre sur les aspects physiologiques et un intérêt plus marqué pour le concept d'énergie. Le dispositif proposé par A. Videaud et son équipe (21), permet de mesurer la consommation d'oxygène par l'organisme, de calculer l'intensité respiratoire, de mettre celle-ci en relation avec un travail extérieur réalisé par le sujet, de calculer la libération d'énergie par le métabolisme respiratoire. Les variations inter-individuelles et les modifications entraînées par un changement dans le travail peuvent également être étudiées.

expériences en  
biologie cellulaire

Dans le même esprit, d'autres réalisations sont actuellement expérimentées sur la photosynthèse (étude du dégagement et de la consommation d'oxygène en relation avec l'énergie lumineuse reçue et la température) et sur la respiration au niveau cellulaire.

A travers ces différents exemples on constate que les activités qui sont liées à l'observation et à la mesure sont largement communes aux deux disciplines expérimentales ; la mise en évidence de propriétés inaccessibles dans l'expérimentation classique, et l'intégration de cette visualisation dans un processus d'investigation et de recherche d'explications, sont plutôt spécifiques de l'enseignement de la biologie, alors que les traitements quantitatifs visant l'établissement ou la validation de relations mathématiques (activités d'analyse et de modélisation) sont beaucoup plus développées en sciences physiques.

(20) "Using computer to study health and fitness. Monitoring human physiology with micro-computers". Projet soutenu par le Health Promotion Research Trust.

(21) "Ordinateur outil pédagogique au laboratoire et à l'atelier". *Journées EVARISTE*. CNAM. 1987 et 1988.

## 2.2. Le travail sur des modèles

l'opposition  
expérience -  
simulation : un  
faux débat

La simulation constitue l'une des utilisations pédagogiques les plus anciennes de l'informatique. De ce fait, elle a donné lieu à un grand nombre de logiciels consacrés le plus souvent à des phénomènes physiques ou biologiques, quelques fois à l'appareillage de laboratoire, et parfois aux interactions qui se déroulent dans la situation d'enseignement. Il n'est pas dans notre propos de faire une revue exhaustive de ces diverses modalités, ni d'entrer dans une discussion sur les réalisations auxquelles conviendrait l'appellation de simulation entendue de manière stricte, qui seraient à distinguer de celles qui correspondent à des extensions du sens de ce terme (22).

les simulations  
s'appuient sur des  
modèles

Nous rappelons cependant qu'au départ, des exemples peu adaptés et d'autres mal compris, ont suscité la méfiance vis-à-vis de ces produits, et renforcé la défense de la composante expérimentale des sciences physiques et de la biologie dans l'enseignement secondaire. S'en tenir à l'opposition entre simulation et expérience nous paraît aujourd'hui s'enfermer dans un faux débat alors que la simulation numérique constitue une extension des possibilités d'investigation, et que le "réel" lui-même est interrogé à travers des théories et des modèles (souvent exprimés sous une forme mathématique et informatisés) : ceci est vrai dans de multiples domaines de la physique, mais aussi en biologie moléculaire, et en géologie (dynamique du globe terrestre), par exemple.

Nous nous intéresserons ici à la simulation de phénomènes qui correspondent à des lois fondamentales ou au fonctionnement de systèmes complexes, en nous plaçant principalement du point de vue des activités expérimentales requises des élèves. Nous distinguerons ces simulations en fonction des deux types majeurs d'activités auxquelles elles peuvent donner lieu : l'exploration de phénomènes modélisés et simulés, et la conception de modèles.

### • L'exploration de phénomènes modélisés

mathématiques

Dans beaucoup de cas, les connaissances concernant les phénomènes étudiés peuvent être représentées sous la forme de modèles mathématiques. Il s'agit le plus souvent de modèles analytiques, c'est-à-dire décrits par un ensemble d'équations plus ou moins complexes, qui expriment les relations entre les divers facteurs dont dépend un phénomène donné.

En biologie, plusieurs exemples appartenant à cette catégorie peuvent être mentionnés : la transmission de l'influx nerveux ;

(22) D. BEAUFILS et al. : "L'ordinateur en sciences physiques, quelles simulations ?", in *Modèles et simulation, Actes des IXèmes journées sur l'éducation scientifique*. Université Paris VII. 1987. pp. 321-328.

les lois de la génétique qui, compte tenu de leur complexité, continuent à faire l'objet de nouveaux logiciels ; les mécanismes régulés, particulièrement celui de la glycémie et les phénomènes métaboliques (la nutrition, la transpiration, la respiration, etc.) ; les relations entre les êtres vivants (compétition entre les espèces, entre prédateurs et proies par exemple), pour lesquelles divers modèles ont été construits par les chercheurs (23).

En physique, parmi les logiciels de simulation réalisés dès le début des années soixante-dix, on trouve l'étude du phénomène de réflexion (recherche de la loi par la construction de "l'image optique"), ou des logiciels de balistique (étude de trajectoires d'objets lancés dans un champ de pesanteur) (24). Parmi ceux réalisés plus récemment, on trouve des logiciels comme RESAIR (25) où l'étude est centrée sur la simulation de l'effet de l'air sur le mouvement d'une sphère en translation, ou comme TENNIS (26) où l'utilisateur dispose d'un modèle très complet permettant de simuler tous les effets sur les balles.

Il existe également de nombreux phénomènes, tout particulièrement en biologie, qui ne peuvent être décrits par des modèles mathématiques, mais pour lesquels il y a quand même des modèles. Ces phénomènes peuvent être représentés par des relations fonctionnelles connues (entre organes par exemple), ou bien par les résultats acquis expérimentalement (qui traduisent ces relations). Différents exemples peuvent être évoqués en illustration de notre propos.

En médecine, pour certaines pathologies, la démarche générale de raisonnement diagnostique d'un expert peut être décrite pour le système informatique sous la forme de conditions permettant de progresser d'un diagnostic à un autre plus

et des relations  
fonctionnelles

---

(23) Pour des descriptions détaillées des logiciels correspondants, se reporter en particulier à :

Dossier Biologie et Informatique. *Bulletin de l'APBG*, n° 3 et 4. Paris. 1978.

P. JEROME : "L'informatique, support logique de la démarche expérimentale en sciences naturelles". *Bulletin de l'APBG*, n° 4. Paris. 1979.  
*Impact de l'introduction de l'Informatique sur les disciplines scientifiques, dans l'enseignement secondaire en France*. Etude pour la CEE 1362-82-7. INRP. 1983.

(24) REF (Centre National de Documentation Pédagogique) est l'un des premiers logiciels proposant une activité de modélisation.

(25) RESAIR : logiciel diffusé par le Centre Académique de Ressources et de Formation en Informatique de Versailles.

(26) TENNIS : logiciel réalisé à l'Ecole Normale de St Cloud, et diffusé par le Centre Académique de Ressources et de Formation en Informatique de Versailles.

A. DUREY : *Vers des activités didactiques de mise au point de modèles de physique avec des micro-ordinateurs. Exemples : trajectoires, frappés et rebonds de balles en rotation*. Thèse d'Etat. Université Paris VII. 1987. 263p.

exemples : la  
démarche  
diagnostique en  
médecine

les mécanismes  
régulés

le comportement  
animal, etc.

précis, en fonction des résultats des examens envisageables. Ensuite, à partir des examens réalisés sur des malades réels (extraits des dossiers médicaux) on propose aux étudiants de résoudre le problème posé par des cas simulés de malades (27).

En biologie, divers logiciels illustrent cette approche, dans le domaine de la régulation hormonale. Un premier exemple (basé sur un modèle des relations connues entre les glandes en cause) propose de rechercher l'origine de troubles (dûs à la thyroïde et à l'hypophyse) qui affectent le déclenchement de la métamorphose chez des batraciens, en procédant à des ablations ou à des greffes d'organes, à des injections, des dosages, etc. (28). Plus récemment, le logiciel REHOR (29), fonctionnant sur le même principe, et offrant encore plus de possibilités d'intervention, propose aux élèves d'établir l'action de certaines hormones hypophysaires et hypothalamiques sur la régulation de la sécrétion des hormones sexuelles chez la Rate. Les résultats qui sont fournis aux élèves correspondent tous à des expériences réelles effectuées dans les laboratoires de recherche ou disponibles dans la littérature.

D'autres domaines sont aussi favorables à la conception de simulations de ce type. En éthologie, par exemple, on peut chercher à étudier les sens qui interviennent dans les différentes phases d'un comportement animal. L'élève fixe les conditions de déroulement d'une expérience en agissant soit sur les caractéristiques de l'animal, soit sur celles de la proie (dans le cas du comportement prédateur). Les résultats qui lui sont fournis reprennent plus ou moins strictement (des adaptations sont parfois nécessaires) ceux observés par les chercheurs (30).

L'importance indéniable de la modélisation mathématique a conduit certains à considérer ces logiciels comme de fausses simulations. Or de tels produits sont fondés sur des propriétés, des relations physiologiques, et des résultats, ce qui correspond à des formes communes de description des connaissances en biologie. Même en physique, il est tout aussi concevable

---

(27) Voir en particulier :

B. VARET et al. "L'enseignement assisté par ordinateur en médecine. Dix ans après". *Presse Médicale*. n° 12. Paris. 1983, pp. 2418-2422.

J. MARSAC, J. CHABOT. *Exercice pratique de la pneumologie*. Ellipses. Paris. 1984.

(28) M. DUPONT, N. SALAME : "Simulation d'expériences et contrôle de raisonnement. un exemple en endocrinologie". in *Modèles et Simulations. Actes des IXèmes Journées Internationales d'Education Scientifique*. Université Paris VII. 1987. pp. 193-202.

(29) C. LEVEQUE, "Régulation de la sécrétion des hormones sexuelles", in *Informatique et Sciences Naturelles*. INRP. 1984. pp. 110-119.

(30) Plusieurs logiciels sont maintenant disponibles sur le comportement prédateur de la Vipère, le chant en relation avec la notion de territoire chez les Oiseaux, ou la signification de la danse chez les Abeilles.

de remplacer la partie systématique d'acquisition de données, non par les résultats fournis par une simulation fondée sur un modèle mathématique, mais par ceux qui ont été obtenus dans des conditions expérimentales déterminées. A l'élève qui fait des propositions d'expériences ou de mesure, le logiciel peut renvoyer la ou les valeurs des grandeurs effectivement mesurées dans les conditions proposées (ou dans celles qui s'en rapprochent le plus).

Quelle que soit la nature de la représentation des connaissances retenue, ces logiciels peuvent être utilisés avec les élèves, soit dans une optique d'acquisition des concepts et de formalisation des lois, soit dans une perspective de renforcement des connaissances déjà acquises. Les activités généralement demandées tournent autour de l'étude du comportement du phénomène ou du système simulé, en fonction de divers facteurs. Suivant les connaissances initiales des élèves, et l'importance accordée à la maîtrise des modèles ou des relations sous-jacentes, les objectifs de cette étude peuvent être :

1 - d'établir de manière précise les lois qui régissent le phénomène. Si quelques exemples peuvent illustrer cet objectif en biologie (en génétique et en écologie), c'est surtout en physique que l'explicitation des modèles sous-jacents est de règle, et peut parfois aller jusqu'à l'écriture formelle des équations.

2 - connaissant les facteurs pertinents propres au système étudié (sachant que d'autres facteurs externes peuvent intervenir dans certaines conditions), d'établir leurs modalités précises d'action ou d'interaction. Il s'agit souvent de mettre en évidence le sens des variations et co-variations, et quelquefois de construire des relations quantitatives (cas de la régulation de la glycémie, par exemple). Dans les cas complexes, comme celui de la biocénose, de multiples facteurs peuvent intervenir simultanément, avec des effets non linéaires et des régulations ; ce qui est généralement visé c'est l'identification des facteurs qui interviennent de manière significative, ou bien l'étude isolée de l'action d'un facteur (toutes choses égales par ailleurs). La mise en commun des résultats des investigations ponctuelles réalisées par les groupes d'élèves, et la formalisation des relations d'ensemble, sont généralement assurées par l'enseignant.

3 - dans certains cas, ni la nature ni la structure du modèle sous-jacent ne sont de première importance. Les simulations servent alors de support dynamique à l'acquisition de savoirs et de compétences dans le domaine traité. La maîtrise d'une démarche de raisonnement diagnostique constitue un exemple typique.

Pour tirer des simulations les informations intéressantes, il est indispensable que les élèves mènent les explorations de manière organisée, c'est-à-dire en mettant en oeuvre une méthode d'investigation, de collecte et d'analyse des résultats. Cette démarche systématique fait implicitement appel aux activités intellectuelles associées à la démarche expérimentale. Il faut

on peut proposer  
aux élèves

d'identifier les  
équations

ou les paramètres  
pertinents

de pratiquer une  
démarche de  
raisonnement

noter cependant que, par définition, les simulations permettent l'obtention d'un grand nombre de résultats, en fonction des variations des facteurs intégrés dans le modèles, ou des résultats expérimentaux accessibles. De ce fait, l'élève n'est pas dans la situation classique où un nombre limité d'expériences, généralement pertinentes et démonstratives, sont réalisées. Les activités d'anticipation et de planification deviennent alors cruciales, faute de quoi l'élève risque vite de se perdre dans les données recueillies trop facilement. L'exploration des environnements simulés devrait d'autant plus répondre aux exigences requises lors du travail sur matériel réel, notamment : réflexion et prévision guidant l'action, économie des gestes et des moyens, mise en forme des résultats, comptes rendus intermédiaires et terminaux précis, etc. Que ces prescriptions soient en réalité plus ou moins suivies relève plutôt des méthodes d'enseignement que de la nature des supports utilisés.

les activités des élèves  
D'autres caractéristiques des simulations nous semblent importantes pour le déroulement des activités d'investigation et la réalisation des objectifs qui leur sont assignés :

dans des environnements plus riches  
1 - la richesse conceptuelle des phénomènes simulés (et surtout la fiabilité scientifique des modèles implantés et des données utilisées), la variété des méthodes d'investigation auxquelles ils se prêtent, et dans une certaine mesure leur complexité. Ceci est particulièrement vrai pour le second cycle de l'enseignement secondaire, où on constate que les situations simples tombent rapidement en désuétude (cas de l'influx nerveux, en biologie),

peuvent être libres  
2 - la marge d'initiative laissée aux élèves dans l'exploration et la recherche de solutions, suivant que celles-ci passent par des actions et des cheminements obligatoires ou optionnels (rigidité de la conception), permettent de développer un raisonnement divergent, de mettre en évidence plusieurs solutions, etc. Cette marge est souvent en relation avec les modalités d'échanges, la souplesse et la variété des interactions,

ou guidées  
3 - l'existence de systèmes d'aide associés, qui s'avèrent indispensables parce que l'exploration d'environnements ouverts et complexes n'est pas une activité triviale (31). Ces aides peuvent être factuelles, apportant des informations complémentaires susceptibles d'aider à résoudre le problème posé, "logistiques", pour l'application de techniques, de méthodes, et pour la conservation et la mise en forme des résultats, "stratégiques", quand elles portent sur le raisonnement à partir des données enregistrées, ou sur la prévision des actions ultérieures.

Peu de systèmes d'enseignement offrent actuellement de telles

---

(31) B. VARET et al. : "Comparison between a prescribed and a permissive process, in computer assisted training, in *Decision making. Information Processing*. IFIP Congress. North-Holland Publishing Company. Amsterdam. 1977. pp. 343-346.

potentialités. La conception de ces systèmes d'aide, qu'ils soient des "partenaires de résolution" ou des experts du domaine, constitue aujourd'hui un des axes de recherche dans le domaine des environnements (intelligents) de l'enseignement (32).

• La construction de modèles par la simulation

Dans les exemples décrits ci-dessus, lorsque l'action porte sur le modèle, elle est alors limitée à la modification des valeurs attribuées à des variables (conditions initiales par exemple) ou à des paramètres du modèle (intensité de la pesanteur, taux de mortalité d'une population, etc.). Des améliorations significatives de l'interactivité ont été enregistrées ces dernières années, allant dans le sens des possibilités d'action, en "temps réel" sur la simulation (33). Il n'en reste pas moins que les facteurs pertinents sont toujours pré-établis, et que la forme du modèle est figée dans le logiciel.

L'exploration permet de tirer beaucoup d'informations de ces modèles simulés. Elle n'est cependant pas forcément l'activité la plus favorable à la perception fine de l'action des facteurs et des domaines de validité des modèles utilisés. Cette perception est particulièrement ardue lorsqu'il faut envisager les effets qui résultent d'une action combinée de plusieurs facteurs.

Pour fournir une vue synthétique d'un problème complexe, une deuxième approche est explorée : l'utilisation des ordinateurs pour la mise au point de modèles construits avec les élèves (plus souvent que par ces derniers). Cette démarche consiste, en partant de relations simples ou évidentes, ou bien d'informations disponibles dans la littérature, à construire une succession de modèles partiels qui sont progressivement enrichis par l'intégration de variables ou de conditions supplémentaires. Les équations qui décrivent chaque modèle partiel sont mises sur ordinateur. Des exécutions successives (simulations) fournissent des résultats qui sont comparés à la réalité, entraînant des corrections, des ajustements, et l'élaboration de nouvelles équations descriptives du phénomène.

La faisabilité pédagogique de cette approche n'est pas de toute évidence et se heurte jusqu'à à diverses limitations, au

l'élaboration de  
modèles

mis à l'épreuve  
par la simulation

---

(32) Voir en particulier :

M. ALCHER, F.M. BLONDEL, N. SALAME : "Aide à la déduction dans le raisonnement expérimental en biologie". EAO87. Cap d'Agde. 1987.

M. STEIBEL, et al. : "MENDEL : an intelligent tutoring system for genetics problem solving, conjecturing and understanding". *Machine-Mediated Learning*, n° 2. 1987, pp. 130-159.

(33) E. SCANLON, R.B. SMITH : "A rational reconstruction of a bubble chamber simulation using the Alternate Reality Kit". *Comput. Educ.*, vol 12, n°1. 1988, pp. 199-207.

premier rang desquelles figurent la disponibilité d'informations scientifiques de référence, la compétence des élèves, la longueur de la tâche. Sur le plan technique, le problème posé concernait la réalisation informatique des modules de description du modèle (variables et relations), d'exécution des équations définies et de réalisation des tracés et représentations graphiques nécessaires. C'est sur ce second point que des progrès significatifs ont été enregistrés ces dernières années. Il existe maintenant sur micro-ordinateurs, des logiciels spécialisés orientés vers la réalisation de ces modélisations : Micro-dynamo, Stella, Dynamic Modelling System, pour n'en citer que quelques-uns. Ces outils ont en commun, de demander à l'utilisateur de nommer les variables, de leur affecter les valeurs initiales, de décrire les relations qui les relient entre elles. Le système vérifie que tous les éléments nécessaires ont été introduits, et gère les itérations nécessaires et les visualisations. Les différences entre ces outils résident principalement dans la "convivialité" et l'interactivité qui y sont intégrées (34).

Pour illustrer cette démarche en biologie, les exemples sont souvent empruntés à l'éthologie, et particulièrement aux modèles qui décrivent le développement de populations, la compétition entre espèces, et les résultats de l'action (régulatrice ou dérégulatrice) de l'homme sur les milieux naturels ou gérés. En partant d'un problème simplifié (étude de la croissance d'une espèce isolée), on peut dans un premier temps construire un modèle qui ne tient compte que d'un taux de reproduction annuel constant, pour constater que ce modèle exponentiel n'est pas réaliste, et introduire ensuite des variations de ce taux en fonction de la densité de la population totale et des limites d'accueil du milieu, ou bien en tenant compte d'autres facteurs tels que le taux naturel de mortalité, ou la sensibilité de la population à des épidémies, etc. Progressivement, le modèle initial est étendu à la compétition entre deux espèces, avec ou sans relations de prédation entre elles, et à des projections d'évolution de l'ensemble du milieu en fonction de différentes stratégies de gestion qui peuvent être adoptées (35). Cette démarche est envisageable dans les domaines quantifiables : transformations énergétiques (photosynthèse), circulation des éléments minéraux dans un système, etc.

(34) H. J. BECKER : "Instructional uses of school computers". *Johns Hopkins University*, 1, 1986.

J. R. HARTLEY : "Learning from computer based learning". *Studies in Science Education*. n° 15. 1988. pp. 55-76.

(35) Voir notamment

C. BRAVARD : "Equilibre d'une biocénose". *Bulletin de l'APBG*. n° 3. 1978. pp. 690-706.

P. VAN KLAVEREN : "Le langage micro-dynamo : exemples d'utilisation pour la construction de modèles écologiques". in *Modèles et Simulations. IXèmes Journées Internationales sur l'Education Scientifique*. Université Paris VII. 1987. pp. 549-553.



En physique, des exemples ont été développés dans lesquels l'élève peut agir sur le modèle, en choisissant lui-même tout ou partie des équations. Ces exemples concernent principalement l'étude de la mécanique, et sont conçus dans des langages tels que Logo. Les activités consistent à reconstruire ou à reproduire des mouvements simples ou complexes, étudiés expérimentalement avec des dispositifs stroboscopiques. L'élève met en oeuvre des connaissances acquises ou propose des relations nouvelles qu'il pourra tester par la simulation (36).

et peut aller  
jusqu'à la  
programmation

Ce type de simulation a été également proposé par Ogborn et Wong (37) sous la forme d'activités plus proches de la programmation : l'introduction des procédés de résolution numérique par itération (au niveau de l'algorithme) permet d'accéder à l'exploration et à la compréhension des équations différentielles.

Ceci est à rapprocher d'un courant actuel de la recherche en physique : la "physique sur ordinateur" (Computational physics, (38)), considérée par certains comme une branche à part entière de la physique, qui, parce qu'elle tient à la fois de la physique expérimentale et de la physique théorique, assure une jonction entre ces domaines.

Dans l'enseignement, la difficulté d'établir des liens suffisants avec la réalité ou les données expérimentales (soit parce qu'elles font défaut soit parce que s'interposent des problèmes de forme des données, d'échelle de représentation, de précision de la méthode, etc) constitue la limite de ces utilisations.

l'analyse de  
résultats  
expérimentaux

Ces problèmes ne se posent plus lorsque la simulation numérique est disponible comme outil complémentaire dans un logiciel d'analyse de données. Il ne s'agit plus dans ce cas d'obtenir une simple description des résultats expérimentaux : l'élève doit déterminer les grandeurs qui vont lui permettre d'étudier le système, construire à partir de ses connaissances

---

(36) A. TEXIER. *Des ailes pour la tortue, simulation de mouvements en LOGO*. CNDP. 1987. Cette publication est aujourd'hui disponible avec la disquette de programmes.

A. TEXIER : "Simulation, modélisation et apprentissage", *Feuilles d'épistémologie appliquée et de didactique des sciences*. n°8. 1986. pp. 121-126.

(37) J. OGBORN : "A microcomputer modelling system and the teaching problem structure", in *Recherches en didactique de la physique. Actes du colloque international de La Londe les Maures*. PARIS. CNRS. 1983. pp. 441-444.

F. ROBSON, D. WONG : "Teaching and learning with the Dynamical Modelling System". *SSR*. June 85. pp. 682-695.

(38) A.D. BOARDMAN et al. "Computational physics - a new discipline", in *The Fifth International Conference on Technology and Education*. Edinburgh. 1988. Vol 1. pp. 133-136.

J.F. COLONNA, M. FARGE. "L'expérimentation numérique par ordinateur". *La Recherche*. n° 187. 1987. pp. 444-457.

peut aussi faire  
appel à la  
simulation

un modèle théorique et écrire le jeu des équations qui s'appliquent (modèle de frottement et équation générale du mouvement, par exemple) ; il utilisera l'ordinateur à la fois pour stocker ou acquérir automatiquement des données expérimentales et pour résoudre les équations et confronter directement les différents résultats ainsi obtenus. Là encore, à côté d'outils généraux on trouve maintenant des logiciels (CHUTE, PENDULE) où il est possible d'entrer une loi de force de son choix et d'obtenir la solution numérique de l'équation différentielle du mouvement du système étudié ; la solution est exprimée directement dans les grandeurs étudiées et la confrontation graphique avec les points expérimentaux, permet d'accéder à un modèle théorique (mathématique) pour le frottement fluide (modèle en V par exemple), qui "explique" le comportement amorti observé.

### 2.3. Le travail sur des banques de données

Des trois orientations que nous examinons, le traitement de banques de données quantitatives est de loin celle qui a été la moins développée, et n'est observée qu'en biologie et en géologie.

Sur divers exemples on a pu montrer que les élèves pouvaient réunir de petits ensembles de données ponctuelles : données d'observation recueillies au cours de sorties pour étudier la nature et la répartition de la végétation par exemple, échantillons de sables se prêtant à une étude gravimétrique pour mettre en évidence des origines différentes etc. Si cette approche fait bien percevoir le processus d'ensemble qui implique la définition des données à rassembler, leur recueil, leur organisation, leur traitement, etc., elle est aussi longue et difficile. En particulier, la fiabilité des données recueillies par les élèves, ainsi que leur volume, ne permettent pas de pousser très loin le traitement, et incitent à la prudence quant aux résultats qu'on peut en tirer.

quelques  
réalisations  
intéressantes

De petites banques de données ont également été constituées à partir des informations communiquées par des organismes scientifiques. Au cours des quinze dernières années, quelques "banques" seulement ont été réunies :

1 - données biologiques et physico-chimiques sur le lac Léman, réunissant les mesures de 20 facteurs, effectuées en différents endroits du lac de 1976 à 1980. Avec ces données, on peut procéder à l'étude de phénomènes qui affectent de manière cyclique le milieu, tels que la production de phytoplancton et de zooplancton, ou le brassage thermique des eaux, ou celles des interactions entre les êtres vivants et les différents facteurs du milieu, etc.

en biologie

2 - données sur les analyses sanguines de personnes "tout venant" fournies par la sécurité sociale, et celles de malades fournies par un service hospitalier, qui peuvent servir pour étudier les variations des constantes sanguines (cholestérol,

urée, glucose, etc.). Une démarche typique consiste à établir d'abord les limites de variation d'un élément dans une population, de rechercher les corrélations possibles avec l'âge ou la masse des sujets, d'étudier l'influence éventuelle du sexe, de comparer les domaines de variation dans diverses sous populations,

et géologie

3 - données sur les séismes mondiaux de 1970 à 1977 (réunies par des géographes), dont le traitement fournit des cartographies mettant en évidence les zones d'activités sismiques du globe.

ont été exploitées

Ces banques de données (39) malgré leurs dimensions réduites, peuvent donner lieu à des activités individuelles : on peut demander à chaque élève (plus souvent à des binômes) de rechercher, de traiter, et de représenter graphiquement, les informations relatives à un facteur donné, ou celles qui sont pertinentes pour l'étude d'un thème. Elles peuvent aussi fournir l'occasion de travaux de synthèse collective : regroupement et comparaison des résultats en vue de la recherche d'explications biologiques ou géologiques.

Cette activité de traitement et d'interprétation de données est une partie intégrante de la démarche de l'expérimentateur, mais cette étape du raisonnement a été peu favorisée dans l'enseignement, sauf quand il s'agissait de résultats qualitatifs. Le travail intellectuel qui doit être effectué par les élèves est similaire à celui qui est développé à partir d'observations classiques. Les données sont des faits qu'il faut savoir regarder et à partir desquels il est possible d'exprimer des interrogations et de formuler des hypothèses. Le test de ces hypothèses se fait à travers des traitements adéquats. Les résultats des traitements nécessitent le même effort d'évaluation et d'interprétation que les résultats d'une expérience. Ils appellent également des mises en forme adaptées : tableaux et représentations graphiques, le plus souvent.

avec les banques  
de données  
actuelles

On peut aller aujourd'hui bien plus loin. De nombreuses banques de données existent dans les centres de recherche et dans les milieux professionnels, notamment auprès d'organismes tels que l'INSERM, l'INRA ou le CNRS. Il est donc tout à fait

---

(39) Pour une description détaillée de ces banques de données et de leurs utilisations pédagogiques, voir dans *Informatique et enseignement des sciences naturelles*. Communications aux journées de Sèvres. INRP. 1984. les articles de :  
R. VANDROUX : "Une banque de données : Léman". pp. 120-133.  
S. DUPOUY, J.P. MAURIES : "Taux des éléments du liquide extracellulaire". pp. 148-158.  
P. JEROME : "Banques de données granulométriques et modélisation". pp. 165-176.  
Voir également J. UNDERWOOD, G. UNDERWOOD : "Data organisation and retrieval by children". *The British Journal of Educational Psychology*. Vol 57. n° 3. 1987. pp. 313-329.

possible de réunir un ensemble de banques représentant une masse critique suffisante, et dont les résultats des traitements sont reliés aux connaissances enseignées, rendant possible une approche plus systématique des problèmes par les données.

et les logiciels  
professionnels  
disponibles

La faisabilité de cette approche se pose maintenant en des termes nouveaux, dans la mesure où on peut s'appuyer sur les banques qui sont informatisées, traitées, interprétées et publiées, sachant que les outils informatiques de saisie et de manipulation des données, de traitement statistique et de représentation graphique sont devenus disponibles sur les micro-ordinateurs courants, avec des fonctionnalités satisfaisantes (40).

Le recours à de telles banques implique la nécessité de s'assurer de la fiabilité des données et de situer pour les élèves la place des données dans le processus d'expérimentation qui a conduit à leur collecte : il est rare, en effet, que le biologiste recueille des données qui ne correspondent pas à une hypothèse au départ, ou qui n'entraînent pas une méthode de collecte et une idée préalable des traitements qui leur seront appliqués.

l'initiation des  
élèves au  
processus de  
traitement

L'exploitation de données quantitatives s'est heurtée jusque là à divers problèmes techniques et pédagogiques. Faisant appel à des méthodes et à des concepts statistiques qui sont couramment assimilés aux mathématiques, elle pose la question de la répartition disciplinaire des connaissances nécessaires aux élèves, et de la formation souhaitable des enseignants en statistiques (41). En réalité, c'est à tort que ce problème est considéré a priori comme un obstacle insurmontable, car dans de nombreux cas, les connaissances requises sont à la portée des élèves et des enseignants.

apporte des  
activités  
nouvelles

On peut maintenant constater que dans la plupart des domaines professionnels, la lecture des résultats des traitements est d'un usage quotidien, parce que ces traitements sont à la fois des moyens de validation et de communication des résultats. La maîtrise du traitement et de l'interprétation des données étant devenue indispensable pour la formation des enseignants de biologie, de géographie, d'économie, etc. chaque discipline est maintenant appelée à intégrer les méthodes statistiques dont elle a besoin, et aura probablement à en assurer l'enseignement. On peut ainsi concevoir que, dans la formation des élèves en biologie, la sélection des données pertinentes pour l'étude des problèmes, la conduite des processus de traitement, d'interprétation et de conclusion, fourniront de nouveaux travaux

(40) H. ROUANET, B. LEROUX, M.C. BERT : *Statistiques en sciences humaines. Procédures naturelles*. Dunod. Paris. 1987.

(41) Des différences de besoins et d'approches avaient déjà été notées dans les recherches précédentes de l'INRP, sur l'introduction de la statistique en mathématiques, en économie et en biologie.

pratiques, qui font partie des savoir-faire modernes nécessaires en sciences expérimentales.

### 3. CONCLUSION

Nous avons essayé de présenter tout au long de cet article celles des utilisations de l'informatique qui sont actuellement porteuses de transformations dans les activités expérimentales. A travers l'installation progressive de ces usages, plusieurs éléments remarquables méritent d'être soulignés.

1 - Après avoir servi en premier lieu pour exploiter des modèles et pour effectuer des calculs simples, les ordinateurs ont été utilisés comme des instruments de mesure, apportant tout de suite des améliorations techniques notables aux expériences concrètes (rapidité et précision des mesures par l'acquisition automatique), et des perspectives de renouvellement des systèmes étudiés ou des méthodes d'investigation (systèmes plus complexes, accès à des données plus nombreuses). Mais dans un deuxième temps, l'accroissement des possibilités des matériels a permis l'intégration de fonctionnalités complémentaires de traitement et d'analyse numériques. Cette évolution a eu comme conséquence une modification sensible des tâches effectuées par les élèves : l'intérêt s'est déplacé de la collecte des mesures à l'analyse et l'interprétation des données. Les exemples que nous avons choisis dans le domaine de l'expérimentation assistée par ordinateur montrent que l'amélioration des expériences concrètes ne s'est pas limitée à la prise en charge des tâches répétitives, mais s'est traduite également par le renouvellement des activités intellectuelles.

2 - Nous avons également vu qu'il est devenu artificiel, de séparer l'acquisition de mesures, des traitements statistiques et numériques, ou de la simulation, et que l'utilisation optimale de ces ressources réside dans leur accessibilité en fonction des nécessités de l'étude, et non dans un ordre séquentiel. Il faut cependant reconnaître que ces approches qui s'appuient toutes sur les capacités de représentation graphique, deviennent parfois complexes et même sophistiquées, et s'assurer que cette complexité est réellement accompagnée d'une extension des activités des élèves.

3 - Il convient également de noter que, malgré l'évolution que nous venons de décrire, les utilisations proposées des ordinateurs restent assez conservatrices des contenus et des méthodes disciplinaires. De plus, la tendance commune à toutes les approches que nous avons signalées, est la part toujours plus importante accordée au traitement numérique, et aux représentations abstraites. Ainsi, même quand les ordinateurs se connectent au "réel", l'informatique peut ne faire que renforcer, sous couvert d'une extension des activités intellectuelles, le formalisme qui caractérise déjà ces disciplines.

au delà des  
améliorations  
techniques

le renouvellement  
des approches  
pédagogiques

Nous pensons que l'informatique peut servir à renouveler les objets d'étude et les approches en prenant plus en compte l'évolution des pratiques et des méthodes dans la recherche et dans l'industrie, et ne pas se cantonner dans l'amélioration des exercices scolaires. La télédétection en fournit un exemple : en s'inspirant des techniques de traitement et des capteurs utilisés par les satellites d'observation de la terre, on peut étudier au laboratoire ou sur le terrain, l'activité photosynthétique des végétaux à partir de leurs réponses radiométriques suivant leurs états de développement. Ceci fournit de nouveaux travaux pratiques de radiométrie et de traitement d'images, complémentaires des manipulations classiques que les ordinateurs peuvent améliorer.

et des activités  
intellectuelles

La question importante reste donc la nature des activités indispensables à l'apprentissage. S'agissant des simulations par exemple, on peut signaler que certains des auteurs que nous avons cités trouvent un intérêt à ce que soient modélisées et simulées, précisément, des expériences réalisables au laboratoire. Ces simulations seraient des outils de recherche, constituant un des termes de comparaison nécessaires pour cerner les apprentissages qui peuvent être atteints par l'expérimentation réelle, et les distinguer de ceux qui peuvent être installés avec des substituts. Ce travail revêt pour l'avenir une importance particulière.

constitue la  
promesse  
essentielle

4 - Reste enfin à signaler les limites pratiques des approches décrites. De multiples obstacles sont à lever, sur le plan de la conception des outils matériels et logiciels, comme sur celui de l'organisation de l'enseignement, pour atteindre une masse critique suffisante pour que ces approches aient un impact effectif. Cette masse n'est pas atteinte, si on se réfère aux produits réellement disponibles et utilisés dans les classes. La réalisation d'ensembles matériels et logiciels cohérents revêt une grande importance dans l'avenir, pour réaliser avec les ordinateurs un enseignement qui ne soit pas marginal et procéder à des évaluations fiables (42). Il existe maintenant plusieurs exemples qui montrent des effets pédagogiques positifs, lorsqu'on dispose de tels ensembles qui proposent aux élèves une utilisation significative, en termes de volume horaire et d'homogénéité dans la manière d'utiliser l'informatique, sur des objectifs bien identifiés. Pour nous en tenir au domaine des sciences, nous renvoyons aux travaux effectués avec les ensembles de logiciels développés à Stanford en mathématiques par P. Suppes (43), aux résultats enregistrés en France dans

(42) A. BORK : "The potential for interactive technology". *Byte*. Vol. 12. n° 2. 1987. pp. 201-206.

(43) P. SUPPES : "Current trends in computer assisted instruction". *Advances in Computers*. Vol. 18. 1979. pp. 173-229.

l'enseignement médical (44), et plus récemment à ceux observés par Rivers et Vockell avec un ensemble de six logiciels de biologie (des simulations) (45).

Daniel BEAUFILS  
Naoum SALAME  
INRP  
Département Technologies nouvelles et  
enseignement (DP5)

- 
- (44) F.M. BLONDEL et al. : "L'entraînement au diagnostic médical par simulation à l'aide de l'ordinateur". *Informatique et Sciences Humaines*. n° 40-41. Paris. 1978. pp. 347-365.
- (45) R. H. RIVERS, E. VOCKELL : "Computer simulations to stimulate scientific problem solving". *Journal of Research in Science Teaching*. vol. 24. n° 5. 1987. pp. 403-416.





# UNE TECHNIQUE EXPÉRIMENTALE ET SON UTILISATION EN ÉVALUATION : L'AUTORADIOGRAPHIE

Alain Monchamp  
Jacques Dewaele

*A propos de l'étude de la synthèse des protéines, un graphique, classique pour les biologistes, qui rassemble des données obtenues par les techniques de marquage radioactif et par la microscopie électronique a été donné à analyser à des élèves de classe Terminale.*

*Les réponses des élèves sont classées et commentées. Beaucoup ne semblent pas pertinentes par rapport à ce qu'on attend de la récitation d'un savoir. Ces erreurs sont-elles condamnables ? Une présentation des techniques utilisées et une analyse historique couvrant une période de 15 ans des travaux originaux, montrent que les erreurs des élèves peuvent être considérées comme légitimes mais évitables si un bagage technique leur est donné en même temps qu'un savoir théorique historique.*

## 1. LA SITUATION D'ÉVALUATION EN CLASSE DE TERMINALE

des réponses  
erronées

La correction classique des réponses d'élèves à un exercice consiste à trier les mauvaises des bonnes réponses et à attribuer un certain nombre de points à ces dernières. Celles qui n'étaient pas attendues sont considérées comme erronées et laissent entendre que l'élève n'a pas fourni le travail de mémorisation et de réflexion nécessaire.

### 1.1. Hypothèses sur l'origine des erreurs

Sur un exercice d'autoradiographie, souvent proposé en Terminales D et C, les auteurs ne se sont pas intéressés à la "bonne réponse" mais aux "mauvaises" et à leurs formes multiples en émettant deux hypothèses (1) :

- certaines réponses inattendues auraient pu être proposées

---

1. Gaston BACHELARD, *La formation de l'esprit scientifique*, Paris, Vrin, 1980

des hypothèses  
pour les expliquer

parce que le bagage de l'élève, en physique en particulier, la précision de l'énoncé étaient insuffisants, laissant le champ libre à des errements.

- d'autres réponses correspondraient à des analyses et à des interprétations que les chercheurs ont déjà proposées à partir de certains résultats expérimentaux, mais que des résultats postérieurs, ignorés des élèves, ont rendus caduques.

Dans le cadre de ces deux hypothèses, les réponses inexactes des élèves ne correspondent plus à une carence intellectuelle, mais ne seraient que des conséquences **logiques** possibles d'une ignorance soit de faits physiques soit de l'histoire de la recherche qui a permis de produire le document-base de l'exercice. Toutes ces considérations interdisent de pénaliser l'élève et amènent le professeur à s'interroger sur la qualité de l'exercice.

Les travaux expérimentaux qui ont conduit à produire le document de Palade entre autres, (prix Nobel en 1974), ont donc été analysés de 1952 à 1967, en s'efforçant d'y repérer les hypothèses semblables à celles proposées par les élèves.

Les auteurs ont été ainsi amenés à réfléchir sur l'intérêt didactique des techniques abordées et sur l'opportunité d'introduire leur étude dans l'enseignement de la biologie en Terminale scientifique.

## 1.2. Nature de l'exercice proposé

### • Enoncé

Ce sujet est emprunté au manuel de Terminale D. Paris. Bordas. 1983. Il doit être effectué en 40 minutes.

#### Document 1. La biosynthèse des protéines

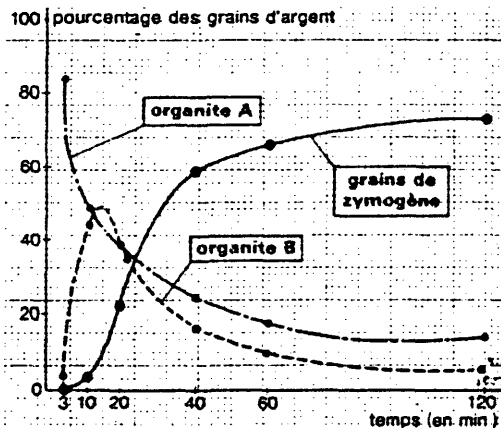
*Pour étudier le lieu de synthèse et le devenir d'une protéine, on procède à l'expérimentation suivante. Au temps 0, on injecte à un rat, soumis à un jeûne préalable, une solution contenant un précurseur de la protéine (un acide aminé radioactif, la leucine tritiée), suivie immédiatement d'une nouvelle injection (la leucine est, cette fois, non radioactive). On effectue alors, au niveau du pancréas de l'animal, une série de prélèvements à des temps différents*

- échantillon 1,  $t = + 3$  min
- échantillon 2,  $t = + 10$  min
- échantillon 3,  $t = + 20$  min
- échantillon 4,  $t = + 40$  min
- échantillon 5,  $t = + 60$  min
- échantillon 6,  $t = + 120$  min.

Ces échantillons sont immédiatement préparés en vue d'un examen autoradiographique.

Sur chaque autoradiographie, on détermine le pourcentage des grains d'argent au niveau de différents organites cellulaires : les résultats sont indiqués sur le schéma et le graphique ci-après.

Comment, à partir de vos connaissances sur la synthèse et le devenir des protéines dans la cellule, pouvez-vous interpréter ces expériences ?



Il s'agit d'un sujet déjà évolué puisqu'on y précise que la leucine tritiée est un précurseur de la protéine et qu'on dilue l'acide aminé radioactif par une injection de leucine non radioactive ("chasse").

un énoncé plus  
précis que  
beaucoup  
d'autres

De nombreux énoncés sont privés de l'une, de l'autre ou des deux informations.

Nous verrons que ces informations sont d'une grande importance. Pourtant, elles ne sont pas souvent comprises par l'élève qui n'a pas eu la possibilité d'y réfléchir en cours.

- Conditions d'interrogation

Ce graphique a été proposé en évaluation sommative après le cours sur la protéosynthèse et les liens entre les structures et certaines fonctions cellulaires. Lors de la correction des copies, un relevé méthodique des diverses réponses a été effectué. On n'a pas procédé à une étude statistique des fréquences des réponses. Celles qui ont été recueillies ne proviennent pas d'une seule classe ni d'une seule année. Nous avons cherché à détecter les difficultés qui subsistaient dans la compréhension des élèves et qui pouvaient obscurcir l'analyse du document. Cela pouvait aussi permettre de mieux comprendre les procédés utilisés par l'élève pour décrypter un document et d'évaluer la part du cours qui était mise en oeuvre en fonction des questions abordées.

Une vérification des savoirs (par restitution), lors de la correction du contrôle a permis de constater que la majorité des élèves ayant fourni une réponse "inattendue" connaissait suffisamment son cours pour être capable de répondre "correctement".

### 1.3. Propositions des élèves.

L'étude des interprétations proposées par les élèves, nous montre que l'on peut les classer en trois groupes selon leur nature.

- Interprétations de nature métaphysique

Les élèves pensent que l'incorporation croissante d'acides aminés dans le reticulum endoplasmique rugueux - RER - est suivie d'une décroissance parce qu'il y a **destruction** des protéines synthétisées (et des organites correspondants) par les rayons ionisants. Les acides aminés libérés diffusent plus profondément dans la cellule et sont réutilisés par l'appareil de Golgi où des phénomènes identiques aux précédents se répètent pour recommencer au niveau des grains de zymogène.

la peur de  
l'atome  
destructeur

- Interprétations de nature physique

L'élève ne remet pas en cause le transfert de protéine du RER aux grains de zymogène mais il n'y aurait pas incorporation des acides aminés radioactifs (marqueurs) dans les protéines syn-

une épidémie de  
radioactivité

thétisées (pour certains il pourrait même ne pas y avoir de synthèse du tout). Les élèves pensent donc que les protéines préexisteraient, et qu'elles deviendraient de plus en plus radioactives, dans le RER d'abord, **par simple contact** avec les marqueurs.

Une variante de l'interprétation précédente repose sur le fait que l'atome radioactif aurait une vie courte, mais qu'avant de "mourir", il aurait le temps de **contaminer** et de rendre donc radioactif un atome stable.

une épidémie  
mortelle ... pour  
l'atome

Ainsi, la radioactivité introduite dans la cellule contaminerait le RER (d'où l'augmentation de sa radioactivité) puis les substances contaminées perdraient leur radioactivité tout en rendant les atomes de l'appareil de Golgi radioactifs (d'où la baisse de la radioactivité dans le RER et son augmentation dans le Golgi). Ainsi de suite.

### • Les interprétations de nature biologique

le marqueur n'est  
pas incorporé

HYPOTHESE 1 (HYP1). On a regroupé sous ce titre, toutes les propositions d'élèves dans lesquelles ils révèlent que pour eux la radioactivité détectée dans la cellule n'est due qu'aux seules molécules d'acides aminés libres radioactifs injectés.

l'atome radioactif  
peut être inséré  
dans n'importe  
quelle molécule

HYPOTHESE 2 (HYP2). Cette fois-ci la radioactivité mesurée dans la cellule peut aussi bien révéler la présence de protéines néosynthétisées que la présence de molécules carbonées devenues différentes des acides aminés car on a appris que ces derniers peuvent être l'objet de transformations chimiques en tant que métabolites : polycondensation en protéines, dégradation, conversion etc....

l'injection  
déclencherait la  
synthèse

HYPOTHESE 3 (HYP3). Ici l'injection d'acides aminés radioactifs dans le sang déclencherait la synthèse des protéines. La pente positive des courbes "organe B et grains de zymogène" montrerait que la synthèse protéique, nulle au moment de l'injection, se développe pour diminuer ensuite et s'arrêter.

de multiples lieux  
de synthèse

HYPOTHESE 4 (HYP4). En formulant cette interprétation, l'élève suppose que le document l'autorise à penser que l'incorporation des acides aminés radioactifs dans les protéines peut avoir lieu en de multiples endroits de la cellule : RER, appareil de Golgi, grains de zymogène et membrane plasmique lors de l'exocytose. Cette dernière proposition est fréquente si l'exercice insiste sur deux faits en corrélation : l'injection dans le sang d'acides aminés radioactifs (et qui entrent donc dans la cellule) et la présence de protéines dans la lumière de l'aci-

l'hydrolyse rapide  
des molécules  
synthétisées serait  
suivie d'une  
nouvelle  
synthèse, ailleurs

nus quelques temps plus tard. En effet, le cours (et le manuel) enseigne que des protéines sont synthétisées au niveau du RER puis transportées vers les grains de zymogène pour être enfin excrétées, mais il ne leur a pas appris que les acides aminés **libres** n'étaient pas transférés selon cette voie.

**HYPOTHESE 5** (HYP5). En questionnant les élèves on peut également recueillir la proposition d'une synthèse des protéines au niveau du RER suivie d'une hydrolyse et d'une réutilisation des acides aminés radioactifs au niveau de l'appareil de Golgi puis des grains de zymogène. On retrouve ici l'idée des lieux de synthèse multiples des protéines associée à celle d'une durée de vie courte de ces mêmes molécules et d'un réemploi des produits d'hydrolyse.

Nous voyons que la persistance des représentations de nature physique nous empêche d'évaluer ce que nous voulions évaluer en donnant cet exercice, à savoir l'acquisition d'un certain savoir biologique.

L'abandon de ces représentations passe par l'appropriation par l'élève d'un savoir physique relatif à la radioactivité, dont nous allons voir le contenu.

## 2. NATURE ET RÔLE DES SAVOIRS PHYSIQUES EN JEU

### 2.1. Connaissances sur les isotopes

Tout repose sur la réponse à la question : **Qu'est-ce qu'un isotope ?** (2) (3)

Les élèves abordent cette notion dès la classe de Seconde, mais il y a nécessité de la leur rappeler en Première S puis en Terminale, où ils n'étudient ce sujet qu'en fin d'année.

Rappelons qu'un atome est constitué d'un noyau et d'une couronne d'électrons répartis en plusieurs couches. Les propriétés de cet atome sont dues aux caractéristiques de la couche électronique externe. Le noyau, lui, est constitué de particules :

- les protons, chargés positivement et en nombre égal aux électrons dont ils équilibrent les charges ;
- les neutrons, en nombre égal ou proche du nombre de protons.

---

2. F. LOT, *Les isotopes radioactifs*, Paris, Hachette, 1952

3. M. TUBIANA, J. DUTREIX, A. WAMBERSIE, *Radiobiologie*, Paris, Hermann, 1986

Exemple :

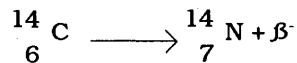
$^{12}_6\text{C}$  Cet atome de carbone possède donc 12 particules nucléaires, dont 6 protons et 6 neutrons.

Il existe des atomes (produits dans les réacteurs nucléaires le plus souvent), qui ne diffèrent d'autres atomes que par le nombre de neutrons. Par exemple,  $^{14}_6\text{C}$  (existant dans la na-

ture mais également produit par l'homme), possède 6 protons mais (14-6) neutrons soit 8 neutrons. Il s'agit d'un **isotope** (mot créé par Soddy qui signifie "même place, même case dans la classification périodique des éléments"), qui a les mêmes propriétés chimiques que le corps équilibré ( $\text{C}^{12}$ ) puisque le nombre d'électrons et leur répartition dans les différentes couches sont identiques.

Cependant, l'excès de matière dans le noyau entraîne un déséquilibre qui déclenche parfois la transformation d'un neutron en proton plus un électron, ceci dans le cas du carbone 14 mais également dans le cas d'autres isotopes utilisés en Biologie : tritium etc...

Le proton supplémentaire apparu fait changer la nature de l'atome :



$\beta^-$  est l'électron émis avec une certaine énergie, il forme le rayonnement  $\beta^-$ .

C'est précisément ce rayonnement  $\beta^-$  qui va conférer à cet atome la propriété nécessaire pour l'utiliser comme marqueur, traceur, indicateur ou d'une façon plus imagée espion.

Mais il faut savoir qu'un isotope n'est pas radioactif en permanence. Il se comporte comme l'atome stable et n'est donc pas détectable jusqu'au moment, imprévisible où il y a transformation d'un neutron avec émission du rayonnement  $\beta^-$ . Il faut donc travailler sur un grand nombre d'atomes pour que l'on ait quelques chances d'obtenir des transformations pendant l'expérience. Dans les expériences étudiées il y a environ 200 000 à 300 000 désintégrations par seconde, ce qui correspond à une radioactivité de 5 à 8  $\mu\text{curies}$ .

L'électron émis est capable de télescoper un des atomes d'une molécule environnante, l'eau par exemple. Il peut alors modifier la position d'un électron dans sa couche (excitation) ou bien le chasser purement et simplement. L'atome modifié, s'il était lié par la mise en commun d'un électron (liaison covalente) avec un autre atome se retrouve libéré et ionisé. Il peut devenir un radical libre chimiquement très actif (ex :  $\text{OH}^\cdot$ ), capable de changer la nature chimique d'une molécule et donc ses propriétés et bouleverser en cela le métabolisme cellulaire. Si la concentration en isotopes est élevée, les chances de collisions efficaces sont importantes augmentant d'autant plus le risque

quand les neutrons ne sont pas au même nombre que les protons

un déséquilibre source de rayonnement décelable

d'altération des protéines, des acides nucléiques, etc...(4). La cellule ainsi modifiée pourra réparer ou bien mourir selon l'ampleur des dégâts.

## 2.2. Interprétations des réponses d'élèves.

la radioactivité  
ne peut être que  
mauvaise

Par leur interprétation métaphysique, les élèves montrent que pour eux la radioactivité est **dangereuse** pour toute vie. Ils connaissent sa capacité **destructrice** mais la comprennent mal. Nous voyons fonctionner ici une représentation irrationnelle de la radioactivité surdéterminée par l'inconscient collectif (Hiroshima et Nagasaki) et les médias (Tchernobyl). Pour répondre à cela, il faut donc leur préciser que la concentration d'isotopes utilisée est calculée de façon à ne pas entraîner de troubles modifiant le fonctionnement cellulaire de façon sensible.

D'autre part, un atome radioactif transformerait, par son rayonnement, un atome stable voisin en atome instable ; il y aurait contamination, augmentation de la radioactivité de proche en proche.

et envahissante

On objectera à cela que si le rayonnement  $\beta^-$  est capable de modifier la répartition des électrons sur leur couche, il ne peut en aucun cas modifier un noyau. Pour qu'un noyau devienne instable dans notre cas il faudrait qu'il reçoive un neutron, ce qui n'est pas possible dans nos expériences puisque la source de neutrons est absente. De plus les noyaux fissiles comme l'uranium, dont les particules du noyau peuvent être séparées en sous-groupes et libérer des neutrons ne peuvent être que des noyaux **lourds**. Ils ne font pas partie des "atomes biologiques". Il ne peut donc pas y avoir **contamination**. Ceci répond à la première interprétation physique des élèves.

En ce qui concerne la seconde interprétation physique, la décroissance de la radioactivité serait spontanée, due à la disparition des atomes radioactifs suite à leur propre transformation.

Pour qu'ils ne puissent plus la formuler il faut qu'ils maîtrisent la notion de **période** d'un radioisotope. Cette période correspond au laps de temps pendant lequel la moitié d'une quelconque masse de matière radioactive s'est désintégrée. Cette valeur est constante pour un isotope donné, elle est de 12,6 années pour le tritium et de 5568 années pour le carbone 14 qui sont les deux isotopes utilisés dans nos expériences. Les atomes instables ne peuvent donc pas tous se désintégrer au cours des manipulations qui ne durent au maximum que quelques semaines.

On voit donc l'intérêt qu'il y aurait en classe de Terminale (mais aussi en Première S) à rappeler les connaissances de base sur l'atome et les compléments dont nous venons de parler ici. Ceci

---

4. Ibid (2).

devrait empêcher les élèves de proposer des interprétations non "pertinentes" et de se détourner des interprétations biologiques. Ces dernières peuvent paraître fantaisistes, produites par un esprit qui n'aurait approché le cours que de très loin. Elles pourraient, cependant, aussi bien être produites par un esprit qui, cherchant à tirer le maximum d'informations possibles du graphique "jouerait à la devinette", en multipliant les hypothèses au lieu de proposer des hypothèses explicatives en mobilisant ses connaissances sur la synthèse et le transport intracellulaire des protéines. Cet élève pourrait ne pas avoir bien compris ou accepté les règles présidant à la rédaction d'un sujet de Baccalauréat, instituant une fausse redécouverte de ce que l'on a appris en cours à partir d'un document. En travaux pratiques, en effet, on étudie un document nouveau pour en tirer une idée, une propriété qui participe à la construction du cours théorique. Mais en contrôle ou au Bac, l'élève doit faire l'opération inverse, c'est-à-dire rechercher dans son cours ce qui correspond à la question posée et chercher à montrer comment le document justifie ou démontre la connaissance, ce qui n'est plus la même chose !

présenter la  
correction d'un  
contrôle, un  
travail délicat

Lors de la correction, le fait d'imposer la "bonne réponse" se référant au cours n'améliore pas la situation de l'élève qui n'a "pas su". Pour faire évoluer les choses, il faudrait le **convaincre** qu'il a tort. En effet, **aucune des réponses d'élèves recensées n'est illogique**. Elles sont fausses par rapport à ce que nous savons, ce que nous acceptons comme vrai, ce que nous disons en cours mais pas nécessairement par rapport à la représentation que l'élève s'est faite du phénomène avec les seules informations apportées par l'énoncé.

N'aurait-on pas oublié ou effacé des éléments d'information en voulant simplifier les données expérimentales ? N'aurait-on pas méconnu la "richesse" de l'exercice et l'intérêt qu'il y avait à décrire les conditions **réelles** d'obtention du graphique ?

Retournons donc à la source pour mieux chercher à comprendre les éventuelles carences de l'exercice et tenter d'éclairer les propositions des élèves. Pour cela nous avons étudié en détail les travaux de nos maîtres (essentiellement Palade) pour comprendre dans quel contexte le document est né et pour mesurer l'ampleur des simplifications et leurs inconvénients.

### 3. LES SAVOIRS BIOLOGIQUES : LES TRAVAUX DE PALADE (1967)

#### 3.1. Principes méthodologiques

quand un  
document  
"simple" cache  
une "forêt" de  
techniques

Palade et coll. en 1967 mettent au point un protocole réunissant pas moins de cinq techniques expérimentales. La coopération de ces techniques doit leur permettre d'obtenir des



résultats incontestables qui valideront l'hypothèse émise neuf ans plus tôt.

- L'autoradiographie

Rétrospectivement et en suivant la démarche de Guy Rumelhard (5) on peut repérer que la technique qui nous intéresse, à savoir l'autoradiographie, est commandée par un modèle élaboré dans le but de surmonter les difficultés dues à la nature même du phénomène étudié. La synthèse et le transport des protéines étudiées étant intracellulaire la méthode expérimentale analytique est mise en échec (6). Pas question en effet d'ouvrir la cellule sans détruire les structures fonctionnelles responsables du phénomène que l'on veut étudier. C'est là qu'intervient le **modèle à compartiment** qui va nous permettre de désigner la cellule comme une **boîte noire** que l'on n'ouvre pas mais dans laquelle nous allons pouvoir introduire des indicateurs pour observer leur localisation à un moment donné ou à des moments successifs en stoppant et en figeant le phénomène qui, nous le savons, se déroule dans le temps et dans l'espace. L'indicateur appartiendra à la famille des radioisotopes à propos desquels A. Kohn a écrit : *"Introduire quelque-part des radioisotopes, cela revient à attacher un grelot au cou de certains atomes... où qu'arrivent ceux-ci, engagés dans n'importe quelle combinaison chimique, le grelot, toujours tintant signalera leur présence."* A ceci près que, dans notre cas, chaque grelot ne tinte qu'une seule fois mais que cela suffira si l'on a placé au-dessus une gélatine contenant des ions argent. L'émission d'un électron sera à même de réduire un de ces ions en argent métallique et pourra être définitivement matérialisée et conservée par le traitement chimique du développement photographique.

l'introduction  
d'indicateurs dont  
le grelot ne tinte  
qu'une fois

- L'incubation "in vitro" de tranches de pancréas

Sans être directement commandée par un modèle, cette technique repose sur les concepts de théorie cellulaire et de milieu intérieur qui permettent de concevoir la vie des cellules (unités fonctionnelles relativement autonomes) en dehors de l'organisme, pour peu qu'on leur fournisse un milieu de survie proche du milieu intérieur. Il est intéressant de penser que, si un modèle est intervenu ici, c'est à la fin du 18ème siècle lorsque le modèle technologique qui permettait de se représenter l'organisme a été détrôné par un modèle sociologique communautaire : la république des cellules. C'est en effet ce changement de modèle qui a permis l'élaboration de la théorie

expérimenter sur  
des cellules  
séparées de  
l'organisme

- 
5. Guy RUMELHARD, "Statut et rôle des modèles dans le travail scientifique et dans l'enseignement de la biologie", *Aster*, INRP, n° 7, 1988, 21
  6. Georges CANGUILHEM, *La connaissance de la vie*, Paris, Vrin, 1980

cellulaire. Se libérant des contingences de l'organisme entier (dilution du traceur, temps de mise à disposition aux cellules de ce dernier trop long), ils sont à même de réaliser la technique suivante.

- La technique du "pulse"

Elle va permettre le marquage des protéines sécrétoires grâce à la mise à disposition des cellules d'un marqueur radioactif en quantité importante pendant un temps très court. Elle nécessite la réalisation d'une "chasse" efficace.

- La technique du fractionnement cellulaire

En isolant les organites cellulaires les uns des autres, cette technique permet de suivre le trajet de la radioactivité à l'intérieur de la cellule, ceci en coopération avec l'autoradiographie.

- La technique de l'extraction biochimique

Elle permet d'extraire d'une façon spécifique :

- soit les **protéines totales** des tranches de pancréas
- soit les **protéines sécrétoires** des différentes fractions cellulaires fournies par le fractionnement.

Ce dernier point est **capital** car il permet de s'assurer que le trajet intracellulaire de la radioactivité correspond bien à celui des protéines sécrétoires synthétisées à partir du marqueur fourni et non pas à celui du marqueur libre ou à toute autre molécule radioactive.

### 3.2. La technique d'autoradiographie et ses limites.

visualiser un phénomène

recherche dominante d'une satisfaction intellectuelle

toute technique, malgré ses insuffisances...

En 1967, l'autoradiographie est suffisamment performante pour permettre la visualisation du trajet des molécules dont nous voulons étudier le transport intracellulaire, même si elle présente certaines limitations que nous devons connaître pour interpréter les images qu'elle nous donne. Ces limitations ont trait à son pouvoir de résolution. En effet, il arrive parfois que la taille des grains d'argent soit supérieure à la taille des organites au-dessus desquels ils sont situés. Ainsi les plus petits grains d'argent ont un diamètre de  $0,1\mu$  alors que le diamètre de certaines vacuoles lisses à la périphérie du Golgi est de  $0,05\mu$ . Il devient alors impossible d'affirmer que le marqueur se trouve bien dans l'organite considéré et non dans le hyaloplasme. A cela nous pouvons ajouter le trajet oblique des rayons  $\beta^-$  qui vont réduire des cations  $Ag^+$  à une certaine distance de leur source.

Ceci étant dit les résultats du document 2 nous paraissent d'une interprétation limpide. Ce sont d'ailleurs ces résultats traduits sous forme de courbes qui servent de support à la plupart des exercices proposés aux élèves.

**Document 2.****Distribution des grains d'argent au dessus des composants cellulaires**

	% de grains d'argent					
	3-mn pulse	temps de chasse				
		+7mn	+17mn	+37mn	+57mn	+117mn
Reticulum Endoplasmique rugueux	<u>86,3</u>	43,7	37,6	24,3	16,0	20,0
Appareil de Golgi*						
microsome lisse	2,7	<u>43,0</u>	37,5	14,9	11,0	3,6
vacuoles de condensation	1,0	3,8	19,5	<u>48,5</u>	35,8	7,5
Grains de zymogène	3,0	4,6	3,1	11,3	32,9	<u>58,6</u>
Lumière de l'acinus	0	0	0	0	2,9	7,1
Mitochondries	4,0	3,1	1,0	0,9	1,2	1,8
Noyaux	3,0	1,7	1,2	0,2	0	1,4
Nbre de grains comptés	300	1146	587	577	960	1140

\* A aucun moment il n'a été trouvé un nombre significatif de grains d'argent en association avec les saccules golgiennes.

Ces résultats nous montrent que le % de grains d'Ag est d'emblée maximum au-dessus du RER juste après le pulse ; puis que ce % décroît au-dessus du RER pour croître en même temps au-dessus des petites vésicules périphériques golgiennes.

Celles-ci voient à leur tour leur % décroître au profit de celui observé au-dessus des vacuoles de condensation qui ne tardent pas à perdre leur radioactivité alors que celle des grains de zymogène augmente.

Tout naturellement ces résultats se prêtent à l'interprétation classique : si la radioactivité est d'emblée maximum **dans** le RER c'est parce que la cellule y synthétise ses protéines sécrétoires.

...peut faire naître  
des hypothèses  
fécondes

ce qu'on voit  
n'est pas toujours  
ce qu'on croit  
être

ce qu'on a appris  
n'a pas toujours  
été évident

Ces protéines se déplacent ensuite comme **une seule vague** du RER aux vésicules périphériques du Golgi, puis de ces vésicules aux vacuoles de condensation puis aux grains de zymogène sans jamais passer par le hyaloplasme.

Mais il faut être conscient que cette interprétation nécessite deux **présupposés implicites** que l'élève ne formule pas. Quels sont-ils ?

- Les grains d'argent identifieraient la radioactivité des protéines sécrétoires synthétisées à partir du marqueur.

Or l'autoradiographie n'en donne pas la preuve absolue à elle toute seule. Les grains d'argent révèlent la présence du marqueur un point c'est tout ! Il peut être ou ne pas être incorporé dans une protéine. Et si c'est le cas comment savoir s'il s'agit d'une protéine sécrétoire et non pas d'une protéine membranaire ?

- Il n'existerait qu'un seul lieu de protéosynthèse : le RER. Là encore la seule technique d'autoradiographie qui consiste à suivre un marqueur fourni aux cellules sans autres précautions ne permet pas de réfuter l'hypothèse supposant la pluralité des lieux de synthèse. La cellule pouvant continuer à incorporer le marqueur tout au long de l'expérience. Ce faisant si on retrouve de la radioactivité dans l'appareil de Golgi 20 mn après la mise à disposition du marqueur, celui-ci continuant à être disponible dans la cellule, rien ne s'oppose à ce que les protéines aient été synthétisées à partir de ce dernier dans le Golgi.

Nous voyons donc qu'il **faut apporter les preuves expérimentales de la véracité de ces présupposés**. Ce n'est qu'à ce prix que l'interprétation classique deviendra la seule possible.

Ces preuves vont nous être fournies par les résultats des travaux de Jamieson et Palade.

### 3.3. Méthodes et résultats

#### • Les techniques biochimiques

- Ils prélèvent les pancréas sur des cobayes à jeun depuis 27 heures. Chaque pancréas fournira à peu près 30 tranches, chaque tranche pesant environ 50 mg et mesurant 0,5 x 7 x 5 mm. Toutes les opérations de découpage sont effectuées à 4° C.

- Les tranches sont mises en incubation dans une solution de Krebs-Ringer à pH 7,6 avec 95 % d'O<sub>2</sub>, 5 % de CO<sub>2</sub> et 14 mM de glucose. Ce milieu de survie reçoit un complément de tous les L-acides aminés, sauf la L-leucine froide, au moment du pulse.

- Ils vont ensuite s'assurer que ces tranches restent capables de prélever à partir du milieu de survie de la leucine 14 C et de l'incorporer à l'intérieur des protéines cellulaires. Pour cela huit tranches sont mises à incuber dans le milieu de survie dans lequel on a ajouté la leucine radioactive plus le complément

d'acides aminés. Huit autres tranches sont mises à incuber dans le même type de milieu exception faite du complément d'acides aminés. Les protéines totales des tranches sont extraites après 1, 2, 3 et 4 heures d'incubation.

Il est **indispensable** pour pouvoir interpréter sans équivoque les résultats ultérieurs, de connaître les techniques d'extraction biochimique utilisées par les auteurs. Pour simplifier, la tranche de pancréas après broyage et homogénéisation au mixer, ou la fraction cellulaire étudiée subit l'action de l'acide trichloracétique (TCA) qui a pour action de précipiter toutes les protéines, celles-ci pourront donc être qualifiées de fraction biochimique - **TCA insoluble** - alors que toutes les molécules protidiques non précipitées correspondant aux acides aminés seront appelées fraction biochimique - **TCA soluble** - libre. A cela s'ajoute l'extraction **spécifique** en milieu alcalin (NAC,  $\text{NaHCO}_3$ , pH 8,4) des **protéines sécrétoires** à partir des différentes fractions cellulaires.

Le taux d'incorporation du marqueur va ensuite être quantifié grâce à la mesure de l'**activité spécifique** (A.S.) de la fraction TCA insoluble extraite des tranches pancréatiques.

#### • Unité de mesure

Il nous faut maintenant définir cette grandeur. Pour cela voyons comment nous l'obtenons.

Les protéines de chaque fraction sont donc extraites par précipitation à l'acide trichloracétique (TCA), puis pesées. La radioactivité de l'échantillon est mesurée par comptage au compteur à scintillations, ce qui donne l'activité de l'échantillon en coups par minute (cpm). L'activité spécifique de l'échantillon est obtenue en divisant l'activité de l'échantillon par la masse de protéines en milligrammes, elle sera donc exprimée en **cpm/mg**. Cette unité, est importante car elle permet de comparer la radioactivité des protéines extraites de différentes fractions à différents moments. Mais on divise cette activité spécifique par la masse du pancréas en gramme afin de pouvoir comparer les différentes valeurs obtenues à partir de différents animaux.

La valeur de l'activité spécifique se référant à la radioactivité d'un milligramme de protéine, on peut dire qu'elle se réfère à un nombre constant de molécules de protéines. Si l'A.S. croît, c'est parce que le nombre de molécules d'acides aminés radioactifs incorporés dans un même nombre de molécules de protéines croît. Du fait de leur concentration croissante, lors de leur diffusion, les acides aminés radioactifs deviennent de plus en plus nombreux à être disponibles pour la protéosynthèse. L'évolution de la valeur de l'A.S. ne permet donc pas de savoir si le nombre de molécules de protéines augmente par unité de temps. On ne peut donc pas dire que la protéosynthèse est stimulée par l'injection d'acides aminés radioactifs, comme l'HYP3 des élèves le prétend.

**Nous voyons donc que les techniques biochimiques spécifiques de l'extraction des protéines ainsi qu'un système**

surtout, rendre les résultats comparables !

tout ceci permettant de tester la troisième hypothèse des élèves...

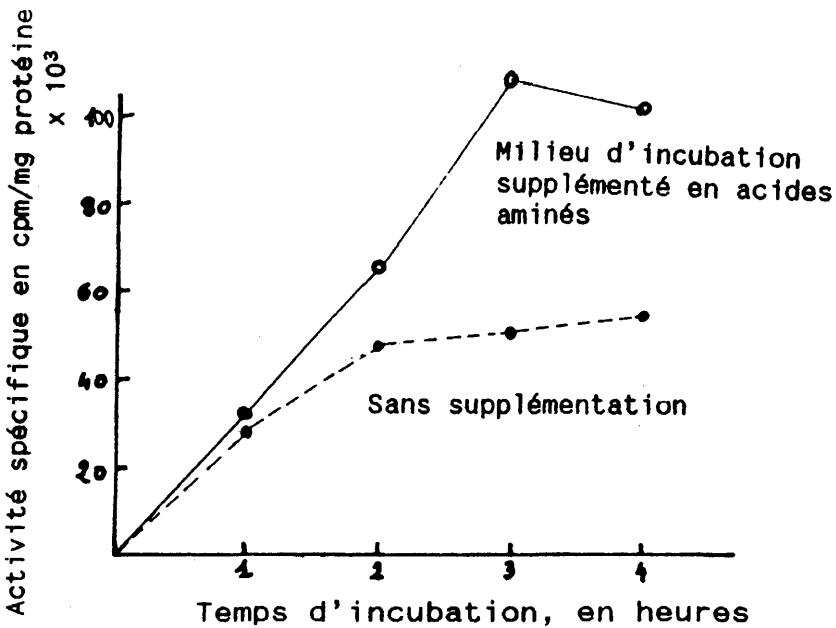
d'unités rigoureux permettent de faire correspondre, sans ambiguïté, la radioactivité mesurée à la quantité de protéines ayant incorporé le précurseur, que l'on peut alors suivre à la trace à l'intérieur des différents compartiments cellulaires.

mais aussi les  
deux premières

Leur maîtrise permet de démontrer alors la véracité du premier présupposé indispensable à l'interprétation classique des résultats autoradiographiques. De plus, ces renseignements techniques fournis, les élèves n'ont donc plus à prendre en compte le suivi éventuel de la radioactivité du traceur libre ou de toute autre molécule ayant hérité de l'atome radioactif par interconversion métabolique (HYP1 et HYP2).

Les courbes du document 3 traduisent les résultats obtenus.

**Document 3. Cinétique de l'incorporation de L. Leucine  $^{14}\text{C}$  à l'intérieur de tranches de pancréas.**



Chaque point est donné par la mesure de l'Activité Spécifique des protéines extraites de deux tranches. Interprétation : voir texte.

Ceux-ci montrent que les tranches en survie sont tout à fait capables d'incorporer le traceur fourni et ce, d'autant plus activement qu'un complément d'acides aminés leur est fourni. Les causes de l'arrêt de l'incorporation au bout de trois heures ne sont pas connues. La conséquence de ces résultats est que la majorité des expériences réalisées ensuite le furent en utilisant un milieu de survie supplémenté en acides aminés.

• Technique du "pulse"

S'étant assuré que les cellules continuaient à fonctionner normalement en dehors de l'organisme pendant un laps de temps suffisant, on peut ensuite procéder à la mise en oeuvre du "PULSE" dont voici la description rapide.

- Huit tranches sont mises à incuber pendant 10 mn à 0°C dans une fiole de 50 ml contenant le milieu de survie plus le marqueur (L.Leucine <sup>14</sup> C).

- La fiole est ensuite mise au bain-marie à 37°C pendant 3 mn.

- Puis les tranches sont sorties du milieu chaud et **rincées** avec un nouveau milieu d'incubation où la Leucine C est remplacée par de la Leucine froide en concentration 800 fois supérieure. Ce milieu correspond au milieu de **chasse**.

Deux tranches sont immédiatement broyées et subissent le fractionnement cellulaire (voir plus loin).

La valeur de l'A.S. de chaque fraction correspondra à celle du temps zéro de l'expérience : zéro minute d'incubation dans le milieu de chasse.

- Les six autres tranches sont mises à incuber dans le milieu de chasse pendant un temps variable 7, 17, et 57 minutes. Le fractionnement cellulaire couplé à l'extraction biochimique effectuée sur deux tranches à la fin de chaque échéance d'incubation devant fournir des résultats permettant de suivre les protéines synthétisées pendant le pulse, à l'intérieur des divers compartiments cellulaires.

Si l'activité spécifique régresse au niveau du RER (voir document 3) c'est parce qu'il y a de moins en moins d'acides aminés marqués disponibles dans la cellule après le pulse, mais la protéosynthèse n'en est pas moins arrêtée pour autant. S'il n'y avait pas de chasse, l'incorporation du marqueur se poursuivrait. L'activité spécifique se maintiendrait constante et on obtiendrait une courbe orientée de façon voisine à l'axe des abscisses qui ne régresserait qu'à l'épuisement de tout le stock de marqueur. Ceci traduisant un certain équilibre entre la synthèse au niveau du RER et l'exportation hors de cet organite.

Quoi qu'il en soit, les résultats ne seront interprétables sans équivoque qu'à une seule condition : **la cellule ne doit plus incorporer de marqueur après les 3 mn d'incubation sur milieu chaud, c'est-à-dire après le pulse. Si ce n'est pas le cas, toute variation de la radioactivité d'un organite pourra être interprétée en terme de transfert mais également en terme de synthèse, d'où l'équivoque.**

le pulse,  
technique  
indispensable, si  
mal connue dans  
les lycées

sans pulse, pas  
d'analyse d'un  
moment de la  
protéosynthèse

Jamieson et Palade vont vérifier les conséquences de chaque étape du pulse sur l'incorporation du marqueur.

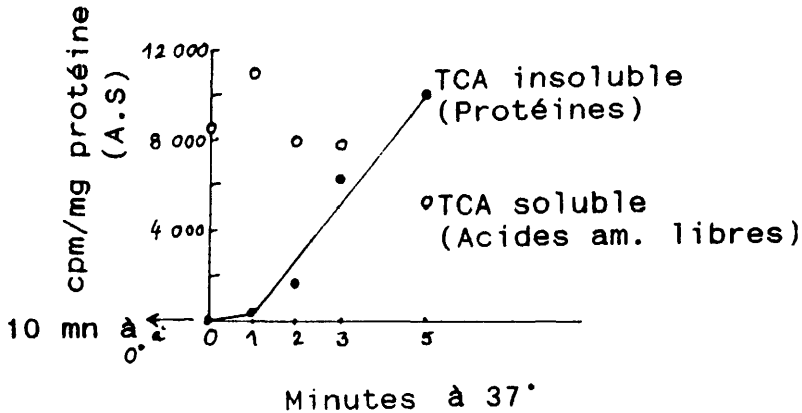
### 3.4. Expériences de vérification

Pour cela ils procèdent à l'extraction des protéines totales et des acides aminés libres des tranches à la fin de chaque étape.

- Conséquences de l'incubation de 10 mn à 0°C sur milieu chaud

#### Document 4.

Incorporation de la L. Leucine  $^{14}\text{C}$  à l'intérieur des fractions biochimiques TCA soluble et insoluble de tranches de pancréas pendant les 5 premières minutes d'incubation dans le milieu de pulse.



*Interprétation : voir texte.*

On notera qu'au temps 0 il n'y a pas d'incorporation (A.S. TCA insoluble = 0 cpm/mg) ainsi qu'une forte diffusion du traceur (A.S. TCA soluble = 8000 cpm/mg). Il s'agit donc d'une mise en charge du cytoplasme avec le traceur libre.

- Conséquences de l'incubation de 3 mn à 37° C sur milieu chaud (Voir document 4)

L'A.S. des protéines passe de 0 à 6000 cpm/mg : l'incorporation a donc lieu de façon active ce qui déclenche la diminution de l'A.S. des acides aminés libres qui passe de 11 000 à 8000 cpm/mg. L'incorporation continue avec la même vitesse au-delà de

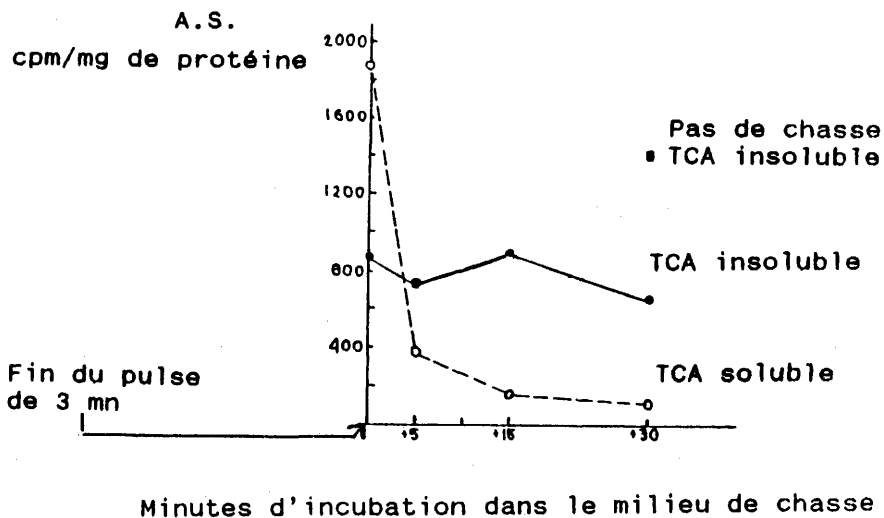


trois minutes comme le montre la valeur de 10 000 cpm/mg pour l'A.S. des protéines après cinq minutes d'incubation.

- Conséquences du transfert dans le milieu de chasse  
(Voir document 5)

**Document 5.**

Evolution de l'A.S. des différentes fractions biochimiques extraites des tranches de pancréas en fonction du temps d'incubation dans le milieu de chasse (cercles pleins et vides).



*Pour le témoin (carré plein) les tranches après les 3' de pulse sont mises à incuber dans un milieu froid mais sans excès de leucine froide. Interprétation dans le texte.*

Un témoin sans excès de leucine froide (pas de chasse) nous permet de vérifier les conséquences de l'excès de leucine froide :

- Sur le milieu de chasse, très rapidement (5 mn), l'A.S. des acides aminés libres cytoplasmiques diminue, elle passe de 1800 à 400 cpm/mg. Le traceur devient alors **non disponible pour la synthèse d'autres protéines**. L'A.S. des protéines devrait donc rester constante en se maintenant à la valeur qu'elle avait à la fin de l'incubation de 3 mn à 37° C sur milieu

chaud. C'est ce que l'on observe en mesurant l'A.S. de la fraction TCA insoluble pour 5, 10, 30 minutes d'incubation sur milieu de chasse.

- Le témoin nous montre que le lavage puis le transfert sur milieu non radioactif sans excès de leucine froide ne permet pas de stopper l'incorporation, car dans ce cas l'A.S. des protéines ne cesse d'augmenter.

Les résultats de la vérification des caractéristiques du pulse effectué sur ce système de tranches incubées in vitro nous démontrent la véracité du second présumé nécessaire à l'interprétation classique des résultats radio-autographiques. En effet grâce à ce **véritable pulse**, (c'est-à-dire la mise à disposition des cellules des tranches, d'un précurseur radioactif pendant un temps très court si possible toujours le même, ici trois minutes), nous sommes certains que la cellule n'incorpore plus de marqueur au-delà de trois minutes. De ce fait une petite quantité de protéines se trouve être synthétisée et c'est le transfert de cette dernière que nous allons pouvoir suivre à l'intérieur de la cellule.

**Toute modification de la radioactivité** d'un organite ne pourra donc être due **qu'à un transfert** de ce contingent de protéines marquées et **non pas à une néosynthèse** car **après le pulse on est sûr qu'il n'y a plus de marqueur disponible dans la cellule.**

Nous comprenons alors que la possession de ces renseignements techniques et de ces résultats doit éviter aux élèves d'émettre certaines HYPOTHESES :

- HYP1 : suivi du marqueur libre - voir conséquences de la chasse.
- HYP4 : pluralité des lieux de protéosynthèse - voir conséquences du véritable pulse.

Pour être complet il faut tirer une autre conclusion de ces résultats. En effet si la masse de protéines radioactives reste constante pendant 30 mn après le pulse cela veut dire que ces protéines ne sont pas hydrolysées pendant ce laps de temps. L'interprétation la plus simple veut que ces protéines aient une durée de vie supérieure à 30 mn. Les élèves n'auront donc plus à envisager l'HYP 5 qui voulait que la diminution de la radioactivité du RER soit due à une hydrolyse des protéines et que l'augmentation de cette même radioactivité au niveau des vésicules golgiennes soit due à une resynthèse de ces protéines utilisant la totalité de la leucine radioactive ayant été incorporée auparavant.

#### • Fractionnement cellulaire

Les protéines radioactives synthétisées pendant le pulse vont pouvoir être suivies à l'intérieur de la cellule grâce au fractionnement cellulaire et à l'autoradiographie.

Dans la mesure où le fractionnement cellulaire est couplé à l'extraction biochimique cette technique fournit, nous allons le

montrer le  
transfert exige  
d'éliminer le  
marqueur libre

pas d'hydrolyse  
des protéines  
avant 30 mn

voir, des résultats plus nombreux avec une grande rigueur scientifique.

En 1967 cette technique est très au point et permet grâce à l'utilisation d'un **gradient de centrifugation** d'isoler les petites vésicules lisses de la périphérie du complexe golgien que Jamieson et Palade soupçonnent d'être responsables du transfert des protéines du RER aux grains de zymogène. Cette technique est donc à même de fournir les fractions suivantes :

- Noyaux : "n"
- Mitochondries : "mt"
- Grains de zymogène : "gz"
- Microsome rugueux : "mcr" (RER)
- Microsome lisse : "mcl" (vésicules lisses golgiennes)
- Post microsome : "pmc" (ribosomes libres)
- Surnageant : "spt" (hyaloplasme)

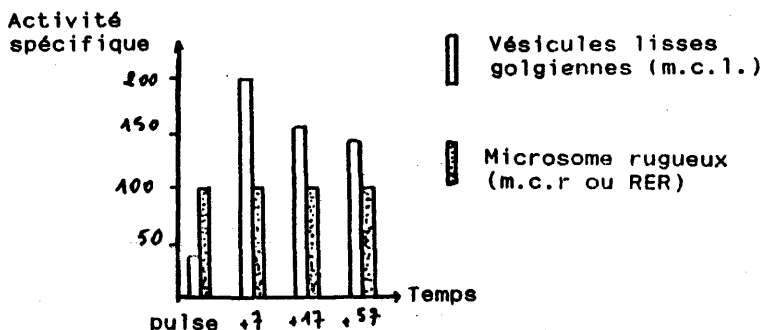
Les protéines de chaque fraction sont extraites puis comptées. Sur les fractions où les variations d'A.S. en fonction du temps sont considérables, à savoir "mcl", "mcr", et "gz", les auteurs vérifient qu'il s'agit bien des protéines enzymatiques vouées à l'exportation et non pas des protéines membranaires, grâce aux résultats de l'extraction biochimique en milieu alcalin qui supprime la quasi totalité de l'A.S. de ces fractions. Cette technique d'extraction, rappelons-le, est connue pour solubiliser spécifiquement les protéines enzymatiques sécrétoires.

Les résultats obtenus pour 0, 3, 7 et 17 minutes de chasse après la fin du pulse permettent de suivre sans ambiguïté la cinétique du transport des protéines du RER aux vésicules lisses du Golgi.

Les mesures d'activité spécifique montre de façon **reproductible** que si tout de suite après la fin du pulse l'A.S. du microsome rugueux est supérieure à celle du microsome lisse, le rapport s'inverse 7 minutes après (voir document 6).

protéines  
enzymatiques  
excrétoires et  
extraction en  
milieu alcalin

**Document 6. Activité spécifique de vésicules golgiennes en pourcent. de celle du reticulum rugueux**



(3mn) durée d'incubation en milieu de chasse (mn)

démonstration  
définitive du  
transfert

La **perte absolue** de protéines radioactives par le RER, peut être tout à fait expliquée par le gain en protéines radioactives des vésicules lisses golgiennes car il y a **correspondance quantitative** entre les pertes du premier et les gains du second.

### 3.5. Des recherches originales, aux exercices d'évaluation

la constance de  
la radioactivité  
globale

Tous ces efforts de démonstration peuvent sembler anecdotiques. Le principe qui les sous-tend est cependant capital : lors d'une étude comparée des courbes, la rigueur exige que l'on trouve, à chaque instant, la **même** quantité de radioactivité en calculant la somme des radioactivités déterminées à partir de chacune des courbes.

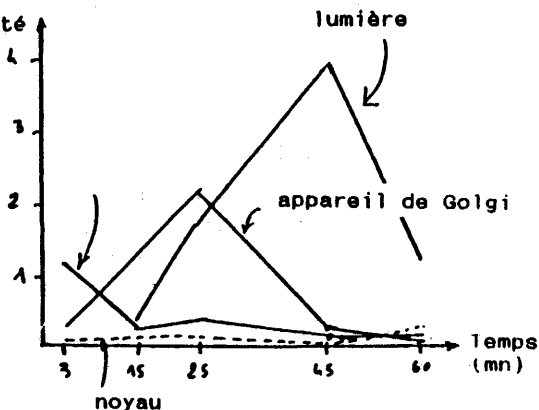
Pourtant ce principe n'est quasiment plus respecté par les chercheurs 10 ans plus tard. En effet, ceux-ci considèrent que les mécanismes de protéosynthèse et de transfert intracellulaire des protéines sont démontrés, ils ne se préoccupent plus des valeurs d'A.S. obtenues. Ils estiment que le simple fait d'obtenir, sur un autre organe (la glande mammaire par exemple) des courbes "voisines" de celles obtenues par Palade sur le pancréas, suffit pour démontrer l'existence de mécanismes semblables.

Lors de la construction de sujets de Baccalauréat, les documents sont souvent tirés directement des travaux de chercheurs qui n'étudient plus forcément la protéosynthèse et le transport intracellulaire des protéines mais l'action de telle ou telle drogue sur ces mécanismes. Soumis à des élèves scrupuleux, ces documents peuvent poser problème car on n'y trouve pas, à chaque instant, la constance de la radioactivité globale qui tenait tant à cœur à Palade. La courbe suivante, document 7, extraite d'un sujet de Terminale D (1984, Versailles), illustre ce propos. Les résultats qu'elle exprime sont relatifs à la synthèse et à l'excrétion des protéines du lait chez un mammifère.

ne se retrouve  
pas toujours

#### Document 7

Intensité de radioactivité  
(unités arbitraires)



Chez Palade, la rigueur scientifique est parfaitement respectée. Si le **pulse** avait duré plus de trois minutes, de la fin de ce présumé pulse jusqu'au premier prélèvement (7 mn de chasse), les auteurs n'auraient pas pu mettre en évidence une diminution de l'activité spécifique du **RER contemporaine** de l'augmentation de celle des vésicules lisses golgiennes. Au contraire, ce dernier aurait continué à incorporer, d'où une augmentation, voir une constance de son activité spécifique, du temps 0 au temps + 7 mn. **L'existence du transfert ne se trouverait pas alors démontrée de façon aussi univoque, aussi rigoureuse**, d'autres hypothèses pourraient encore être avancées telles les hypothèses 4 et 5 des élèves.

Grâce au pulse, ce n'est plus le cas. En effet, lorsque les protéines radioactives apparaissent dans le Golgi, soit 7 mn après la fin du pulse, celui-ci ne peut absolument pas incorporer de traceur dans de nouvelles protéines **puisqu'il n'y a plus de marqueur disponible** (voir document 5).

A cet argument s'ajoute la preuve capitale apportée par les résultats des travaux de 1967, à savoir **l'égalité entre la quantité de protéines perdue par le RER et la quantité de protéines gagnée par le micrososome lisse**.

Désormais, connaissant de façon précise les travaux originaux, il nous est facile de replacer l'exercice dans le contexte expérimental et de mesurer le travail simplificateur de son constructeur.

une simplification  
dangereuse...

Ce travail a consisté à isoler les différentes techniques les unes des autres pour n'en privilégier qu'une seule, l'**autoradiographie**. **Sans doute parce qu'elle semble plus pédagogique dans la mesure où elle satisfait la fonction sensorielle que nous prions le plus : la vision**.

Cette technique est supposée connue ou facilement assimilable. On simplifie donc sa présentation en élaguant certains de ses composants.

Ce travail d'élimination révèle l'espérance d'obtenir une seule réponse de l'élève, extirpée du cours. Or si le graphique est bien issu de l'autoradiographie, son interprétation, nous l'avons démontré, n'est possible qu'à travers la connaissance de tous les résultats fournis par les techniques "annexes". En effet loin d'isoler l'autoradiographie de la technique fractionnement cellulaire/ extraction biochimique, Palade et coll. utilisent la dialectique existant entre ces deux techniques : le fractionnement cellulaire en détruisant les rapports anatomiques entre les composants cellulaires leur enlève toute personnalité. Ainsi une forte A.S. à + 7 mn dans le micrososome lisse ne signifie pas obligatoirement que ce micrososome lisse corresponde aux petites vésicules lisses de la périphérie du Golgi. D'autres petites vésicules lisses existent dans ces cellules. Pour soulever l'indétermination Palade a recours aux résultats de l'autoradiographie. Cette dernière indique, pour le même temps de chasse, une forte radioactivité au niveau des vésicules lisses de la périphérie du Golgi et nulle part ailleurs. Mais elle ne peut pas dire si cette radioactivité correspond aux protéines sécrétoires

intravésiculaires. C'est le fractionnement cellulaire qui le dira et qui en prenant en compte l'élimination par l'autoradiographie des autres petites vésicules lisses, pourra affirmer qu'il s'agit bien de protéines sécrétoires à l'intérieur des petites vésicules lisses péri-Golgiennes.

Les chercheurs, méticuleux, ont opéré de façon à répondre à un certain nombre de questions et c'est l'ensemble de leurs résultats qui a produit le document, et non pas la seule technique d'autoradiographie : rien n'est dissociable.

Simplifier ne peut consister à supprimer un des composants nécessaires à la compréhension de l'ensemble.

où le dogme  
menace

Les interprétations, les hypothèses proposées ne correspondent pas à la réponse attendue par le correcteur car celui-ci en éliminant (consciemment ?) les techniques "annexes" a éliminé d'office, de ses exigences, les interprétations "annexes" dont il n'a, du reste plus conscience. Il est donc tenté de mal juger la copie de l'élève.

Le cours apporte bien la "bonne réponse" et l'élève devrait s'y référer. Mais dans un contexte expérimental particulier et nouveau, plus ou moins bien précisé, l'élève ne retrouve pas toujours spontanément le bon fil conducteur. Il lui manque les éléments nécessaires pour éliminer certaines hypothèses que le document l'amène à formuler.

De plus, on attend de l'élève une interprétation **qualitative** du document alors qu'on lui donne un cadre de réflexion **quantitatif** (compliqué parfois par des ordonnées exprimées en "unités arbitraires" inexploitable).

quand le  
marquage  
temporaire des  
protéines fait des  
vagues

On ne travaille pas non plus sur des vitesses, ce que la variable "temps" en abscisse laisse croire. On ne doit utiliser que le fait que les acides aminés marqués apportent des informations spatiales en fonction du temps, ceci donnant l'idée d'un déplacement. En fait, il faut se créer une représentation du phénomène à partir des résultats qui suggère l'**image d'une vague** qui se déplace. Le risque est de concevoir un phénomène qui débute, s'amplifie, puis diminue et s'arrête. Il faut, au contraire supposer le phénomène constant (ce que les travaux ont démontré (7)), et que seule la fraction marquée présente cet aspect.

En prolongement de notre réflexion, on pourrait s'interroger sur les capacités d'analyse d'un élève qui aurait fourni la bonne réponse sans repérer un seul des problèmes posés par le graphique...

Quoiqu'il en soit, on est conduit à penser que la description des conditions d'expériences aurait fourni aux élèves un cadre précis hors duquel ils n'auraient pu divaguer. Mais nombre de collègues vont penser alors que la prolifération des détails

---

7. M.M. DALY, A.E. MIRSKY, "Formation of protein in the pancreas", *Journal of genetic and physiology*, 36, 1952, 243

donner des  
précisions  
techniques : une  
solution non  
reconnue de tous

techniques va alourdir l'énoncé, le rendant difficilement assimilable ou inversement, le rendre trop facile à interpréter puisque les élèves pourraient être étroitement guidés vers la "bonne réponse". Tout est affaire de tempérament !

En ce qui nous concerne, nous faisons nôtre le texte suivant extrait des "Objectifs et procédures d'évaluation - 1ère A et B" (8).

*Voici un professeur de la classe de 1ère B, qui a fait un cours sur les aliments. Lors du contrôle, il donne à interpréter des courbes de croissance de rats carencés. Aucune séance de travaux pratiques n'a comporté ce travail personnel sur l'analyse de courbes... Au sens le plus simple, il (l'élève) a "compris" : il est capable de redire dans ses mots les idées reçues. Mais il ne sait pas, ipso facto, transférer ses acquis dans une situation nouvelle. Ce transfert suppose un entraînement, sur divers exemples, dont on fait souvent l'économie, faute de temps. Ne nous étonnons pas des échecs. Personne n'est responsable... Mais alors pourquoi évaluer ce que l'on n'a pas enseigné ?*

Toutes les remarques précédentes montrent que cet exercice est délicat à utiliser en évaluation sommative, sans précaution particulière. Par contre, il peut constituer un excellent instrument de sollicitation de l'imagination, de la rigueur, s'il est proposé en travaux pratiques tel quel. Chaque proposition d'élève peut constituer un prétexte pour apporter les précisions techniques complémentaires et ainsi dévoiler progressivement tout ce qui se "cache derrière" le graphique. En fin d'analyse, il devient facile d'en tirer les éléments théoriques essentiels et de construire le cours.

l'étude historique  
peut rendre  
confiance à  
l'élève

Mais, le plus frappant est de constater que des **élèves** confrontés à ce document **se posent** des questions que les **chercheurs se sont eux-mêmes posés et qu'ils ont dû résoudre**. Le fait qu'il y ait correspondance entre les interprétations d'élèves et les interrogations des chercheurs devrait nous amener à plus de bienveillance dans le jugement de la valeur de la copie de l'élève. Pour apprécier davantage la qualité des propositions des élèves, il faudrait avoir clairement à l'esprit **les hypothèses** des chercheurs. Celles-ci n'ont pas été soulignées lors de l'exposé des travaux de 1967. Présenter ces travaux de façon tronquée peut être nuisible car les élèves n'ont que trop tendance à penser qu'on va directement d'un problème à une expérience. Bref, il peut sembler que ces travaux n'ont pas été dépassés, ce qui est faux.

éviter les  
simplifications

C'est pourquoi nous proposons une étude historique rapide de la cellule sécrétrice (pancréatique, essentiellement) pour mieux dégager les hypothèses testées et mesurer l'intérêt des propositions des élèves.

---

8. "Sciences naturelles en 1ère A-B, I- Objectifs et procédures d'évaluation", Education Nationale, Direction des Lycées et Collèges

## 4. PERSPECTIVE HISTORIQUE : ÉVOLUTION DE LA BIOLOGIE CELLULAIRE

### 4.1. Évolution des stratégies de recherche

Le pancréas, exploré très tôt par Claude Bernard (9), devra attendre comme beaucoup d'autres organes, le grand tournant technologique fin 40 - début des années 50 pour être analysé de façon approfondie après avoir été seulement et pendant très longtemps scruté au travers d'un microscope.

Au niveau d'une cellule, la multiplicité des fonctions qui la maintiennent en vie permet de lui appliquer, par transposition avec changement d'échelle (10), un modèle proposé par C. Bernard pour l'organisme. Celui-ci serait un *"modèle économique : la division du travail est la loi de la société comme de l'organisme dont les cellules sont des unités fonctionnelles virtuellement autonomes. L'organisme complexe est constitué de la réunion de ces unités élémentaires. Il assure les conditions de leur vie et la coordination de leurs fonctions."*

au départ, le  
schéma de  
Claude Bernard

Ainsi, il semble que les chercheurs aient abordé l'étude d'une cellule sécrétrice avec ce schéma en tête. Une cellule pourrait aussi être un ensemble d'édifices moléculaires spécialisés et distincts (= organites) mais aux fonctions dépendantes et donc coordonnées.

Ce **compartimentage hypothétique de départ**, que l'observation au microscope photonique laissait espérer, propose une interprétation possible des clichés obtenus au microscope électronique. Comment comprendre tout ce monde de membranes changeantes ? Autant de voiles cachant d'obscures fonctions ?

Pourtant, contrairement au modèle technologique où chaque pièce est indispensable et ne peut fonctionner qu'avec l'ensemble, la transposition du modèle cellulaire permet d'imaginer une possible séparation des organites les uns des autres et leur mise en fonctionnement à l'état isolé. Dans le cadre de ces hypothèses, on a cherché à accélérer les vitesses de centrifugation pour disséquer la cellule et **séparer ses composants** de différente densité. On s'est également assuré de la relative pureté de ces extraits par leur observation au microscope électronique. On a aussi cherché à caractériser chimiquement ces extraits.

Ainsi, Daly et Mirsky (11) déterminent le contenu enzymatique du pancréas de Souris. Ils évaluent les modifications de ce

---

9. Claude BERNARD, *Comptes rendus de l'Académie des Sciences*, 1, 1856, supplément 379.

10. Ibid (6), page 70

11. Ibid (7)



un autre  
argument  
répondant à la  
troisième  
hypothèse

contenu pendant le cycle de sécrétion et de synthèse, déclenché par un jeûne suivi d'une période d'alimentation ou d'une injection d'un parasymphico-mimétique. La prise d'un repas (ou la présence de peptones dans le duodénum) active la sécrétion et donc la synthèse présentant entre les repas un rythme lent et régulier. **L'injection d'un acide aminé radioactif ou non, dans le sang ne semble pas activer le pancréas.**

Ces informations permettent de reconsidérer l'hypothèse 3 des élèves ; celle-ci ne peut être rejetée qu'à partir du moment où l'on connaît ces travaux. Le pancréas est déjà en activité, lente ou rapide, lorsque l'on injecte l'acide aminé marqué et sa vitesse de synthèse reste constante. L'ignorance de ces faits contribue à construire une image fautive du phénomène.

D'autre part, la mise à la disposition des chercheurs d'isotopes radioactifs divers permet à la cytochimie d'effectuer un gigantesque bon en avant par l'application de la méthode des indicateurs.

Il ne restait plus qu'à tester le modèle en appliquant deux techniques, "in vivo" mais aussi "in vitro" en **reconstituant un compartiment cellulaire** et en observant son fonctionnement dans **diverses conditions expérimentales**.

Par exemple, à partir de constituants cellulaires isolés de foie (mitochondries, reticulum et enzymes solubles), Siekevitz (12), en 1954, a créé in vitro un mélange capable d'incorporer des acides aminés radioactifs dans des protéines.

En 1955, J.W. Littlefield et coll. (13) montrent que les ribosomes (RNP ou particules ribonucléoprotéiques fixées aux microsomes) deviennent radioactifs **en premier** après injection in vivo d'un acide aminé radioactif, avant les microsomes et les protéines cellulaires (les microsomes désignant les membranes du RER). Palade et coll. écrivent plus tard (14) : *"Cette découverte permet de considérer les ribosomes comme étant le siège le plus probable de l'incorporation des acides aminés."*

Palade, a choisi le pancréas pour sa production abondante d'hydrolases, tout en reconnaissant que les phénomènes de production de substances, de sécrétion pourraient différer du mécanisme général de synthèse des protéines intracellulaires.

Siekevitz et Palade (15) puis Hokin pratiquent l'analyse biochimique des grains de zymogène et constatent la très grande

12. P. SIEKEVITZ, *Journal of biological chemistry* 195, 1952, 549

13. J.W. LITTLEFIELD, *Journal of biological chemistry* 217, 1955, 111

14. J. KIRSCH, G. PALADE, P. SIEKEVITZ, "Aminoacid Incorporation in vitro by ribonucleoprotein particles detached from Guinea Pig Liver Microsomes", *Journal of biological chemistry*, 235, n°5, 1960, 1419

15. G. PALADE, P. SIEKEVITZ, "Aminoacid Incorporation in vitro by ribonucleoprotein particles detached from Guinea pig liver Microsomes", *Journal of biophysical and biochemical cytology* 4, 1958, 203.

quantité d'enzymes (lipases, RNases, amylases et TAPases qui sont des enzymes activant le trypsinogène en trypsine). Ils pensent qu'il s'agit d'un dépôt temporaire d'hydrolases. **La fonction de certains organites se dessine.**

Siekevitz et Palade unissent les études anatomiques au microscope et les analyses biochimiques. Ils tentent de replacer sur les électronographies les pièces du puzzle constituées par les données biochimiques et les observations au microscope électronique des différentes fractions cellulaires comme les grains de zymogène par exemple.

Puis ils vont faire plus qu'observer et reconnaître, ils vont **influencer** l'activité cellulaire : une heure après avoir nourri l'animal (16), la fraction microsomiale montre une grande activité enzymatique (TAPase et RNase). L'observation microscopique des cavités du RER révèle davantage de granules "intracisternaux" en même temps qu'une activité enzymatique accrue dans la fraction microsomiale. Il y aurait selon eux, synthèse de nouvelles enzymes au niveau du RER et accumulation de ces mêmes enzymes, donc, il y aurait transfert cellulaire, mais par où ? ... Pour résoudre ce problème, ils ont l'idée de marquer les protéines par des acides aminés radioactifs et de les suivre par extraction biochimique dans les différentes fractions cellulaires. L'autoradiographie, à cette époque, est encore inapplicable à la microscopie électronique.

pour espionner  
les protéines, leur  
attacher une  
casserole...

## 4.2. Recherches sur la protéosynthèse

### • Etudes "in vivo"

En 1958, Siekevitz et Palade (17) étudient l'incorporation de leucine  $^{14}\text{C}$  et entreprennent la vérification de l'hypothèse voulant que **l'augmentation de l'activité enzymatique d'une certaine fraction cellulaire après un repas soit due à une néosynthèse protéique plutôt qu'à une redistribution intracellulaire d'un vieux stock d'enzymes.**

Protocole expérimental :

Quatre cobayes à jeun depuis 48 heures reçoivent une injection intracardiaque de leucine  $^{14}\text{C}$ , 15 minutes après le début de leur repas.

- le premier est sacrifié 5' après l'injection
- le deuxième est sacrifié 15' après l'injection
- le troisième est sacrifié 45' après l'injection
- le dernier est sacrifié 120' après l'injection.

16. Ibid (15) "Fonctionnal variations in the enzymatic activity of microsomes", 309

17. Ibid (15) "In vivo Incorporation of leucine-C14 into the proteins of cell fractions", 557

la protéosynthèse  
dans les  
pancréas de 4 co

Le pancréas est prélevé, pesé, broyé et fractionné. Le fractionnement cellulaire est effectué par centrifugation différentielle simple (le gradient de centrifugation n'est pas encore inventé) qui donne les fractions suivantes :

Noyaux ("n")

Grains de zymogène ("gz")

Mitochondries ("mt")

Microsomes ("mc"), correspondant au RER, c'est-à-dire les membranes, les contenus ainsi que les ribosomes attachés aux membranes

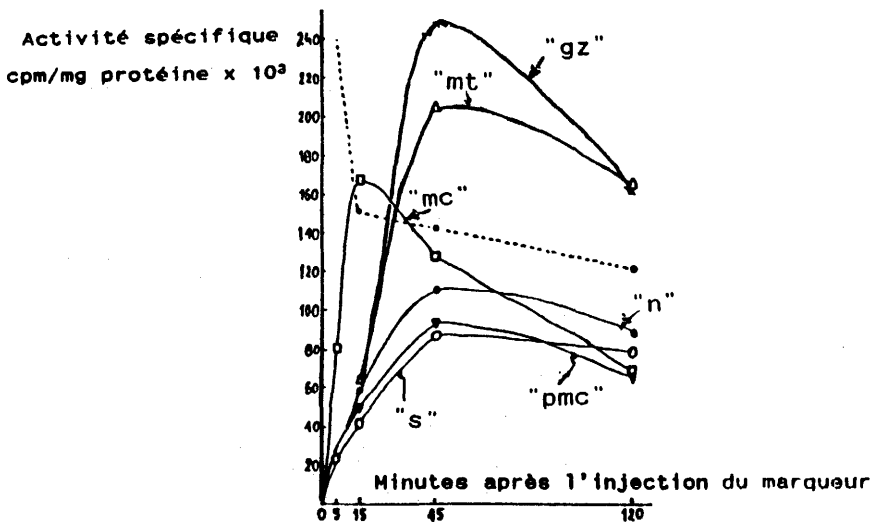
Post-microsomes ("pmc") correspondant aux ribosomes libres

Surnageant ("s") correspondant au hyaloplasme.

L'étude morphologique des fractions montre que les fractions lourdes sont hétérogènes : "gz" étant contaminées par "mt", "mt" étant contaminées par "gz" et "mc". Les fractions "mc" et "pmc" par contre sont relativement homogènes. Puis, pour repérer la présence et/ou la synthèse d'enzymes, ils mettent au point la mesure d'activité spécifique (voir les travaux de 1967). Ces techniques expérimentales étant connues, l'hypothèse faisant état du suivi de l'acide aminé libre radioactif ne peut être émise, mais on découvre que ce fut pour les auteurs une **préoccupation permanente jusqu'en 1967**. Les résultats sont consignés sous la forme du graphique du document 8.

#### Document 8.

Variations en fonction du temps de l'A.S. des protéines extraites des différentes fractions cellulaires obtenues à partir de pancréas de cochons d'Inde ayant subi au temps 0 une injection de leucine  $^{14}\text{C}$ .



Initiales et interprétation : voir texte.

Nous voyons que 15 mn après l'injection du précurseur, l'A.S. maximum se retrouve dans la fraction "mc". Ceci montre clairement que la synthèse de nouvelles protéines existe et "qu'elle s'effectue **en priorité** au niveau du RER". On notera la prudence de cette conclusion qui n'exclut pas d'autres lieux de synthèse.

s'intéresser à la  
synthèse d'une  
seule protéine

En 1959, Siekevitz et Palade (18) suivent la synthèse du seul chymotrypsinogène et le voient apparaître d'abord au niveau du RER. C'est en étudiant la synthèse de la RNase que Morris et Dickman (19) localisent cette enzyme en premier lieu également au niveau du RER. Ils la retrouveront plus tardivement au niveau des autres sites. Ce retard semble dû à un transfert plutôt qu'à une synthèse. On en reste toujours aux fortes présomptions...

• Etudes "In vitro"

A la fin de 1959, Kirsch, Siekevitz et Palade (20) reprennent leurs travaux mais changent de matériel (foie de cobaye) et leur méthode, **afin de "voir"** si les ribosomes isolés des membranes conservent toujours leur capacité à incorporer "in vitro" les acides aminés marqués. Cette autre manière d'aborder le problème est intéressante car elle est complémentaire de la précédente ("in vivo").

travailler sur des  
constituants de  
cellules de foie

A partir de cellules vivantes de foie, ils isolent certains constituants qu'ils s'efforcent d'obtenir à l'état pur et dont ils vérifient la pureté au microscope électronique. Puis ils réunissent certains d'entre eux en présence d'acides aminés marqués dans le même tube à essais à 37° pendant 20 minutes :

- ribosomes
- fraction enzymatique soluble (pH 5) correspondant aux protéines hyaloplasmiques (sans membrane de reticulum)
- ATP et GTP
- phosphoénol pyruvate et pyruvate-kinase (dernière enzyme de la glycolyse permettant de régénérer l'ATP).

Les résultats obtenus montrent qu'il y a incorporation de leucine marquée dans les protéines nouvellement synthétisées (HYP1 des élèves).

Par contre, la **suppression** d'un des composants du mélange réduit de façon très significative l'incorporation d'acides aminés marqués, ce qui révèle le caractère **indispensable** de la fraction supprimée. Ceci souligne l'importance du rôle des

18. G. PALADE, P. SIEKEVITZ, "In vivo incorporation of leucine-C14 into the chymotrypsinogen of various cell fraction", *Journal of biophysical and biochemical cytology*, 7, 1960, 619

19. A. MORRIS, S. DICKMANN, "Biosynthesis of ribonuclease in Mouse Pancreas." *Journal of biological chemistry* 235, n°5, 1960, 1419.

20. Ibid (14)

ribosomes dans le transfert de l'acide aminé marqué, de l'ARN soluble (ARNt) à la protéine et réduit celui de la membrane du reticulum. Celle-ci semble agir comme un site d'isolement, de séparation de cette protéine destinée à l'exportation.

l'importance des  
ribosomes

Donc, **toute protéosynthèse ne peut avoir lieu que là où il y a des ribosomes**, y compris dans les mitochondries, où la vitesse de synthèse y est réduite par rapport à celle du système lié au reticulum. Aucun élément cellulaire autre n'intervient, exception faite des enzymes hyaloplasmiques et de la source d'énergie citée plus haut.

Cette approche expérimentale est plus rigoureuse que la précédente puisqu'on contrôle mieux les paramètres qu'in vivo (utilisation du principe de variation d'un seul facteur, tube témoin ...).

On notera que l'aspect informationnel du problème de la synthèse des protéines n'est pas envisagé. Si les ARNm ne sont pas encore connus (ils ne le seront qu'en 1960), ce n'est pas le cas des ARNt découverts en 1957. In vitro les expérimentateurs croient maîtriser tous les paramètres. Les acides nucléiques ne sont pas pris en compte et pourtant présents dans les extraits cytoplasmiques, ils interviennent nécessairement.

**Ce n'est qu'au prix de toute cette étude** que l'on peut rejeter l'HYP4 des élèves selon laquelle il pourrait y avoir synthèse "un peu partout". Il est cependant intéressant de remarquer que Palade a tenu à se procurer un argument supplémentaire pour réfuter cette hypothèse, qui avait manifestement la vie dure. Cet argument supplémentaire lui sera fourni en 1967 par la technique du pulse, comme nous l'avons vu dans le 3.

l'impossibilité des  
lieux de synthèse  
multiples

Si le problème des lieux de synthèse semble résolu, il reste celui du transfert des protéines.

#### 4.3. Recherches sur le transfert des protéines

Les travaux de 1958 (21) posent, à ce sujet, plus de problèmes qu'ils n'en résolvent (Document 8)

Si l'évolution de l'A.S. de chaque fraction est compatible avec un transfert des protéines marquées du RER aux grains de zymogène (croisement des courbes), les résultats quantitatifs ainsi que la technique expérimentale, ne permettent pas d'impliquer les variations d'A.S. de chaque fraction à ce seul transfert.

En effet, il semble peu probable, compte tenu des chiffres que la diminution de l'A.S. du RER puisse être à l'origine de la croissance de l'A.S. des autres fractions, "mt" et "gz" en l'occurrence. Ceci les amène à supposer d'autres lieux de synthèse avec H.M. Bates (22) et A.E. Mirsky (23). De plus, pour expliquer

21. Ibid (16)

22. H.M. BATES, K.M. CRADDOCK, "The incorporation of valine-1-C14 into cytochrome C by rat liver mitochondria", *Journal of american and chemical society*

23. V.G. ALLFREY, A.E. MIRSKY, "Protein synthesis in isolated cell nuclei", *Journal of genetic and physiology*, 40, 1957, 459

les modalités de transfert les auteurs ne peuvent invoquer, sans ambiguïté, un transport en masse des nouvelles protéines du RER aux grains de zymogène à cause des réserves d'ordre technique suivantes :

- le caractère rudimentaire du fractionnement cellulaire (hétérogénéité des fractions)
- l'impossibilité d'isoler l'appareil de Golgi, compte tenu de son polymorphisme
- la mise à la disposition des cellules, du précurseur pendant un temps très long (15 mn et plus)
- le fait que toutes les protéines cellulaires soient extraites et comptées. On ne suit donc pas la famille particulière des protéines sécrétoires à laquelle appartient l' $\alpha$  chymotrypsinogène. Ceci est ennuyeux car à cette époque rien ne permet d'affirmer que toutes les protéines sont synthétisées selon les mêmes modalités.

Ces réserves interdisent aux auteurs de trancher entre un transfert ou une néosynthèse dans les mitochondries, le noyau et/ou dans les grains de zymogène.

Ils restent donc prudents même s'ils pensent que leur hypothèse est la plus probable : synthèse des protéines au niveau du RER puis transfert dans les grains de zymogène. On ne parle pas encore de l'appareil de Golgi (qui est connu) puisque ses différents constituants se répartissent selon leur densité dans les différentes fractions "gz" et "mc".

Palade cherche à perfectionner sa technique d'analyse biochimique associée à l'observation microscopique. Cela le conduit à l'autoradiographie. Cette technique existe déjà mais elle n'est vraiment maîtrisée qu'en microscopie photonique. Cependant, de nombreux auteurs travaillent déjà à l'adapter à la microscopie électronique. Palade fait partie de ceux-là.

En 1961, grâce à cette technique, Caro et Palade (24) rapportent le fait qu'il y a concentration de leucine marquée dans la zone de l'appareil de Golgi. Est-ce la preuve du transfert de protéines par cet appareil ? Prudents, ils n'écrivent jamais qu'il y a incorporation de marqueurs dans les protéines, en toute certitude car la technique photographique et la technique des indicateurs ne le prouvent pas encore. Par contre, ils rappellent que Siekevitz et Palade ont montré par extraction et ultracentrifugation (voir plus haut) que la leucine était incorporée dans des protéines récemment synthétisées, destinées surtout à l'exportation. Ils ont donc postulé que ces enzymes passent par la zone de Golgi car on les retrouve dans des vésicules golgiennes. Il y a, en effet, corrélation entre ces faits et la forte concentration de leucine marquée dans l'appareil de Golgi. Ils en concluent que la leucine ne peut qu'être incorporée dans les enzymes digesti-

une technique a  
aussi ses  
faiblesses

introduction  
d'une nouvelle  
technique :  
l'autoradiographie...

24. L. CARO, G. PALADE, "Le rôle de l'appareil de Golgi dans le processus sécrétoire - Etude autoradiographique", *Comptes rendus de la société de biologie*, 115, séance du 27.5.61. 1750.

ves élaborées par la cellule. Ils reconstituent, par le raisonnement le trajet suivi par ces protéines depuis le RER (radioactivité au bout de 4 mn) aux grains de zymogène (radioactivité au bout de 4 heures).

Ces premiers résultats donnent raison à H. Lévi (25) qui écrivait en 1957 après s'être interrogé sur les très nombreuses sources d'erreurs du comptage de grains d'argent dues aussi bien aux défauts possibles de la coupe de tissu que de l'émulsion photographique : *"L'autoradiographie a partagé le sort de tant de nombreux instruments et méthodes, d'abord on s'attendait à ce qu'elle résorbe tous les problèmes et qu'elle réponde à toutes les questions. Puis, on l'a abandonnée comme étant trop complexe, et finalement, quelques investigations prudentes et consciencieuses ont conduit à des résultats encourageants. On espère que cette dernière phase prévaudra dans les temps à venir."*

...qui fournit des quantifications à l'origine de graphiques très utilisés

L'utilisation de l'autoradiographie est, en effet, riche d'enseignements car on passe de la simple attitude qui consiste à chercher où est l'isotope puis dans quelle molécule il est, à celle qui s'interroge sur le nombre d'isotopes repérés en un endroit précis et qui aboutit à une évaluation de l'activité chimique (synthèse, transfert, concentration) de l'organite ou de la cellule, en fonction du temps.

On peut alors comparer non seulement des localisations mais aussi des quantités, construire des graphiques, ce qui autorisera la rédaction de nombreux sujets de Baccalauréat mais aussi augmentera le risque d'erreurs d'interprétation par les spécialistes comme par les élèves...

Toujours est-il qu'à cette époque (1961), la technique d'autoradiographie n'étant pas exempte de critiques, on s'affaire dans les laboratoires pour résoudre les difficultés (26).

En 1964, Caro et Palade (27) utilisent de la leucine tritiée comme précurseur. Le marquage est obtenu "in vivo". Pour la première fois, la chasse est employée afin de diminuer les artefacts dus à la fixation du précurseur par l'oxyde d'osmium sur des structures étrangères à la synthèse et au transfert des protéines. Elle consiste en une injection, 4 mn après celle du traceur, d'une solution contenant 100 fois plus de leucine "froide".

La justification principale de la chasse n'est pas évoquée. En effet, la finalité principale de la chasse est de ne mettre le

25. H. LEVI, "A discussion of recent advances towards quantitative autoradiography", *Experimental cell research*, suppl. 4, 1957, 207

26. L. CARO, R. TUBERGEN, J.A. KOLB, "High-Resolution Autoradiography". 1) "Methods", *Journal of cell biology*, 15, 1962, 189.  
2) "The problem of resolution", *Journal of cell biology* 15, 1962, 473.

27. L. CARO, G. PALADE, "Proteins synthesis, storage and discharge in the pancreatic exocrine cell, an autoradiographic study", *Journal of cell biology*, 20, 1964, 473.

précurseur à la disposition des cellules que pendant un temps très court ; de ce fait un véritable "pulse" peut être réalisé. La technique "in vivo" ne permet pas de réaliser un pulse d'une durée inférieure à 15 mn.

Les résultats sont cependant proches de ceux qui seront obtenus en 1967 (voir document 9).

#### Document 9.

**Distribution des grains d'argent de différentes structures cellulaires en fonction du temps après l'injection du marqueur (DL Leucine -4,5 <sup>3</sup>H)**

Temps après le marquage -mn -	% de grains d'Ag au-dessus					
	RER* %	Golgi %	Grains Zg %	Noyau %	Mitoch. %	Total grains
4	67	27	1	2	3	557
6	53	39	2	5	1	157
20	11	73	10	3	3	518
240	11	10	73	4	2	167

\* *Reticulum endoplasmique rugueux et le hyaloplasme contigu.*

pas de preuve  
absolue du  
transfert au Golgi

Les résultats de l'autoradiographie au microscope électronique suggèrent que les protéines sont synthétisées au niveau du RER puis rapidement transférées vers les petites vacuoles lisses péri-golgiennes. Mais cette dernière remarque n'est qu'une supposition à cause du pouvoir de résolution de la technique qui n'est que de 0,2 à 0,1  $\mu$ m alors que le diamètre de ces petites vésicules ne dépasse pas 0,05  $\mu$ m. L'autoradiographie ne peut donc pas donner la preuve absolue du passage des protéines par ces petites vésicules.

Quoiqu'il en soit, le transfert des protéines nouvellement synthétisées du RER au golgi via ces petites vésicules est une supposition **raisonnable**. Cela explique de façon satisfaisante les résultats et est en accord avec les notions acceptées à cette époque sur la synthèse des protéines.

De plus, ce n'est en contradiction avec aucun fait connu. Toute autre interprétation de ces résultats autoradiographiques devrait impliquer des mécanismes multiples pour la synthèse des



protéines. Puisqu'ils s'occupent particulièrement d'une seule classe de protéines, de telles multiplicité et complexité sont hautement improbables.

Ces résultats tendent donc à nous convaincre du rôle de l'appareil de Golgi dans le processus sécrétoire. Il existe une concentration progressive des produits, probablement par déshydratation, dans les grandes vacuoles localisées au centre de l'appareil de Golgi. Ces vacuoles sont appelées vacuoles de concentration, elles se transforment progressivement en grains de zymogène. On connaît donc le rôle des vacuoles de concentration. Ce n'est pas le cas des petites vacuoles lisses à la périphérie de l'appareil de Golgi. Les auteurs en sont réduits aux hypothèses : elles joueraient le rôle de navettes entre le RER et les vacuoles de concentration.

#### 4.4. Réflexions sur les idées émises de 1958 à 1967

On voit qu'en 1958, les grands problèmes sont déjà définis. Aucun n'est résolu même s'il existe de fortes présomptions. Chaque question posée apporte avec elle de nouvelles questions et demande de nouvelles expériences.

**Certaines de ces questions sont bien celles que se sont posées des élèves confrontés au graphique et elles correspondent bien à une interrogation pertinente** liée au doute, à l'imagination, c'est-à-dire à l'image que chacun s'est faite du phénomène. Désormais, on conçoit qu'un élève est fondé à se demander, par exemple, s'il n'y aurait pas plusieurs sites de synthèse !

D'autre part, avec un peu de recul, on s'aperçoit que l'année 1959 fut une année charnière et donc intéressante. Les idées s'y opposent ou se recoupent. On hésite encore sur les lieux de transfert des protéines du RER aux grains de zymogène : passent-elles à travers le hyaloplasme, à l'état soluble, comme le pensent Morris et Dickman (28) ou bien sont-elles incluses dans un système membranaire, ce qui amènerait à étudier l'appareil de Golgi qu'on ne distingue pas encore du RER, au plan fonctionnel ?

Cette dernière position est défendue par Sjöstrand et Hanson depuis 1954. Ils se fondent sur l'étude microscopique et les relations intimes entre l'appareil de Golgi et les grains de zymogène. Plus tard, ils ont décrit des grains dans la zone de Golgi, qui semblent représenter la série complète des étapes de formation, du plus petit grain au granule bien caractéristique. D'autres auteurs confirment, Palade, en 1959, propose que les granules soient formés dans le RER. On voit donc que le savoir

1959 : année des  
mises au point...  
d'interrogation !

la protéine est  
passée par ici...  
repassera par  
là...

---

28. Ibid (19)

est hésitant dans sa construction et qu'on ne suit pas une voie linéaire vers la connaissance définitive. Pourquoi l'élève n'aurait-il pas le droit d'être tout aussi hésitant ?

pour se retrouver  
dans l'appareil de  
Golgi

En 1961, Caro et Palade écrivent : "*En conclusion, nos résultats ont confirmé et précisé l'ancienne hypothèse (1924-1929 / NDLR) du rôle actif de l'appareil de Golgi dans la formation des grains de sécrétion.*" Trente-sept ans pour commencer à rassembler des faits convergents susceptibles d'asseoir l'hypothèse ! Et il a fallu attendre 1964 (29) et surtout 1967 (30) pour avoir une idée encore plus précise. Les preuves, en effet, s'accumulent au cours du temps mais le **doute scientifique persiste**. C'est pourquoi Jamieson et Palade en 1964 (29) puis 1967 (30) imaginent la technique du pulse.

Les résultats obtenus permettent de corriger ceux obtenus en 1958 :

- il est clair que le marquage précoce des grains de zymogène à 20 mn, et avant, était dû à des artefacts expérimentaux (contamination de cette fraction par des vacuoles de concentration partiellement pleines).
- même remarque pour les fractions "mitochondries" et "noyaux". Après neuf ans d'aller et retour entre le modèle confronté aux faits et les résultats confrontés au modèle, des techniques ont été affinées et ont permis d'élucider le rôle des petites vacuoles péri-golgiennes.

Jamieson et Palade jettent donc les **bases du flux membranaire**. Le modèle du compartimentage s'affirme et se consolide, avec le rôle de l'appareil de Golgi dans l'économie du système endomembranaire de la cellule.

difficultés à faire  
fonctionner le  
modèle du  
compartimentage

C'est peut-être l'assimilation de ce modèle qui pose problème à l'élève car il est délicat de le faire fonctionner (31), les propriétés membranaires étant multiples (souplesse, déformabilité, fusion, réactivité, perméabilité ou non aux protéines selon les cas ...) et posant de nombreux problèmes (deux exemples : comment sont déplacées les vésicules golgiennes à l'intérieur du cytoplasme ? La fusion de la membrane de ces mêmes vésicules ne devrait-elle pas réduire la surface des membranes du RER et augmenter la surface de la membrane cytoplasmique ? ...).

Signalons, pour terminer ce paragraphe, que le mot compartimentation, très souvent employé, n'existe pas dans notre langue. Il devrait être abandonné au profit du mot compartimentage, désignant à la fois la division et l'action de diviser.

29. Ibid (27)

30. J. JAMIESON, G. PALADE, "Intracellular transport of secretory proteins in the pancreatic exocrine cell", *Journal of cell biology*, 34, 1967, 577 (I) et 598 (II)

31. Ibid (5)

## CONCLUSION

Ce travail de retour aux sources historiques a donc montré :

- d'une part, que **sans connaissances précises en physique, les représentations préexistantes de l'élève le conduisent à imaginer des hypothèses divagantes ou ne relevant pas de la science.**
- d'autre part, **qu'il existe une exacte superposition entre les solutions biologiques proposées par les élèves et les hypothèses formulées par le chercheur.**

Les hypothèses qui ont servi de base à ce travail semblent donc validées.

On retirera de cette réflexion qu'il est toujours intéressant de prendre en considération, à partir de copies d'élèves, les réponses inattendues, considérées comme fausses et qu'il faut, dans ce cas, évaluer la qualité de la copie avec prudence et sagesse.

Beaucoup d'erreurs ne sont pas dues à un manque de travail ou à des capacités intellectuelles vacillantes. Certaines peuvent guider le professeur vers une autre voie, une autre technique d'enseignement et le rendre prudent vis-à-vis du document et l'amener à mieux connaître son histoire et les conditions de sa naissance.

Cette étude nous laisse à penser que cet exercice n'est guère utilisable en dehors de son contexte historique et sans apprentissage de la technique. Autrement utilisé, il montre que notre discipline tend à s'orienter de plus en plus vers les savoirs, en utilisant les expériences comme alibi et non comme support réel d'analyse.

Notre science expérimentale deviendrait-elle moins expérimentale ?

Si le professeur ne demande que de restituer la leçon : RER - - Appareil de Golgi - - Vésicules, le document n'est pas nécessaire. Nous avons essayé de montrer qu'il s'agissait d'une fausse analyse et que la méthode utilisée ne consistait plus à prouver par l'analyse d'un document mais à déclencher une restitution grâce à un document censé orienter cette récitation. Lorsque le document rend possible des interprétations multiples, il est aisé de comprendre qu'on va au devant de surprises...

Il serait cependant dommage d'abandonner ce graphique. Il permet d'évaluer plus que la simple connaissance de l'origine et du transfert des protéines dans la cellule sécrétrice. En effet, l'étude, en cours, du graphique avec analyse critique justifiant des rappels historiques, est bien une activité développant l'esprit expérimental, **même s'il n'y a pas de manipulation réelle.**

validation des hypothèses de départ

pour que les expériences ne soient pas des alibis mais des bases concrètes d'analyse

l'exercice doit être travaillé en phase d'apprentissage et non en évaluation finale

intérêts de l'étude  
historique

Les nouveaux programmes de Terminale D prévoient l'étude de *"fonctionnement et de structure d'une cellule sécrétrice dans le cadre de l'activité de deux cellules différenciées - cycle de la matière et flux d'énergie."* On peut se demander si ce chapitre ne pourrait pas justifier une étude historique, même légère (avec coopération du professeur de philosophie). Cela permettrait :

- d'aborder des techniques et de relier le théorique au pratique.
- de relier des notions appartenant à divers chapitres. En effet, l'étude d'une cellule sécrétrice relève de la même attitude d'esprit que celle du physiologiste qui veut établir des relations d'information, par exemple, entre tel et tel organe (par ablation ou section de nerf...).

relier des notions  
de domaines  
différents

Les techniques tentent d'éclaircir les mécanismes d'information de la matière première (synthèse des protéines) et de les localiser, puis de révéler dans quel état et selon quel trajet les molécules informées sont transférées, stockées et rejetées. On cherche à savoir par où est passé cette molécule de même qu'on essaie de savoir par où est passée une hormone (analyse du sang) ou un message nerveux (enregistrement des potentiels d'action).

On utilise des instruments qui correspondent à la nature du message mais le **modèle qui appelle ces techniques est toujours le même.**

- enfin, montrer comment se construit une science (32) permettrait certainement d'enrichir l'enseignement en lui apportant une nouvelle dimension, comme a tenté de le montrer Claude Allègre (33) :

*"... L'élaboration des théories scientifiques est présentée comme des suites logiques où les - par conséquent - succèdent aux - donc -. Or ce type de raisonnement n'a aucun rapport avec la manière dont les scientifiques explorent et déchiffrent les lois de la nature pour bâtir les sciences. Découvrir les lois de la nature c'est d'abord observer, mesurer, classer des objets, c'est étudier des phénomènes dont la logique est complexe, les causalités multiples et interconnectées. C'est ensuite, par des structurations successives, des hiérarchisations simplificatrices, construire des modèles, représentations du monde dont l'élaboration conduit à la formulation abstraite. Ces modèles une fois bâtis, deviennent des outils pour continuer l'exploration de la nature, mais ce sont des outils provisoires... La science progresse par le va-et-vient incessant entre le réel et l'abstrait, entre la théorie et*

appréhender  
avec justesse  
l'évolution de la  
science

32. J.L. CANAL, "Modèles et apprentissages", *compétences méthodologiques en sciences expérimentales*, n°4, Paris INRP-DP1, juin 1988, 25-26 (rapport de recherche interne non publié)

33. C. ALLÈGRE, "Platon vs Aristote : l'équilibre de l'enseignement des sciences en France", *Pour la Science*, n°121, novembre 1987, 7.

*l'observation, et ce va-et-vient ne conduit pas toujours à des évolutions simples, logiques, prévisibles...*

C'est cette démarche qu'il faut enseigner à nos élèves et à nos étudiants."

Alain MONCHAMP  
Lycée Plaisir-Grignon  
Jacques DEWAELE  
Lycée Aulnay-sous-Bois

Pour plus de renseignements sur les traceurs et l'autoradiographie, on pourra se reporter à l'Encyclopédie Internationale des Sciences et Techniques, Paris, Presses de la Cité.

D'autre part, Schoenheimer R., Ratner S., Rittenberg D., ont publié de nombreuses études utilisant des isotopes lourds (exemple : "The metabolism activity of body proteins investigated with  $^{14}\text{C}$  leucine containing two isotopes", *Journal of Biological Chemistry*, 130, 1939, 703). Il semble qu'il s'agisse des tout premiers travaux, portant sur la conversion d'acides aminés.

Les auteurs remercient Mme Ollivier-Bousquet (INRA - Jouy-en-Josas, Yvelines) pour avoir grandement facilité leur recherche bibliographique.



# L'ÉPREUVE ÉCRITE DE BIOLOGIE AU BACCALAURÉAT FAIT-ELLE APPEL AU RAISONNEMENT EN SCIENCES EXPÉRIMENTALES ?

Babacar Gueye

*L'épreuve de Biologie au baccalauréat a été réformée en France en 1969, dans le but de tester davantage l'intelligence que la mémoire des élèves. Dans la thèse de doctorat soutenue par Babacar Gueye, celui-ci fait un inventaire des sujets proposés au Sénégal (la même réforme y a été officiellement adoptée en 1977) avant de les catégoriser selon leurs thèmes, leur élaboration, leur présentation et plus profondément leur conception.*

*Cet article, s'inspirant de la deuxième partie de ce travail, analyse sur quelques exemples l'écart qui existe entre les intentions exprimées dans les textes officiels et la pratique réelle du baccalauréat.*

l'évaluation n'est pas toujours facile, c'est ainsi que...

L'enseignement d'une discipline forme un tout dans lequel est comprise son évaluation. Or, de tous les éléments d'un curriculum, l'évaluation est sans doute le plus difficile à mettre en place.

En France l'épreuve écrite de Biologie au baccalauréat a beaucoup évolué depuis le début du siècle dans le sens d'une meilleure évaluation de l'acquis des élèves sur la démarche expérimentale.

Dans une étude précédente (Gueye, 1988) nous avons montré que de 1910 à 1969 cette évolution s'est déroulée en trois étapes:

- de 1910 à 1950, les sujets proposés demandaient aux élèves la restitution de mémoire de connaissances apprises par coeur avec cependant un effort de composition ;
- entre 1951 et 1968, les premières tentatives d'évaluation de l'acquis des candidats en travaux pratiques débouchèrent sur des sujets de restitution de mémoire de protocoles expérimentaux ;
- à partir de 1969, les sujets commencèrent à être construits sous forme de "problèmes" comme en physique et en mathématiques à la suite des instructions ci-dessous :

l'épreuve de Biologie au baccalauréat a connu trois réformes de 1910 à maintenant

## Document 1

*Instructions pour les épreuves du baccalauréat 1969*

Extrait de la circulaire n°IV 68-470 du 25 novembre 1968

(B.O. n°42 du 28 novembre 1968. p.3147)

Epreuve écrite de la série D (Horaire : 2H30)

*Deux sujets, empruntés à deux parties différentes du programme sont proposés au choix du candidat. L'intention de cette épreuve est bien moins de mesurer l'ampleur d'un savoir que d'apprécier des qualités d'analyse, l'aptitude à la réflexion, l'esprit de synthèse, la manifestation d'une pensée logique et l'expression correcte de cette pensée.*

*Les sujets proposés feront donc appel moins à la mémoire qu'à l'intelligence. A cette fin, ils prendront la forme de problèmes à résoudre. Comme il est fait au cours d'exercices pratiques, une documentation sera soumise aux candidats. Cette documentation pourra prendre les aspects les plus divers : tableaux de mesure ou graphes correspondants, tracés d'enregistrement graphiques, dessins, photographies, comptes rendus d'expérience, textes, etc. Il leur sera demandé de "manipuler" cette documentation, de l'exploiter, s'il est possible à la fois de façon qualitative et quantitative, d'exprimer, dans une courte rédaction, la démarche de la pensée, au terme, de formuler des conclusions.*

*Une telle épreuve ne peut surprendre les candidats.*

*Elle est conforme à l'orientation donnée aux nouveaux programmes, à l'importance accordée aux travaux pratiques, aux méthodes utilisées dans l'enseignement des Sciences Naturelles et aux intentions majeures de cet enseignement.*

le but de la dernière réforme était d'évaluer les raisonnements des élèves

Dès 1971, en France, le doyen de l'inspection générale Campan lançait ces propos qui furent le départ d'un ensemble d'investigations concernant l'épreuve de Biologie au baccalauréat : "A la suite de deux années d'expériences sur un nouveau style des sujets des épreuves écrites, il nous a paru nécessaire de provoquer et d'entreprendre une recherche véritable sur la mise en oeuvre des qualités des élèves à ce niveau, sur leur détection et leur meilleure appréciation" (Campan, 1971).

elle a fait l'objet de quelques recherches que nous poursuivons

De nombreuses études virent ainsi le jour dans plusieurs académies. Parmi celles-ci la plus importante fut menée à Lille. Les travaux publiés par le CRDP en 1974 avaient pour objectif de trouver les meilleurs moyens de tester les capacités des élèves. En 1977, le CRDP de Paris consacra le n°10 du bulletin de liaison des professeurs de Biologie-Géologie à la définition des objectifs de l'enseignement des Sciences Naturelles en Terminale et au baccalauréat. On y trouve des réflexions assez critiques sur différents aspects des sujets : les objectifs testés, le questionnement, la notation.

Notre étude rejoint ces derniers travaux, de manière beaucoup plus approfondie, au Sénégal où les sujets de Biologie au



baccalauréat sont pratiquement similaires à ceux proposés en France.

Le but de l'épreuve sur documents telle qu'elle est définie dans la circulaire citée est de placer l'élève devant une situation problématique, c'est-à-dire tant soit peu nouvelle par rapport à ce qu'il fait habituellement en classe. Elle doit donc se présenter de telle sorte que le candidat puisse par un effort de transposition faire la preuve de connaissances et de démarches devenues opérationnelles et pas seulement stockées dans sa mémoire.

L'étude que nous avons menée révèle différents éléments qui méritent réflexion.

## 1. HIÉRARCHIE DES CHAPITRES DU PROGRAMME

il y a des  
préférences dans  
les chapitres du  
programme

Tous les chapitres du programme de terminale ne sont pas également considérés par les concepteurs de sujets de Biologie au baccalauréat, il y a des préférences. C'est ainsi que les chapitres sur la génétique et l'endocrinologie sont très fréquentés alors que celui de l'évolution est complètement abandonné.

### 1.1. La génétique

Bien que présentés sous forme de problèmes, les exercices actuels de génétique ne permettent pas la démonstration des qualités de réflexion les plus importantes (formulation d'hypothèses, confrontation avec les résultats, etc).

la génétique est  
omniprésente

Les limites que nous avons constatées sont liées à la matière elle-même qui, pour des raisons évidentes de matériel et de temps ne permet aucune expérimentation en classe ; mais surtout à l'approche historique que l'on fait de ce chapitre à partir des travaux de Mendel. Cette approche ne laisse pas beaucoup de place à des questions originales pouvant évaluer la capacité des élèves à formuler eux-mêmes des hypothèses et à trouver leurs implications vérifiables. Les questions posées sont souvent des questions de cours, partielles et fragmentaires, qui n'insistent que sur certains points de raisonnement (le caractère est-il dominant ? le caractère est-il récessif ? etc).

Il y a aujourd'hui, en génétique, au baccalauréat trois situations types que l'on peut distinguer en fonction du document de base qui a servi à les construire :

- à partir des résultats d'une deuxième génération (F<sub>2</sub>),
- à partir des résultats d'un croisement retour,
- à partir d'un arbre généalogique.

Pour les deux premiers cas, il y a une très grande variabilité des données numériques concernant les proportions d'individus présentant les mêmes caractères lors d'un croisement (voir quelques exemples dans le document n°2), alors que les solu-

tions à ces problèmes sont au nombre de deux : les gènes sont liés ; les gènes ne sont pas liés.

**Document 2**

Proportions d'individus présentant différentes combinaisons de caractères selon que les gènes qui les portent sont indépendants ou liés

<i>Données numériques</i>	<i>Pourcentage</i>	<i>Solutions</i>
2834 920 951 287 4992	56,77 % 18,42 19,05 5,74	<i>Les gènes sont indépendants</i>
1677 567 573 183 3000	55,90 % 19,10 19,10 6,10	<i>Les gènes sont indépendants</i>
7304 2431 2422 809 12966	56,33 % 18,74 18,67 6,23	<i>Les gènes sont indépendants</i>
1085 49 40 305 997	73,40 % 3,30 2,70 20,60	<i>Les gènes sont liés</i>
876 38 32 264 1200	73,00 % 3,16 2,66 22,00	<i>Les gènes sont liés</i>

Cette situation fait qu'il n'y a qu'un seul petit nombre de problèmes qu'on peut inférer facilement par algorithme à partir des résultats présentés, alors qu'on peut avoir l'illusion d'une certaine variété.

### Document 3

*"On croise une drosophile de race pure à antennes longues et ailes droites avec une drosophile de race pure à antennes courtes et ailes arquées. Les descendants de la F1 (première génération) ont tous des antennes longues et des ailes droites. On croise entre eux un mâle et une femelle de cette première génération. On obtient :*

*2834 drosophiles à antennes longues et ailes droites.*

*920 drosophiles à antennes longues et ailes arquées.*

*951 drosophiles à antennes courtes et ailes droites.*

*287 drosophiles à antennes courtes et ailes arquées.*

*Expliquez ces résultats à partir des génotypes parentaux et en faisant l'échiquier de croisement de la deuxième génération F2".*

Pour expliquer ces résultats, l'élève doit :

- reconnaître qu'il s'agit d'un dihybridisme ;
- reconnaître les caractères dominants et les caractères récessifs ;
- reconnaître les proportions qui permettent de dire que les gènes sont indépendants ;
- faire l'échiquier de croisement.

Il est donc clair que devant ces questions de génétique, les élèves vont rechercher dans l'ensemble des explications qu'ils connaissent, celles qui sont conformes aux résultats, puisqu'on leur demande toujours de sortir la bonne hypothèse. On ne leur propose jamais d'exclure une hypothèse en leur demandant, par exemple de montrer que tel caractère n'est pas lié aux chromosomes sexuels.

En génétique humaine, les généalogies présentées permettent toujours de formuler de bonnes réponses alors qu'on pourrait (dans des cas où le nombre d'enfants est insuffisant) amener l'élève à l'impossibilité de conclure, donc l'obliger à formuler des hypothèses, à donner des cas possibles ou probables ; ce qui serait plus conforme à l'esprit de la circulaire.

Nous retiendrons finalement que ce n'est pas parce qu'elle permet de mieux évaluer les différentes qualités de raisonnement que la génétique est si présente au baccalauréat.

C'est simplement parce que les concepteurs de sujets cèdent à la facilité et à la rapidité de conception d'exercices qui apparemment constituent des "problèmes" ; c'est aussi ce qui donne lieu le plus facilement possible à quelque chose qui ressemble à un exercice de mathématique.

## 1.2. L'endocrinologie

Le succès de l'endocrinologie au baccalauréat était tout à fait prévisible. On dispose dans ce chapitre de nombreux résultats expérimentaux qui, en principe, peuvent permettre de vérifier chez l'élève l'acquis de nombreux objectifs de méthode tels que l'analyse, la formulation d'hypothèses, la synthèse.

l'endocrinologie  
aussi...

En effet, si nous nous référons au programme tel qu'il est défini, les professeurs ont la possibilité pédagogique de n'étudier qu'une seule glande endocrine de leur choix et de faire acquérir à l'élève, en plus des connaissances anatomiques et physiologiques, la méthodologie démonstrative de l'endocrinologie : ablation, réimplantation, réalisation d'extraits que l'on injecte dans la circulation sanguine.

On considère alors que l'élève arrive au baccalauréat avec ce savoir procédural qu'il devra transposer ; c'est-à-dire que pour éviter la répétition dogmatique, on doit proposer à l'examen un exemple non étudié en classe : l'intention est claire et correcte. Sa réalisation en génétique a déjà été critiquée (simple changement de données numériques). Ici, elle devrait pouvoir se mettre en oeuvre plus nettement puisqu'on change de glande ; mais aujourd'hui, presque tous les problèmes concernant les différentes glandes endocrines sont traités dans les annales de sujets corrigés du baccalauréat.

Notre étude révèle l'existence dans les sujets du baccalauréat d'un nombre de situations types limité à trois qui sont dans l'ordre :

- montrer l'existence d'une action hormonale à partir d'une expérience d'ablation suivie d'une greffe de la même glande à un autre endroit du corps ;
- montrer qu'une glande X est contrôlée par une glande Y lorsque l'ablation de Y entraîne l'absence du fonctionnement de X ;
- situer les localisations du recontrôle d'une glande endocrine. Ici il s'agit le plus souvent de l'action des hormones sexuelles sur l'hypothalamus.

mais elle n'offre  
plus de possibilités  
de transposition  
et de  
raisonnement

Actuellement, presque toutes les expériences dont on demande l'analyse sont précisément les supports didactiques qu'utilisent les professeurs pour faire leurs cours. On retombe donc au baccalauréat sur des questions qui, malgré les apparences de la forme sont des questions de cours. On ne fait pas faire à l'élève la transposition souhaitée ; il s'agit pour lui de répéter face à chaque situation les explications déjà faites en classe.

On ne teste pas non plus l'esprit de synthèse ; ce qu'on pourrait faire, en demandant à l'élève de réutiliser ses connaissances dans une situation un peu inattendue comme celle-ci : lorsqu'on effectue l'ablation de l'hypophyse suivie quelques jours après d'une injection de FSH seulement, l'élève doit pouvoir dire que certaines conséquences de l'ablation vont disparaître alors que d'autres vont demeurer puisque l'hypophyse fabrique plusieurs hormones. Ce genre de situation entre autre n'a

jamais été proposé. On pourrait également dans certains cas demander à l'élève de proposer des expériences pour tester des hypothèses. L'exercice reproduit ci-dessous et extrait d'un sujet de baccalauréat pourrait être transformé dans ce sens.

#### Document 4

*"L'injection répétée d'un mélange d'oestrogènes et de progestérone à une femelle de mammifère provoque l'arrêt des cycles ovariens et hormonaux. La femelle devient stérile.*

*1°) Formuler plusieurs hypothèses sur le niveau d'action possible des oestrogènes et de la progestérone injectés.*

*2°) On répète cette expérience en dosant simultanément les hormones hypophysaires FSH (hormone de stimulation des follicules) et LH (hormone lutéinisante) dans le sang de la veine hypophysaire. L'injection précédente provoque le blocage de FSH et de LH par l'hypophyse. Cette réaction de blocage ne s'effectue plus si la tige pituitaire reliant hypothalamus et hypophyse est sectionnée.*

*Ces données permettent-elles de conclure sur le niveau d'action des oestrogènes et de la progestérone ? "*

L'enchaînement de ces deux questions dans le même exercice ôte à la première une partie de son sens. En effet, une partie des hypothèses que l'on demande à l'élève de formuler forme celles que l'on teste dans la deuxième. On devrait logiquement transformer la deuxième question en une demande de proposition d'expériences pour corroborer ou infirmer les hypothèses proposées. C'est ce travail-là qui demanderait à l'élève de mobiliser ses connaissances sur la relation entre hypothalamus - hypophyse et ovaires. Car il est sensé savoir que l'hypothalamus agit sur l'hypophyse qui sécrète FSH et LH, qui stimulent l'ovaire, respectivement pour les oestrogènes et pour la progestérone ; ces derniers pouvant à certains taux dans le sang bloquer le fonctionnement de l'hypothalamus par rétroaction.

Pour terminer sur ce point, nous dirons que dans le fond, il n'y a aucune différence entre les anciens exercices d'endocrinologie et ceux d'aujourd'hui du point de vue des objectifs réellement évalués. Là aussi les auteurs cèdent à la facilité et à la rapidité de conception des exercices grâce à l'abondance des résultats expérimentaux. L'originalité des exercices d'endocrinologie se trouverait peut-être dans la possibilité de proposer des expériences, de les critiquer et de dire en quoi certaines expériences prouvent ou infirment certaines hypothèses.

### 1.3. L'évolution

Au regard de la définition des sujets de Biologie au baccalauréat, on pouvait également prévoir l'exclusion de ce chapitre. En effet, avec l'avènement des méthodes dites "actives" et

l'évolution est  
abandonnée

l'étude de la méthode expérimentale prétendue unique avec observation, hypothèse, expérience, résultats, interprétation, conclusion (OHERIC), la physiologie a pris le pas sur l'anatomie. Or, l'étude de l'évolution demande la maîtrise de l'anatomie comparée des êtres vivants ; ce qui implique beaucoup de connaissances difficiles à mémoriser qui ont longtemps fait considérer les sciences naturelles comme une matière de pure mémoire. De plus, ce chapitre n'offre pas comme celui sur la génétique la possibilité de construire des "problèmes" de pure forme.

## 2. LES PIÈGES DE L'ORIGINALITÉ ET DU RAISONNEMENT

L'étude des sujets semble montrer que les concepteurs se heurtent à deux obstacles majeurs : les techniques et le raisonnement.

### 2.1. Le problème des techniques expérimentales

ce type  
d'épreuve s'est  
heurté

La Biologie est une science expérimentale. Or, qui dit expérience dit technique. Avant l'avènement de cette réforme, les travaux pratiques évoqués en classe et à l'examen obéissaient presque tous à un seul critère, celui de leur faisabilité en classe par le professeur ou par les élèves eux-mêmes.

Exemples :

- l'enregistrement des contractions du cœur isolé
- la mesure de la sécrétion pancréatique
- l'enregistrement du potentiel d'action d'un nerf

Ce sont là des manipulations que les futurs professeurs avaient faites en Faculté des Sciences et qu'ils transposaient au niveau des élèves. Les premiers sujets proposés dans le cadre de cette réforme furent bâtis autour de ces techniques classiques.

Quelques années plus tard on s'est aperçu que dans de nombreux chapitres du programme, les types de sujets nouveaux que l'on pouvait construire sur la base des expériences traditionnelles devenaient de plus en plus rares. C'est ainsi que les concepteurs de sujets se lancèrent dans la recherche forcenée de l'originalité des exercices proposés en puisant des résultats expérimentaux et des documents dans des revues spécialisées et dans des livres de niveau universitaire. De ce fait on s'est vite trouvé en face de nombreuses techniques nouvelles qui, pour des raisons matérielles, financières et de sécurité sont irréalisables en classe.

Exemples :

- l'électrophèse
- l'immunofluorescence
- la photolorimétrie
- l'autoradiographie...

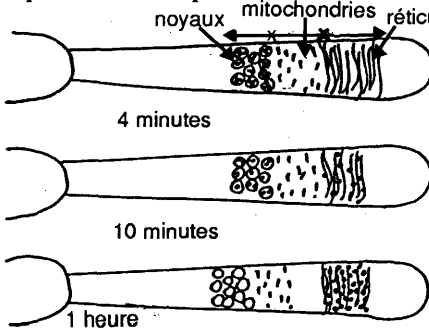
aux techniques  
modernes que les  
professeurs ne  
maîtrisent pas...

Le travail de rédaction des sujets autour de ces techniques exige de la part des concepteurs la recherche d'un niveau de langue et de connaissances compréhensibles par les élèves. Les résultats montrent dans bien des cas des défauts dont voici quelques exemples.

- Des simplifications trop rapides

#### Document 5

"Dans une cellule qui ne se divise pas, le noyau a-t-il un rôle ? Dans le but de répondre à cette question, Zalokar réalisa l'expérience suivante en 1960.



Des cellules de champignon sont placées trois minutes dans un milieu nutritif contenant une substance radioactive, l'uridine tritiée. Puis elles sont transplantées sur un milieu non radioactif ou milieu froid, pendant un temps variable. Les cellules sont ensuite tuées puis la radioactivité est détectée par une technique spéciale. Les résultats sont schématisés par le document E".

Document E : Le temps indiqué est celui du passage sur milieu froid ; les points localisent la radioactivité.

et qui sont parfois escamotées dans leur description

Ce qui frappe dans la description de l'expérience c'est le nombre d'éléments absents qui appellent un certain nombre de questions :

- à quoi sert la transplantation dans un milieu non radioactif ?
- qu'est ce que la centrifugation ?
- où sont les autres éléments cellulaires ?

L'expérience telle qu'elle est relatée présente des implicites qui font obstacle à la compréhension de la technique utilisée et des simplifications qui risquent d'induire chez l'élève des idées erronées sur les différents organites de la cellule.

- Des erreurs scientifiques

#### Document 6

"Des levures (êtres vivants unicellulaires) sont placées en aérobiose dans une atmosphère riche en oxygène radioactif ( $^{18}\text{O}$ ) et sur un milieu nutritif contenant des acides organiques marqués par du carbone radioactif ( $^{14}\text{C}$ ) au niveau de leur radicaux "carboxyl" ( $-\text{COOH}$ ).

N.B. : On rappelle que les éléments radioactifs  $^{18}\text{O}$  et  $^{14}\text{C}$  ont les mêmes propriétés que les éléments normaux  $^{16}\text{O}$  et  $^{12}\text{C}$ . On recueille le gaz carbonique dégagé, par respiration, par ces levures. Après analyse, on a déterminé que seul le carbone du  $\text{CO}_2$  était radioactif ; l'oxygène était de l'oxygène normal".

ou exposées  
avec des  
confusions

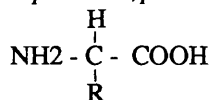
Le fait de considérer  $^{18}\text{O}$  comme un isotope radioactif de l'oxygène n'est pas exact.  $^{18}\text{O}$  est en réalité un isotope lourd de l'oxygène. Il y a là une confusion regrettable entre isotope lourd et isotope radioactif. Le fait d'utiliser  $^{18}\text{O}$  ne gênera pas le raisonnement de l'élève. Mais il y a des vérités scientifiques qui ont été établies de manière incontestable et il faut les respecter. Les isotopes radioactifs de l'oxygène sont des isotopes de synthèse ( $^{14}\text{O}$ ,  $^{15}\text{O}$ ,  $^{19}\text{O}$ ) (Creuse, 1985).

## 2.2. Les modalités de raisonnement

On trouve fréquemment dans les sujets proposés des modalités de raisonnement qui sont tout à fait critiquables.

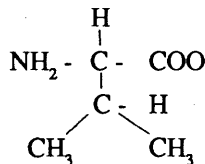
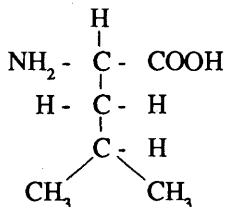
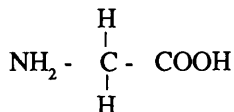
### Document 7

"Le pancréas est un organe sécréteur qui élabore, entre autre, le suc pancréatique. Ce suc est fabriqué dans les cellules des acinis sous la forme de grains de zymogènes. Pour connaître l'activité sécrétoire des cellules pancréatiques, on procède à des expériences d'autoradiographie. Elles consistent à injecter des substances radioactives à un lot de cobayes que l'on a mis à jeûner 48 heures auparavant, puis nourris. On injecte de nombreux corps de formule générale :



où R est un radical variable suivant les corps choisis. Trois de ces corps contiennent du tritium ; hydrogène radioactif :  $\text{H}_3$ .

Leurs formules sont les suivantes :



1°) Comment classez-vous ces corps ? Justifiez votre réponse.

Des coupes de pancréas fixées sont mises en contact à l'obscurité avec une émulsion photographique sensible aux rayonnements radioactifs. On peut ainsi savoir précisément où se trouvent, dans la cellule, les corps radioactifs précédemment injectés aux animaux.

- 5 minutes après l'injection, la radioactivité est localisée aux tubules du réticulum endoplasmique.

- 20 minutes après l'injection, la radioactivité est localisée dans les dictyosomes de l'appareil de Golgi.

- 4 heures après l'injection, elle est localisée dans les grains de zymogène.

- 4h30 après l'injection, la radioactivité est toute entière dans la lumière des acinis.

2°) Les cellules ont donc utilisé les corps fournis. Schématisez sur la figure 3 le trajet suivi par ces corps dans la cellule pancréatique."



...un  
raisonnement qui  
souvent manque  
de rigueur

...ce qui conduit  
à des déductions  
hâtives

Tout d'abord nous signalerons que le symbole du tritium est  $^3\text{H}$  et non  $\text{H}_3$  ! Ensuite l'auteur semble dégager l'utilisation des corps fournis à partir du cheminement de la radioactivité. Ce raisonnement ne tient pas. En effet l'autoradiographie dans ce cas ne suffit pas à prouver l'utilisation des corps injectés. Tout ce que l'on peut dire c'est que des éléments radioactifs sortent de la cellule et rien ici ne montre que ce ne sont pas les substances radioactives injectées au départ qui sont ressorties telles quelles. Pour savoir si les éléments de départ ont été utilisés, il faudrait faire une expérience complémentaire qui permettrait de montrer que les corps sécrétés par la cellule sont différents de ceux injectés au départ et les intègrent. En fait tout ceci sert de prétexte pour faire réciter au candidat ce qu'il sait sur la synthèse des protéines.

### Document 8

*"On dispose de quatre races de plants de tomates :*

- la race A possède des tiges glabres et des fruits portés par des pédicelles ;
- la race B possède des tiges velues et des fruits sans pédicelles ;
- la race C possède des tiges glabres et des fruits sans pédicelles ;
- la race D possède des tiges velues et des fruits avec pédicelles ;

*1) Le croisement d'un plant de race A avec un plant de race B donne en F1 des plants à tiges velues et fruits à pédicelles.*

*Interprétez ce résultat.*

*2) Un plant F1 issu du croisement précédent est croisé avec un plant de race C.*

*On obtient la descendance suivante :*

- 1209 plants à tiges glabres et fruits avec pédicelles.*
- 1191 plants à tiges velues et fruits sans pédicelles.*
- 292 plants à tiges velues et fruits avec pédicelles*
- 308 plants à tiges glabres et fruits sans pédicelles.*

*En utilisant un raisonnement logique, interprétez ces résultats. On exploitera au maximum les données fournies."*

L'analyse descriptive de la tâche donne ceci :

- 1° reconnaître les caractères dominants et les caractères récessifs ;
- 2° reconnaître que c'est un croisement retour ; retrouver la relation entre les gènes ;  
donner une explication chromosomique ;  
faire des croisements avec un symbolisme adéquat.

Une relecture attentive à l'aide d'un raisonnement logique comme il est demandé dans la deuxième question nous mène

des réponses  
logiquement  
impossibles à  
donner

à ceci: à la première question nous pouvons dire que le croisement indiqué donne une descendance identique à l'un des parents. Ce qui signifie que les caractères "velues" et "avec pédicelles" sont héréditaires. Nous n'avons pas la preuve que les caractères "glabres" et "sans pédicelles" le sont à leur tour et qu'ils sont présents dans le patrimoine génétique des individus de la F1. Ceci fait qu'il est impossible de se prononcer sur la dominance ou la récessivité de tel ou tel caractère.

La difficulté est due au fait que l'auteur n'a pas précisé qu'il s'agissait de racés pures pour les caractères considérés. Si cela était fait on aurait su dès le départ que les caractères considérés sont héréditaires et qu'ils sont présents dans la descendance. Ceci aurait permis de dire avec certitude que tel caractère est dominant et que tel autre est récessif.

### Document 9

*"Pour préciser le mode d'action de l'hypophyse, on réalise les deux expériences suivantes :*

*1ère expérience : Deux rates sont réunies par leur cavité générale grâce à une suture latérale dans la peau des muscles abdominaux et de leurs vaisseaux sanguins. Cette opération appelée parabiose est réalisée entre une femelle castrée et une femelle hypophysectomisée (document 2). L'ovaire de la rate hypophysectomisée reprend alors un aspect normal. Des dosages plasmatiques montrent que les cycles hormonaux reprennent et la femelle hypophysectomisée redevient fertile.*

*2ème expérience : La stimulation électrique d'une région bien précise de l'hypothalamus chez la lapine provoque l'ovulation. Cette stimulation est sans effet si on sectionne auparavant la tige pituitaire reliant l'hypothalamus à l'hypophyse (document 3).*

*A partir de l'analyse de ces deux expériences, préciser le mode d'action de l'hypothalamus et de l'hypophyse sur l'ovaire."*

certaines  
incohérences

Dans la première expérience, l'auteur parle de rate et dans la deuxième de lapine. On peut alors se demander de quels hypothalamus, hypophyse et ovaire il s'agit ? A-t-on le droit de ne pas tenir compte de la variabilité interspécifique, surtout que chez la lapine l'ovulation est provoquée alors qu'elle ne l'est pas chez la rate ?

### 3. LE RETOUR À DES DOCUMENTS DÉJÀ VUS EN CLASSE

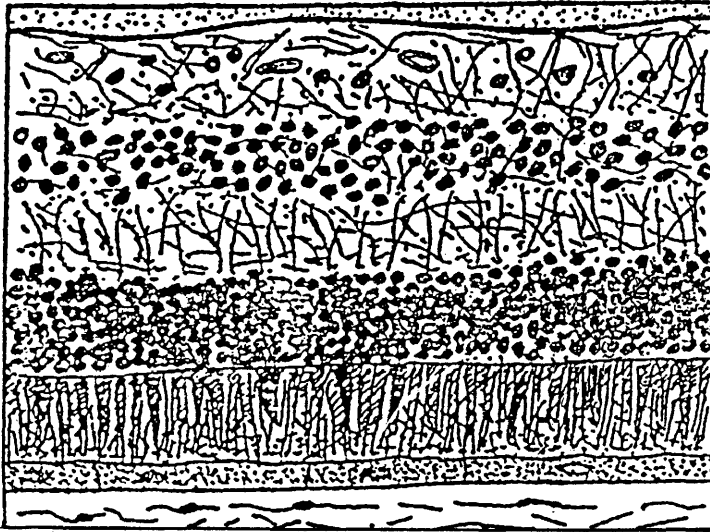
Aujourd'hui on peut se rendre compte que la tendance à utiliser des supports documentaires nouveaux tirés de la Biologie fondamentale moderne est en train de s'estomper. Les docu-

le retour au  
contrôle des  
connaissances  
mémorisées est  
de plus en plus  
net

ments proposés sont de plus en plus similaires à ceux qui ont été utilisés en classe.

Du coup, les problèmes proposés ne le sont que par la forme. Les documents constituent des aides-mémoires et l'usage intempestif des termes "analyser", "interpréter", "commenter", "dédire" ne fait que cacher mal une demande de récitation de plus en plus évidente. Ces questions sont des questions de cours déguisées. En voici une illustration

### Document 10



*"Question : Interprétez cette micrographie de rétine vue à un fort grossissement."*

les documents ne  
sont souvent que  
des aides  
mémoires

Ici il y a un élément constant au baccalauréat qui est la mauvaise qualité de la micrographie de rétine. Les colorations présentées ne montrent que les noyaux et absolument pas les fibres et les synapses.

En fait, ce qui est demandé à l'élève c'est de reproduire, de mémoire, le schéma légendé des relations entre les différentes cellules de la rétine. D'ailleurs souvent il ne s'y trompe pas; malgré l'usage du mot "interpréter" qui semble faire appel à son esprit de raisonnement.

L'épreuve de Biologie au baccalauréat se trouve actuellement dans une situation telle que :

- la plupart des sujets, bien qu'ayant l'aspect de problèmes de Physique ou de Mathématiques, ne permettent pas de mesurer la maîtrise d'une pensée logique, puisqu'ils n'aboutissent pas à la rédaction d'un texte cohérent et précis ;

le raisonnement,  
les attitudes et les  
démarches ne  
sont pas évalués

- il existe de nombreuses questions qui, sous une forme déguisée par le style rhétorique que l'on donne à leur enchaînement, font beaucoup appel à la récitation de connaissances apprises par cœur ;
- les sujets proposés ne permettent pas d'évaluer les attitudes et les démarches des élèves. Ils sont beaucoup plus variés dans leurs contenus que dans les qualités de raisonnement qu'ils sont sensés mesurer ;
- beaucoup de sujets prennent des proportions trop importantes du fait qu'ils sont construits à partir d'expériences dont la description du déroulement et l'exposé des résultats donnent un texte trop long.

Le retour à des documents déjà vus, étudiés en classe, dans des manuels scolaires et dans des annales corrigées du baccalauréat fait que nous pouvons dire avec Gribenski que :

*"L'appel au raisonnement est donc une clause de style et un faux semblant ; ce qui est demandé aux candidats n'est qu'un exercice de rhétorique : rédiger habilement leur réponse en ayant l'air de ne pas savoir ce qu'ils savent parfaitement et que le correcteur sait qu'ils savent"* (Gribenski, 1971).

## CONCLUSION

Pour terminer cette analyse critique, nous dirons que l'épreuve de Biologie sur document au baccalauréat n'est presque jamais arrivée à évaluer plus l'intelligence que la mémoire des élèves. La plupart des sujets proposés n'appellent de la part des candidats que la récitation des connaissances mémorisées. C'est pourquoi nous dirons avec Gohau que :

*"Si l'on désire poser une question de cours, qu'on ne la déguise pas en une pseudodécouverte. Les épreuves sur documents ne doivent pas nous donner honte de poser des questions de cours. C'est absurde de poser en exercice un exposé de connaissances que les élèves tirent de leur mémoire en faisant comme s'ils le dégageaient des données du problème."* (Gohau, 1972)

Nous pensons que le maintien de l'épreuve sur documents dans le but de tester les capacités de raisonnement des élèves en Biologie nécessite au moins trois éléments préalables :

- la définition des programmes en termes de modalités de raisonnement et de techniques expérimentales que les élèves doivent maîtriser à la fin du secondaire ;
- une formation universitaire et pédagogique de professeurs qui tienne compte aussi bien des connaissances que des méthodes de recherche et de raisonnement en Biologie ;
- la recherche par des équipes pédagogiques de types de problèmes qui, entre autres permettent aux élèves :
- d'exclure certaines hypothèses plutôt que de corroborer les bonnes réponses connues par ailleurs,

se posent  
aujourd'hui les  
problèmes de la  
définition des  
programmes et  
de la formation  
des professeurs

- d'aboutir à l'impossibilité de conclure et à l'obligation de formuler d'autres hypothèses,
- de proposer des situations expérimentales pour tester des hypothèses.

Tant que ces trois éléments feront défaut, il sera illusoire "de s'appuyer sur les travaux pratiques, l'expérimentation et le raisonnement pour faire un sujet qui ne soit de pure mémoire"(Gribenski, 1971).

Babacar GUEYE  
Professeur de Sciences Naturelles, Dakar,  
Sénégal  
Docteur en didactique de la biologie,  
Paris 7

## RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

CAMPAN (F). "L'enseignement de la Biologie et de la Géologie, une évolution évolution permanente". *Cahiers pédagogiques* n°97, 1971, pp 12-33.

CREUSE (R). "Oxygène" in Encyclopédia Universalis, 1985, *Corpus* 13, pp 844-849.

FAVARD (P). "Réflexions d'un Président de la commission de choix des sujets de Sciences Naturelles" *Bulletin de liaison et d'information des Professeurs de Biologie-Géologie* (Paris) n°10, 1977, pp 19-20.

GOHAU (G). "A propos des épreuves sur documents" *Bulletin de l'APBG*, N°3, 1972, pp 451-454.

GRIBENSKI (A). "A propos du concours général". *Bulletin de l'APBG*, n°3, 1971, pp 556-568.

GUEYE (B). "Etude historique de l'évolution de l'épreuve de Sciences Naturelles au Baccalauréat". *Bulletin de l'APBG*, n°2, 1988, pp 301-323.



# DEUX APPROCHES POUR MODIFIER LES ACTIVITÉS DE RÉOLUTION DE PROBLÈMES EN PHYSIQUE DANS L'ENSEIGNEMENT SECONDAIRE : UNE TENTATIVE DE SYNTHÈSE

Andrée DUMAS-CARRÉ,  
Michel CAILLOT,  
Joaquin MARTINEZ TORREGROSSA,  
Daniel GIL

*Dans cet article nous présentons un cadre théorique pour analyser les activités de résolution de problèmes "papier crayon" issu de la confrontation des recherches menées par deux équipes (Gil Perez D. et Martinez Torregrossa J. en Espagne et Caillot M. et Dumas-Carré A. en France) dans le domaine de la physique.*

*Le point de départ commun des deux équipes est de considérer que l'échec généralisé des élèves ne peut être imputé seulement (ni principalement) à des caractéristiques ou des lacunes des élèves, mais que la plus grande responsabilité doit être cherchée du côté de la didactique habituelle. Ce qui doit être remis en question de façon prioritaire est la conception même des activités de résolution de problèmes. Cette remise en question de la conception didactique commence par une interrogation sur le concept de problème lui-même. De même, le comportement habituellement retenu comme modèle (celui de l'expert) est remis en question ; le comportement proposé comme modèle est celui du chercheur scientifique.*

## INTRODUCTION

L'enseignement des disciplines scientifiques utilise largement les activités de résolution de problèmes papier/crayon (1) ; Ces activités consomment une grande part du temps d'enseignement soit à titre d'activités d'apprentissage soit pour évaluer les acquisitions des élèves. Après avoir passé autant de temps à résoudre des problèmes on pourrait donc s'attendre à ce que les

1. Nous utilisons l'expression problèmes papier/crayon pour opposer d'une part les problèmes dans lesquels la situation physique à étudier est présentée par un texte écrit, la solution aussi étant écrite et obtenue par application de connaissances déjà acquises et d'autre part les problèmes expérimentaux dans lesquels la situation n'est pas décrite mais existe concrètement, la solution aussi étant expérimentale

rôle des activités  
de résolution de  
problèmes

élèves soient de bons résolveurs. Or il n'en est rien et, à tous les niveaux, lycée aussi bien qu'université, on reconnaît que, en définitive, une très faible proportion d'élèves est capable de performances satisfaisantes, dès lors que le problème à résoudre s'éloigne, si peu que ce soit, de la simple répétition d'un exercice déjà vu. Qu'ont donc appris les élèves au cours de ces heures consacrées aux activités de résolution de problèmes ? Ont-ils appris à résoudre des problèmes, c'est-à-dire une méthodologie, une stratégie qui leur permettrait d'affronter des problèmes nouveaux, d'utiliser des connaissances génériques dans une situation qui ne ressemblerait pas à celles déjà étudiées ? D'après la constatation précédente la réponse est non.

Le but de cet article est de poser un cadre théorique permettant d'analyser cette divergence entre les intentions (amener les élèves à être capables de résoudre des problèmes nouveaux) et les résultats (la majorité des élèves n'est capable que de répéter des solutions connues) puis de présenter, de comparer et de tenter une synthèse entre des enseignements spécifiquement destinés à l'apprentissage de la résolution de problèmes mis au point indépendamment par deux équipes de chercheurs : une équipe espagnole, Gil D. et Martinez Torregrossa J., et une équipe française, Caillot M. et Dumas-Carré A. (ce travail a été fait dans le cadre de la R.C.P. "Résolution de Problèmes en Mathématiques et en Physique" de l'Institut National de Recherche Pédagogique. Les deux équipes ont travaillé au niveau du lycée (élèves de 16 à 19 ans), essentiellement dans le domaine de la mécanique.

types de  
recherches sur la  
résolution de  
problèmes

De très nombreux chercheurs se sont intéressés à ces activités de résolution de problèmes, aussi bien des psychologues que des didacticiens de différentes disciplines. Pour les psychologues, il s'agit souvent d'analyser les processus cognitifs qui composent l'activité de résolution, de mettre en évidence des processus de base indépendants et leur articulation, ou de différencier des stratégies - Newel A. and Simon H.A. (1972) ; Simon H.A. (1975) ; Langley P. (1985). Les tâches utilisées pour ces études sont très souvent des devinettes sans contenu conceptuel spécialisé (la tour de Hanoï ou les missionnaires et les cannibales par exemple). Les travaux des didacticiens (ou des psychologues s'intéressant à une discipline spécifique) se développent dans deux directions. D'une part, comme les travaux précédents, ils s'intéressent à l'analyse des processus composants et des stratégies et utilisent souvent le paradigme de comparaison experts/novices - Shaw J.S. (1983) ; Anderson J.R. et al. (1981) ; Lester F.K. (1983) ; Lesh R., Landau M. (1983) ; Kilpatrick J. (1982) ; Reif F. (1983) ; Larkin J.H. (1981) ; Chi M.T.H. et al. (1981) ; Gorodetsky M., Hoz R. (1986) ; Johnstone A.H., Kellett N.C. (1980) ; Mandell A. (1980) ; Heath P.A. et al. (1987). Ceci conduit à des modèles de résolution de problèmes ; ces modèles formalisent le comportement de résolution d'une catégorie d'individus.



D'autre part, de nombreux travaux proposent des modèles d'enseignement/apprentissage destinés plus ou moins explicitement à modifier l'enseignement actuel. Ils ont été opérationnalisés et expérimentés à des degrés divers : Reif F. (1983) ; Mettes C.T.C.W. et al. (1981 et 1982) ; Polya G. (1975) ; Tobin K. (1985) ; Baird J.R. (1986) ; Caillot M., Dumas-Carré A. (1987) ; Gil D., Martinez Torregrossa J. (1983)...

Les plus prescriptifs fournissent des guides de résolution c'est-à-dire décomposent l'activité en pas successifs, et, pour chaque pas énoncent des consignes d'action à exécuter ; la limite d'une telle démarche serait un algorithme de résolution.

A l'opposé, un modèle d'orientation ne donne pas de consignes, ne décompose pas l'ensemble de l'activité en pas élémentaires, il repose sur un ensemble de situations qui mettent les élèves dans l'obligation d'avoir le comportement que l'on veut développer chez eux.

D'autres travaux se situent entre ces deux pôles ; ils proposent des instruments d'analyse qui aident et guident les élèves mais qui sont seulement à disposition sans être intégrés dans des guidages algorithmiques.

La critique que l'on peut faire à nombre de ces travaux est le manque de fondement théorique ; en effet beaucoup de ces propositions s'appuient sur l'expérience en tant qu'enseignant (la connaissance et l'analyse de certaines des difficultés des élèves) ou sur des intuitions. Ceci conduit à des améliorations souvent efficaces (comme le prouvent les résultats publiés) mais partielles.

Mettre en place un modèle susceptible de modifier la pratique habituelle des activités de résolution de problèmes comporte trois volets : définir les caractéristiques de ce que l'on appelle des "problèmes", définir les composantes cognitives de l'activité de résolution de problèmes, enfin proposer des matériels pédagogiques. Un fondement théorique complet est indispensable pour créer un tel modèle d'orientation.

Dans un premier paragraphe nous exposerons les bases théoriques sur lesquelles nous nous appuyons ; ensuite nous développerons notre conception de la situation problème et de l'activité de résolution ; dans le troisième paragraphe nous ferons une analyse critique de la pratique actuelle (pratiques très semblables en Espagne et en France) à la lumière de ces conceptions et pour finir, dans le quatrième paragraphe nous présenterons certaines de nos réalisations pratiques, sans détailler les résultats obtenus qui ont déjà été publiés ailleurs - Gil D., Martinez Torregrossa J. (1983), (1984) et (1987), Martinez Torregrossa J. (1987) ; Caillot M., Dumas-Carré A. (1985) et (1987) ; Dumas-Carré A. (1987) ; Dumas-Carré A., Caillot M. (1987).

différents  
modèles  
d'enseignement/  
apprentissage de  
la résolution de  
problèmes

## I. FONDEMENT THÉORIQUE

où chercher les  
origines du  
comportement  
de résolution  
habituel des  
élèves ?

Le point commun de départ des deux équipes est de considérer que le comportement de résolution constaté chez la majorité des élèves ne peut être imputé seulement à des caractéristiques des élèves (ce que supposent implicitement les recherches de type experts/novices) mais que la plus grande responsabilité doit être recherchée du côté de la didactique habituelle : ce qui doit être remis en question de façon prioritaire est la conception même des activités de résolution de problèmes. Cette remise en question de la conception didactique commence par une interrogation sur le concept de problème lui-même et débouche sur une redéfinition complète des activités de résolution.

La pratique actuelle (enseignement expositif puis activités de résolution de problèmes applicatives) repose sur une théorie de l'enseignement/apprentissage de type transmission/réception de connaissances toutes élaborées. Les mauvaises performances des élèves en tant que résolveurs de problèmes de physique prouvent que cette approche n'est pas satisfaisante.

une théorie  
émergente de  
l'apprentissage  
des sciences

Une théorie de l'apprentissage émergeant à l'heure actuelle est celle du constructivisme. Les connaissances ne se transmettent pas toutes élaborées. Chaque apprenant construit ses propres connaissances au travers des situations qu'il expérimente - Novak J.D. (1987) et (1988), Driver R., Oldham V. (1986). Cette idée de construction des connaissances est associée à la vision de l'apprentissage des sciences comme un changement conceptuel à partir des préconceptions et des savoirs préalables acquis - Posner G.J. et al. (1982) et, plus encore, comme un changement conceptuel et **méthodologique** qui tient compte aussi de la méthodologie spontanée des élèves - Gil D., Carroscia J. (1985) ; Hashweh M.Z. (1986). Si les activités de résolution de problèmes doivent servir à l'apprentissage, il faudra qu'elles soient l'occasion et le moyen d'un tel changement conceptuel et méthodologique. Il faudra que la résolution de problèmes permette aux préconceptions d'être exprimées pour susciter des conflits cognitifs.

spécificités de la  
discipline

Puisqu'il s'agit de physique, les spécificités de cette discipline, son épistémologie propre, ne devront pas être oubliées. Une des caractéristiques essentielles de la physique est qu'il s'agit d'un domaine conceptuel très structuré. Un petit nombre de principes (souvent des principes de conservation) régit le comportement des dispositifs artificiels ou des phénomènes naturels. Chacun de ces principes requiert, pour être valide, que certaines conditions soient satisfaites, ce qui correspond à une infinité de situations physiques particulières. Par addition de conditions supplémentaires ces grands principes généraux (peu nombreux) se spécifient en de nombreuses lois locales, chacune étant valide dans un sous-ensemble de situations physiques. Avoir compris la physique c'est non seulement connaître des lois locales, en connaître les conditions de

la résolution de problèmes : "mise en scène" des concepts et des principes

validité, mais aussi avoir construit cette structure, avoir établi ces relations hiérarchiques d'inclusion et de généralité. Pour que les activités de résolution de problèmes soient un moyen d'apprentissage il ne suffira donc pas de faire pratiquer des lois locales il faudra surtout que, d'une façon ou d'une autre, cette structure soit présente.

Résoudre un problème consiste donc à utiliser des concepts, des principes ou des lois génériques dans une situation particulière, en tenant compte des spécificités de la situation étudiée. C'est donc l'occasion de donner du sens à ces concepts et principes généraux. C'est au travers de leur "mise en scène" dans des cas particuliers que concepts et principes ont une chance de devenir opérationnels, de ne plus être seulement des définitions ou des relations symboliques. C'est en ce sens que les activités de résolution de problèmes peuvent être un des moyens privilégiés de l'apprentissage conceptuel. Larkin J. (1979) insiste aussi sur ce point.

En résumé, les éléments théoriques dont nous devons tenir compte dans l'élaboration d'un modèle de résolution de problèmes sont les suivants :

- l'apprenant construit ses propres connaissances ; l'apprentissage de la physique passe par un changement conceptuel mais aussi par un changement méthodologique,
- apprendre de la physique ce n'est pas seulement apprendre des concepts et des lois c'est aussi apprendre à s'en servir, à les utiliser correctement et consciemment pour traiter des situations particulières.

A la lumière de cette base théorique nous allons maintenant préciser les caractéristiques du problèmes et de la résolution pour que ces activités puissent jouer leur rôle de moyen privilégié d'apprentissage de la physique. Ceci sera l'occasion aussi d'approfondir le fondement théorique que nous venons d'esquisser.

## 2. NOS CONCEPTIONS

### 2.1. Notre conception du problème

Comme l'a montré Prendergast W.F. (1986) la terminologie employée dans ce domaine de recherches demanderait à être clarifiée et unifiée, les différents chercheurs employant les mêmes mots souvent avec des significations différentes. Toutefois sur le concept de "problème" lui-même un accord existe. La définition de Krulik S., Rudnik K. (1980) résume bien ce consensus : *un problème est une situation, quantitative ou non, qui demande une solution, et pour laquelle les individus concernés ne connaissent pas de moyens ou de chemin évident pour obtenir la solution.*

qu'est-ce qu'un problème ?

modèle d'action :  
le chercheur  
scientifique

quelques  
caractéristiques  
de la démarche  
scientifique

Un problème est donc une situation ambiguë où, au départ, on ne sait pas ce que l'on va faire et quel chemin on va prendre. Sans difficultés et sans ambiguïté il n'y a pas de problème. Mais l'existence de difficultés ou d'ambiguïtés n'est pas une caractéristique intrinsèque de la situation ; c'est une caractéristique de l'interaction entre la situation et le résolveur. Un problème n'est donc pas un objet ayant une existence autonome, c'est l'interaction entre une situation et un individu à un moment donné. Une même situation peut être un problème pour un individu et ne pas l'être pour un autre. Décider que telle situation est un problème pour tel individu à un moment donné c'est faire (consciemment ou non) une hypothèse sur l'état de connaissance de l'individu concerné (son passé, les expériences qu'il a eues, les situations qu'il a déjà rencontrées et ce qu'il en a tiré, ce qu'il a construit à partir de ces expériences et stocké dans sa mémoire). Les implications de ces remarques sont nombreuses et importantes pour ce qui concerne l'enseignement.

Si on accepte l'idée que faire face à un problème c'est être dans une situation où l'on est perdu, où l'on ne **sait** pas ce que l'on doit faire, le modèle de l'expert (qui, lui, **sait**) ne peut pas être très utile. Une situation beaucoup plus semblable est celle du chercheur scientifique qui, lui aussi, est face à un vrai problème et ne **sait** pas, dès le départ, comment arriver à la réponse, pire, ne sait même pas s'il existe une réponse. Au lieu d'utiliser comme modèle d'action le comportement de l'expert résolvant les mêmes problèmes que ceux proposés aux élèves et qui, répétons-le, ne sont pas des problèmes pour lui, nous allons retenir comme modèle le comportement du chercheur. C'est donc la méthode scientifique ou la démarche scientifique qui servira de base à notre analyse. Ces termes n'ont pas de définition claire et univoque, certains auteurs Feyerabend P.K. (1979) contestent même l'idée de méthode. Toutefois, la démarche ou l'approche scientifique d'un problème de recherche présente certaines caractéristiques incontournables sur lesquelles les épistémologues sont en accord :

- l'aspect ambigu des vrais problèmes : le fait qu'ils ne sont pas, au départ, clairement formulés et modélisés, que la clarification du but et la modélisation (pour l'inscrire, dans un cadre théorique connu) sont à faire ;
- l'aspect hypothétique, incertain, sujet à remise en question continuelle de tout travail de recherche ;
- comme conséquence des deux points précédents, le fait qu'on ne se trouve pas, au départ, avec des données à traiter ; ces données, il faut les construire à partir de la modélisation faite et dans le cadre des hypothèses retenues ;
- la nécessité de ne pas accepter un résultat sans confrontation avec, d'une part, les hypothèses de départ et, d'autre part, le corpus des connaissances déjà acquises.

Cette image imprécise, floue, de la démarche scientifique, où rien ne garantit que l'on arrivera au résultat est loin d'une démarche algorithmique. Notre hypothèse est que ce peut être

un bon modèle pour orienter les activités de résolution de problèmes pour les élèves.

## 2.2. Une nouvelle conception de l'activité de résolution de problèmes

Nous venons de donner quelques arguments pour justifier notre conception de la résolution de problèmes comme une activité ayant des points communs avec celles de recherche. Nous allons maintenant traduire en termes d'activités de résolution de problèmes les caractéristiques et les composantes de la démarche de recherche scientifique.

- La reconnaissance de l'existence d'un problème

Pour qu'il y ait activité de résolution de problèmes (au sens que nous donnons), la première condition à satisfaire est que le résolveur ait conscience du fait qu'il existe un problème. Ceci implique que l'individu concerné ait conscience d'un but à atteindre même si ce but est très vague et, à cet instant, très mal formulé. Cette condition n'est pas toujours satisfaite dans l'enseignement comme nous le développerons dans le paragraphe 3.

La définition du but, sa clarification, éventuellement sa traduction en termes de grandeur physique ou dans un autre langage symbolique est un des éléments clef de l'activité de résolution de problèmes - Birch W. (1986). Cette clarification du but n'est pas une composante autonome, indépendante, elle se fait en parallèle et en interaction avec l'analyse de la situation physique que nous allons développer maintenant.

- La compréhension-représentation qualitative du problème en interaction avec la simplification et la modélisation de la situation

Les nombreux travaux comparant les comportements de résolution des experts et des novices ont montré qu'une différence essentielle concerne cette analyse de la situation ; les experts élaborent, plus ou moins explicitement, une représentation **globale qualitative intégrée** de la situation problème en mettant en œuvre des connaissances compilées - Anderson et al. (1981). Les novices ne constituent au mieux que des îlots de représentation non connectés - Larkin J. (1979) ; Reif F. (1983). Pour nous aussi, cette analyse, cette élaboration d'une représentation du problème est le premier pas indispensable d'une résolution ; cette représentation du problème est faite à partir des informations descriptives fournies par l'énoncé et guidée par les connaissances génériques que le résolveur possède en mémoire ; c'est une première confrontation entre le cas particulier du problème et des connaissances génériques. Mais pour être efficace et utile la représentation ainsi construite doit satisfaire les critères suivants :

la question et le but du problème

comprendre ce qui se passe

- elle doit être **qualitative**. A. Einstein lui-même insiste sur ce point : *"Aucun scientifique ne pense avec des formules. Avant que le physicien commence à calculer il doit avoir dans son cerveau le cours de son raisonnement. Ces derniers, dans la plupart des cas, peuvent être exposés avec des mots simples. Les calculs et les formules viennent après."*

Cet aspect qualitatif repousse à plus tard la prise en compte des données et disqualifie les méthodes ou stratégies qui recommandent de commencer par une analyse des données ou de faire une première lecture de l'énoncé en y extrayant les données. Ce type de stratégie est souvent conseillée par les enseignants. Le comportement spontané le plus fréquemment rencontré chez les élèves est de tenter tout de suite de combiner les données même dans le cas où l'énoncé fournit des données non pertinentes - Selvaratman M. (1974).

- c'est une vue **large, globale** de l'ensemble de la situation ; on ne décide pas encore, à ce stade, de ce qui est pertinent ou ne l'est pas. C'est à cette étape que, si l'énoncé ne modélise pas totalement la situation, les premiers choix sont faits, les premières décisions sont prises, pour inscrire le problème dans un cadre théorique unique (ce qui est indispensable pour pouvoir résoudre). Dans le cas (le plus fréquent actuellement) où la modélisation est totalement faite par l'énoncé, où il n'y a pas de telles décisions à prendre, le résolveur doit accomplir quand même un travail du même ordre : il doit identifier, reconnaître, cette modélisation ces simplifications imposées par l'énoncé. Le fait que l'énoncé les exprime (même clairement et complètement) n'est pas toujours suffisant pour que les élèves en soient conscients.

Cette élaboration d'une représentation globale qualitative est une activité à la fois de prise de conscience, de compréhension mais aussi d'organisation. Ce passage, pour l'élève, d'une description écrite à la représentation mentale d'un événement ne peut se faire que par une certaine organisation et une mise en relation des informations.

Notre position à propos de l'apprentissage est que, pour cette étape cruciale et difficile de la résolution, il est possible d'enseigner, de fournir des aides cognitives. Nous y reviendrons au paragraphe 4.

#### • Les hypothèses

Une des étapes fondamentales d'une activité de recherche est l'émission d'hypothèses et les choix de traitement qui en découlent. Pour inscrire les activités de résolution de problèmes comme activités de recherche cette étape doit nécessairement figurer dans la résolution. De quelles hypothèses peut-il s'agir dans une situation non expérimentale ? Ce sont des hypothèses à propos des paramètres qui vont avoir une influence sur le phénomène étudié. Un pas supplémentaire consiste à émettre des hypothèses sur la nature de cette

la représentation  
globale et  
qualitative

quels paramètres  
jouent et  
comment ?

influence. Pour cela il faut envisager des cas limites et analyser des sens de variation. De plus cette étape est l'occasion privilégiée pour que les préconceptions soient exprimées (par exemple, dans un problème de chute libre dans le vide, très souvent, la masse du corps est proposée comme grandeur ayant une influence sur le temps de chute). Cette expression des préconceptions permet de les expliciter mieux, d'en tirer les conséquences, de les confronter entre élèves, et, enfin, de les mettre en conflit avec le corpus de connaissances déjà acquises.

- Les choix, les chemins de résolutions alternatifs

quel chemin  
prendre ?

Dans une activité de recherche la sélection d'un jeu d'hypothèses est suivie par des **choix** que nous qualifierons de stratégiques. Il s'agit, par exemple, de choisir le dispositif expérimental et la méthode qui permettront de valider l'hypothèse faite à propos de l'influence de tel ou tel paramètre. L'élève résolvant un problème par écrit, les choix ne sont pas de même nature mais ils existent. Il aura à sélectionner, parmi tous les principes et lois qu'il connaît, celui qu'il va utiliser dans la situation particulière traitée. Bien sûr, il s'agit d'une identification plutôt que d'un choix, c'est à partir de ce qu'il sait de chacun des principes et de leurs conditions de validité qu'il fera sa sélection. Mais il en est de même pour le chercheur : c'est tout ce qu'il connaît déjà qui guide et oriente ses choix. Éventuellement, si plusieurs principes sont applicables à la situation étudiée, l'élève aura, de plus, un vrai choix à accomplir. Ceci ne peut être fait que si l'élève a envisagé les différents chemins alternatifs possibles (sans nécessairement les construire et les poursuivre jusqu'au bout). Cet aspect là aussi est un des éléments fondamentaux d'une attitude de recherche. Nous avons qualifié ces choix de **stratégiques** ce mot se justifie doublement. En effet, d'une part faire un choix impose une stratégie pour la suite et, d'autre part, c'est l'analyse prospective des stratégies possibles qui guide les choix.

- La résolution littérale, la résolution numérique

Dans notre conception, la résolution formelle doit être menée jusqu'au bout sous forme littérale, ce n'est qu'une fois le résultat final obtenu sous forme littérale symbolique que les données, les valeurs numériques, sont introduites et que le résultat spécifique du problème est produit. Cette position (totalement en accord avec la pratique habituelle) se justifie d'un point de vue théorique. Un problème repose toujours sur une situation physique particulière, spécifiée, caractérisée par des valeurs des grandeurs physiques. En fait le but des activités de résolution de problèmes, en classe, n'est pas d'obtenir le résultat numérique correspondant à la situation particulière présentée. La situation étudiée n'a d'intérêt qu'à titre d'exemple d'une classe de situations et c'est la méthode de résolution qui importe et non le résultat. Pour que les résolutions de tels

problèmes jouent réellement ce rôle d'exemple, de mise en scène, de concrétisation du général il est indispensable que la résolution soit menée jusqu'au bout au niveau symbolique, les grandeurs physiques y ayant statut de variables ou de paramètres et non pas de simples valeurs numériques. De même, un travail de recherche n'a pas, en général, pour but de produire des valeurs numériques. De même, un travail de recherche n'a pas, en général, pour but de produire des valeurs numériques mais d'établir des relations entre paramètres.

- L'analyse critique du résultat, les vérifications

L'obtention d'un résultat n'est pas la dernière étape d'un travail de recherche. Il reste à critiquer ce résultat, en le confrontant avec les conséquences déduites des hypothèses faites précédemment, en le confrontant aussi avec le corpus des connaissances déjà établies, reconnues par la communauté scientifique. Si cette double confrontation fait apparaître des contradictions alors commence une boucle de remise en question. S'il existait des hypothèses ou des choix alternatifs, négligés dans un premier temps, ils sont alors pris comme nouveau départ. Sinon la boucle remonte jusqu'à l'analyse de la situation et/ou la définition de la question de recherche, pour les compléter et les affiner afin d'être à même de générer de nouvelles hypothèses ou de nouveaux choix.

un résultat doit  
être vérifié

Il en est de même pour un étudiant résolvant un problème ; il suffit de changer les expressions "connaissances déjà établies et reconnues par la communauté scientifique" par "connaissances que l'étudiant a déjà construites" et "l'analyse de la situation et/ou la définition de la question de recherche" par "la représentation du problème et la clarification du but".

D'autres chercheurs ont insisté sur cette nécessité d'analyse du résultat obtenu et de confrontation avec les connaissances déjà acquises. Reif F. (1983) parle de vérification interne (cohérence, logique du raisonnement) et de vérification externe (confrontation au déjà connu) ; Mettes C.T.C.W. et al. (1981) et (1982) insistent aussi sur l'importance de cette dernière phase.

Nous pensons que cette idée de vérification ne doit pas être réservée à la fin, ne doit pas concerner seulement le résultat final ; c'est tout au long du processus de résolution que des vérifications doivent être faites. Tout, à tout moment, doit être questionné et est susceptible d'être modifié ou abandonné.

Nous venons de donner, en détail, en relation avec la base théorique choisie, notre conception de ce que doivent être des activités de résolution de problèmes. Nous allons maintenant décrire, dans cet éclairage, la pratique actuelle dominante de ces activités dans les classes du secondaire.



### 3. LA PRATIQUE ACTUELLE

Pour analyser cette pratique nous allons séparer deux aspects : les tâches elles-mêmes et ce que l'on en fait, la façon dont elles sont exploitées.

#### 3.1. A propos des énoncés utilisés

- Pour les professeurs

Les "problèmes" que les enseignants donnent à leurs élèves ne sont jamais des problèmes pour eux-mêmes. En effet, ils connaissent et le résultat et le moyen, la route à suivre, pour y arriver. A première vue, ceci n'a pas d'importance à condition que les élèves, eux, soient face à un vrai problème ! En fait, cette non-problématicité, pour les enseignants, influence leur façon d'animer les activités de résolution de problèmes, les points sur lesquels ils insistent et ceux qu'ils passent sous silence. De plus, lorsqu'ils choisissent un énoncé, parmi les critères qui guident ce choix, ne figure pas celui de savoir si, pour les élèves concernés, au moment concerné, il s'agit d'un vrai problème ou simplement d'une tâche de répétition de procédures connues.

- Pour les élèves

Comme nous l'avons déjà dit, une même situation n'est pas également problématique pour tout le monde. Définir un "seuil de problématicité" (Elshout, J.J. (1985) ) pour les élèves d'une classe n'est ni immédiat ni évident, puisqu'il faut faire une hypothèse sur les acquis des élèves (aussi bien conceptuels que de procédures). Ce n'est que par une analyse fine du passé de la classe (les situations déjà rencontrées, les problèmes déjà résolus, et la manière dont ces résolutions ont été faites) et une hypothèse sur ce que les élèves ont construit que ce seuil de problématicité peut être déterminé (de plus l'hypothèse d'une certaine homogénéité est inévitable si l'on raisonne en terme de classe). Les énoncés classiques de manuels peuvent tout à fait être des situations problématiques pour les élèves. Ce n'est pas parce qu'ils ont perdu toute problématicité pour les professeurs qu'ils sont disqualifiés en tant que problèmes pour des élèves débutants ! Cette différence de problématicité d'une même situation pour les élèves et pour leur maître est génératrice de nombreuses incompréhensions : les élèves ne résolvent pas comme le maître l'attend : le maître, lorsqu'il corrige ne fournit pas les informations qui seraient utiles et nécessaires aux élèves pour comprendre et progresser.

- A propos des situations physiques support

Une analyse des situations physiques utilisées dans les énoncés de problèmes qui existent dans les manuels et dans les

les énoncés  
habituellement  
utilisés sont-ils de  
vrais problèmes ?

recueils d'exercices ou annales montre que certaines situations sont privilégiées (Dumas-Carré A, 1987) : elles sont présentes dans tous les manuels et très souvent dans les sujets d'examen, d'autres sont fréquentes enfin d'autres sont absentes, alors même que la définition stricte des programmes les autoriserait. Si l'on considère que les énoncés de problèmes présents dans les manuels et les annales sont une définition implicite de ce qui doit être fait en classe on en déduit que : l'étude de certaines situations est obligatoire (les situations privilégiées) certaines sont recommandées (les situations fréquentes), enfin certaines sont exclues (les situations absentes des problèmes de manuels).

### 3.2. Les activités de résolution de problèmes

La pratique habituelle consiste à laisser les élèves résoudre seuls en fournissant éventuellement les informations qu'ils demandent (généralement des informations de type factuel ou conceptuel, rarement de type procédural, exceptionnellement de type stratégique) et à exposer, ensuite, une solution reconstituée. Des critères généraux de ce que doit être une bonne rédaction sont souvent rappelés : par exemple "précisez le système que vous étudiez" ou bien "faites une résolution littérale complète d'abord".

N'exposer que la solution reconstruite a posteriori conduit à passer sous silence la majeure partie de ce qui, dans la résolution de problèmes, est de l'ordre de l'activité de recherche ; c'est présenter un chemin sûr, sans hésitations, sans erreurs ; c'est donc déproblématiser - Garret R. et al. (1988). Ceci est une conséquence du fait que pour les maîtres il ne s'agit pas d'un problème (ils savent !). Ce qu'ils exposent aux élèves a perdu toute ambiguïté, tout caractère hypothétique pour être transformé en une situation claire, fermée, dans laquelle on va directement et sans difficulté (autre que d'ordre mathématique) des données au résultat.

On peut noter que, dans la solution exposée, ne figurent pas l'analyse et la clarification du but, dès le départ ce but est considéré comme évident. Ceci traduit, de la part des enseignants, la conception suivante : la présence d'une question dans l'énoncé est suffisante pour que les élèves aient conscience d'un but à atteindre ; de plus, elle est suffisante pour que ce but soit clair et bien défini. Or les analyses de protocoles de résolution d'élèves prouvent que souvent ce n'est pas le cas ! Souvent les élèves font des choses (écrivent des équations, combinent des valeurs de grandeurs physiques, énoncent des lois...) sans donner l'impression qu'ils ont conscience d'un but à atteindre. De fait, dans ces cas, les élèves ne savent pas ce qu'ils cherchent ni pourquoi ils alignent des éléments de raisonnement ou des parties de démonstration. Une autre erreur fréquente des élèves consiste à inclure dans les prémisses de leur raisonnement, dès le départ, ce qui doit être démontré obtenu comme but (erreur bien connue aussi des

la pratique  
actuelle :  
déproblématiser  
plutôt  
qu'apprendre à  
résoudre

professeurs de mathématiques). Ce type d'erreur peut aussi être relié à l'absence de définition du but ; dans ce cas, le but a été compris en tant que connaissance de physique mais n'a pas pris son statut de but.

Dans l'exposé d'une solution reconstruite ne figure pas, non plus, l'aspect hypothétique, tentatif qui est au cœur de la résolution. La solution est un chemin sûr, éprouvé, débarrassé de tout doute, de toutes erreurs. De plus, cette solution reconstruite est exposée pas à pas depuis le début jusqu'au résultat, ce qui empêche toute vision globale du chemin de résolution, toute approche stratégique. Cette façon de faire n'apprend rien aux élèves quant aux méthodes de résolution, de plus, elle donne une image fausse de ce qu'est un travail scientifique.

le corrigé : sans  
erreur, sans  
impasse, sans  
hésitation !

### 3.3. Une interprétation de cet état de faits

Si l'on ajoute à cette pratique d'exposition de la solution reconstruite le fait que, pendant la phase d'apprentissage, le maître fait résoudre aux élèves un grand nombre de problèmes utilisant la même procédure de résolution (on peut parler de problèmes isomorphes) on peut interpréter ceci comme révélateur de l'objectif suivant : faire construire aux élèves des **problèmes modèles** qui serviront de **guide d'action** pour résoudre des problèmes appartenant à la même classe. Alors les problèmes privilégiés sont ceux qui serviront de modèle et les problèmes exclus ceux qui ne rentrent pas dans le cadre des modèles enseignés.

Si l'on accepte cette interprétation de la pratique habituelle, il en découle que la stratégie implicitement véhiculée par les activités de résolution de problèmes est une stratégie de résolution par analogie. Cette résolution par analogie présuppose l'existence de **catégories de problèmes**. En effet un modèle de résolution n'a sens que si son utilisateur a délimité ses conditions d'utilisation, s'il connaît les caractéristiques des problèmes justiciables de ce type de résolution ou autrement dit, s'il a construit la catégorie correspondante. La théorie sous-jacente à la pratique actuelle peut donc être interprétée comme suit : les activités de résolution de problèmes ont pour but, en même temps, d'apprendre des procédures-modèles de résolution et de construire les catégories de problèmes correspondantes. Ensuite les élèves résoudront des problèmes nouveaux (mais, en fait, appartenant à une catégorie connue) par analogie.

Dans cette interprétation, aucune place n'est faite à l'enseignement de méthodes ou d'heuristiques de recherche. Un enseignement du type décrit ci-dessus, même parfaitement efficace et réussi, ne permet pas aux élèves de construire les outils nécessaires pour résoudre un vrai problème. Au mieux, ils construisent d'une part les outils pour reconnaître un type de situation et d'autre part les procédures de résolution corres-

c'est la résolution  
par analogie qui  
est implicitement  
visée

pondantes. Au pire, ils construisent un catalogue de situations particulières, chacune associée à un raisonnement.

Cette pratique, à notre avis, est en grande partie responsable des comportements de résolution des élèves.

### 3.4. Conséquences sur les comportements de résolution des élèves

Quand on analyse les protocoles de résolution des élèves on constate qu'ils résolvent plutôt par reconnaissance que par analogie. C'est-à-dire que, face à un problème nouveau ils essaient de reconnaître quelque chose qu'ils ont déjà fait, afin de simplement dupliquer des résultats connus. Cette reconnaissance peut être correcte ; il peut aussi y avoir fausse reconnaissance ce qui conduit à des réponses erronées. Enfin l'élève peut ne rien reconnaître du tout, ce qui conduit souvent à l'abandon ou à des tentatives de résolution par combinaisons d'équations. Dans tous les cas, l'activité ainsi développée par l'élève, n'a aucun des caractères d'une activité de recherche ; il ne s'agit donc pas, pour nous, d'activités de résolution de problèmes ! Tous les auteurs de modèles de résolution ne partagent pas cette position ainsi Mettes C.T.C.W. et al. (1981) donnent comme consigne dans leur guide de résolution : *"Établir s'il s'agit d'un problème standard, c'est-à-dire un problème qui peut être résolu par de simples opérations de routine ; si ce n'est pas le cas, chercher des relations entre les données et l'inconnue qui permettront de transformer le problème en un problème standard."*

la stratégie la plus fréquente chez les élèves : "reconnaître ou abandonner"

## 4. GUIDAGE ET CHOIX DE SITUATIONS PÉDAGOGIQUES

Nous allons maintenant détailler et mettre en parallèle les deux travaux faits indépendamment en Espagne par Gil D., Martinez Torregrossa J. et en France par Caillot M., Dumas-Carré A. Ces travaux ont en commun :

- d'avoir été expérimentés en réelle situation de classe,
- une pratique habituelle des enseignants très semblable en Espagne et en France,
- un parti pris heuristique loin de toute idée d'algorithme.

Au moment où ces travaux ont été faits, l'analyse théorique commune présentée ci-dessus n'avait pas encore été faite ; les deux travaux ne reflètent donc pas l'ensemble de cette analyse. Mais ces réalisations différentes, loin d'être contradictoires peuvent être complémentaires.

Une des raisons de ces différences est liée aux conditions différentes de réalisation. En Espagne, les chercheurs eux-mêmes animalent les séances de résolution de problèmes (en

conditions de  
deux  
expérimentations

classe avec des élèves ou avec des maîtres en formation) ; de plus l'intervention ne se limitait pas aux activités de résolution de problèmes seulement ; un travail préalable de type discussion et activités expérimentales concrètes avait déjà modifié la conception et la façon d'aborder une situation problème. En France, une équipe composée de deux chercheurs et quatre enseignants de lycée réfléchissait et mettait au point le matériel pédagogique, ensuite les maîtres utilisaient ce matériel dans leurs classes et rapportaient les résultats qui étaient analysés par l'équipe entière. Au départ, l'intervention ne concernait que les séances de résolution de problèmes, l'enseignement préalable n'étant pas remis en question ; de fait, au cours des quatre années qu'a duré cette recherche, les enseignants ont aussi, partiellement, modifié leur cours. Toutefois il ne s'agissait pas d'une remise en question fondamentale mais plutôt de modifications partielles ou d'ajouts. Cette médiation par les enseignants a conduit l'équipe française à une plus grande formalisation des outils mis au point ; pour la même raison l'équipe française a été tenue de moins s'éloigner de la pratique habituelle.

#### **4.1. Pour la représentation globale qualitative (incluant la clarification du but)**

deux solutions  
différentes pour  
conduire les  
élèves à  
commencer par  
"comprendre ce  
qui se passe"

Les deux équipes ont apporté des réponses différentes à la même difficulté : comment obtenir des élèves qu'ils fassent une analyse qualitative physique, qu'ils se construisent une représentation de ce qui se passe avant d'introduire quelque formalisme que ce soit, avant de commencer à jouer avec des équations.

- En France : guidage cognitif de l'élaboration de la représentation

C'est sur ce point qu'a porté l'essentiel du travail de l'équipe française. A ce sujet, la première question à se poser est la suivante : quelles sont les caractéristiques d'une représentation du problème utile à l'élève ? Les élèves, par définition, sont des débutants en physique c'est-à-dire qu'ils ne connaissent pas encore tous les principes (par exemple, en première - niveau auquel se situe l'essentiel du travail de l'équipe française - ils ne connaissent pas encore le principe fondamental de la dynamique, ils n'ont encore rencontré que la statique, le principe de conservation de la quantité de mouvement, le principe de l'inertie et le principe de conservation de l'énergie mécanique). De plus, pour les principes étudiés, les élèves n'ont travaillé que sur certaines classes de problèmes. Leur savoir est donc moins étendu, moins complet que celui des experts ; il est surtout moins compilé (Anderson J. et al., 1981) moins intégré. En conséquence, la représentation du problème utile à l'élève n'est pas exactement semblable à celle faite par les experts. Elle utilise des savoirs plus élémentaires, moins

compilés ; elle se doit d'explicitier au mieux tous les éléments d'information qui y sont inclus et surtout toutes les relations entre ces éléments. L'expert, lui, laisse une grande partie de ces relations implicites ; sa vision étant plus globale, plus intégrante.

A partir de cette analyse l'équipe française a défini des *représentations intermédiaires* et mis au point des *aides cognitives* pour guider l'élaboration de chacune d'elle. Représentation intermédiaire signifie trois choses :

1. elle se situe quelque part entre la description verbale de l'énoncé et la représentation finale formelle en termes de concepts quantitatifs de la physique (voir figure 1).

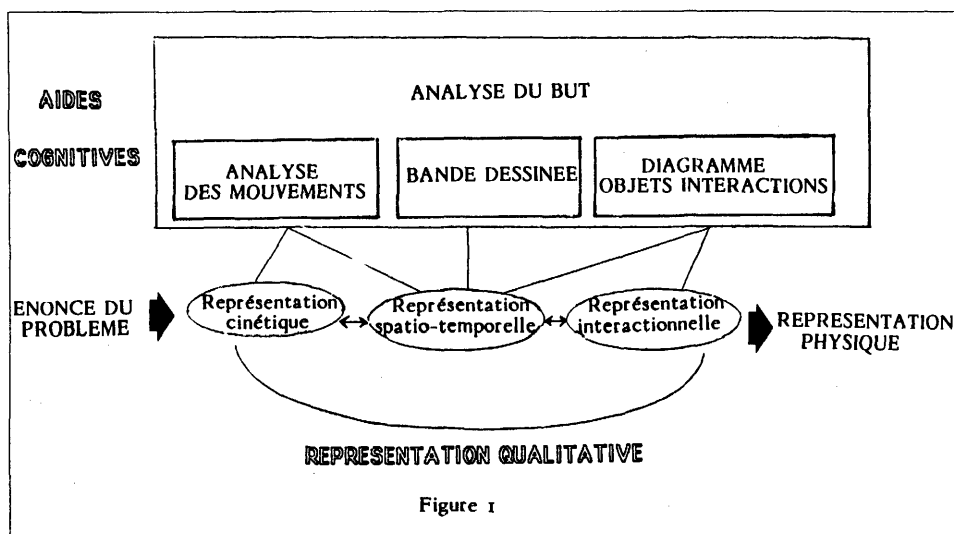


Figure 1

2. Chacune ne prend en compte qu'un seul aspect de la situation, n'utilise qu'un seul type de grandeur physique.
3. A chaque fois que c'est possible elle est en termes de concepts intermédiaires (par exemple en termes d'interactions qui est un concept semi-quantitatif précurseur du concept de force).

L'élaboration de la représentation ainsi guidée comporte donc deux processus antagonistes et complémentaires : un processus d'analyse, d'éclatement, où l'on n'étudie qu'un seul aspect ; un processus de synthèse qui regroupe, qui relie et articule explicitement ces différents aspects.

Trois représentations intermédiaires ont ainsi été définies :

- La représentation cinétique qui découle de l'analyse des mouvements. On demande aux élèves de repérer les objets en mouvement et ceux au repos ; pour ceux en mouvement de

noter si la vitesse est constante ou non (ceci orientera plus tard le choix du principe). Enfin on leur demande de repérer si certains objets bougent ensemble (soit une prise en compte des contraintes de liaison).

- La représentation spatio-temporelle qui concerne d'une part le découpage temporel, l'analyse du déroulement du phénomène dans le temps, le repérage des instants caractéristiques (ceux pour lesquels "quelque chose" de pertinent change) et des phases (durée comprise entre deux instants caractéristiques) ; d'autre part les configurations correspondantes des objets (mettant en évidence les contacts). Cette représentation spatio-temporelle est concrétisée dans ce que nous avons appelé la *Bande Dessinée* (voir figure 2a).

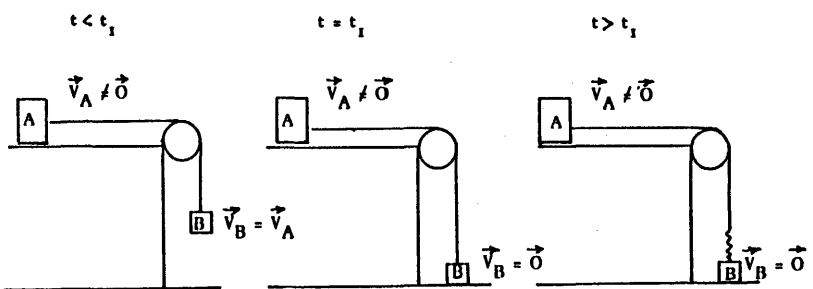


Figure 2 a

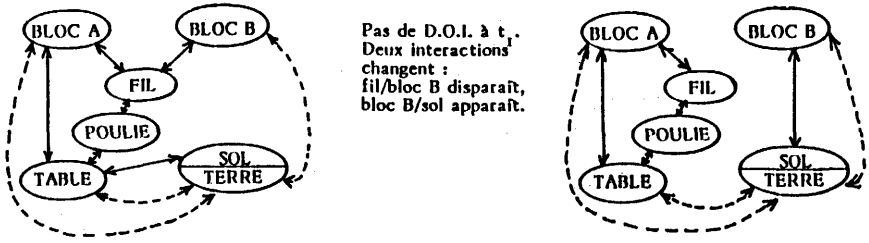


Figure 2 b

Figure 2

Étudions le système suivant : deux blocs, A de masse  $m_A$  et B de masse  $m_B$ , sont reliés par un fil.

Le fil est inextensible et sa masse est négligeable devant  $m_A$  et  $m_B$ .

Le bloc A repose sans frottement sur une table horizontale. Le fil passe par une poulie parfaite (de masse négligeable et sans frottement) fixée à l'extrémité de la table.

Le bloc B pend au bout du fil.

- 1) Déterminer la valeur de l'accélération du bloc A.
- 2) A l'instant  $t_1$  le bloc B touche le sol ; déterminer la valeur de l'accélération de A pour  $t > t_1$ .

- La représentation interactionnelle qui est une nouveauté dans l'enseignement français actuel. Ce qui est analysé ici ce sont les interactions mécaniques qui existent. L'intérêt de raisonner en termes d'interactions est que pour cette analyse il n'est pas nécessaire d'avoir déjà choisi un système (comme c'est le cas pour une analyse en termes de forces). La situation reste globale symétrique, sans que rien n'y soit privilégié. Le choix du système se fera plus tard explicitement et en utilisant cette analyse en interactions. Cette analyse des interactions se concrétise dans ce que nous avons appelé le *Diagramme Objets Interactions* (voir figure 2b).

Aux images de la bande dessinée sont associés les diagrammes objets interactions correspondants ; l'analyse des mouvements ainsi que les informations de l'énoncé (caractéristiques connues des objets tels que les masses par exemple) sont également reportées sur la bande dessinée. Enfin la grandeur cherchée (le but du problème) figure par un point d'interrogation sur l'image concernée de la bande dessinée, relié à l'objet concerné. Ce point d'interrogation est en fait le résultat d'une analyse supplémentaire, élément de l'élaboration de la représentation, qui est l'analyse du but.

Bien évidemment, des boucles sont possibles lors de l'utilisation des aides cognitives guidant l'élaboration des représentations intermédiaires. Des aller et retour entre bande dessinée et diagrammes objets interactions sont fréquents.

La bande dessinée ainsi complétée - figure 2a + 2b - est donc une visualisation qui résume et organise de façon compacte les informations disponibles dans l'énoncé et l'analyse qualitative de la situation. Ce sera le support de la suite de la résolution.

En résumé l'équipe française a fourni aux élèves des aides et des critères pour guider et organiser la mise au point de la représentation du problème. Les problèmes utilisés étaient des problèmes habituels, ceux qu'on trouve dans les manuels. Dans ces problèmes, généralement, la modélisation et les simplifications sont faites. Les choix de modélisation (que l'on pourrait plus classiquement appeler des hypothèses de travail) ne sont pas à la charge de l'élève ; mais l'un des éléments de la construction de la représentation globale qualitative consiste à en devenir conscient, à les prendre en compte. Les aides cognitives, en organisation l'ensemble des informations, aident aussi à cette prise en compte.

- En Espagne : choix de situations problèmes

L'équipe espagnole a apporté un autre type de solution en mettant les élèves dans l'impossibilité de commencer leur travail par une manipulation des équations et des données. Ceci est réalisé en présentant, au cours d'une première étape, des énoncés de problèmes sans données (cette suppression des données a aussi une autre finalité comme nous le verrons plus loin). De plus il est demandé aux élèves de verbaliser cette étape



de représentation en donnant plus d'explications possibles. Aucun guidage explicite n'est donné. Ce qui est dit aux élèves est : de comprendre la situation, de fixer clairement le but et d'imposer des conditions qui permettent d'approcher le problème à un niveau de difficulté adéquat.

des situations

Ces deux approches peuvent être complémentaires : en France les élèves ne sont pas obligés de faire cette représentation qualitative (énoncés habituels) mais des instruments leur sont fournis pour les y aider ; en Espagne les élèves sont mis dans une situation telle qu'ils ne peuvent pas commencer à partir des données donc ne peuvent pas éviter une certaine forme d'analyse qualitative, très événementielle et sans formalisation, mais aucune aide systématique, organisatrice ne leur est donnée pour le faire. Les deux approches se sont révélées fécondes. Il serait envisageable de les associer.

#### **4.2. Pour l'émission d'hypothèses et les choix stratégiques (élaborations de plusieurs chemins de résolution)**

- Hypothèses sur les paramètres pertinents

anticiper  
l'influence de  
certains  
paramètres sur le  
résultat

L'équipe espagnole accorde une très grande importance à l'étape d'émission d'hypothèses (comme étant l'une des composantes incontournables d'une activité de recherche). Il ne s'agit pas ici des hypothèses de travail (choix d'un cadre modélisateur) dont nous avons parlé dans le paragraphe précédent, il s'agit de considérer différents paramètres (grandeurs physiques) et d'émettre des hypothèses quant à leur influence sur le résultat cherché ; influence en tout ou rien d'abord (par exemple : quels sont les facteurs qui vont intervenir sur la durée de la chute ?) et ensuite le mode, le sens de cette influence (par exemple : si la masse augmente la durée de chute va-t-elle augmenter ou diminuer ?). Il s'agit donc de prendre des décisions à propos de ce que l'on considère comme pertinent et de suivre ces hypothèses jusqu'au bout, jusqu'au résultat. Bien évidemment, ce type d'analyse inclut la prise en compte des cas limites, quand on cherche les conséquences de l'hypothèse faite à propos de la pertinence d'un facteur l'un des moyens les plus simples est de donner à ce facteur des valeurs limites. Une autre raison pour considérer cette phase comme essentielle est que c'est une occasion privilégiée pour que les préconceptions soient exprimées ce qui est indispensable comme nous l'avons déjà dit. Là aussi les énoncés de problèmes sans données sont une réponse adéquate.

Par exemple au lieu de l'énoncé classique :

*Une voiture de police poursuit à 120 km/h une automobile qui roule à 100 km/h. En combien de temps la voiture sera-t-elle rattrapée si la distance initiale entre les deux voitures était de 5 km ?*

c'est l'énoncé suivant qui est proposé aux élèves :

*Combien de temps mettra une voiture de police pour rattraper une automobile qu'elle poursuit ?*

Ainsi, dans l'énoncé rien ne signale quels sont les paramètres pertinents et les élèves ne peuvent pas faire autrement que de les déterminer eux-mêmes ; de cette façon, ces déterminations prennent clairement un statut d'hypothèses, ce qui n'est pas le cas lorsque l'énoncé fournit toutes les données (ce sont alors des certitudes). Aucune heuristique spécifique formelle et systématique n'est fournie aux élèves pour les orienter ou les guider. Comme pour l'étape précédente il leur est demandé de verbaliser au maximum.

L'équipe française, contrainte à utiliser des énoncés classiques c'est-à-dire signalant explicitement les paramètres pertinents (soit en les désignant par un symbole littéral soit en leur attribuant une valeur numérique) n'a pas envisagé cet aspect. Toutefois, une analyse systématique des données est demandée, les critères étant : données instantanées (valables à un instant, la vitesse d'un objet par exemple) ou données permanentes (valables tout au long du phénomène, la masse d'un objet par exemple).

- Les choix stratégiques ou les différents chemins de résolution

Sous des terminologies différentes (qui traduisent, en fait, des conceptions légèrement différentes) les deux équipes se sont intéressées au même aspect de la démarche de recherche. Il s'agit maintenant d'inscrire le phénomène étudié dans le cadre de principes ou de loi généraux et de délimiter précisément l'étude faite.

L'équipe française parle de choix stratégiques. A cette étape, on demande aux élèves, à partir de la représentation globale qualitative (dans laquelle figurent les contraintes spécifiques de la situation étudiée), de déterminer les principes qui sont applicables (par comparaison des contraintes spécifiques de la situation et les conditions de validité des principes). Si plusieurs principes sont applicables on leur demande d'en **choisir** explicitement un. Un principe étant choisi, il reste à délimiter l'étude à faire : soit à choisir un système et des instants (en mécanique). Pour que ces choix soient cohérents avec le principe retenu des critères généraux de cohérence et de vérification ont été explicités. C'est donc à partir des informations organisées dans la représentation globale qualitative et à l'aide de critères de cohérence entre principes et systèmes que les élèves sont guidés le long de cette étape de choix stratégiques.

L'équipe espagnole parle de différentes stratégies ou de différents chemins de résolution. Ce qui est demandé aux élèves c'est, dans le cadre des hypothèses faites précédemment, d'envisager plusieurs voies de résolution possibles, reposant

envisager des  
alternatives ou  
choisir

sur l'utilisation de différents principes ; il s'agit donc bien de stratégies différentes puisqu'elles reposent sur des choix différents. Ce sont les hypothèses faites et le corpus de connaissances dont disposent les élèves qui guident cette recherche de chemins alternatifs. Il est, comme pour toutes les autres étapes, demandé aux élèves de verbaliser et d'expliquer au maximum.

être conscient et  
garder le contrôle  
de l'action au lieu  
de répéter

L'équipe française ne demande pas d'envisager des solutions alternatives, elle demande que les choix soient faits explicitement, consciemment en s'appuyant sur des critères et non pas seulement par analogie avec des situations déjà vues, par simple reconduction de choix qui ont déjà "marché". Une fois les choix faits, la résolution est menée jusqu'au bout et ce n'est qu'en cas d'échec que les choix sont remis en question et qu'une stratégie alternative est envisagée. L'objectif de l'équipe française, sur ce point précis, est de lutter contre les choix faits implicitement, inconsciemment, par similitude avec du déjà connu.

#### **4.3. Pour la résolution littérale complète avant toute résolution numérique**

Les deux équipes **demandent** aux élèves de mener au bout une résolution symbolique.

De plus, l'équipe française explicite des critères pour que le choix des symboles et des indices soit le plus efficace, le plus cohérent et le plus simple possible. En effet, il est avéré que cette activité de symbolisation est source de grandes difficultés pour les élèves. Quand on étudie les protocoles de résolution on constate que, souvent, leur symbolisation/indiciation est incohérente ou insuffisante ou au contraire redondante et inutilement lourde. Bien symboliser fait partie intégrante de l'élaboration de la représentation. Une symbolisation incohérente peut être un indicateur de mauvaise compréhension de la situation, elle traduit souvent des confusions ; de plus elle est génératrice d'erreurs de traitement. Pour les maîtres le savoir correspondant est devenu implicite, il s'agit de savoir compilé ; c'est la raison pour laquelle ils n'expliquent pas, en cours de résolution au tableau, les raisons pour lesquelles ils ont fait tel ou tel choix de symboles et d'indices.

#### **4.4. L'analyse critique du résultat, les vérifications**

Pour l'équipe espagnole il s'agit effectivement d'une analyse critique qui découle de, et renvoie aux hypothèses faites à propos de l'influence des différents paramètres. C'est l'occasion de mettre les préconceptions en contradiction. Si différents chemins de résolution ont été élaborés cette analyse critique ne se borne pas aux résultats mais inclut aussi la comparaison des différentes voies. Là, comme pour ce qui précède, il n'a pas été mis au point de guidage spécifique. La référence est le corpus

vérifier,  
un critère :  
la cohérence

de connaissances déjà constituées et le guide est la double cohérence entre d'une part le résultat et d'autre part les hypothèses et le corpus de connaissances déjà acquises.

La position de l'équipe française est plutôt de vérification. Des critères généraux de vérification sont explicités en différenciant cohérence interne (vérification du fait qu'il n'y a pas de contradictions entre les différentes étapes du raisonnement) et cohérence externe (vérification qu'il n'y a pas de contradictions entre le résultat obtenu et ce que l'on sait par ailleurs). Cette préoccupation de vérification n'est pas réservée au résultat, chaque fois que c'est possible, en cours de résolution, des critères de vérification sont fournis aux élèves.

## CONCLUSION, PERSPECTIVES

Les deux équipes ne situent pas exactement les activités de résolution de problèmes au même point du déroulement de l'apprentissage. Pour les Espagnols les connaissances sont déjà construites (d'autres travaux de la même équipe concernent d'ailleurs cette construction des connaissances) et la nouvelle orientation proposée vise avant tout à initier un changement de méthodologie et d'attitude des élèves vis-à-vis d'une situation problème. Pour cela la méthode consiste à mettre les élèves dans l'obligation d'effectuer les différentes étapes (le moyen de les y obliger étant, dans un premier temps, la suppression des données dans l'énoncé). Ce qui guide ces différentes étapes ce sont les hypothèses faites au début et la cohérence avec le corpus des connaissances déjà construites. Le rôle du maître est semblable à celui d'un directeur de recherches qui pose les bonnes questions au bon moment et qui ainsi réoriente, quand nécessaire, le travail des élèves. Ce rôle peut être différent d'une situation problème à une autre, d'un groupe d'élèves à un autre ; l'idée directrice étant d'intervenir le moins possible et de laisser la plus grande initiative possible aux élèves. La nouveauté de cet enseignement se situe avant tout dans le choix des situations problèmes.

une future  
collaboration

L'équipe française envisage les activités de résolution de problèmes plutôt dans le processus d'apprentissage, à un moment où les connaissances ne sont pas encore structurées (elles n'ont encore été étudiées qu'à un niveau général mais n'ont pas fonctionné suffisamment pour s'organiser les unes par rapport aux autres). La résolution de problème, guidée par les aides cognitives, est alors conçue comme un moyen pour aider et organiser la structuration. Ce sont des outils conceptuels d'organisation qui sont proposés aux élèves au travers des aides cognitives.

Ces deux approches nouvelles de la résolution de problèmes ont été testées et évaluées. Dans les deux cas on note des

progrès dans les performances des élèves traités par rapport à des élèves témoins.

Le point fondamental de divergence entre ces deux approches est le suivant : l'équipe espagnole agit sur les situations ; son hypothèse est que des situations problèmes bien choisies sont suffisantes pour générer les changements de méthodologie et d'attitudes visés. C'est une perspective constructiviste de l'enseignement/apprentissage.

L'équipe française, elle, n'a pas agi sur les situations (ce sont généralement des problèmes de manuel qui sont utilisés). Elle propose des aides qui guident organisent et résument la représentation du problème ; de plus chaque fois que c'est possible elle explicite des critères (critères de cohérence entre principe et système, critères de symbolisation et d'indiciation...). L'hypothèse sous jacente à ce travail est que, pour des débutants tels que des élèves de lycée, expliciter autant que faire se peut est indispensable, surtout en ce qui concerne les critères qui guident les choix. L'expérience qui a été faite, s'inscrivait dans une conception de l'enseignement/apprentissage de type transmissif mais nous pensons que la raison en est conjoncturelle beaucoup plus que fondamentale.

Ces deux réponses différentes aux mêmes difficultés des élèves, qui toutes deux refusent l'expert comme modèle, qui toutes deux ont produit des résultats positifs, mais qui s'ancrent (plus ou moins fortement) dans des conceptions de l'enseignement/apprentissage différentes sont-elles incompatibles ? Y a-t-il contradiction entre une orientation qui met l'accent sur le guidage et l'explicitation et une orientation qui met l'accent sur le choix de situations problèmes adéquates ? En élargissant la question : un enseignement peut-il être à 100 % constructiviste ou bien une association de phases constructivistes et de phases de type transmissif est-elle envisageable ? Pour répondre à ces questions une recherche commune est prévue dans laquelle certains aspects des deux approches seront utilisés.

Andrée DUMAS-CARRÉ

Michel CAILLOT

L.I.R.E.S.P.T., Université Paris 7, France

Daniel GIL

Joaquin MARTINEZ TORREGROSSA

Formation permanente, Université de  
Valence, Espagne

## RÉFÉRENCES

- ANDERSON J.R., GREENO J.G., KLINE P.J. et NEVES D.M. (1981). Acquisition of problem solving skills, In J. Anderson editor *Cognitive Skills and their Acquisition*. Hillsdale New Jersey. Lawrence Erlbaum Associates.
- BAIRD J.R. (1986). Improving learning through enhanced metacognition : a classroom study. *EUR J SCI EDUC* 8 (3) 263-282.
- BIRCH W. (1986). Towards a model for problem-based learning. *Studies in higher education*, 11 (51) 73-83.
- CAILLOT M. et DUMAS-CARRÉ A. (1985), Activités cognitives et connaissances nécessaires à la résolution de problèmes : un exemple en physique, *Cognitiva 1985* 81-86, Paris. CESTA.
- CAILLOT M. et DUMAS-CARRÉ A. (1987). PROPHY : un enseignement d'une méthodologie de résolution de problèmes de physiques, In *Résolution de problèmes en mathématiques et en physique, Rapports de recherche* 12 199-244, Paris. INRP.
- CHI M.T.H., FELTOVITCH P.J. and GLASER R. (1981). Categorisation and representation of physics problems by experts and novices. *Cognitive Science*, 5 (2) 121-152.
- DRIVER R. et OLDDHAM V. (1986). A constructivist approach to curriculum development in science. *Studies in Science Education*, 13 105-122.
- DUMAS-CARRÉ A. (1987). *La résolution de problèmes en physique au lycée*. Thèse d'état, Paris 7, juin 1987.
- DUMAS-CARRÉ A. et CAILLOT M. (1987), Résolution de problèmes et apprentissage de la physique, In *Didactique et acquisition des connaissances scientifiques GRECO 130071* 165-179, Paris. CNRS.
- ELSHOUT J.J. (1985). Problem solving and education ; state of the art papier, *EARLI Conference, LEWEN, June 1985*.
- FEYERABEND P.K. (1979). *Contre la méthode, esquisse d'une théorie anarchiste de la connaissance*, Paris. Seuil.
- GARRET R., GIL D., MARTINEZ TORREGROSSA J., SATTERLY D. (1988). Turning exercises into problems ; an experimental study with teachers in training. *INTER J SCIEN EDUC* (à paraître).
- GIL D., CARROSCA J. (1985). Science Learning as a conceptual and methodological change. *EUR J. SCIEN EDUC* 7 (3) 213-236.

- GIL D., MARTINEZ TORREGROSSA J. (1983). A model for problem solving in accordance with the scientific methodology. *EUR J SCIEN EDUC* 5, 447-455.
- GIL D., MARTINEZ TORREGROSSA J. (1984). Problems solving in physics : a critical analysis, In *Recherches en Didactique de la Physique*, Paris. CNRS éditeur.
- GIL D., MARTINEZ TORREGROSSA J. (1987). La résolution de problèmes comme instrument de changement conceptuel et méthodologique. *Petit X* 14-15, 25-38.
- GORODETSKY M., HOZ R. (1986). Hierarchical Solution Models of Speed Problems. *Science Education*, 70 (5) 565-582.
- HASEWEH M.Z. (1986). Towards an explanation of conceptual change. *EUR J SCIEN EDUC* 8 (3) 229-249.
- HEATH P.A., WHITE A.L., BERLIN D.F. and PARK J.C. (1987). Decision Making : Influence of Feature and Representation Mode Upon Generation of Alternatives. *J of RES on SCI TEAC* 24 (9) 821-833.
- JOHNSTONE A.H., KELLETT N.C. (1980). Learning Difficulties in School Science - Towards a Working Hypothesis, *EUR J SCI EDUC*, 2 (2) 175-181.
- KILPATRIK J. (1982). What is a problem ? *Problem solving Newsletter* 4 (2).
- KRULIK S. and RUDNIK K. (1980). Problem Solving in school mathematics. *National Council Teachers of Mathematics ; Year Book*, Reston. Virginia.
- LARKIN J. (1979). Processing information for effective problem solving. *Engeneering Education*. December 1979, 285-288.
- LARKIN J. (1981). Enriching formal knowledge : a model for learning to solve textbook physics problems, In J. Anderson editor *Cognitive Skills and their Acquisition* 311-334. Hillsdale New Jersey. Lawrence Erlbaum Associates.
- LANGLEY P. (1985). Learning to Search : From Weack Methods to Domain-Specific Heuristics. *Cognitive Science*, 9 217-260.
- LESCH R., LANDAU M. (1983). Conceptual models and applied mathematical problem solving research, In *Acquisition of mathematics concepts and processes*. Chapter 9. NY. Academic Press.
- LESTER F.K. (1983). Trends and issues in mathematical problem solving research, In *Acquisition of mathematics concepts and processes*. Chapter 8. NY. Academic Press.
- MANDELL A. (1980). Problem-Solving Strategies of Sixth-Grade Students Who Are Superior Problem Solvers. *Science Education*, 64 (2) 203-211.

MARTINEZ TORREGROSSA J. (1987). *La resolucion de problemas de fisica como investigacion : un instrumento de cambio metodologico*. Tesis Doctoral. Valencia.

METTES C.T.C.W., PILOT A., ROOSINK J.H., KRAMERS PALS H. (1981). Teaching and learning problem solving in science. Part I : A general strategy. *Journal of Chemical Education*, 57, 882-885.

METTES C.T.C.W., PILOT A., ROOSINK J.H., KRAMERS PALS H. (1982). Teaching and learning problem solving in science part II : Learning problem solving in thermodynamics. *Journal of Chemical Education*, 58, 51-55.

NEWEL A., SIMON H.A. (1972). *Human Problem Solving*, New Jersey, Engelwood Cliffs, Prentice Hall.

NOVACK J.D. (1987). Human Constructivism : towards a unity of psychological and epistemological meaning making. *Proceedings of the second international seminar on misconceptions and education*.

NOVACK J.D. (1988). Constructivismo humano : un consenso emergente. *Ensenanza de las Ciencias* 6 (3) (en cours d'impression).

POLYA G. (1975). *How to solve it*, New York. Princeton University Press.

POSNER G.J., STRIKE K.A., HEWSON P.W., GERTZOG W.A. (1982). Accomodation of a scientific conception : towards a theory of conceptual change, *Science Education* 66, 211-227.

PRENDERGAST W.F. (1986). Terminology of problem solving. *Problem Solving Newsletter* 8 (2) 1-7.

REIF F. (1983). Understanding and Teaching Problem Solving in Physics, In *Recherches en Didactique* 3-53, Paris. CNRS éditions.

SELVARATMAN M. (1974). Use of problems in chemistry courses. *Education in Chemistry* 1974, 201-205.

SHAW T.J. (1983). The effect of a Process-Oriented Science Curriculum Upon Problem-Solving Ability. *Science Education*, 67 (5) 615-623.

SIMON H.A. (1975). The functional equivalence of problem solving skills. *Cognitive Psychology*, 7 268-288.

TOBIN K. (1985). Teaching Strategy Analysis Models in Middle School Science Education Course, *Science Education*, 69 (1) 69-82.



# VERS DES ACTIVITÉS DIDACTIQUES DE MISE AU POINT DE MODÈLES DE PHYSIQUE AVEC DES MICRO-ORDINATEURS

Alain Durey  
Roger Journeaux

*Construire des activités scolaires utilisant l'ordinateur doit s'inspirer de l'évolution provoquée par l'introduction des ordinateurs dans les pratiques professionnelles en établissant des relations définissables et contrôlables avec ces "pratiques de références". Deux caractéristiques générales de ces pratiques émergent : la prise en compte nécessaire de relations nouvelles avec le domaine empirique et l'utilisation d'une méthodologie de mise au point de modèles par approximations successives. En explorant dans les deux sens l'espace entre cadre scolaire et pratiques de référence, on élabore à la fois des outils pédagogiques (d'un autre ordre que les didacticiels) et des données utilisables pour la technique : c'est la base d'une méthodologie d'utilisation didactique des ordinateurs en physique.*

## INTRODUCTION

Engagés depuis plus de dix ans dans l'innovation utilisant l'ordinateur dans l'enseignement, nous avons constaté le mal qu'elle a à se dégager d'un processus de mise en forme informatique de contenus et de pédagogies existantes (1).

Pourtant dans les objectifs assignés à l'introduction de l'informatique, le premier chargé de mission à l'informatique au Ministère de l'Education Nationale, le professeur W. Mercouroff déclarait que "l'introduction d'une sensibilisation à l'informatique pouvait ouvrir l'enseignement secondaire sur le monde contemporain et avoir un effet secondaire sur les enseignants plus traditionnels, en obligeant les enseignants à se poser des questions sur le contenu de leur enseignement" (2). Ces effets

des effets  
secondaires  
encore à venir

1. A. DUREY, M. SCHWOB, "Les utilisations du micro-ordinateur en Sciences Physiques. Essai de classification". *Education et Informatique*, n° 20, Avril 84, p. 33-38.  
A. DUREY, M. LAURENT, R. JOURNEAUX, "Avec des micro-ordinateurs, faire de la physique d'abord". *B.U.P.*, n° 652, Mars 83, Paris, p. 757-780.
2. N. MERCOUROFF, "L'expérience des 58 lycées", *Education et Informatique*, n° 1, 1980, p. 10-15.

secondaires supposés ne sont pas venus, c'est peut-être parce qu'ils sont restés secondaires aussi au niveau des objectifs et des moyens. De tels bouleversements ne se font pas spontanément et de plus il ne peuvent pas être le fait des seuls enseignants. Pourtant W. Mercouroff avait à notre sens dévoilé ce sur quoi aurait dû porter l'essentiel de l'investissement financier et intellectuel de l'introduction de l'informatique, à savoir la remise en cause de l'enseignement. Pour notre part, nous avons essayé d'apporter des éclairages à cette question d'un point de vue que nous pourrions qualifier d'épistémologie appliquée.

Dès les débuts des recherches d'innovation, nous avons pensé qu'il était nécessaire de s'inspirer des transformations provoquées par l'informatique dans tous les domaines industriels, dans les entreprises, dans les laboratoires.

Des concepts nouveaux, des méthodes nouvelles, des outils logiciels bouleversaient les attitudes et les activités des physiciens chercheurs, des ingénieurs et des techniciens. C'est en essayant de tenir compte de ces pratiques nouvelles extérieures à l'école sur le problème particulier de l'informatique que nous avons surplombé le terrible gouffre qui séparait, de façon générale, les activités scolaires et les activités professionnelles liées à la physique. Pourtant la référence toujours réaffirmée aux physiciens, à la physique et aux activités de la démarche expérimentale aurait dû garantir un rapprochement. Il n'en est rien. Nous allons exposer dans la suite pourquoi à notre avis il y a échec et comment en actualisant le processus de transposition, le problème limité aux ordinateurs nous a permis d'envisager une solution généralisable à l'enseignement des sciences physiques.

une liaison avec  
l'expérimental  
inexistante

# **1. LA RÉFÉRENCE AUX ACTIVITÉS DU PHYSICIEN : UNE VOLONTÉ TOUJOURS RÉAFFIRMÉE, UN ÉCHEC DANS LA RÉALITÉ**

L'informatique a tout d'abord été utilisée dans l'enseignement notamment aux Etats-Unis à partir des années 60 pour suppléer ou aider l'enseignement. Les prises en charge par l'ordinateur étant plus ou moins longues et plus ou moins autonomes selon la classification de N. Rushby (3), on peut dénommer avec G. Benchimol (4) toutes ces utilisations sous le vocable d'enseignement par l'ordinateur. Pour l'essentiel ces program-

---

3. N. RUSHBY, "An introduction to Educational Computing", Croom-helm, London, 1979.

4. G. BENCHIMOL, "Enseignement et Informatique". *Sciences et Techniques*, n° 81, Octobre 81, p. 7-19.

enseigner une  
méthodologie

mes réinvestissaient les recherches faites sur l'enseignement programmé. L'expérience française dès ce début a pris le contre-pied de cette approche. En 1972, le professeur J. Hebenstreitt (5) présentait à une réunion internationale d'experts les orientations du projet français de la façon suivante. *"L'Ecole ne peut plus être uniquement un lieu où l'on transmet des connaissances. Ce qu'il faut enseigner aujourd'hui c'est une méthodologie et force est de constater qu'il existe très peu de démarches méthodologiques. En physique le plus important est d'essayer de transmettre aux élèves la démarche du physicien qui est schématiquement la suivante : observation du réel - construction du modèle - recherche des variables"*.

une  
redécouverte des  
lois

Cette référence explicite aux méthodes du physicien aurait dû générer des transpositions nombreuses et des propositions pour l'ensemble des activités des élèves en classe. En fait, cela s'est traduit seulement par des simulations de modèles qui mettent l'accent sur le modèle causal. L'activité de l'élève consiste à reconstituer le modèle qui est dans l'ordinateur à partir des résultats donnés par le modèle. La démarche est intéressante mais on retombe sur les mêmes difficultés qui font achopper l'enseignement traditionnel. On veut faire redécouvrir des lois de la physique simple dont seule la formulation est simple mais qui sont en fait très profondes dans la structure des connaissances de la physique ; elles sont inaccessibles a priori, et c'est par là qu'on prétend faire commencer les novices en leur imposant un parcours de redécouverte.

Pour contourner cette difficulté nous avons été de ceux qui ont contribué à développer une innovation regroupée sous le terme "d'ordinateur outil de laboratoire". C'est une approche qui prend pour référence l'utilisation de l'outil ordinateur dans les laboratoires. Elle est ancrée sur l'expérimentation et peut développer aussi bien des approches phénoménologiques que des méthodologies de modélisation. Son développement est lié à l'apparition des interfaces d'acquisition de données fabriqués spécialement pour l'enseignement et au développement du groupe Evariste du CNAM sous l'impulsion de F. Sourdillat.

Très rapidement ce thème d'ordinateur outil de laboratoire a été admis à la fois par les enseignants, par l'UDP et par l'Inspection Générale. Il figure depuis le début en bonne place dans les thèmes des Journées "Informatique et Pédagogie des sciences physiques" co-organisées par l'INRP, l'UDP et l'Inspection

---

5. J. HEBENSTREITT, "Les orientation du projet français", *Bulletin de liaison*, n° 6. Décembre 72, in L'informatique dans l'enseignement secondaire.

autre chose que  
des logiciels

sortir des  
pratiques  
classiques du  
physicien

Générale (6) ainsi que dans les publications INRP, UDP (7). Parallèlement au développement de logiciels liés à des acquisitions de données sur des dispositifs expérimentaux, une autre catégorie de travaux est apparu concernant le traitement, la mise en forme, et la visualisation des données expérimentales. Ce travail tout à fait complémentaire du premier explore essentiellement les modes de traitement statistique et graphique des données, pour donner une représentation modélisée des données recueillies sous une forme plus visuelle que les tableaux de nombres. Un travail important a été fourni depuis cinq ans par les différents groupes et innovateurs indépendants pour donner corps à ce thème "d'ordinateur outil de laboratoire". Mais c'est là que les difficultés commencent, elles sont de deux ordres. Tout d'abord de la part des innovateurs, la plupart étant enseignants, une première difficulté consiste à chercher des exemples en dehors des expériences traditionnelles ; c'est un écueil évident de l'innovation de rester très proche des préoccupations concrètes de l'application directe en classe qui fait que l'enseignement reste souvent sa propre pratique de référence, ensuite une difficulté de la part des enseignants utilisateurs qui rejettent tout ce qui pourrait être jugé comme hors programme et réduisent encore les aspects novateurs des projets. Ainsi en bout de chaîne dans une classe d'utilisateur que retrouve-t-on des innovations "outils de laboratoire". Ce sont les anciens travaux pratiques sous forme informatique où les aspects novateurs se réduisent aux techniques d'acquisition et de visualisation des résultats qui peuvent dans certains cas masquer les vrais problèmes de mesure et de mise en forme des résultats et des modélisations qui se font automatiquement sans que l'élève ou le maître en maîtrisent les paramètres. Certains produits comme le logiciel Pendule (8) à la conception duquel nous avons participé essayent d'éviter cet écueil. Ce logiciel permet de façon très libre de faire une confrontation des données expérimentales mises en forme avec des modèles théoriques construits sur différentes hypothèses de forces de frottement. Cet exemple de logiciel traitant de problèmes qui

- 
6. *Compte-rendu des premières journées "Informatique et Pédagogie des Sciences Physiques"*, Poitiers, Octobre 84, INRP, UDP, Inspection Générale.  
*Compte-rendu des deuxièmes journées "Informatique et Pédagogie des Sciences Physiques"*, Nancy, Avril 86, INRP, UDP, Inspection Générale.  
*Compte-rendu des troisièmes journées "Informatique et Pédagogie des Sciences Physiques"*, Grenoble, Mars 88, INRP, UDP, Inspection Générale.
  7. *"Ordinateurs en Physique-Chimie ou comment s'en servir dans l'enseignement."*, INRP, UDP, Paris, 1985.  
*"Cours et T.P. de Physique et Chimie avec ordinateur. Compte-rendus d'utilisateurs."* Paris, INRP, UDP, 1987.
  8. D. BEAUFILS, Logiciel Pendule. Scénario pédagogique. Réalisation informatique. Logiciel CNDP.

sont aux extrêmes limites du programme de seconde a été valorisé par le CNDP, va être diffusé sous contrat CNDP ; cela montre qu'il a été admis par l'institution qui le met même en avant. Mais il reste deux difficultés à surmonter pour qu'il soit effectivement utilisé.

aider au  
développement  
d'apprentissages

La première c'est qu'il ne soit pas jugé par les enseignants sur le critère du contenu notionnel et de la conformité aux programmes mais qu'il soit effectivement reconnu comme un outil de modélisation, c'est-à-dire comme une aide didactique au développement d'un apprentissage méthodologique. La deuxième réside dans sa mise en service concrète. Bien que des exemples de déroulement de séance soient proposés, c'est un autre point de vue qui doit présider à son utilisation qui est en rupture complète avec celui de la transmission-évaluation des connaissances.

éviter le rejet par  
les enseignants

Ce logiciel est ce que nous connaissons de plus élaboré dans la direction proposée par Henbenstreitt (voir note 5) de transmettre la démarche du physicien. Cependant, il risque de connaître auprès des enseignants, pour les raisons que nous venons d'évoquer, la même indifférence que les logiciels de la première génération sur les simulations de modèle. Au-delà d'un problème de formation des maîtres, du programme et de baccalauréat, il y a aussi des raisons d'ordre épistémologique à cette indifférence qui prend la forme d'un rejet.

## **2. SAVOIR SAVANT, PROGRAMMES ET ACTIVITÉS SCOLAIRES**

Invoquer le respect des programmes ou le problème de préparation au bac pour accepter ou non une innovation sont de faux arguments sur le plan didactique. Ce qui nous paraît le plus en cause et le plus sujet à critique, ce n'est pas tant le programme que les activités scolaires qui s'y réfèrent. En effet les programmes constituent en quelque sorte un "texte du savoir" issu du savoir savant par un premier acte de transposition. Son principal défaut c'est qu'il ne peut transposer qu'un état du système de connaissances et que donc il ne renseigne aucunement sur sa genèse.

### **Du savoir savant aux programmes scolaires : le premier acte de la transposition**

- Le savoir savant et le savoir à enseigner (programme) proviennent de deux modes de production fondamentalement différents

Le savoir savant procède par formalisations successives vers des théories qui tendent à être de plus en plus générales et

un savoir d'abord  
rendu logique

globales, mais dont la validité provient en dernier ressort de la confrontation avec les données observées. On peut distinguer dans cette structure très hiérarchisée du savoir savant, les super-lois (invariance, jauges, ...), les théories (mécanique newtonienne), les modèles tétrataulogiques (oscillateur harmonique). Ainsi ce savoir est dépersonnalisé, décontextualisé, synchrétique et ordonné par les problèmes rencontrés.

Cet édifice ainsi validé est pris comme base pour la constitution du savoir à enseigner qui se forme ainsi sans aucun souci de confrontation avec les données expérimentales mais dans le seul but de trouver une cohérence interne propre à un niveau d'enseignement et une cohérence externe par rapport aux niveaux précédent et suivant. Le mode de constitution s'opère par choix et par reformulations dans des cadres nouveaux qui cherchent seulement une logique de la présentation et de la communication.

On retrouve ainsi deux caractéristiques du savoir savant : la dépersonnalisation et la décontextualisation. En revanche l'organisation du savoir n'est plus donnée par les problèmes rencontrés mais par la logique du niveau de formalisation choisi.

- Le savoir à enseigner est coupé de son référent empirique

mais en restant  
très théorisé...

Le choix du programme s'effectue dans la partie la plus formalisée, la plus théorique du savoir savant, jamais autour des techniques de laboratoire, des expériences ou des objets techniques liés au développement des sciences. En conséquence, il est pauvre en référent empirique. D'où les difficultés de trouver des exemples, des expériences pour les cours et les T.P. Ces référents sont construits a posteriori dans un but d'illustration ou d'introduction, jamais de validation.

- Il est ahistorique

Le choix s'effectue seulement dans le savoir savant qui fait l'objet d'un consensus, jamais il ne prend en compte les théories "fausses" ou contradictoires éliminées par l'histoire. C'est un savoir redigéré plusieurs fois qui l'éloigne de sa genèse historique. Il est ainsi souvent reformulé dans des formalismes mathématiques qui n'existaient pas au moment de sa création, il est également illustré avec des méthodes utilisant des technologies nouvelles. De ce point de vue le programme est le reflet du savoir savant. Il dissimule les conditions de la production scientifique.

- Il est coupé de toute pratique sociale

La seule qui soit régulièrement invoquée c'est celle des physiciens générateurs du savoir savant mais on a vu à quel point le savoir à enseigner est coupé des bases mêmes de cette genèse (histoire et référent empirique). D'où les échecs des approches historiques qui dégénèrent en pseudo redécouvertes, et l'échec

il se coupe de la  
physique des  
physiciens

plus fondamental d'activités scolaires complètement dénaturées par rapport aux activités réelles du physicien.

M. Hulin (9) a montré comment et pourquoi à son avis le lien de transposition n'existait plus entre la physique des physiciens et celle du lycée. A tel point que l'enseignement dit de "physique" dans les lycées porte selon lui sur une autre matière que la physique. Cet enseignement fonctionne en vase clos, coupé des physiciens, coupé des structures de la discipline, des pratiques expérimentales et des applications. M. Hulin va plus loin dans son analyse en montrant que *"la physique est une discipline qui ne s'enseigne pas"*, ce qui signifie que *"l'enseignement correspondant, au niveau secondaire ne peut reproduire, en nombre et à un niveau adéquat, assez de caractéristiques de la discipline pour s'assurer les justifications diverses"* (connaissances effectivement exploitables, ouverture sur les résultats et les structures épistémologiques essentiels du savoir savant, ouverture sur des pratiques sociales qui en dérivent). L'analyse ainsi proposée par M. Hulin montre que la situation n'est satisfaisante sur aucun des points qui lui semblent caractériser la physique. Au niveau de la formulation elle est *"maladroite, inefficace et inexploitable au niveau d'une compréhension un peu profonde de l'exploitation physique des phénomènes parce qu'elle manque d'ampleur et de généralité et qu'elle ne fait pas l'objet d'une présentation et d'une discussion en tant que processus, et n'est introduite que comme procédé. Cet ensemble de recettes, dans l'esprit des élèves, côtoie les représentations "spontanées" qui, hors du contexte scolaire, perdurent et réapparaissent d'ailleurs dans ledit contexte dès que fléchit le secours des recettes."*

un recours naïf à  
l'expérimental

Sur le plan expérimental la situation n'est pas plus satisfaisante. *"Les savoir-faire pratiques des élèves restent très pauvres, la référence à l'expérience prend souvent l'aspect, dans les cours ou les manuels, de fausses démonstrations entachées encore des naïvetés de la redécouverte. Les manipulations font recours à un matériel "didactique" hors de prix et "ad hoc" qui enlève l'essentiel de leur intérêt aux manipulations car il s'agit d'un matériel "modèle" imposé dans une situation figée aux élèves. De nouveau, toute la réflexion liée à la modélisation est éliminée de l'enseignement et celui-ci se condamne à vivre replié sur lui-même, au milieu des objets qu'il s'est lui-même construit"*.

Devant ce constat, devant l'échec des grandes réformes mondiales de l'enseignement de la physique (PSSC, HPP, Nuffield Project, Commission Lagarrigue...) lancées à l'initiative des physiciens de "profession" avec d'énormes moyens notamment aux Etats Unis et une somme incroyable de créativité au niveau des manuels et des activités scolaires, force est de constater qu'il y a échec de cette référence. Si on veut continuer à

9. M. HULIN, "Quelques thèses pour la didactique de la physique". *Communications aux journées du CIRDDS*, Nov. 83.

préparer les  
élèves à la  
physique en  
s'appuyant sur  
des pratiques...

maintenir un enseignement de physique au lycée, tout au moins un enseignement préparatoire à la physique, il faut inventer autre chose. Notre travail a consisté dans un premier temps à mettre au point une stratégie permettant de rechercher les pratiques sociales autres que celles du physicien qui pourraient servir de référence à un pré-enseignement de la physique au lycée et au collège. Partant du constat que nous venons d'exposer, qui séparant nettement dans l'évaluation programme et activités des élèves, montre que c'est surtout au niveau des activités scolaires que l'échec à la référence du physicien est très net alors qu'en revanche, les physiciens se reconnaissent fort bien dans les programmes. Nous n'avons pas cherché, contrairement aux réformes qui se sont passées en France et même à certaines recherches curriculaires, à produire de nouveaux programmes, mais au contraire nous nous sommes appuyés dessus, pour faire porter notre effort essentiellement sur le deuxième acte de la transposition didactique, celui qui passe du programme aux conditions concrètes de l'enseignement (savoir enseigné).

autres que celles  
du physicien

Contrairement au premier acte de la transposition qui prend modèle sur celui du chercheur lorsqu'il veut mettre au point un modèle ou communiquer un savoir, le deuxième acte de la transposition qui consiste à recontextualiser et à repersonnaliser l'objet de savoir, ne prend jamais en référence le physicien. Pourtant celui-ci pratique effectivement cette démarche notamment lorsqu'il est amené à construire des modèles. Pour des raisons déjà citées, il nous semble que cette référence n'est pas faite parce qu'elle est très difficile, compte tenu des systèmes sur lesquels travaillent les physiciens. Ainsi pour éviter de retomber dans un enseignement réduit à une transmission de connaissances, qui est la "genèse artificielle" du savoir la plus simplifiée, nous avons pensé qu'il fallait une fois pour toute renoncer en tout cas au lycée à prendre la physique des physiciens comme pratique sociale de référence unique et exclusive, mais qu'il fallait plutôt chercher des pratiques sociales de référence plus appliquées ou celles qui utilisent la physique dans les domaines divers liés à l'ingénierie, la production et la technologie. Il fallait également définir et caractériser précisément ces pratiques pour établir la correspondance, pour mettre réellement en comparaison les buts, les contenus, les activités pédagogiques avec des situations, tâches et qualifications de cette pratique sociale qui nous servira de référence. Cette question des "pratiques sociales de référence" mise à jour par J.L. Martinand (10) joue dans notre approche un rôle cen-

10. J.L. MARTINAND, *"Connaître et transformer la matière, des objectifs pour l'initiation aux sciences et techniques"*, Berne, P. Lang, 1986.

J.L. MARTINAND, "Questions pour la recherche : la référence et le possible dans les activités scientifiques scolaires". *Actes de l'atelier international d'été. Recherche en didactique de la physique*. (La Londe les Maures, Juillet 83), Paris, CNRS, 1984.



tral car comme nous venons de le voir, elle fonde notre problématique et elle sert de pivot à notre démarche ; celle-ci consiste à utiliser les connaissances d'un programme scolaire pour élaborer des résultats qui peuvent servir dans les domaines professionnels complètement extérieurs à l'école.

### 3. LES PROGRAMMES EN ACTION POUR MODÉLISER DES SITUATIONS SPORTIVES

Comment établir des contacts avec les professionnels du sport : entraîneurs, techniciens, industriels ?

les activités  
sportives comme  
domaine  
privilegié

Le choix du sport tient à plusieurs raisons. En premier lieu c'est un domaine d'application idéal de la mécanique classique, c'est également un domaine où les données expérimentales sont très riches et peuvent être recueillies assez facilement par des moyens relativement disponibles (caméra, strobophotographie, vidéo), c'est un domaine autour duquel se développe tout un ensemble de recherches pluridisciplinaires dénommées Sciences et Techniques des activités physiques et sportives (STAPS) et enfin c'est un thème pour lequel les élèves ont une expérience commune forte à la fois visuelle et corporelle tout en manquant d'éléments conceptuels et méthodologiques pour les lire et les interpréter de façon scientifique.

*Premier exemple : Le coup franc brossé de M. Platini*

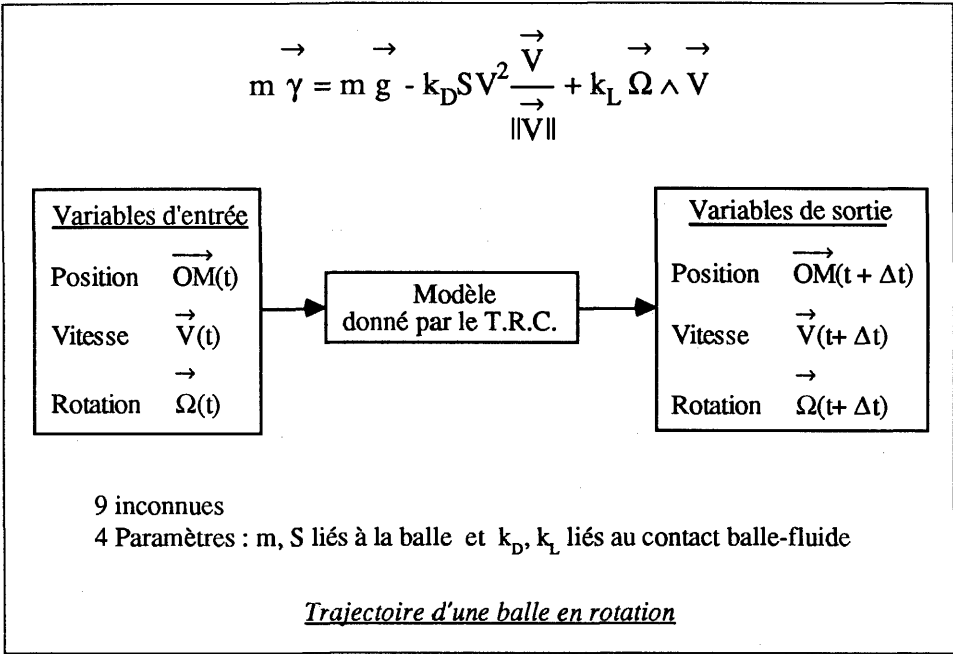
*Les trajectoires de balles et ballons en rotations.*

Le mouvement du ballon sera décrit par le mouvement de son centre de gravité qui est le centre du ballon. Selon la deuxième loi de Newton, l'accélération du ballon sera liée aux forces qui s'exercent sur celui-ci par la relation :

$$\vec{F} = m \cdot \vec{\gamma} \quad m \text{ étant la masse du ballon}$$

Le recensement des forces fait apparaître tout d'abord le poids, puis une force due au frottement de l'air sur la balle.

Dans le cas simple où la balle ne tourne pas, cette force est directement opposée au vecteur vitesse. Dans le cas où la balle tourne, il apparaît une composante de cette force perpendiculaire au vecteur vitesse. Ces forces sont données par des expressions littérales reliant des variables (qui dépendent du mouvement) et des paramètres qui dépendent des systèmes étudiés (ballon, air, etc...).



mettre en relation  
la physique avec  
les praticiens

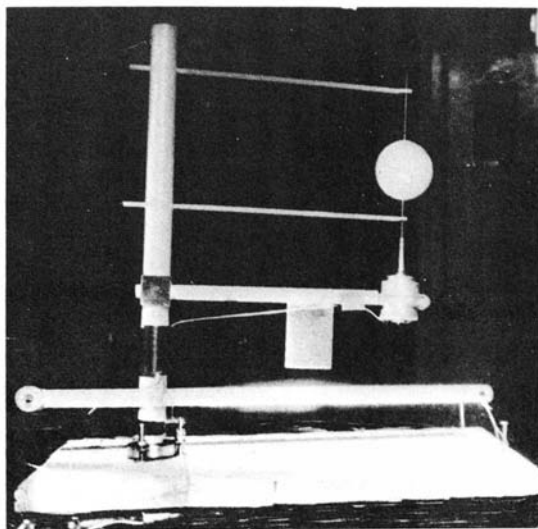
Lorsque l'on veut reproduire un coup franc de M. Platini, un service slicé de J. Mac Enroe, un top spin de J.P. Gatién, il faut connaître la valeur de ces paramètres pour chaque balle ou ballon. La littérature nous donne des valeurs indicatives pour la sphère lisse. Or, justement, l'état de surface du ballon ou de la balle modifie considérablement les paramètres. Il faut donc les mesurer pour chaque sport et c'est là que commence le travail d'application de la physique et c'est aussi à partir du moment où l'on aura une bonne estimation de ces paramètres qu'on pourra établir un dialogue avec les entraîneurs et les techniciens de ce sport pour envisager des travaux en collaboration.

un problème  
complexe de  
mécanique

Le modèle ainsi construit permet de calculer les variables à un instant  $(t+dt)$  connaissant les variables à un instant  $t$  (en ayant fixé toutes les valeurs des paramètres). Etant donné la complexité des forces mises en jeu, l'intégration littérale du système d'équation différentielle n'est pas possible, nous ne pouvons donc pas avoir d'équation littérale de la trajectoire. La seule chose que permet le modèle c'est de calculer la valeur des variables à un instant  $(t+dt)$  connaissant les variables à un instant  $t$  (ceci avec d'autant plus de précision que  $dt$  est petit devant le temps total de la trajectoire); ainsi pour savoir où est la balle à un instant  $(t+t1)$ , il faut calculer tous les états intermédiaires on ne peut pas l'avoir directement. On aura déterminé la valeur des paramètres lorsqu'ils permettront de faire coïncider la trajectoire calculée avec la trajectoire mesurée.

Pour cette détermination plusieurs méthodes sont possibles. Les méthodes directes consistent à isoler le phénomène dans un dispositif où l'on puisse avoir accès par la mesure de façon la plus directe à sa manifestation.

Exemple : Mesure de  $K_L$  par la mesure de la force perpendiculaire à la vitesse.



*Figure 1 - Appareil pour la mesure de la force orthogonale à la vitesse*

La balle est mise en rotation par un petit moteur à courant continu très léger ; la vitesse de rotation est mesurée par un stroboscope. L'ensemble solide (balle + moteur) est soumis à un moment autour d'un axe, lorsqu'il est dans le vent de la soufflerie. La vitesse du vent est mesurée avec un anémomètre à fil chaud (Figure 1). La rotation de l'ensemble (balle + moteur) est contrariée par une lame élastique (lame de scie) et mesurée par une méthode de Poggendorf à l'aide d'un miroir. On accède ainsi à la force qui s'exerce sur la balle après étalonnage du système. On tire de ces mesures la valeur de  $K_L$ . On vérifie la variation linéaire de la force avec la vitesse de rotation et avec la vitesse du vent dans la limite de validité du dispositif expérimental (homogénéité du vent, largeur de la soufflerie comparée aux dimensions de la balle) par rapport à la réalité.

une première détermination des paramètres en laboratoire

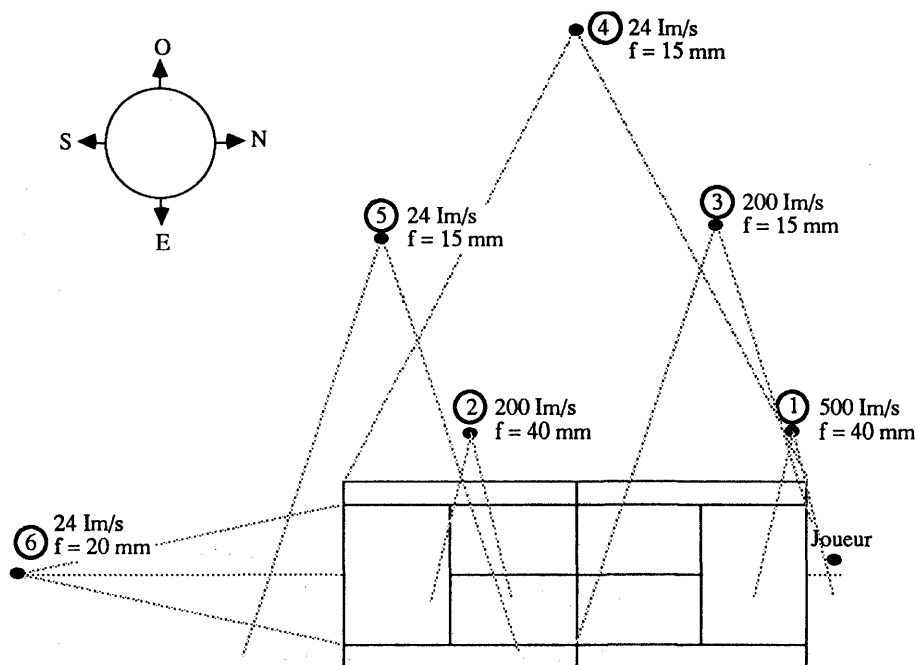
Pour un ballon de football cette méthode est inapplicable (avec notre soufflerie) le diamètre du ballon étant voisin de celui de la soufflerie. Nous avons alors utilisé une méthode indirecte qui consiste à faire osciller au bout d'un fil le ballon en rotation. Dans ces conditions le plan d'oscillation tourne (même équations que pour le pendule de Foucault) avec une vitesse  $k_L \omega / 2m$ .

Nous avons opéré dans une cage d'escalier avec une longueur de suspension de 25 m. La période de rotation du plan d'oscillation était alors de 700 s. L'inconvénient de cette méthode c'est que la vitesse linéaire du ballon n'est pas constante et qu'elle est faible par rapport au domaine réel qui nous intéresse (coup franc de football).

Enfin, la dernière méthode que nous avons utilisée c'est celle qui consiste à faire des essais de valeurs de  $K_L$  sur le modèle calculé pour faire coïncider la trajectoire calculée avec celle mesurée. Cette méthode suppose la connaissance des autres

une seconde en  
mettant en  
coïncidence  
réalité et calculs

paramètres et surtout des valeurs des variables initiales (vitesse, position, rotation). Pour ce faire nous avons obtenu un contrat du Musée des Sciences et Techniques et la collaboration active de la Fédération Française de Tennis pour filmer des trajectoires de balles sur le terrain de Roland Garros. Le dispositif général de recueil de données par ultra-caméra était destiné à déterminer les conditions initiales du départ de la balle, la trajectoire vue sous deux angles et des données relatives au rebond (Figure 2).

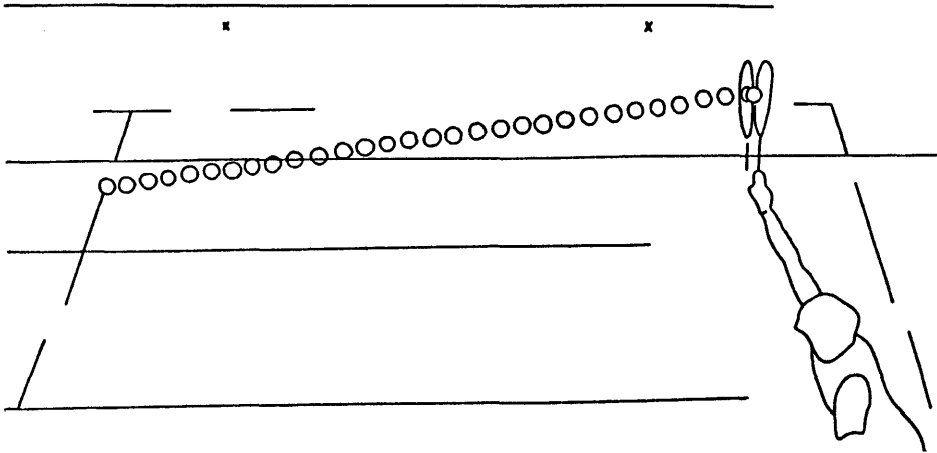


*Figure 2 - Disposition des caméras sur le terrain*

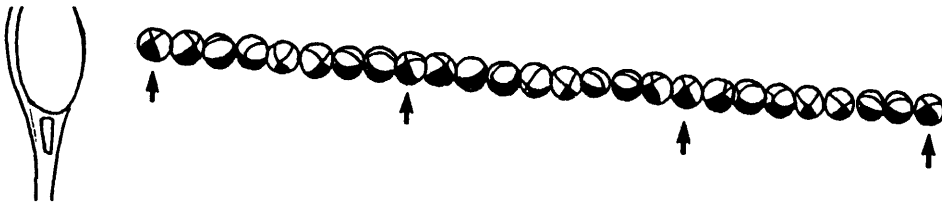
le dispositif  
d'observation doit  
être très précis

La vitesse de la balle ainsi que sa position de départ étaient données par la caméra n° 3. La fréquence de prise de vue de 200 images/s assurait un assez grand nombre de points sur le champ exploré pour extrapoler la vitesse au temps  $t = 0$  (Figure 3). La vitesse d'obturation réglée grâce à un secteur variable d'obturation au  $1/3000^{\text{ième}}$  de seconde permet d'avoir une image nette (en arrêt sur image) même pour des très grandes vitesses de la balle. Par exemple à 50 m/s la balle aura bougé de 1,7 cm pour la prise de vue alors que son déplacement entre deux images ( $1/200^{\text{ième}}$  de seconde) sera de 25 cm. La rotation de la balle était donnée par la caméra n° 1 qui prenait 500

images par seconde avec une obturation au  $1/3000^{\text{ème}}$  de seconde ce qui correspond à un bougé en rotation lors de la prise de vue de  $1/60^{\text{ème}}$  de tour pour une balle tournant à 50 tr/s. alors que entre deux images la rotation est de  $1/10$  de tour. La balle est repérée par des quartiers coloriés pour repérer la séquence qui se reproduit. On trouve par exemple 3 séquences ou 25 images ce qui donne  $N = 60$  tr/s (Figure 4).



*Figure 3 - Vitesse de la balle au départ du service (Caméra 3)*



*Figure 4 - Rotation de la balle au départ . Service slicé de Pablo Arraya (Caméra 1)*

Pour déterminer l'axe de rotation on simule sur ordinateur la rotation en faisant varier l'angle de l'axe de rotation jusqu'à reproduire les figures coloriées observées sur les images successives. Dans le cas du service slicé de Pablo Arraya analysé (Figure 4), la meilleure simulation donne un angle d'environ  $10^\circ$  pour l'axe de la rotation par rapport à la verticale (Figure 5). Cela signifie que le service est presque un slice pur, la composante sur l'axe du lift est très faible.



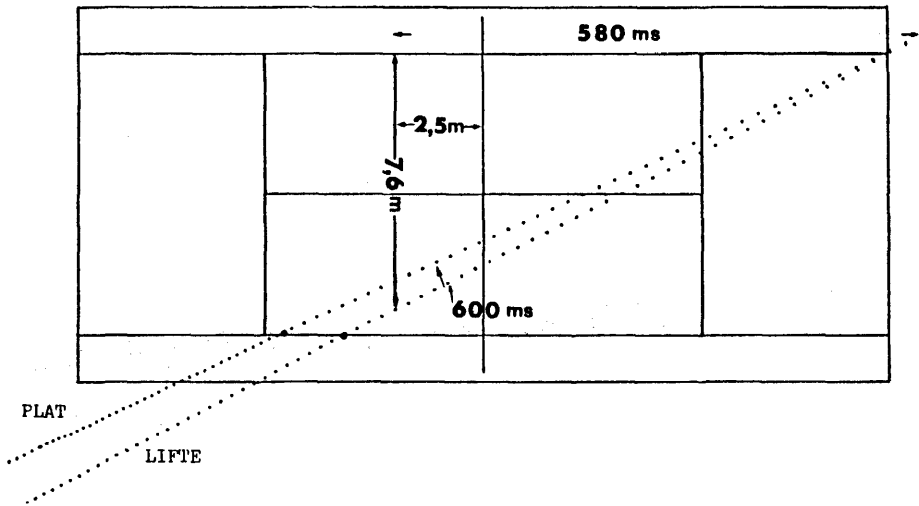
Figure 5 - Simulation de la rotation de la balle par ordinateur.

le modèle est  
validé par  
confrontation à  
d'autres situations

Les conditions initiales déterminées, on peut calculer la trajectoire grâce au modèle en fixant une valeur de  $K_L$ , puis on ajuste cette valeur pour faire coïncider les deux trajectoires.

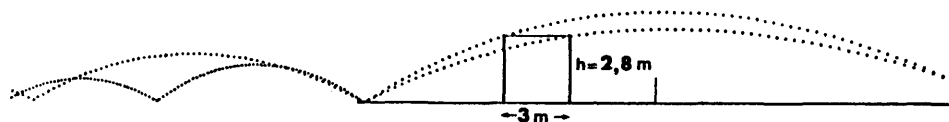
On trouve ainsi pour le tennis  $K_L = 2\pi k_L / m = 0,02 \text{ MKSA}$  à 5 %.

La validation de cette valeur se fait sur d'autres trajectoires, dans d'autres conditions de vitesse et de rotation. Ensuite on peut utiliser le modèle validé en simulation pour faire des prévisions sur l'influence des différents paramètres (Figures 6 et 7).



- Le passing shot lifté est 1 mètre plus à l'extérieur que le plat plus bas de 30 cm (à 2,5 m du filet)
- La durée de la trajectoire -du départ à 2,5 m derrière le filet- est de 670 ms

Figure 6 - Comparaison entre un passing shot croisé lifté et un plat pour une même vitesse initiale de 100km/h



Le lob lifté est toujours plus haut (ex : 70 cm au niveau du filet) ce qui fait gagner 3 m en profondeur pour passer un adversaire qui rattrape la balle à 2,8 m.

Figure 7 - Comparaison entre un lob lifté et un lob plat ayant un rebond sur la ligne de fond et même vitesse de départ 75 km/h

A ce stade la coopération avec la F.F.T. se situe surtout au niveau de la formation des cadres techniques et des entraîneurs c'est pourquoi nous avons écrit avec Gil de Kermadec un article dans un Science et Vie hors série qui précise les résultats de ce travail.

Après enquête auprès de tous les entraîneurs nationaux et régionaux qui ont reçu cet article avec un questionnaire (11), un des résultats important de cet essai de vulgarisation réside dans la mise au point d'un vocabulaire précis et bien défini sur la terminologie des effets de balle. Les termes fleurissaient ; ils étaient liés soit à la production gestuelle soit aux conditions tactiques ou aux effets sur la trajectoire, et les spécialistes parlaient entre eux mais pas toujours de la même chose. Pour accorder les discours nous avons défini les effets par rapport à des coups prototypes caractérisés par la direction de l'axe de rotation de la balle.

une définition  
nécessaire de  
termes

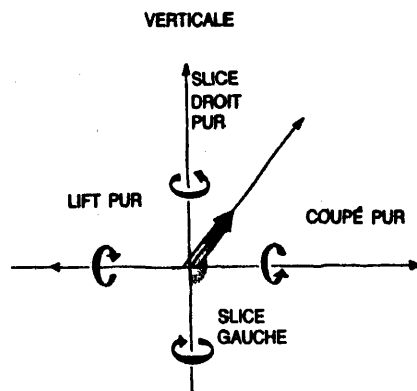


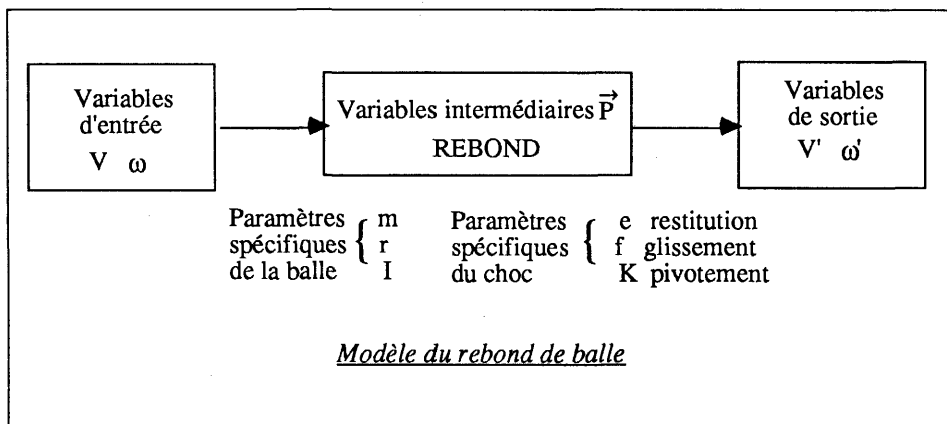
Figure 8 - Caractérisation des coups purs par les directions des axes de rotation de la balle

11. A. DUREY, "Comment les entraîneurs de tennis justifient leurs conseils par des explications à caractères scientifique. Extrait d'une enquête auprès des conseillers techniques nationaux et régionaux." *Actes des 8èmes Journées sur l'Education Scientifiques*, Chamonix, Fév. 86.

Les coups réels sont des coups qui sont en général la combinaison de deux de ces effets.

L'étude de la trajectoire se serait pas complète sans l'étude du rebond qui intervient comme une discontinuité dans celle-ci ; nous ne donnerons ici aucun détail de cette étude (12), mais nous allons seulement exposer les aspects qui permettent d'éclairer les conditions de la transposition didactique.

Le modèle permet de calculer les variables après le choc connaissant les variables avant le choc et les paramètres.



la théorie  
classique est  
insuffisante

Pour déterminer les paramètres  $e$ ,  $f$  et  $K$  nous avons mis au point des dispositifs expérimentaux de mesure directe. Ces mesures, dans des conditions quasi statiques, c'est-à-dire avec un écrasement de balle fixe dans le temps montrent que l'hypothèse de paramètres constants n'est pas justifiée. Le coefficient de restitution dépend de la vitesse verticale de la balle, le coefficient de frottement mesuré en quasi statique dépend de l'écrasement de la balle. Du point de vue pratique pour le tennis on est ainsi amené à différencier les rebonds selon les coups exécutés (en particulier en essayant de les classer en fonction de leur vitesse verticale). Mais du point de

12. Elle peut être consultée dans les publications suivantes :

A. DUREY, "*Vers des activités didactiques de mise au point de modèles en physique avec des micro-ordinateurs. Exemples de trajectoires, frappés et rebonds de balles en rotation*". Thèse d'Etat, Université Paris 7, 1987.

A. DUREY, "Modélisation théorique du rebond des balles de tennis, caractérisation du choc sol-balle". *Science et Motricité*, n° 3, Oct. 87, p 19-24.



vue théorique cela signifie qu'un rebond de balle de tennis ne peut pas être modélisé dans le cadre de la théorie des chocs, c'est-à-dire en considérant une variation brutale sous l'effet d'une impulsion (qui est la valeur intégrée sur le temps du choc des forces s'exerçant sur la balle) mais qu'il faut prendre en compte l'évolution de ces forces au cours du rebond ceci en utilisant les mêmes théorèmes sous leur forme différentielle et non sous leur forme intégrée.

Dans cette modélisation, le paramètre coefficient de frottement est en fait une courbe expérimentale obtenue en quasi statique en fonction de l'écrasement. De même, l'élasticité de la balle est une courbe obtenue expérimentalement en quasi statique en fonction de l'écrasement. Ce sont ces éléments quasi statiques qui permettent de prévoir un comportement dynamique du système. Au lieu de caractériser le rebond globalement par glisse ou roule c'est à chaque instant que le test est fait ; un même rebond peut comporter plusieurs phases différentes par exemple une phase de glissement, puis de roulement, puis à nouveau de glissement.

Si le modèle a évolué, s'il s'est affiné, c'est parce que les exigences ont changé en fonction des contrats que nous avons eu successivement. Nous avons d'abord travaillé avec la société Taraflex pour contribuer à la fabrication de sols synthétiques ayant les mêmes rebonds que la terre battue. Puis avec le laboratoire des Sols Sportifs du M.J.S. pour fabriquer un dispositif expérimental portable permettant de caractériser les sols in situ (stroboflash) (13). Enfin nous sommes en train, avec le CRIT de Poitiers, d'établir une nouvelle normalisation des balles de tennis pour le compte de l'AFNOR.

#### **4. ESSAI DE CARACTÉRISATION DES ACTIVITÉS QUE NOUS AVONS MENÉES DANS LE CADRE DES PROJETS AVEC LES INDUSTRIELS ET LES TECHNICIENS DU SPORT**

- Le problème posé est un problème de nature technique

Dans le cas des Sciences et Techniques des Activités Physiques et Sportives (STAPS) cela peut être un problème technique lié à l'amélioration de la performance sportive, ou lié à la technologie même des engins sportifs (sols, raquettes, chaussures...). Le travail que nous avons effectué a eu comme point de départ des échanges de questions réponses entre des premiers résultats

des retombées  
de ce travail  
auprès des  
industriels

des échanges  
constants entre  
les parties

---

13. Voir article de A. Durey cité note 12.

obtenus avec des outils scolaires du second degré et des demandes provenant d'industriels ou de dirigeants sportifs. Cette discussion s'est poursuivie d'ailleurs à chaque nouvelle étape d'avancement des travaux, dans la mesure où les questions de nos interlocuteurs s'affinaient, se précisaient et s'inséraient de mieux en mieux dans notre mode de description et que par ailleurs nous étions capables de mieux traduire nos résultats dans les termes spécifiques de la situation sportive.

- Il faut établir une correspondance entre une description phénoménologique associée aux questions qui nous sont posées et une formalisation compatible avec le champ théorique choisi, susceptible de donner des réponses

Ceci est surtout vrai lorsqu'on se préoccupe de technique gestuelle et de son amélioration dans une relation entraîneur-entraîné. Par exemple la description par des techniciens du tennis, d'un revers coupé passe par des expressions très variées comme *"il faut ouvrir son tamis", "accompagne la balle si tu veux éviter qu'elle monte"* etc. Il s'agit donc de passer de cette description phénoménologique à une traduction utilisant les concepts de la dynamique newtonienne. Il faut en particulier distinguer trois phases dans le mouvement de frappé de balle, avant l'impact raquette-balle, l'impact et après l'impact. Les seules variables pertinentes pour décrire l'impact en termes de choc sont les variables mécaniques liées au mouvement de la raquette juste avant l'impact. En particulier l'effet donné à la balle (ex : balle coupée) dépend d'une variable angulaire qui n'apparaît jamais dans les conseils des entraîneurs (voir note 11). Il s'agit de l'angle formé par la perpendiculaire au tamis et la direction de la vitesse du tamis.

- La formalisation du problème aboutit à la réalisation d'un modèle construit par application de théories connues. Il définit les variables et les paramètres qui caractérisent la classe des systèmes étudiés

Exemple : Le rebond d'une balle de tennis

Le système étudié est réduit à une sphère rigide de masse  $m$ , de rayon  $r$  et de moment d'inertie  $I$  (paramètres liés à la balle). Le rebond est étudié comme un choc grâce à la notion d'impulsion. Les grandeurs physiques vont subir une variation discontinue et au moment du choc sous l'effet de l'impulsion (intégrale des forces pendant le choc). Le problème consiste à trouver les valeurs après le choc. Pour cela on écrit les théorèmes généraux de la dynamique ; puis on introduit des équations supplémentaires liées aux conditions spécifiques de ce rebond. Il y a perte d'énergie pendant le rebond et il y a frottement de la balle sur le sol. Ces deux dernières conditions introduisent des paramè-

analyser en  
termes de  
physique les  
pratiques  
empiriques

le modèle se complexifie par ajout de paramètres

tres spécifiques du modèle, le coefficient de restitution énergétique et les coefficients de frottements  $f$  et  $K$ .

En pratique les variables de base correspondent aux entrées sorties du système, et les paramètres interviennent dans les relations entre ces variables.

Pour le rebond : des systèmes ayant même valeur numérique des paramètres seront dits équivalents (ex : un sol synthétique ayant les caractéristiques de la terre battue et la terre battue), des systèmes décrits par les mêmes paramètres mais dont les valeurs numériques sont différentes seront dits similaires, par exemple : deux marques de balles différentes, ou même une balle de tennis et une balle de foot peuvent être décrites dans un rebond par un modèle similaire.

- La justification du modèle nécessite des prises de données expérimentales et/ou la réalisation de dispositifs expérimentaux adaptés

il est ensuite confronté à la réalité expérimentale

La justification du modèle passe par une confrontation des résultats qu'il engendre avec les données expérimentales recueillies sur un représentant de l'ensemble des systèmes qu'il est censé décrire. D'où la nécessité d'imaginer et de réaliser des prises de données expérimentales. En général le système ou le phénomène pré-existe à l'étude et à la modélisation, il faut simplement l'observer, faire des mesures. Ceci est très différent de ce qui se passe en sciences physiques où les systèmes expérimentaux ne pré-existent pas ; ils ont été construits, ils sont une histoire issue d'un va-et-vient entre objet d'étude constitué et théorie. Exemple : la trajectoire du coup franc de Platini est un phénomène observable qui n'a pas été construit historiquement pour étudier l'effet Rubinov-Keller.

Il faut penser la prise de données objectives sur ce phénomène, pour pouvoir justifier le modèle. Les phénomènes et systèmes à étudier sont cependant souvent trop complexes (caractérisés par plusieurs paramètres) et la justification s'avère impossible. Il faut alors trouver des exemples réduits (à un seul paramètre) ou imaginer des situations expérimentales contrôlables proches de la situation réelle mais dans lesquelles certains paramètres sont éliminés. Exemple : étude des coefficients aérodynamiques en soufflerie. On étudie les forces exercées sur la balle sans rotation pour accéder au coefficient de traînée. Puis à l'aide d'un autre dispositif dans lequel la balle tourne on mesure le coefficient Rubinov-Keller.

- La démarche de mise au point du modèle se fait par approximations successives. La mise au point ne consiste pas seulement à améliorer le modèle dans un processus de justification mais aussi à l'adapter aux questions qui s'affinent au fur et à mesure de son élaboration

mais le modèle  
doit parfois être  
rectifié

Les ajustements successifs entre théorie et expérience peuvent porter sur la valeur numérique du paramètre. C'est le premier niveau de justification. La recherche d'une valeur numérique du paramètre qui établisse un accord jugé satisfaisant (à l'aide de critères objectifs) entre les résultats donnés par le modèle et les données expérimentales. Ceci n'est pas toujours possible. Par exemple, dans le cas de la trajectoire d'une balle à effet, il est impossible de faire coïncider résultats expérimentaux et résultat d'un modèle limité à la prise en considération d'une force aérodynamique de traînée. Quelle que soit la valeur du paramètre intervenant dans cette force, le modèle ne rendra pas compte de la courbure de la trajectoire. Il faut alors introduire une autre force aérodynamique dans laquelle un nouveau paramètre permet la justification. La correspondance ainsi établie doit se révéler indépendante des conditions initiales imposées à la trajectoire (variables d'entrée du modèle) ; la valeur numérique du paramètre doit être constante. On obtient ainsi un modèle validé pour un champ empirique donné et pour une utilisation donnée. Exemple : les rebonds de balles et de ballons dans les pratiques sportives.

Lorsque l'exigence de justification augmente (tolérance d'écart entre valeur expérimentale et valeur donnée par le modèle), le modèle ne peut plus être justifié sous cette forme, il faut le modifier, l'améliorer. L'exemple du rebond montre qu'il faut parfois reconsidérer le modèle dans son ensemble et abandonner une description (impulsion) pour une autre (forces instantanées pendant le rebond). En effet le modèle utilisant la notion d'impulsion a son champ de validité limité à un type de coups du tennis, c'est-à-dire à un domaine de vitesse et d'angle d'arrivée de la balle donné. Cela correspond au fait que la valeur des paramètres de ce modèle dépend de l'écrasement de la balle au cours du choc donc de la valeur de la composante verticale de la vitesse. Constatation déjà faite lors des mesures de ces paramètres en statique au laboratoire. Le modèle utilisant la notion de force et étudiant les variations des grandeurs mécaniques pendant le choc permet de définir de nouveaux paramètres qui restent constants dans un domaine d'expériences intégrant tous les coups du tennis.

## **5. RETOUR VERS LE CADRE SCOLAIRE, PERSPECTIVES POUR LA TRANSPOSITION DIDACTIQUE**

Nous pensons que le vice fondamental du deuxième acte de la transposition tel qu'il est pratiqué depuis toujours est de vouloir faire reconstruire par les élèves le savoir consigné dans le programme en prenant de façon plus ou moins explicite la pratique du physicien en référence. Ceci conduit à trois modifications principales dans l'enseignement des sciences physi-

ques : le problème des finalités, le choix des Systèmes-modèles et la possibilité de mettre en œuvre une méthodologie de modélisation.

redéfinir les  
finalités de  
l'enseignement  
scientifique

La finalité actuelle, c'est la connaissance. Cela se traduit par des objectifs qui peuvent être plus nuancés ou plus volontaristes (savoir faire, méthode, ...). Mais quels que soient ces objectifs ils peuvent se décrire en un texte de savoir à connaître ou de savoir mettre en œuvre dans des situations types. De ce fait, toutes les tentatives de focaliser les activités d'élèves sur autre chose que la mémorisation de ces textes de savoir est très difficile. Les travaux pratiques notamment apparaissent comme une illustration d'un texte de savoir ou une introduction à un texte de savoir. La réalisation correcte du T.P. n'a aucune influence sur la connaissance. Le T.P. n'a aucun enjeu sinon la note qu'on peut avoir. Pour transposer nos activités de référence, il faut garder à l'activité une finalité pratique ou technique. Ainsi, on peut distinguer très clairement la finalité de l'activité qui se juge par une réalisation concrète conforme à un cahier des charges dont le contrôle s'effectue assez directement et conjointement entre élèves professeurs, et des finalités de l'enseignement de la discipline, qui se jugent sur un ensemble d'activités qui portent sur des démarches et les méthodes utilisées par les élèves dans ces activités. Les activités de l'élève doivent être l'enjeu de la solution à trouver ou de la production. C'est le cas par exemple dans les travaux originaux réalisés par Anne Goube sur l'écriture en science au collège (14) : rédiger un compte-rendu d'expérience qui doit être un document communicable à un autre élève extérieur à la classe. Celui-ci devra comprendre et refaire l'expérience sans avoir besoin d'aucune autre aide ou indication, rédiger une notice d'utilisation d'un appareil ou bien rédiger des "anti-sèches" utilisables pour le contrôle. On voit ainsi comment le résultat de l'activité est directement sanctionné par le but recherché sans que la subjectivité du professeur soit mise en cause et sans que le résultat soit connu d'avance.

Ces choix de finalités étant faits, il reste le choix des Systèmes Modèles sur lesquels peuvent porter ces activités et le choix des méthodes à faire utiliser par les élèves.

les modèles  
enseignés sont  
trop théoriques

Dans les programmes scolaires la priorité est donnée aux modèles théoriques très généraux (oscillateur harmonique, mouvements sans frottements, chocs élastiques...). Ces modèles donnent peu d'informations sur les systèmes réels. Ils vont même souvent à l'encontre des évidences et des observations (pas de perte d'amplitude du pendule, rebonds de balles à l'infini...). De ce fait, ils sont difficiles à faire comprendre, à enseigner, car ils ne sont valables que pour les cas poussés à

---

14. A. GOUBE, "Ecrire en Sciences au Collège", *Actes des 11èmes Journées sur l'Education Scientifique*, Chamonix, Janv. 89.

la limite (frottement tendant vers zéro, pas de pertes d'énergie...). Ces modèles très généraux n'ont pas de référents empiriques communs, c'est-à-dire habituels courants, de ce point de vue, leur élaboration a constitué une véritable rupture avec la connaissance commune et c'est cette difficulté, cette rupture nécessaire qui pose problème pour les enseigner. Une solution consiste à imaginer et produire des systèmes complexes, qui simulent ou qui reproduisent les conditions théoriques de validité du modèle tétralogique (frottements nuls, balles à forts coefficients de restitution...). La table à coussin d'air, typique de cette démarche, constitue depuis plusieurs années le complément expérimental nécessaire suffisant et exclusif de l'enseignement des débuts de la mécanique. Les modèles théoriques ainsi introduits sont en revanche de portée plus générale et ont une valeur heuristique qui facilite l'approche d'autres domaines empiriques où ils restent toujours valables.

Le choix des modèles généraux pour l'enseignement implique un référent empirique ad-hoc, ou son absence. Du point de vue de l'élève, cela revient souvent au même, dans la mesure où le système physique ad-hoc, souvent techniquement sophistiqué, est perçu comme un dispositif "pour que cela marche". C'est ainsi qu'on établit une véritable coupure entre les connaissances acquises en cours de physique et la vie réelle (la physique, ça marche en classe de physique avec le matériel du labo, mais ça n'a rien à voir avec le réel). Même si le dispositif est étudié et présenté comme un système particulier, cas limite de cas réels, il faut à ce moment-là, introduire le phénomène que l'on a tenté d'éliminer au moins du point de vue qualitatif. On est donc dans la situation paradoxale qui consiste à parler d'un phénomène qu'on veut justement ne pas étudier.

La situation est tout à fait différente de ce point de vue dans les laboratoires de physique. Certes, on est souvent aussi dans le cas de systèmes ad-hoc très sophistiqués, qui sont censés éliminer les phénomènes parasites pour relier le résultat expérimental à un problème théorique nouveau. Mais la différence essentielle avec la situation d'enseignement décrite ci-dessus provient de la maîtrise des parasites possibles, ceux qui ont été contrôlés pour être éliminés ou minimisés, ceux qu'on n'a pas pu éliminer mais dont on connaît un modèle qui permet d'en tenir compte et ceux enfin qui peuvent être révélés a posteriori par l'expérience elle-même.

Les systèmes réels, ceux qui en mécanique notamment sont des systèmes usuels, courants, connus de tous, sont des systèmes dont la modélisation théorique est complexe. Les phénomènes mis en jeu sont variés et ne sont tous modélisables simplement (dynamique des fluides). Il en résulte une éviction de ces systèmes et de leurs modèles de l'enseignement. Car dans ce cas, on a bien le référent empirique à disposition dans la tête des élèves, mais on craint que les connaissances théoriques demandées soient trop importantes, et trop variées. Si on voulait, on serait donc dans la situation paradoxale qui consisterait à

une physique  
coupée du réel

de laquelle  
l'expérience  
courante est  
exclue

ne pas savoir parler (décrire formellement, modéliser) de phénomènes qu'on connaît (expérience familière courante). On ne disposerait pas des théories et des modèles généraux suffisants permettant de décrire les systèmes réels (pendule amorti, rebond avec rotation).

Poussé à l'extrême ce raisonnement signifierait que l'on ne peut pas faire de physique sur systèmes complexes avant de connaître toute la physique. Or nous pensons par exemple qu'il n'est pas nécessaire de tout savoir sur l'effet Rubinov-Keller pour pouvoir commencer à l'utiliser dans un modèle. Une activité d'application de cette théorie peut conduire à lui donner un sens certes ponctuel, mais constitutif du sens général. On est obligé de constater qu'il y a une relation de complexité appliquée à l'ensemble < Modèle théorique - Système étudié >. En ayant pratiqué la transposition didactique comme un acte de simplification vers le théorique, la physique à l'école est souvent réduite à des couples < modèle - système >, qui sacrifient la relation aux référents empiriques à la faveur d'un schéma directeur logique de reconstruction théorique partielle du domaine. L'institution française qui gère et génère l'enseignement est ainsi amenée à se poser la question de l'illustration de modèles térautologiques simples par des manipulations et des dispositifs adaptés (banc à coussin d'air) ou par la recherche d'expériences induisant le champ théorique visé. Une fois celui-ci choisi et apprêté - ce qui est évidemment un casse tête chinois car on ne peut facilement réintroduire la relation au champ empirique lorsqu'on est au niveau d'abstraction où la simplification a conduit. La rencontre avec une pratique sociale utilisant la physique nous a permis de montrer qu'il était possible de rééquilibrer le choix en travaillant sur des systèmes réels et non sur des systèmes ad-hoc.

alors que la  
démarche  
inverse est  
possible

La complexité de la modélisation des systèmes réels est certes un problème, mais il peut être surmonté. Tout d'abord en utilisant des modèles types simples, pour les complexifier par addition d'éléments nouveaux. Le modèle n'est pas changé fondamentalement, il est simplement étoffé. Ses caractéristiques et son fonctionnement interne restent les mêmes. On peut alors supposer que ces ajouts ne constituent pas une difficulté de fond ; c'est le cas de l'exemple du coup franc de Michel Platini (adjonction de forces). La difficulté à ce niveau consiste à trouver les documents, et les éléments d'information permettant cette amélioration. C'est là que la transposition peut énormément apporter. Ensuite c'est renoncer à vouloir décrire toute la réalité, mais utiliser les modèles simples avec paramètres pour accéder à une partie seulement du système ou du dispositif. On peut par exemple tirer beaucoup d'informations de la seule mesure de la période d'oscillation libre de clubs de golf ou de raquette de tennis, en utilisant le modèle très général de l'oscillateur harmonique.

Le dernier problème concerne la démarche qui permet de rallier ces finalités de l'activité. Cette démarche est ici l'enjeu de la

réussite, elle conditionne l'accès au résultat visé, nous l'avons caractérisée par un certain nombre d'étapes autour de la mise au point de modèles par approximations successives. L'objectif d'enseignement est ici clairement un objectif méthodologique, mais celui-ci sera sanctionné par la qualité de la production donnée par les élèves sur le problème en question, appréciable directement par les élèves eux-mêmes.

l'élève doit  
résoudre son  
problème

Les problèmes à résoudre doivent nécessiter une démarche de mise au point de modèle. Même si l'enseignant décide du thème ou du système sur lequel va porter le problème, il ne faut pas que la formalisation de celui-ci soit entièrement faite par l'enseignant ou celui qui a fabriqué l'exercice ; cela reviendrait à éliminer une partie très importante de la démarche, celle qui, sans cesse, refinalise et redonne sens à l'activité. Au lieu d'avoir à résoudre un problème qui lui a été posé, l'élève doit se poser un problème compte tenu de ce qu'il sait déjà résoudre. C'est ce qui correspond dans la pratique de référence à la discussion entre le physicien et l'utilisateur. Même si elle est plus importante au début du travail, elle peut ressurgir à n'importe quel autre moment de la modélisation. Du point de vue didactique cette étape est aussi très importante, pour définir clairement le but du travail de modélisation, pour formuler le problème en termes acceptables par le professeur. Il y a autour de ces reformulations un travail important d'expression qui fait émerger les préconceptions des élèves, les polysémies et les points de vue diversifiés. Les solutions envisagées possibles sous le contrôle de l'enseignant seront passibles d'une démarche de mise au point de modèle dont la principale caractéristique réside dans la possibilité de trouver une valeur d'un paramètre caractérisant le système. Cette recherche de paramètre passe par une confrontation entre des résultats expérimentaux et des résultats provenant d'un calcul du modèle. La validité de la démarche est définie par un domaine dans lequel le paramètre reste constant dans la série de manipulations faites avec le même système dans des conditions initiales différentes. Cette démarche ne fait pas l'objet d'un enseignement explicite et systématique. C'est un objectif d'enseignement. Pour aider concrètement le retour dans le cadre scolaire, nous avons de ce fait essentiellement créé des outils logiciels permettant cette démarche et avons mis en forme des résultats pouvant servir de base d'informations pour des activités scolaires, l'activité elle-même restant à créer par les enseignants et les élèves, aidés par l'environnement mis à disposition. Après avoir testé la faisabilité de nos propositions en classe de Première S dans un cours facultatif d'informatique (15) nous avons produit avec des enseignants, des fiches pédagogiques décrivant des parcours pos-

créer des outils  
pour les  
enseignants

15. M. BERREY, "Mise en place d'une étude de modélisation par des élèves de 1ère S en utilisant le micro-ordinateur", Mémoire de Tutorat, DEA de didactique des disciplines, Paris 7, 1984.



sibles de modélisation avec l'ordinateur, puis nous nous sommes plus particulièrement intéressés à un aspect qui apparaît déterminant dans cette approche qui est la formation des enseignants à la mise en place et à la pratique en classe d'activités de modélisation sur des systèmes pris hors des dispositifs d'enseignement (16).

La question centrale de ce travail est bien celle du choix d'une pratique sociale de référence pour l'enseignement des sciences physiques. Nous avons montré que la démarche du physicien comme référence conduisait à un échec, c'est-à-dire à des formes d'activités complètement éloignées de ces références. Nous n'en concluons pas pour autant à l'impossibilité d'enseigner la physique mais nous reformulons le problème de cet enseignement en cherchant un aspect de cette discipline qui pourrait s'enseigner et qui pourrait préparer à la discipline elle-même. La recherche passe alors par la définition de pratiques sociales qui pourraient servir de référence et aider ainsi à construire des activités scolaires dont le lien avec ces pratiques soit contrôlable et explicite. Nous avons choisi de rallier une pratique sociale extérieure à l'école, à partir de l'utilisation de modèles simples, scolaires, appliqués au domaine sportif. Nous avons ainsi parcouru l'espace béant entre le cadre scolaire et les pratiques sociales extérieures à l'école. A chaque étape franchie nous l'avons analysée dans le but de faciliter le retour vers les activités scolaires. Notre implication personnelle dans le champ de ces pratiques sociales, la reconnaissance de nos travaux et les contrats obtenus sont en soi une validation de la démarche didactique et une première réponse à la problématique posée : la physique du programme est opérationnelle, on peut lui réattribuer un référent empirique qui ne soit pas de complaisance.

Le fait d'avoir ainsi trouvé une pratique sociale d'application de la physique pas trop éloignée du cadre scolaire permet d'envisager une transposition. Les chances de réussite tiennent à cette proximité dont chaque étape qui sépare la référence du cadre scolaire, est connue. Cela tient au fait que les activités appliquées sont moins abstraites que celles du physicien. Elles n'ont pas pour but la mise à jour de nouvelles connaissances, mais seulement une concrétisation sur un système (par la valeur numérique d'un paramètre) de connaissances existantes.

Alain DUREY  
Ecole Normale Supérieure  
de Lyon (Saint-Cloud)  
et LIRESPT (Paris VII)

---

16. "Polycopié de formation continue des enseignants de sciences physiques", CARFI, Versailles, 1987.

bâtir un  
enseignement sur  
des pratiques  
liées au réel  
connu des élèves



# SYSTÈMES ET MODÈLES : QUELQUES REPÈRES BIBLIOGRAPHIQUES

Victor Host

*L'étude bibliographique comparée fait apparaître la diversité des conceptions relatives aux systèmes et la polysémie du terme de modèle. De ce fait les deux concepts ne peuvent constituer la matrice commune des disciplines au cours de la transposition didactique. Mais les points de convergence des analyses sont importants pour le didacticien. La référence au système permet de situer la dissection analytique dont l'emploi exclusif tend à donner une idée caricaturale de la démarche expérimentale. La modélisation comporte des opérations intellectuelles communes dont l'explicitation est à la fois une exigence de rigueur disciplinaire et un facteur du développement cognitif.*

Le foisonnement actuel des ouvrages relatifs aux systèmes et aux modèles est parfois déconcertant. S'agit-il d'un simple élargissement des méthodes de la science ou d'une révolution scientifique telle que la définit Kuhn ? Sur le plan de la pratique pédagogique la référence systémique conduit-elle à une perspective transdisciplinaire ou oriente-t-elle seulement la transposition didactique dans un domaine donné sans faire éclater les cadres disciplinaires ? L'analyse comparée de quelques ouvrages à orientation épistémologique ou didactique permet de dégager certaines implications relatives à la recherche pédagogique en sciences malgré la diversité des points de vue.

## **1. Robert KARPLUS. *Science Curriculum Improvement Study*. Chicago : Rand Mac Nally et C°. 1962.**

(Curriculum destiné aux élèves de l'école élémentaire de 5 à 12 ans, traduction ; Montréal : Ed. Psychologiques).

La notion de système revient constamment en physique, principalement en mécanique et thermodynamique. Mais ce terme est introduit dans l'enseignement de façon incidente, en donnant lieu à des définitions "locales" sans métaréflexion sur la démarche intellectuelle impliquée. D'autre part de nombreux "objets" des physiciens comme le rayon lumineux, le point matériel, l'atome de Bohr sont en fait des modèles construits par l'esprit humain sans que cet aspect n'ait été explicité. Ces

lacunes contribuent à donner un aspect formel à l'enseignement de la discipline, à négliger l'approche qualitative précédant la mathématisation et à compromettre l'initiation précoce à la discipline.

Quand Karplus, chercheur connu en physique des particules, s'orienta vers la construction d'un curriculum scientifique pour jeunes enfants il décida de se centrer sur les concepts méthodologiques de base de la discipline. Pour lui le concept central de la science est celui d'interaction : tout phénomène, toute transformation peuvent être caractérisées par une relation entre les objets agissant les uns sur les autres. On évite ainsi d'attribuer les actions aux objets eux-mêmes et on supprime la dissymétrie entre cause et objet. La notion d'interaction détermine celle de système, l'ensemble des objets physiques qui interviennent dans une interaction donnée, par exemple l'interaction entre l'aimant et le clou.

La représentation mentale d'un système donné - l'auteur prend l'exemple d'un distributeur de friandises - conduit à un modèle qui fournit une explication possible de fonctionnement du système sans être nécessairement une copie exacte de la réalité : le modèle permet de coordonner les observations et de prévoir l'effet de certaines interventions. La progression proposée par le SCIS en physique porte successivement sur les objets matériels, l'interaction dans un système, les sous-systèmes et les variables, la relativité des positions et des mouvements, les sources et les transferts d'énergie, les modèles imaginés à partir de constructions mécaniques ou de circuits électriques. Le curriculum de biologie centré sur la notion d'écosystème n'est cependant pas fondé sur les cadres conceptuels définis en physique.

Pour l'auteur, la physique ne débute pas par la mathématisation mais par le dépassement de la pensée précausale fortement teintée d'anthropomorphisme. Il propose d'emblée une analyse des situations expérimentales qui élimine le sujet, l'événement et l'histoire pour situer les données dans un espace et un temps construits, pour exprimer la causalité et le déterminisme par des relations universelles et répétables. Les notions de système et de modèle permettent de définir les propriétés qui sont traitées ultérieurement par la mathématisation ; elles facilitent le dépassement des données de la perception immédiate pour définir les grandeurs fondées sur le principe de conservation : masse, énergie, quantité de mouvement, flux etc ; elles sont souvent matérialisées par la "boîte noire" qui transforme les flux.

Mais ce curriculum pose un certain nombre de questions. Peut-on construire directement ces concepts méthodologiques généraux à partir de situations expérimentales orientées de façon très directive pour réinvestir ensuite ce savoir procédural dans des situations d'apprentissage qui conduisent à l'acquisition d'un savoir déclaratif spécifique ? Suffit-il d'appliquer de façon quasi mécanique des règles méthodologiques pour éviter les blocages dus aux représentations anthropomorphiques et ar-

le SCIS propose une initiation à la physique centrée sur les concepts d'interaction, de système et de modèle

l'initiation scientifique peut-elle se faire à partir de situations imposées sans référence à l'environnement technologique de l'enfant ?

tificialistes des enfants ? Ne vaudrait-il pas mieux définir des concepts élémentaires comme ceux de dissolution ou d'air pour passer ensuite à une métaréflexion sur les opérations intellectuelles ? Ne pourrait-on pas s'appuyer davantage sur des activités techniques diversifiées pour introduire les activités de repérage et de mesure qui permettent d'élargir la perspective systémique ?

Dans quelle mesure la définition des systèmes et modèles proposée dans ce curriculum est-elle généralisable ? Pourquoi leur réutilisation dans le même curriculum en biologie est-elle limitée ? L'ouvrage de Von Bertalanffy, l'un des fondateurs de la théorie des systèmes fournira des éléments de réponse.

## **2. Ludwig VON BERTALANFFY. *Théorie générale des systèmes*. Paris : Dunod. 1973. Traduit par Jean-Benoît Chabrol.**

Cet ouvrage présente une synthèse des publications de l'auteur qui s'étendent sur une durée de trente ans.

Deux problèmes ont orienté sa démarche vers une théorie qu'il qualifie de nouveau paradigme ayant conduit à une révolution scientifique telle que la définit Kuhn. D'une part les recherches de l'auteur en biologie théorique l'ont amené à chercher une problématique permettant de dépasser la controverse vitalisme-mécanisme. Il ne pense pas que l'orientation réductionniste classique puisse expliquer complètement la complexité des équilibres biologiques, l'emboîtement des structures dans un ordre hiérarchique, le développement de l'organisme avec ses régulations, l'évolution des espèces ; de façon générale les phénomènes d'émergence et de téléonomie. Il ne suffit pas de compléter la biologie analytique par la cybernétique et la théorie de l'information : une remise en cause épistémologique est nécessaire. Mais celle-ci ne consiste pas à admettre un principe organisateur de type anthropomorphique relevant du vitalisme et échappant à l'expérimentation.

C'est à l'intérieur de la science qu'il faut repenser le cadre de la causalité et du déterminisme, en substituant à l'explication par des chaînes causales linéaires indépendantes, une explication qui part des propriétés d'une totalité organisée, et qui prend en compte les problèmes posés par un grand nombre de variables en interrelation. D'autre part la théorie des systèmes ne concerne pas seulement la biologie. Elle a permis une rencontre entre spécialistes de nombreuses disciplines scientifiques, à une époque où leur cloisonnement croissant entrave la communication et freine la création de champs conceptuels nouveaux, qui se situent souvent à l'intersection de plusieurs disciplines. L'auteur ne pense pas que l'unité de la science se réalise à partir d'une conception réductionniste de la méthode expérimentale, fondée sur le postulat du déterminisme universel de Laplace ou

la théorie des systèmes permet de compléter l'analyse réductionniste en biologie par l'étude des propriétés d'une totalité organisée

elle contribue à réduire le cloisonnement disciplinaire par une analyse systémique qui permet de repérer les isomorphismes et de les traiter par des méthodes communes

sur le positivisme logique de Carnap, pour qui la science se reconnaît au fait que tous les énoncés peuvent s'exprimer en dernier lieu dans le langage de la physique, ou encore sur l'atomisme qui explique toutes les propriétés macroscopiques par addition de propriétés microscopiques. Pour lui, la progression vers l'unité de la science se fait par la recherche des isomorphismes entre les schémas conceptuels qui se rapportent aux différents aspects et niveaux de la réalité ; la théorie des systèmes définit les cadres qui permettent de repérer ces isomorphismes et de les mettre en œuvre. Elle s'appuie sur les deux fondements de la connaissance : la structure cognitive du sujet qui organise les données à partir d'un nombre limité de schémas et la structure objective du réel qui impose ses contraintes, même si la pensée scientifique admet parfois des représentations opposées. En comparant les principes fondamentaux de leurs disciplines respectives, les fondateurs de la théorie des systèmes ont retrouvé des algorithmes et des instruments conceptuels identiques bien qu'élaborés de façon indépendante.

L'étude des systèmes, c'est-à-dire d'ensembles complexes et organisés caractérisés par des variables interdépendantes, conduit à des concepts méthodologiques nouveaux par deux voies différentes : une approche logico-mathématique et une approche thermodynamique. La première n'est pas présentée de façon axiomatique et rigoureuse à partir d'un modèle général. D'ailleurs, en fonction de la relation qui lie la variation de la grandeur d'un élément à toutes les autres mesures, s'exprime dans la quasi généralité des cas par un système d'équations différentielles non résoluble même par calculatrice. L'auteur se limite à l'étude de cas particuliers pour montrer que l'évolution d'un système à variables multiples en interaction peut être très différente de celle qui a été supposée en additionnant l'effet de variables considérées comme indépendantes.

D'autre part, les mêmes modèles logico-mathématiques peuvent s'adresser à des systèmes concrets très différents. Par exemple l'évolution d'un système en fonction du temps peut se traduire par un équilibre stable ou instable, des oscillations périodiques, donner lieu à une croissance exponentielle ou logistique suivant la forme mathématique des données, indépendamment du phénomène étudié. La croissance relative de parties en compétition se traduit par l'équation allométrique qu'il s'agisse de revenus ou de la taille des cornes des ruminants. Quelquefois, une même transformation définie par les mêmes données, peut être calculée à partir de l'état initial dans une perspective causale ou à partir des valeurs terminales dans une perspective finaliste. Pour certains systèmes d'équations, la variation infime d'un paramètre peut provoquer une variation considérable de l'ensemble des facteurs. L'auteur fonde certaines propriétés fondamentales des systèmes biologiques et sociaux (comme la sensibilité, la centralisation des réponses...) sur certaines modalités de l'interaction, indépendam-

l'interaction des variables dans des systèmes concrets très différents peut s'exprimer par des modèles logico-mathématiques communs permettant de calculer l'évolution du système, le type de croissance etc...

ment des structures variées qui leur servent de support. Les isomorphismes ainsi définis se distinguent des analogies globales non calculables. De plus ils permettent de transférer l'expérimentation d'un système peu accessible sur un modèle qui représente un système bien maîtrisé.

l'évolution de la  
plupart des  
systèmes  
s'explique par la  
thermodynamique  
des systèmes  
ouverts

La référence thermodynamique permet à l'auteur de sortir du cadre formel des mathématiques. Il oppose les systèmes fermés évoluant vers un état d'équilibre vrai, caractérisé par une valeur minima de l'énergie libre et par l'impossibilité de fournir du travail à ce stade, et les systèmes ouverts susceptibles d'être maintenus de façon invariable à une certaine distance de l'état d'équilibre vrai, grâce à un flux continu de matière et d'énergie. Ces systèmes se rencontrent presque exclusivement en biophysique et en chimie industrielle. Ils sont caractérisés par une prédominance des réactions lentes, portant sur des composés riches en énergie et orientés par l'action des catalyseurs. Ils présentent quelques propriétés originales non prévues par la thermodynamique des systèmes fermés : par exemple, la possibilité d'évoluer vers un état improbable caractérisé par une organisation dynamique, et l'équifinalité, c'est-à-dire la possibilité d'atteindre un état final déterminé indépendamment des conditions initiales et du chemin parcouru. Ces aspects seront développés de façon beaucoup plus précise par Prigogine (cf. 4).

l'évolution des  
systèmes  
biologiques  
débouche sur  
une mécanisation  
progressive,  
caractérisée par  
le passage d'un  
équilibre  
dynamique à une  
organisation  
statique

Les derniers chapitres de l'ouvrage portent sur l'application de la théorie des systèmes dans différentes disciplines : biologie, sciences de l'homme et de la société, histoire. L'auteur développe surtout les exemples biologiques à partir de ses propres travaux. L'étude des régulations le conduit à distinguer deux temps dans l'évolution des espèces et le développement des organismes : les régulations traduisent d'abord l'équilibre biochimique dynamique dans un système ouvert, traversé par un flux qui sous-tend les caractéristiques générales du vivant : croissance, irritabilité, reproduction. Puis celui-ci se fige par mécanisation progressive en une organisation statique régulée par des mécanismes cybernétiques de rétroaction avec transfert d'information comme dans les systèmes technologiques. De larges développements sont consacrés au métabolisme (loi des surfaces) et à la croissance. Ils mettent en relief deux contributions importantes de la démarche systémique : le traitement mathématique des données conduit à expliciter des constantes ayant une signification empirique car elles peuvent faire l'objet d'une mesure directe ; une fonction complexe comme le métabolisme basal peut être calculée à partir d'un modèle simple liant quelques grandeurs d'état, sans prendre en compte l'extrême complexité des relations qui assurent l'équilibre à l'intérieur de la boîte noire constituée par l'organisme.

La théorie des systèmes telle qu'elle est décrite par l'auteur ne constitue peut-être pas une révolution scientifique, car elle ne remet pas en cause le postulat déterministe et l'explication causale. Mais elle permet de dépasser les formulations réductionnistes, qui ont certes permis le développement de la physique classique et sous-tendent le développement technologique,

la théorie des systèmes ne vise pas seulement à expliquer le fonctionnement des systèmes auto-organisés mais aussi leur développement

mais qui ne suffisent pas à expliquer les systèmes biologiques et sociaux car il est nécessaire de prendre en compte la véritable complexité des objets premiers de la science. La démarche expérimentale classique fondée sur le principe de raison suffisante - relation entre une cause et un effet, séparation des variables, vérification successive de chaque facteur par une démarche hypothético-déductive - apparaît comme une démarche préalable bien que nécessaire pour pouvoir définir les éléments du système qui devra être étudié dans sa globalité. L'extension de la théorie aux systèmes auto-organisés ne peut pas se limiter à une simple application de la cybernétique et de la théorie de l'information, en évacuant les problèmes du développement, de l'équifinalité, de l'antériorité de la régulation par rapport à la différenciation des appareils. Cependant, le didacticien éprouvera une certaine difficulté à traduire les principes posés dans la pratique de la classe. Les compétences transdisciplinaires proposées se rapportent le plus souvent à une modélisation mathématique alors que celle-ci n'est pas toujours réalisable en classe ; l'approche qualitative, en particulier sa traduction par les graphes, est négligée. L'étude des systèmes ouverts et des relations probabilistes est trop rapide pour déboucher directement sur une transposition didactique. L'aspect pédagogique de la pensée de von Bertalanffy sera repris dans l'exemple 3 et les travaux de Prigogine (exemple 4) permettront de mieux cerner l'apport de la thermodynamique à l'étude des systèmes.

### **3. Horst BAYRUBER, Gerhard SCHAEFER, *Kybernetische Biologie*. IPN. Einheitenbank. Köln : Aulic Verlag 1978.**

l'étude de quelques problèmes concrets de biologie par l'analyse systémique conduit à une métaréflexion sur les instruments employés

Cette unité curriculaire à l'usage des enseignants du second cycle des lycées vise à compléter l'enseignement actuel de la biologie. Elle peut soit être fractionnée dans le cadre de l'enseignement obligatoire, soit faire l'objet d'un programme optionnel d'un semestre. Son contenu est plus large que ne l'indique le titre. Il répond à une double finalité : réaliser une meilleure approche de certains problèmes de biologie grâce au repérage et à la modélisation des systèmes impliqués, maîtriser les méthodes, les algorithmes et les concepts de la théorie des systèmes pour les appliquer à la vie quotidienne dans un environnement marqué par l'informatique. En particulier, les auteurs se proposent de faciliter le passage de la pensée linéaire, limitée à des relations cause-effet indépendantes, à la pensée systémique, caractérisée par l'analyse de réseaux d'interactions.

Pour réaliser ces deux objectifs, ils partent de problèmes précis de biologie, de physiologie, d'écologie ou de génétique, plus rarement de problèmes de physique ou de technologie. Les



données, éventuellement établies à partir d'une expérimentation, sont modélisées pour répondre à la question posée ; la signification des instruments conceptuels proposés apparaît clairement ; la métaréflexion sur les principes généraux suit l'étude d'exemples concrets. L'ouvrage ne se présente pas comme les cours de cybernétique destinés aux spécialistes, cours où les exemples ne servent qu'à illustrer ponctuellement une présentation formelle. La publication comprend des chapitres d'informations scientifiques, des fiches pédagogiques, des protocoles expérimentaux précis et pratiques, des fiches d'exercices et d'épreuves d'évaluation testées en situation de classe.

L'étude des auteurs se limite à l'analyse du fonctionnement de systèmes préalablement organisés. Ils distinguent des régulations directes entre éléments du système, sans transfert d'information, et les régulations indirectes, où une organisation assure le transfert de celle-ci.

Les premières sont modélisées à l'aide du diagramme sagittal. Grâce à la diversité des exemples, ils font apparaître la polysémie de la flèche et la variété des types de modélisation qu'elle exprime. Ils développent en particulier les modèles qualitatifs de régulation, en signalant les erreurs repérées dans la pratique de la classe. Citons les équilibres stables, les relations de concurrence ou d'équilibre instable, les cycles de croissance exponentielle ou d'autocatalyse. Par ailleurs, l'écriture algorithmique des diagrammes permet de raisonner sur la composition des corrélations par l'application de règles de déduction formelles.

Les régulations avec transfert d'information sont représentées par un modèle général, suivant des conventions normalisées en ce qui concerne la syntaxe, c'est-à-dire la nature des éléments et leur mise en relation. La sémantique est exprimée par les étiquettes qui donnent une signification concrète au schéma : cycle de régulation de l'eau, cycle de régulation thermique d'une grenouille ou d'une souris. La représentation des régulations s'appuie sur le modèle de la boîte noire. Celle-ci représente d'abord l'organisme entier, puis on la décompose en sous-systèmes considérés à leur tour comme des boîtes noires ; le programme de l'explication dévoile des sous-systèmes successifs emboîtés. La dernière partie de l'ouvrage est consacrée au transfert d'information. L'étude qualitative trop souvent négligée - distinction entre sémantique et syntaxe de l'information - précède l'étude quantitative. Le transfert de l'information est étudié avec précision dans le cas des organes des sens, depuis l'excitant jusqu'au système nerveux central en définissant les différentes grandeurs physiques impliquées dans la transmission : excitant, étages successifs du récepteur, axone, synapse.

Les concepts de base sont souvent introduits par des situations originales, mais susceptibles d'être effectivement réalisées, par exemple lorsqu'il s'agit de comparer l'énergie régulée à l'énergie qui sert de support au flux d'information. Les exercices d'évaluation portent sur l'analyse critique de diagrammes sagittaux,

les instruments de modélisation (diagramme sagittal, cycle de régulation) doivent être signifiants et employés suivant des conventions rigoureuses

l'analyse  
proposée porte  
uniquement sur le  
fonctionnement  
des systèmes mais  
non sur leur  
développement  
et leur formation

sur la construction ou l'interprétation de cycles de régulation, sur la mesure et le transfert de l'information.

Cet ouvrage réalise en grande partie les ambitions des auteurs. Les démarches de modélisation proposées éclairent un certain nombre de domaines de la biologie (régulations de l'organisme, physiologie du système nerveux, dynamique des populations). On peut regretter qu'ils n'indiquent pas les limites de leur analyse : en assimilant les systèmes biologiques à des systèmes techniques, ils étudient le fonctionnement d'une organisation donnée, sans se préoccuper de son origine et de son histoire : or celles-ci conduisent à un développement de la théorie des systèmes (cf. Prigogine). D'autre part, cet ouvrage constitue une initiation opérationnelle à la pensée systémique. Il vise à la maîtrise effective de certains instruments dont les élèves peuvent saisir la fonction ; l'expérience et la formalisation sont en interaction. L'activité de modélisation proposée n'est pas une simple représentation ; elle développe une écriture algorithmique qui sert non seulement de support à une interprétation logique mais qui peut conduire à un traitement informatique des propositions.

**4. Ilya PRIGOGINE, "La thermodynamique et la vie", *La Recherche* n°24. juin 1972. pp. 555-558.**

**Ilya PRIGOGINE et Isabelle STENGERS. *La Nouvelle Alliance*. Paris : Gallimard. 1979. (repris en coll. Folio-Essais).**

**Ilya PRIGOGINE et Isabelle STENGERS. *Entre le temps et l'éternité*. Paris : Fayard 1988.**

les systèmes  
dissipatifs sont des  
systèmes ouverts  
loin de l'équilibre

Les trois publications portent sur les mêmes thèmes, en apportant parfois des points de vue complémentaires. La généralisation de la thermodynamique à des systèmes ouverts loin de l'équilibre, conduit à définir des structures ayant des propriétés particulières : les systèmes dissipatifs. Ceux-ci permettent de donner une explication physique de l'ordre biologique dans le domaine des structures comme dans celui des fonctions. De plus, certains problèmes épistémologiques se trouvent renouvelés, comme ceux de la causalité, de la signification de la flèche du temps, des rapports entre l'homme et la nature. La première publication reste sur le plan d'une problématique purement physique ; les deux suivantes donnent une importance croissante aux recherches récentes et aux problèmes philosophiques. L'analyse développée ci-dessous se limite aux aspects qui concernent la notion de système.

Les recherches de Prigogine portent sur l'extension du deuxième principe de la thermodynamique. L'énoncé classique porte sur un système isolé, c'est-à-dire un système qui n'échange ni

matière ni énergie avec le milieu extérieur. Il subit une évolution irréversible vers un équilibre vrai caractérisé au niveau macroscopique par l'entropie maxima et au niveau microscopique par un désordre moléculaire maximum, par exemple l'équirépartition des molécules malgré de petites fluctuations (principe de Boltzmann). Les systèmes ouverts peuvent évoluer vers un état stationnaire différent d'un équilibre vrai, grâce à l'apport continu de matière et d'énergie, dont la néguentropie compense la production d'entropie au sein même du système. C'est le cas par exemple d'une chaîne continue de réactions chimiques. Lorsque ces systèmes ne sont pas trop éloignés de l'équilibre - dans ce cas, les variations d'une grandeur sont commandées par des fonctions linéaires des variables - le système paraît homogène, malgré les fluctuations microscopiques liées à l'agitation thermique.

Mais au-delà d'un seuil d'instabilité, l'homogénéité spatiale ou temporelle peut disparaître, au profit d'une organisation dynamique macroscopique entretenue par les échanges du système. L'exemple des courants de Bénard est souvent cité : lorsqu'on crée par chauffage un gradient vertical de température dans une couche horizontale de liquide, on observe à partir d'un seuil, le passage brusque du transport de chaleur par diffusion dans un liquide immobile à l'apparition d'une structure régulière de cellules de convection, dont l'organisation est entretenue par le flux de chaleur. Ces structures ont pour origine une fluctuation géante amplifiée et stabilisée par les échanges de chaleur. Les structures dissipatives peuvent être périodiques ou instables, et dans ce dernier cas, il existe des points singuliers pour lesquels le système peut évoluer vers plusieurs régimes fonctionnellement stables. Cette orientation est déterminée par la fluctuation déclenchante et non par des variables des grandeurs d'état, définies à l'avance par l'observateur : il s'agit du phénomène de bifurcation décrit par R.Thom. Il peut même s'installer un régime chaotique échappant aux descriptions déterministes macroscopiques ; la situation probabiliste a alors un caractère irréductible. Ces systèmes ont d'abord été simulés avec des calculatrices sur des cas relativement simples ; ils portent en particulier sur des chaînes de réactions comportant des interactions entre produits ou des phénomènes de transport. Quelques expériences de laboratoire ont confirmé directement ces résultats. Les lois de la thermodynamique ne conduisent pas nécessairement à l'uniformité, à la mort thermique ; elles peuvent aussi créer et entretenir une organisation et contribuer en particulier à expliquer les phénomènes de la vie.

En biologie, la thermodynamique généralisée permet d'expliquer à la fois l'ordre fonctionnel et l'ordre architectural. Sur le plan du fonctionnement actuel des organismes, elle apporte des instruments conceptuels qui manquent à la pensée analytique et réductionniste : le maintien de l'équilibre stationnaire malgré les perturbations aléatoires du flux de matière (en particulier la glycolyse a fait l'objet d'une modélisation sur

ils peuvent évoluer vers une organisation stable, périodique ou instable grâce à un flux continu de matière et d'énergie

la  
thermodynamique  
des systèmes  
dissipatifs permet  
d'expliquer les  
caractères  
fondamentaux  
des systèmes  
biologiques ainsi  
que leur  
apparition

calculateurs) ; l'existence d'oscillations entretenues (qu'il s'agisse du taux sanguin de glucose, de la polarisation de la membrane ou du comportement rythmique de populations de neurones). La genèse des notions d'information et de code est abordée de façon très sommaire. D'autre part la thermodynamique des systèmes dissipatifs permet d'expliquer le caractère fondamental des systèmes biologiques, qui ne se reproduisent et ne maintiennent leur identité que grâce à un flux continu de matière et d'énergie. La vie n'est pas l'oeuvre d'un démon de Maxwell luttant contre le deuxième principe de la thermodynamique, mais résulte d'une succession d'instabilités qui articulent fluctuations aléatoires et déterminismes. Cette succession est en grande partie inconnue car elle a été réalisée dans un contexte qui ne peut pas être reproduit actuellement. Des aspects très limités ont fait l'objet d'une étude expérimentale, par exemple l'organisation d'une colonie d'amibes en un plasmode à sporogone sous l'action d'une distribution inégale d'AMP cyclique. La thermodynamique ne permet pas de calculer à l'avance l'organisation concrète des structures en formation, mais elle explique les conditions de leur formation, la régulation du développement malgré la diversité des conditions et les incidents de parcours. Elle permet de comprendre l'étonnante variété des phénomènes d'organisation à partir d'une même situation initiale.

Les auteurs donnent une grande place aux problèmes épistémologiques. Pour eux, la thermodynamique des systèmes dissipatifs contribue largement à faire évoluer les notions de déterminisme, de causalité, de temps et modifie les rapports entre l'homme et la nature. Ils considèrent les paradigmes de la physique classique comme un cas particulier relevant des systèmes près de l'équilibre. Ils relativisent l'idée d'une nature automate, totalement prévisible et manipulable, l'idée d'un temps réversible, la conception de l'explication qui ramène le divers et le changeant à l'identique et au permanent et, dès lors, élimine l'histoire et la mémoire. Ils récusent l'idéal d'une compréhension du monde qui élimine complètement celui qui la décrit, qui fait de l'homme un étranger au cosmos et qui évacue toute référence à la relation que nous entretenons avec le monde.

tous les êtres  
physiques sont  
caractérisés par  
une évolution  
irréversible ; la  
nature crée  
constamment  
des structures  
actives

Les auteurs donnent une place considérable à la flèche du temps. Tous les êtres physiques sont caractérisés par un devenir irréversible, de l'étoile à l'atome. Ils insistent sur les limites du postulat de raison suffisante - une même cause dans les mêmes circonstances donne les mêmes effets - : on ne peut définir que des classes de situations alors que des différences fondamentalement non mesurables entre certains systèmes entraînent des évolutions totalement différentes ou des trajectoires différentes au cours du temps. Pour conclure, la thermodynamique n'explique pas seulement l'évolution de certains systèmes vers l'équilibre, mais elle permet de comprendre un caractère essentiel de la nature : la création incessante de structures actives et proliférantes.

Le lecteur ne partagera pas nécessairement les points de vue philosophiques des auteurs, mais il sera probablement séduit par les perspectives de recherche évoquées par la thermodynamique des systèmes dissipatifs, en particulier la perspective d'un élargissement du champ de l'explication scientifique au domaine de l'organisation de la régulation et de l'émergence de propriétés nouvelles. Le didacticien trouvera peu de repères pour la transposition didactique de nouveaux concepts, mais il retiendra surtout une mise en garde : il importe de dépasser une description purement mécaniste des systèmes biologiques et sociaux, description à l'image des systèmes technologiques, car l'étude de ces systèmes relève d'une thermodynamique généralisée longtemps ignorée des physiciens.

### **5. Jean-Louis LE MOIGNE. *La théorie du système général*. Paris : PUF. 1977. (2ème éd. 1983)**

L'auteur réagit en tant que témoin du gâchis de l'informatisation et de la communication sociale. Il se propose d'aider les hommes d'action, ingénieurs ou travailleurs sociaux, à rationaliser leurs prises de décision, à partir d'une démarche qui centre leur activité d'analyse, de conception et de simulation sur un processus de modélisation, fondé sur un nouveau "Discours de la Méthode". Il récuse les bases logiques, épistémologiques et philosophiques des procédures traditionnelles et se réfère à R.Thom pour affirmer : "Il existe le contraste le plus évident entre une science pléthorique et la stagnation manifeste de la pensée scientifique vis à vis des problèmes centraux qui affectent notre connaissance de la réalité." Au discours cartésien fondé sur l'analyse, le dénombrement exhaustif, le passage du simple au complexe, il oppose les paradigmes fondés sur la modélisation des systèmes suivant un cadre général qui permet de repérer les isomorphismes. Il faut d'abord percevoir ses relations globales avec l'environnement : tout objet se définit par rapport aux intentions implicites ou explicites du modélisateur et toute représentation est partisane ; l'explication première du comportement n'est pas le fait d'une loi impliquée dans une structure mais se situe par rapport aux projets du modélisateur, c'est-à-dire procède d'un choix pertinent et d'un dénombrement exhaustif.

D'autre part, l'auteur s'appuie sur les travaux de I. Prigogine et de H. Atlan, pour mettre en question l'orientation purement réductionniste de la pensée causale telle qu'elle est défendue par J. Monod. Il pense que le principe de raison suffisante (cf. 4) n'est pas applicable aux systèmes complexes. La référence à la thermodynamique des systèmes ouverts permet d'attribuer aux systèmes la possibilité de développer une organisation fonctionnelle et évolutive, de créer de l'ordre à partir du bruit, d'élever la complexité par la destruction de la redondance.

la rationalisation  
des prises de  
décision suppose  
un nouveau  
discours de la  
méthode fondé  
sur la  
modélisation des  
systèmes

un système est  
caractérisé par  
un projet et les  
processeurs qui  
assurent un  
fonctionnement  
et son évolution

tous les systèmes  
sont isomorphes  
d'un modèle  
formel universel  
"le modèle du  
système général"

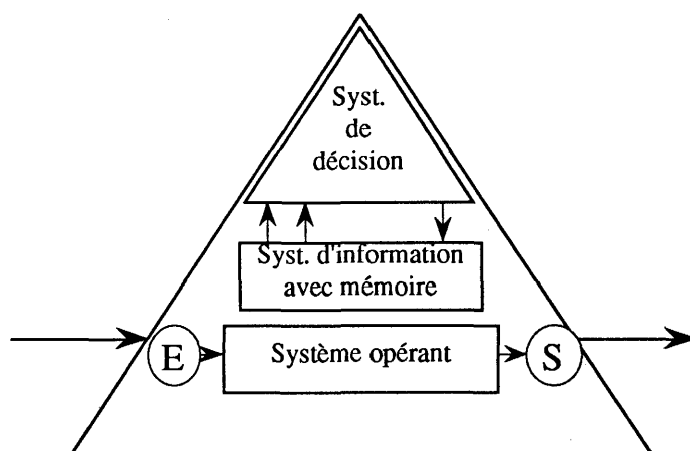
L'apport original de l'auteur - le seul qui soit évoqué ici - se rapporte aux procédures d'analyse du système et de modélisation qu'il décrit. Il récuse le point de vue ensembliste classique (un système est un ensemble d'éléments en interaction) pour le caractériser par son projet et son organisation. Celle-ci ne se limite pas à une structure, mais se caractérise par *"la capacité à produire et à se reproduire..., à maintenir et à se maintenir..., à devenir en fonctionnant et à fonctionner en maintenant son identité."* La connaissance d'un système se traduit par sa modélisation qui se réfère à l'ensemble des actions exercées sur lui, et exprime les poussées du passé (déterminisme) comme la traction de l'avenir (finalité). Le processus de modélisation n'évince pas le modélisateur : au contraire, il est invité à expliciter ses choix et ses interprétations par la schématisation de son système de représentation. Le modèle construit est isomorphe d'un modèle formel universel, crée par la pensée humaine et appelé "modèle du système général". Il répond à la question de F. Jacob : *"Quelle dissection, demain, disloquera nos objets pour les recomposer en un espace neuf?"* La connaissance des objectifs du système détermine les frontières le séparant de l'environnement et la partition en un certain nombre d'unités actives. Ces unités ou processeurs ne sont pas définies par leur structure mais par leur fonction, c'est-à-dire par une combinaison de processus portant en particulier sur le transfert, le stockage et la transformation de matière, d'énergie, d'information, et répertérés sur le tableau suivant :

TABLEAU DES PRINCIPAUX TYPES DE PROCESSEURS

Forme du processus Objet du processus	Transport	Stockage	Transformation
Matière ou énergie	Ingesteur Injecteur Distributeur Extracteur	Stockeur  Accumulateur	Destructeur Producteur Filtre Catalyseur
Information	Lecteur Récepteur Canal Emetteur	Mémoire Duplicateur	Codeur-décodeur Calculateur Régulateur

les processeurs  
traitent soit de la  
matière, soit de  
l'information

Le modèle du système général est construit par la différenciation d'une boîte noire caractérisée par ses entrées et ses sorties ; la progression comprend neuf niveaux emboîtés. Il apparaît d'abord une boucle de régulation avec transfert éventuel d'information. Puis se différencie une capacité définie objectivement en termes de comportement. D'où la distinction entre un processeur de décision et un processeur opérant ; le premier se complique par un processeur d'information ayant pour support une mémoire - il caractérise le niveau sept représenté par le schéma ci-dessous. Les systèmes plus complexes, caractérisés par des capacités d'auto-organisation et d'auto développement, présentent un processeur de pilotage doué d'imagination et capable de définir ses finalités en interaction avec l'environnement.



la problématique  
de l'auteur est  
peu satisfaisante  
du point de vue  
de  
l'épistémologie  
des sciences

Le modèle proposé concerne en premier lieu les systèmes économiques et sociaux. Il met en évidence certaines exigences souvent négligées : la nécessité d'explicitier avec précision le projet organisateur du système et de procéder à une analyse qualitative rigoureuse avant la quantification ; le refus de réduire l'analyse du système à sa dimension technocratique : la hantise de l'unique trajectoire optima donnée par le calcul. Mais l'auteur étend aussi sa théorie aux systèmes biologiques et physiques. Il identifie les processus décisionnels aux processus aléatoires ; le développement et l'évolution définissent un projet. Même le principe de conservation en physique est analysé dans cette perspective : *"Le seul projet d'une pâte à modeler c'est de se conserver."*

En se limitant à un point de vue purement didactique on peut regretter la procédure employée par l'auteur pour modéliser tous les systèmes. Elle organise l'étude sur la réalisation d'un

mais convient à  
l'analyse des  
situations  
didactiques dans  
le cadre de  
l'institution  
scolaire

projet éventuellement subjectif alors que l'initiation scientifique passe par l'effacement du sujet - même si on est amené à considérer cette éviction comme une exigence temporaire.

Même si l'on regrette la confusion épistémologique qui vient d'être évoquée, on a intérêt à retenir l'aspect pragmatique de cet ouvrage. Tout projet pédagogique traduit des finalités explicites ou implicites ; il est accepté ou refusé suivant les attentes de ceux qui le reçoivent. L'activité didactique se concrétise par des décisions successives, dont l'impact peut varier totalement suivant le système de relations où l'élève se trouve placé. Au fur et à mesure du développement d'un projet pédagogique, il peut paraître utile de modéliser les interactions entre les processeurs et de les présenter sous une forme évolutive, qui laisse une place à la création suivant les exigences de l'auteur. On limite ainsi les dérapages technocratiques dûs soit à l'absence d'évocation des finalités masquées, soit à une analyse systémique simpliste sur le modèle de la relation homme-machine. D'autre part, on adopte une stratégie de modélisation fondée sur un aller-retour incessant entre représentation et action.

## **6. Bernard WALLISER. *Systèmes et modèles.* *Introduction critique à l'analyse des systèmes.* Paris : Seuil. 1977.**

l'étude des  
systèmes explicite  
les interactions  
qui fondent l'unité  
de l'objet étudié  
et facilite la  
communication  
entre scientifiques  
grâce à un  
langage unitaire

L'auteur définit l'étude des systèmes comme une approche cognitive qualitative qui précède la mathématisation proprement dite. Il ne prétend pas bâtir une théorie universelle des systèmes intégrant toutes les théories spécifiques des différentes disciplines et qui évacuerait le rôle de l'homme. Il vise à rendre opérationnelles les finalités qui sous-tendent le courant systémique sur le plan de la connaissance comme celui de l'action. Comment dépasser les tendances purement analytiques de certaines sciences, par une approche plus synthétique explicitant les interactions qui fondent l'unité de l'objet étudié (cellule par exemple) ? Comment promouvoir un langage unitaire qui facilite la communication entre scientifiques dans des domaines où des propriétés communes risquent d'être masquées par des langages différents ?

L'ouvrage aborde successivement les notions de systèmes et de modèle. Une analyse précise et exhaustive tend à expliciter les opérations intellectuelles qui sous-tendent les démarches et à démasquer les a priori épistémologiques et philosophiques implicites qui les orientent. L'étude des systèmes porte sciemment sur les relations de situation de causalité ou de finalité, qui permettent de les définir par rapport à l'environnement, sur les interactions entre sous-systèmes et systèmes, sur les modalités de leur évolution ou de leur régulation. Cette étude est faite avant tout à partir d'un point de vue logico-mathématique. Les systèmes ne sont pas présentés comme des objets de



l'expérience immédiate, mais comme des constructions formelles à partir d'une opération de séparation des variables. Pour un problème donné, un système se définit par un processus d'optimisation qui oppose des variables liées qui caractérisent celui-ci, à des variables plus indépendantes qui définissent l'environnement.

L'étude des modèles porte sur leur aspect syntaxique (mode de construction), sémantique (signification) et pragmatique. Sur le plan de la syntaxe l'auteur distingue les modèles de forme verbale, graphique ou mathématique. Il récuse la tendance à réserver ce terme à des constructions relativement formalisées, exprimées par des systèmes d'équations et traduites par des programmes informatiques, mais l'étude détaillée porte uniquement sur des formes logico-mathématiques de modèles. Les modèles matériels (maquettes, etc) iconiques et graphiques sont uniquement mentionnés ; le modèle verbal cité en biologie (les migraines ont souvent une cause biologique) est un exemple médiocre et un énoncé de peu d'importance.

la modélisation se caractérise par des va-et-vient successifs entre un champ empirique du travail sur les données et un champ théorique centré sur les procédures d'axiomatisation et de déduction

Du point de vue sémantique, l'auteur qualifie de modèle tous les produits de l'activité de représentation, y compris les définitions obtenues par des opérations de classement ou de généralisation de données empiriques et les fonctions mathématiques qui expriment des relations expérimentales sous forme de lois. La loi de Mariotte a le même statut que la molécule support de la théorie cinétique des gaz. Cependant l'auteur considère surtout le modèle comme un médiateur entre l'élaboration de la loi et la compréhension de celle-ci. Il analyse les modèles aléatoires comme les modèles déterministes. Ici encore l'accent est mis sur le processus de modélisation et non sur l'objet. Le processus se caractérise par des va et vient successifs entre un champ empirique de recueil et de traitement des données (manipulations, expérimentations...), qui permet par exemple de passer du modèle hypothétique au modèle confirmé, et un champ théorique caractérisé par des procédures d'axiomatisation et de déduction, qui induisent des projections conduisant à un nouveau modèle hypothétique.

Les cycles successifs permettent une explicitation précise entre le système et les modèles successifs, en éliminant les analogies superficielles et douteuses. D'autre part ils peuvent se traduire par des activités de simulation qui définissent une caractéristique essentielle des modèles. Ceux-ci peuvent être symbolisés par une fonction ( $f$ ) qui lie les entrées, variables d'environnement ( $x$ ) et de commande ( $u$ ) aux variables de sortie ( $y$ ). Le modèle est cognitif, prévisionnel, décisionnel, normatif suivant que la variable à déterminer est respectivement  $f$ ,  $y$ ,  $u$  ou  $x$ .

Ce livre présente un tableau concis et complet des problèmes rencontrés à l'occasion de l'analyse des systèmes et de la modélisation. Il est susceptible de rendre de grands services aux spécialistes appelés à traiter des ensembles complexes de données et qui seraient tentés, du fait de leur formation, à privilégier le formalisme logico-mathématique au détriment

l'ouvrage permet d'identifier et de situer les problèmes de didactique mais leur résolution implique des références plus précises à l'épistémologie des sciences

d'une approche heuristique, et qui seraient tentés de ce fait à donner un alibi scientifique à des décisions politiques et à négliger l'expérience des praticiens. Le didacticien des sciences peut être concerné lorsqu'il est confronté à des situations complexes qui font intervenir des aspects très divers de l'institution scolaire comme ceux qui sont liés au problème de l'introduction des sciences physiques dans les collèges. Mais la problématique développée dans cet ouvrage est souvent peu adaptée à des recherches plus focalisées en pédagogie des sciences. Les exemples cités par l'auteur illustrent une définition ponctuelle, mais ne permettent pas de maîtriser l'ensemble du processus. Le formalisme mathématique, parfois inutilement lourd, masque l'explicitation insuffisante des contraintes épistémologiques qui orientent l'analyse des systèmes et la modélisation dans les sciences expérimentales, et qui différencient la pensée scientifique de la pensée magique ou de la prise de décision dans le domaine socio-économique.

## 7. BILAN DE L'ÉTUDE BIBLIOGRAPHIQUE

La comparaison entre les propositions relevées dans les ouvrages cités peut porter sur deux problèmes :

- quelles perspectives épistémologiques peut-on dégager de l'approche systémique ?
- quelles orientations pédagogiques peut-on proposer au niveau de l'enseignement général ?

### 7.1. Le point de vue épistémologique

Quel est le statut des notions de système, de modèle, d'analyse systémique dans la pensée scientifique ?

- Notion de système

Les systèmes décrits sont d'une extrême diversité :

- Les systèmes physiques comme le système solaire servent à repérer le support qui conditionne une transformation ; ils sont déterminés de façon rigoureuse.
- Les systèmes techniques comme le réfrigérateur sont caractérisés par une fonction technique, c'est-à-dire une finalité intentionnelle qui se réalise par une articulation de déterminismes.
- Les systèmes biologiques comme le système régulant le taux de glucose sanguin déterminent une fonction biologique de régulation ou d'adaptation nécessaire au maintien de la vie ou à son extension. Un faisceau de déterminismes physico-chimiques peut s'interpréter comme la manifestation d'une finalité de fait, produit d'une histoire.

- Les systèmes économiques et sociaux réalisent un projet implicite ou explicite dans un contexte caractérisé par la communication sous forme symbolique, les prises de décision, l'existence de lois susceptibles de changer avec le système.

Mais trois familles de problèmes ont conduit à la recherche des éléments de convergence à travers la diversité des situations :

- la nécessité de ne pas étouffer, par la dissection analytique, l'étude des problèmes nés de la complexité *"du grouillement merveilleux mais intelligible des interactions"* (Le Moigne). L'analyse ne donne pas à elle seule la réponse aux problèmes complexes posés,
- la nécessité de réagir contre une tendance dominante de la science actuelle, tendance qui conduit à la spécialisation croissante, à l'éclatement en disciplines de plus en plus cloisonnées. Cette tendance tend à bloquer la communication et la création de champs conceptuels nouveaux. Par l'approche systémique, *"des spécialistes... éloignés les uns des autres se trouvent subitement au coude à coude et en possession d'un formidable appareil conceptuel dont ils découvrent progressivement qu'il constitue pour eux un langage commun"* (Levy-Strauss),
- la nécessité de fonder les décisions de la vie économique et sociale sur une analyse de l'ensemble des variables et non sur une intuition subjective et partielle. Le développement des méthodes de programmation et des instruments de calcul suppose le développement d'un appareil conceptuel qui les situe par rapport à leur finalité ou leur signification.

L'étude comparée ne permet pas de dégager une définition exhaustive des systèmes, mais conduit à articuler deux points de vue complémentaires, analytique et globaliste. Le premier définit les systèmes comme des ensembles d'éléments en relation, et le deuxième détermine le système par rapport à l'environnement en fonction d'un principe organisateur ou d'un projet qui lie un certain nombre de variables. Le système se distingue d'un ensemble quelconque parce que l'articulation des éléments crée des propriétés nouvelles : Par exemple, en associant un poids et un ressort on crée un pendule, c'est-à-dire un système oscillant. Un système ne s'identifie pas à un objet réel même s'il en porte le nom. Sa définition fait toujours intervenir le choix d'un observateur qui abstrait certaines propriétés ; de ce fait il représente une classe d'objets et désigne les isomorphismes qui les réunissent. Le plus souvent le système ne désigne qu'un objet formel, c'est-à-dire une création de l'esprit.

- Notion de modèle

Le terme de modèle présente une polysémie marquée, parfois chez le même auteur. Au sens large, il définit toute activité de représentation, quelle que soit la nature des opérations intellectuelles réalisées : définition (espace), loi (loi des gaz parfaits),

quelles  
convergences y  
a-t-il entre les  
systèmes  
décisionnels des  
sciences sociales  
et les systèmes  
déterministes des  
sciences de la  
nature ?

reconstruction conceptuelle (cellule). L'idée implicite des tenants de cette conception c'est que l'activité scientifique porte sur des objets construits par l'esprit humain et qui doivent être reconstruits au fur et à mesure du développement de la science.

Au sens étroit le terme de modèle désigne toute représentation matérielle, iconique ou symbolique faite en vue d'une explication, c'est-à-dire, qui reproduit certains aspects de l'objet étudié pour comprendre son fonctionnement et déduire des propriétés nouvelles (par exemple, le modèle de courant électrique). L'analyse des systèmes vise à construire un modèle explicatif et à l'utiliser au cours d'activités de simulation, lesquelles permettent de prévoir l'évolution du système et qui conduisent éventuellement à un remodelage du modèle.

Deux aspects de la modélisation sont développés le plus souvent par les auteurs :

- Il est nécessaire de déterminer avec précision les isomorphismes, c'est-à-dire les correspondances terme à terme entre le système et le modèle qui le représente. Alors que les rapprochements fondés sur des analogies globales conduisent le plus souvent à des impasses, les relations d'isomorphisme permettent des inférences et des calculs susceptibles d'être réinvestis dans le système.
- Un modèle peut être défini par deux procédures différentes : il peut être construit progressivement par induction et comparaison de données empiriques (modèle de la cellule) ; au contraire il peut être posé de façon axiomatique et donner lieu à des déductions faisant l'objet d'un contrôle expérimental (modèle moléculaire dans la théorie cinétique des gaz). Pour Walliser en particulier, l'articulation des deux procédures permet d'effectuer des aller-retours successifs entre le champ empirique et le champ théorique. On évite ainsi de rigidifier le modèle en un objet statique et stérile ; de plus cette procédure conduit éventuellement à établir la pluralité des modèles.

#### • Approche systémique et démarche expérimentale

Pour certains auteurs, l'approche systémique marque une rupture avec la pensée scientifique traditionnelle : elle constituerait une révolution scientifique (von Bertalanffy) ; elle exprimerait un nouveau "discours de la méthode" (Le Moigne) ; elle permettrait de dégager une matrice commune à l'intérieur de laquelle se différencieraient les différentes disciplines ; elle substituerait au déterminisme réductionniste de la science traditionnelle une approche qui intègre l'activité créatrice du sujet et éventuellement de la nature (Prigogine, Atlan, Morin).

La position de Walliser paraît plus réaliste : l'analyse systémique ne conduit pas à une théorie universelle qui supprimerait les théories spécifiques. Elle ne se substitue pas à la méthode expérimentale décrite par Claude Bernard, mais elle la complète, l'intègre et permet d'articuler déterminisme et finalité. Elle rapproche les disciplines parce qu'elle fait apparaître les

un modèle risque  
de se dégrader  
en objet  
dogmatique sans  
la simulation qui  
permet de le  
rectifier et de le  
reconstruire

l'analyse des  
systèmes se situe  
de façon  
différente par  
rapport à la  
démarche  
expérimentale  
suivant le  
domaine étudié

propriétés communes aux organisations complexes et parce qu'elle explicite la signification théorique et la valeur opératoire de concepts analogues dans différentes disciplines. Elle donne un objectif et une signification aux techniques de programmation et de calcul qui se développent rapidement aujourd'hui.

Suivant le domaine exploré et le problème posé l'approche systémique se situe de façon très différente par rapport aux méthodes expérimentales classiques de type analytique.

A un premier niveau, développé par Karplus, la notion de système ne sert qu'à préciser la démarche expérimentale traditionnelle. En limitant celle-ci à la démarche hypothético-déductive (vérification d'hypothèse) et à la séparation des variables, on valorise des procédures déjà employées pour la résolution de problèmes pratiques (recherche de pannes par exemple) et on occulte les opérations intellectuelles qui marquent le passage du réalisme naïf à la pensée causale. Il s'agit de passer de l'événement complexe et subjectif, situé par des corrélations plus ou moins aléatoires dans une flèche du temps vécu ou généralisé sous la forme d'une règle pratique, au fait scientifique localisé dans un espace-temps universel réversible, et à la relation causale reproductible et détachée du sujet.

Deux principes caractérisent les opérations intellectuelles assurant cette évolution. D'une part, la notion d'interaction entre deux éléments tend à effacer la dissymétrie entre la cause et l'effet (exemple étude du choc de deux particules) ; elle n'attribue pas le changement aux propriétés intrinsèques des objets mais aux relations qui les lient. D'autre part, une transformation ne peut être décrite sans référence à la conservation d'une grandeur (masse, énergie, éléments, quantité de mouvement, charge électrique, flux...).

La notion de système sous-tend de façon au moins implicite celle d'interaction. Elle doit être dégagée de façon explicite lorsqu'on applique le principe de conservation. Mais elle n'est établie que de façon locale et incidente sans métaréflexion sur l'opération intellectuelle qui pourrait s'exprimer par la proposition suivante : il s'agit de réduire les systèmes complexes à une somme de systèmes à deux éléments caractérisés par des relations d'interaction et de conservation. Dans ce cadre, la notion de système peut servir de support à des explications purement réductionnistes, en particulier celle qui ramène l'explication ultime de tous les phénomènes à des relations entre grandeurs physiques. Ces systèmes élémentaires sont souvent matérialisés par les appareils très particuliers que l'on trouve dans les laboratoires de physique.

Mais en général, les systèmes complexes présentent des propriétés d'intégration nouvelles, non réductibles à celles des composants pris isolément. Un deuxième niveau de l'analyse des systèmes, étudié en particulier par von Bertalanffy, s'efforce de déterminer ou de calculer les effets de l'interaction des variables. Des systèmes matériels très différents peuvent être exprimés par un même modèle mathématique, et par suite,

en physique elle vise à donner plus de précision et de rigueur à une démarche déterministe de type réductionniste

présenter des propriétés communes, par exemple le même type d'évolution dans le temps : (croissance exponentielle ou sigmoïde, oscillations périodiques ou amorties, évolution vers un équilibre). L'interaction se manifeste parfois par des propriétés imprévues comme l'équifinalité et la sensibilité déjà décrites (cf von Bertalanffy). Certaines études peuvent porter sur le fonctionnement global du système sans qu'il soit nécessaire d'analyser chacune des multiples réactions élémentaires qui déterminent ce comportement (par exemple, rapport entre les populations d'un écosystème et le flux de matière et d'énergie). Les systèmes de ce type sont déterministes, mais leur étude se distingue de celle des systèmes du premier niveau par les postulats suivants :

- Les objets premiers de la science sont complexes. Ils constituent au départ une boîte noire, délimitée par rapport à l'environnement, et que l'on démonte progressivement. Le réductionnisme de Laplace est illusoire.
- Les systèmes de ce niveau sont définis par une organisation dont on n'explique pas l'origine (êtres vivants) mais dont on caractérise le fonctionnement. Il se définit souvent par un équilibre dynamique. Il s'agit de systèmes ouverts qui maintiennent une organisation improbable grâce à un flux de matière et d'énergie qui s'oppose à l'évolution du système vers l'entropie maxima, c'est-à-dire le désordre.

dans d'autres domaines, en particulier en biologie, elle postule la complexité des objets premiers de la science et analyse les propriétés nouvelles résultant de l'organisation en particulier d'un système de régulation

Le maintien du système est lié à des activités de régulation. Celle-ci peut résulter du simple jeu des interactions qui définissent le système comme la régulation du pH dans le cas d'une solution tampon. Dans d'autres cas la régulation est assurée par rétroaction, grâce à une organisation spécifique de feedback qui définit un troisième niveau.

Les systèmes de ce troisième niveau relèvent des domaines technologique, biologique ou social. A ce niveau d'analyse ils sont conçus à la manière des systèmes techniques, c'est-à-dire comme des organisations exprimant un projet - fut-ce celui du maintien de la vie. La régulation et l'adaptation impliquées par ce projet sont réalisés grâce à un sous-système spécifique fondé sur un transfert d'information. Par son organisation, le flux d'information est déterministe. Il se réalise grâce à un flux d'énergie - en général très faible - qui relie la sortie du système à l'organe effecteur. Mais ce flux doit être rendu significatif par des opérations de codage et de décodage qui relèvent de la logique de l'intention. L'analyse systémique du troisième niveau - celle des cybernéticiens ou des spécialistes de la théorie de l'information - ne prend en compte que l'aspect déterministe de la communication ; sa signification et son origine échapperaient à la science qui ignore le démon de Maxwell.

Par contre, un certain nombre de penseurs - Prigogine, Morin, Atlan - refusent d'admettre que la téléonomie (finalité de fait) dans la nature est une illusion ou le résultat d'un événement totalement imprévisible. Ils considèrent l'auto-organisation comme la propriété intrinsèque de certains systèmes dont

peut-on assimiler  
les systèmes  
techniques et  
sociaux produits  
par l'intelligence  
humaine aux  
systèmes auto-  
organiseurs  
produits par  
l'évolution  
biologique ?

l'étude définit un quatrième niveau. La thermodynamique des systèmes ouverts ne postule pas leur évolution irréversible vers des équilibres statiques, le désordre et la mort, mais prévoit des possibilités de fluctuations amplifiées et stabilisées : la nature manifeste constamment des propriétés de création et de "jeu" que l'on croyait réservées à l'intelligence humaine. L'exemple classique de cette propriété est celui des courants de Bénard déjà évoqués (Prigogine). Par ce caractère, les systèmes vivants se distinguent des systèmes techniques. Une histoire est jalonnée de fluctuations qui les font passer des formes d'interaction globale sans support spécifique différencié de régulation à des structures de rétroaction de plus en plus complexes. Cette mécanisation progressive augmente l'efficacité de la régulation dans des directions déterminées, mais limite la souplesse de l'adaptation.

## **7.2. Le point de vue didactique : quel intérêt pédagogique présente la problématique présentée dans les ouvrages cités ?**

- Une lecture superficielle peut conduire à deux impasses

Elle favorise l'idée que l'étude des systèmes exige des instruments logico-mathématiques sophistiqués et qu'elle relève de ce fait du domaine des spécialistes.

Elle se limite à une vulgarisation portant sur les résultats de l'étude des résultats, étude faussée par des analogies douteuses ; cette procédure tend à masquer les objectifs et les hypothèses qui sous-tendent les conclusions.

En fait il est possible de dégager de ces ouvrages un certain nombre d'objectifs réalisables dans le cadre d'une première approche de l'étude des systèmes :

- élargir les procédures de la démarche expérimentale pour dépasser une épistémologie naïve limitée à la séparation des variables,
- construire, en liaison avec d'autres disciplines (économie, géographie), les instruments élémentaires de l'analyse systématique et de la modélisation, pour maîtriser et donner un sens aux procédures de collecte et de traitement des données, qui prennent une place de plus en plus importante dans notre environnement quotidien,
- faciliter le dialogue expert-novice, rendu de plus en plus difficile par la complexité des situations et l'évolution rapide des techniques. Le mode de pensée des spécialistes échappe souvent aux exécutants faute de formation générale. Inversement les premiers laissent échapper des variables significatives et traitent parfois des nombres sans rapport avec l'expérience.

- Les différentes étapes de l'approche systémique peuvent être dégagées par une métaréflexion sur les activités scientifiques, orientée par les ouvrages cités

au lieu d'imposer une étude formelle des systèmes, de la cybernétique et de l'information, il y a intérêt à dégager les concepts fondamentaux à partir d'une métaréflexion induite par des activités scientifiques concrètes

La prise en charge par l'élève des opérations intellectuelles dégagées constitue une école de rigueur.

L'approche débute par l'identification du système : quel problème ou projet permet de le définir et de préciser ses rapports avec l'environnement ? La prise en compte des systèmes du premier niveau permet d'articuler l'ensemble des opérations intellectuelles nécessaires à la définition d'une relation causale ; en fonction des grandes lignes du développement cognitif défini par Piaget, les élèves sont amenés à distinguer les différentes formes de corrélation et à diversifier les méthodes permettant d'identifier les déterminismes : méthodes classiques et méthodes statistiques. Les ouvrages cités présentent de nombreux guides pour l'étude des systèmes complexes (Schaefer, Le Moigne, Walliser) qui s'appuient sur des éléments communs à l'ensemble des systèmes : boucles, réseaux, flux, réservoirs.

L'étude analytique débouche sur une synthèse, la construction et la modélisation du réseau d'interactions. La première représentation du système se traduit souvent par le modèle de la boîte noire et sa décomposition en compartiments, suivant une procédure déjà évoquée. La modélisation des systèmes dépourvus de mécanismes de rétroaction se fait souvent sous forme de graphes. Ces derniers sont le support de méthodes algorithmiques de traitement de données, méthodes appelées à des développements importants (Atlan). De ce fait, il importe de réagir contre l'emploi maladroit du diagramme sagittal et de préciser avec soin les attributs des éléments et la signification des relations. Ainsi en écologie, l'élément du schéma représente-t-il l'espèce, la grandeur relative d'une population ou la valeur numérique de celle-ci ? La flèche représente-t-elle une rencontre aléatoire ou traduit-elle la complexité réelle d'une relation donnée prédateur-proie ? Dans ce domaine, les analyses de Schaefer complètent les indications déjà publiées dans Aster. De nombreux raisonnements déductifs peuvent s'appuyer sur des graphes construits correctement.

Les systèmes plus complexes sont souvent modélisés sous la forme d'organigrammes (blocs-diagrammes). De nombreuses tentatives ont été faites pour traduire les isomorphismes à partir d'un modèle général de systèmes. Ceux de Le Moigne et Walliser semblent trop complexes pour la plupart des situations scolaires. Ils concernent plutôt le chercheur en didactique appelé à modéliser une face du système scolaire. Schaefer propose d'adopter et de normaliser un schéma général des systèmes à rétroaction et il l'applique avec succès à différents systèmes biologiques : régulation thermique, régulation de la teneur en eau de l'organisme etc... Les modélisations mathé-



matiques des systèmes proposées dans ces ouvrages sont rarement accessibles aux élèves du second degré. Dans la littérature analysée, les modèles matériels et iconiques sont à peine cités, alors qu'ils ont une grande importance en technologie (maquettes, dessin industriel) et qu'ils font partie de l'environnement habituel des élèves. Pour Shaw, cité par von Bertalanffy *"il n'y a pas eu émergence de la théorie des systèmes à partir de l'analyse récente des systèmes technologiques."* Mais pour l'enseignement, cette lacune est regrettable, car le va-et-vient entre biologie et technologie est historiquement très important à la fois par les apports réciproques des deux disciplines à la théorie des systèmes et les blocages qu'entraîne l'assimilation trop simple des systèmes biologiques aux systèmes techniques.

Il semble souhaitable de définir des procédures de modélisation faisant apparaître des isomorphismes entre les disciplines

La construction d'un modèle n'épuise pas l'analyse systémique, même s'il s'agit d'un modèle explicatif. Il est indispensable de le faire fonctionner et de procéder à des simulations, pour éviter la dégradation du modèle en un objet dogmatique, faussé par des analogies douteuses, trop rigide pour s'appliquer à des champs conceptuels nouveaux. Le va et vient entre le domaine empirique et le domaine théorique décrit par Walliser a déjà été évoqué. Ces conditions ne sont pas réalisées dans le cadre d'un enseignement impositif limité au déroulement d'un programme linéaire.

L'analyse comparée des ouvrages cités permet de dégager certaines exigences pédagogiques même s'ils semblent parfois très éloignés de la réalité :

- l'approche systémique permet d'approfondir et d'actualiser l'apprentissage des méthodes expérimentales, de mieux cerner le rapport entre théorie et expérience, d'exploiter les possibilités dégagées par le développement de l'informatique ;
- elle conduit à un rapprochement de certaines disciplines par la modélisation de démarches communes et par l'extension du domaine logico-mathématique qui permet de traiter les données.

Victor HOST  
Équipe de didactique des sciences  
expérimentales, INRP



# MOUVEMENT ET VITESSE AU COURS ÉLÉMENTAIRE

Susanna Invernizzi,  
Cesare Marionni,  
Piera Sabadini

*Nous avons réalisé cette recherche dans une classe de cours élémentaire (enfants de 7 - 8 ans) sur les notions d'espace, de temps et de vitesse. Notre propos était d'analyser, en classe, les représentations que les enfants se font de ces trois notions et d'élaborer des actions didactiques qui, en s'appuyant sur les procédés spontanés des enfants, leur permettent d'élaborer plus facilement ces notions de physique.*

une recherche  
dans une classe  
de CE1 prenant  
en compte les  
représentations  
des élèves

Si l'on souhaite que les enfants eux-mêmes construisent les schématisations nécessaires à une nouvelle façon de regarder les faits naturels, c'est de leur expérience commune que l'on doit partir afin d'aboutir à une description scientifique.

C'est dans cette optique que nous avons réalisé une recherche à l'école élémentaire avec des enfants de 7-8 ans sur les notions de mouvement et de vitesse. Notre propos était d'analyser, en classe, les représentations enfantines et de parvenir à la définition d'actions didactiques adéquates.

## 1. LES CONDITIONS DE MISE EN PLACE

### 1.1 L'équipe des collaborateurs

Ce travail de recherche, l'élaboration des propositions de travail en classe et leur expérimentation découlent de la collaboration étroite entre des universitaires de différentes disciplines et des professeurs chercheurs parallèlement engagés dans un travail sur la compréhension et l'enseignement de sujets scientifiques.

Notre équipe regroupait ainsi un chercheur universitaire, trois professeurs chercheurs et les institutrices concernées. Les cours ont été dirigés par l'enseignant de la classe secondé par un professeur chercheur, tandis que la programmation et la vérification des résultats obtenus ont été chaque fois discutés conjointement par toute l'équipe de recherche.

La structure-même du groupe a permis d'assembler compétences interdisciplinaires et pédagogiques et encouragé un échange stimulant entre l'école et l'université avec un enrichissement mutuel.

...en  
collaboration  
avec l'université

Par ailleurs, de fréquentes discussions avec d'autres chercheurs de notre groupe de Milan et du Groupe National de Didactique de la Physique du C.N.R italien ont contribué à enrichir cet échange (1).

## 1.2. Hypothèses et finalités de cette recherche

La recherche, échelonnée sur huit séances a été conduite dans une classe de CE1 de dix garçons et neuf filles (de 7 - 8 ans). Chaque séance durait environ deux heures.

Parallèlement, une recherche analogue s'effectuait dans une classe de CE2 (enfants de 8-9 ans) et une classe de CM1 (enfants de 9-10 ans). Les résultats obtenus dans ces deux dernières classes ont été analysés et confrontés aux résultats obtenus en classe de CE1.

Notre objectif était d'analyser, en situation scolaire, les représentations des enfants sur les notions de distance, de durée et de vitesse (2).

Nous étions surtout intéressés par l'étude de ces notions chez des enfants n'ayant pas encore développé une organisation métrique de l'espace.

En partant des perceptions spatio-temporelles des enfants de cet âge, nous voulions les amener à réaliser le parcours conceptuel nécessaire pour intégrer les notions physiques d'espace, de temps et de vitesse. Dans cette progression, nous avons essayé d'utiliser les stratégies de raisonnement suggérées par les enfants eux-mêmes.

Nous avons notamment cherché à construire avec eux les notions d'intervalle temporel et de vitesse. Cependant, tout en nous limitant à introduire ces notions au niveau qualitatif, étant donné l'âge des élèves, nous avons remarqué que ces enfants ont spontanément utilisé des unités de mesure non conventionnelles pour évaluer l'espace et le temps. Leur façon d'intégrer la notion de vitesse sera analysée dans les pages suivantes.

Il nous paraît utile de souligner les deux finalités de notre recherche : d'une part, comprendre la façon dont les enfants de

modes de  
connaissance  
des enfants

(1) Pour plus amples informations sur les activités du CNR italien dans le secteur de didactique de la physique à l'école, cf. : M. GAGLIARDI, E. GIORDANO, "La communication entre les chercheurs en didactique et les enseignants est-elle possible? Le projet TID, un instrument pour développer la communication entre enseignants et éducateurs". *Actes des Xèmes journées Internationales sur l'éducation scientifique*, Chamonix, 1988.

P.GUIDONI et coll. *Guardare per sistemi, guardare per variabili, Progetto TID*, Torino, Emme ed. 1987.

(2) Comme exemple de recherche dans une situation de classe, cf J.L. CANAL, "La vitesse au cours moyen", *Aster* n° 2, INRP 1986.

et intervention  
didactique

7-8 ans intègrent ces notions physiques , d'autre part, trouver les moyens didactiques les plus efficaces à mettre en oeuvre pour les aider à mieux les intégrer.

En ce qui concerne les enseignants, nous avons préféré, au lieu de leur fournir un "Itinéraire didactique" déjà prêt et détaillé, leur apprendre une méthode et des techniques d'exploitation et leur en laisser la gestion.

## 2. LA MÉTHODOLOGIE CHOISIE

En accord avec les interprétations les plus récentes, l'enseignement représente moins, pour nous, une transmission de contenus qu'une construction active de signifiés ou valeurs de la part des élèves.

Ainsi, les options didactiques possibles qui découlent de cette conception sont-elles nombreuses.

### 2.1. Nos objectifs

La méthode choisie pour notre intervention dans un contexte scolaire tient compte de nos objectifs et peut se synthétiser comme il suit :

- \* Nous avons essayé de partir de situations bien connues des enfants et qui leur sont familières même en dehors du contexte scolaire, à savoir :
  - le jeu ;
  - les compétitions sportives ;
  - la vie quotidienne.
- \* Nous avons essayé de faire ressortir leurs conceptions intuitives et leurs modes de raisonnement spontanés.

Ainsi l'enfant est-il stimulé pour :

- rechercher des réponses individuelles ou collectives aux problèmes qui, graduellement, lui sont posés ;
- confronter ses réponses avec celles de ses camarades, notamment dans l'évaluation de parcours ou de vitesse différentes.
- \* Nous avons essayé d'attirer l'attention des enfants sur quelques aspects bien précis des situations examinées, aspects qui relevaient aussi de la physique.
- \* Nous avons essayé d'appliquer les notions apprises à des contextes différents, donc d'élargir et d'approfondir ces mêmes notions.

### 2.2. Organisation du travail

Le travail en classe s'est déroulé comme suit :

- travail individuel ;

le travail avec la  
classe

- travail par petits groupes ;
- travail de toute la classe ;
- discussions libres où tous participaient ;
- discussions dirigées par la maîtresse.

Souvent à tour de rôle, de petits groupes de deux ou trois élèves travaillaient. A ce ou ces groupes était confiée une tâche bien précise et, durant le travail, la maîtresse et le reste de la classe regardaient, posaient des questions, commentaient.

Dans le travail individuel nous avons largement exploité le dessin, d'une part parce qu'il véhicule la représentation d'une situation réelle ou imaginée, de l'autre parce qu'il permet de la représenter symboliquement.

### 2.3. Les activités proposées (3)

- Activités d'orientation

Expression des représentations spontanées des enfants sur un parcours :

- représentation graphique de parcours ;
- exécution de parcours avec
  - . départs simultanés
  - . départs et arrivées simultanés.

- Activités de restructuration

Les élèves éprouvent des difficultés à évaluer la longueur de parcours différents lorsque le point de départ et le point d'arrivée coïncident. Nous proposons donc des activités pour faciliter la restructuration des variables espace, temps et vitesse :

- évaluation d'intervalles de temps (jeux dans la salle de gymnastique)
- évaluation d'intervalles d'espace.

- Extension et approfondissement

Dans ces dernières activités, les variables espace, temps et vitesse ont été à nouveau présentées entrecroisées.

schéma de  
l'itinéraire  
didactique

---

(3) L'itinéraire didactique présenté ici est fortement réduit aux étapes principales, notre propos n'étant pas de décrire le déroulement détaillé de chaque séance mais plutôt de repérer les passages logiques graduellement assimilés par les enfants pour intégrer d'abord et maîtriser ensuite les notions d'espace, de temps et de vitesse.

Dans cet article, nous retraçons la progression d'une classe de CE1, même s'il nous arrivera de faire référence à d'autres classes où ce même type d'approche sur les notions d'espace, de temps et de vitesse a été proposé.

### 3. LES RÉSULTATS OBTENUS : CRITIQUES ET PROPOSITIONS

#### 3.1. Les activités d'orientation : expression des représentations spontanées des enfants

Le choix de la situation de départ est très délicat. En effet, elle doit évoquer une réalité extrêmement familière à l'enfant, assimiler et synthétiser plusieurs éléments de recherche et, à la fois, être suffisamment souple et significative pour l'enfant et l'enseignant.

Nous avons donc, en tout premier lieu, essayé de repérer les connaissances et les capacités préalables des enfants au travers de jeux dans la salle de gymnastique (courses, compétitions, jeux de ballon etc).

Nous avons constaté que les enfants étaient surtout intéressés par les activités où eux-même étaient les acteurs du mouvement ; notamment, nous avons repris avec eux le jeu des parcours qu'ils connaissaient déjà.

##### • Première phase du jeu

Les enfants recevaient chacun une feuille de papier où avaient été préalablement indiqués un point de départ et un point d'arrivée. Ils devaient donc inventer le trajet de liaison, le tracer ensuite à la craie sur le parquet de la classe et le parcourir.

Dans ces activités, nous avons remarqué la capacité des enfants à faire correspondre la représentation symbolique qu'ils avaient dessinée sur la feuille et le trajet qu'ils ont parcouru dans la seconde partie du jeu.

##### • Deuxième phase du jeu : enquête sur la notion de départ simultané

Pour pouvoir comparer les vitesses, il nous fallait voir d'abord si tous les enfants étaient capables de réaliser des départs simultanés.

Nous leur avons demandé de parcourir à tour de rôle, par équipes de deux, les trajets dessinés sur le sol en partant ensemble. Il s'agissait de trajets parallèles et de même forme. Au départ, chacun était libre de choisir son allure ou d'adopter la vitesse qui lui convenait le plus : très rapide, par bonds, très lente, etc.

Au fur et à mesure que les équipes passaient, leurs camarades exprimaient leurs appréciations.

Dans la discussion finale, les enfants ont exprimé leurs opinions sur la possibilité de départs et d'arrivées simultanés.

Les enfants sont parvenus à distinguer les éventualités suivantes :

- parcours de même longueur et de même forme :

le jeu des  
parcours

avec des départs  
simultanés

- Le départ simultané est toujours possible.
- L'arrivée simultanée paraît, à la classe, impossible initialement parce que *"il y a des allures rapides, d'autres plus lentes"*; cependant, graduellement, les enfants expriment l'idée *"que l'on peut arriver ensemble si on va à la même vitesse que l'autre"*;
- parcours de longueur différente :  
Pour les enfants on ne peut pas arriver ensemble. *"Cependant, si une allure est plus rapide que l'autre et qu'elle choisit le parcours le plus long, cela serait peut-être possible"*;
- parcours différents et vitesses de parcours différentes :  
selon certains, *"on ne peut pas arriver ensemble parce que si l'on choisit une allure très lente (une allure d'escargot par exemple) on met trop de temps, même si on a le parcours le plus court"*; pour d'autres cela est tout de même possible parce que *"si le premier choisit une allure très lente, l'autre peut, lui aussi, adopter une allure très lente. Comme ça ils peuvent arriver ensemble"*.

la représentation  
de la vitesse chez  
les enfants

vitesse  
instantanée

et vitesse  
moyenne

A ce stade les enfants n'explicitent pas le problème de la vitesse, même s'ils s'en approchent déjà lorsqu'ils disent :

*"avec un parcours de même longueur, pour arriver ensemble il faut aller à la même vitesse que l'autre"*, c'est-à-dire à la même vitesse instant par instant. Ici, l'on constate que les enfants, même s'ils ne le réalisent pas consciemment, ont déjà l'intuition de l'imbrication des trois grandeurs : longueur du trajet, temps utilisé pour le parcourir, vitesse instantanée. En effet, les enfants ont fortement critiqué l'attitude d'un camarade qui, pendant le parcours, s'était arrêté pour attendre son coéquipier resté à l'arrière sur l'autre parcours. Ce ne sera que bien plus tard que les enfants accepteront cette éventualité. Pour en arriver là, ils devront implicitement concevoir l'état "d'arrêt" comme étant de vitesse nulle, passage indispensable pour arriver à intégrer la notion de vitesse moyenne. Cette progression ne se fait pas toute seule mais plutôt de façon graduelle et est d'autant plus facilitée que l'adulte est là pour intervenir et aider les enfants.

Au niveau de la motricité corporelle des enfants, on remarque que :

- la vitesse est vécue, subie comme facteur de gêne : *"si tu avais marché plus lentement, tu l'aurais mieux fait !"*
- la vitesse rythme les mouvements du corps : *"les pas n'allaient pas tous à la même vitesse"*; *"certains pas sont plus rapides, d'autres plus lents"*.

### 3.2. Les activités de structuration

- Première phase : comparaison de deux parcours de longueur différentes mais ayant le même point de départ et d'arrivée



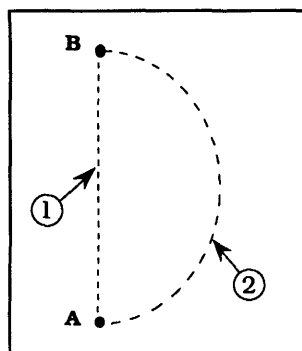


Fig. 1

comparaison de  
deux longueurs :  
le problème de la  
mesure

La maîtresse a essayé de faire calculer par les enfants les distances parcourues.

Voici les propositions des élèves pour comparer les parcours :  
"comptons des traits : 10 traits pour le parcours courbe, 9 pour le parcours droit. Donc, le parcours droit est plus court";  
"...oui..., mais les traits sont un peu dessinés au hasard..  
Certains traits sont courts, d'autres longs.."

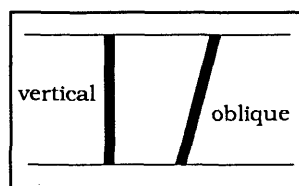


Fig. 2

Après réflexion, les enfants disent que le segment oblique est plus court et qu'il faut utiliser les mains pour mesurer ; une fillette suggère d'utiliser un instrument rigide : la règle par exemple.

Quelques élèves proposent de prendre, comme points de repère et de mesure, les lignes du tableau. Mais lesquelles ? La maîtresse demande au sujet de la fig. 2. (détail agrandi de la figure précédente) : Les segments "vertical" et "oblique" ont-ils la même longueur?

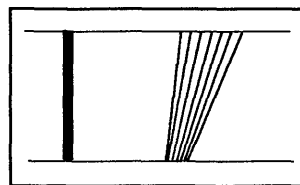


Fig. 3

Entre temps, la maîtresse dessine au tableau différentes lignes, une première, verticale, suivie de plusieurs obliques, plus ou moins inclinées (fig. 3.)

Les enfants demandent à les mesurer toutes. Le résultat est évident : la ligne oblique, même la moins inclinée, est toujours plus longue que la ligne verticale.

En revenant à la situation de départ, toute la classe est d'accord pour dire que le trajet courbe était le plus long.

Leurs conclusions ont été formulées ainsi :

- pour mesurer la longueur d'un parcours droit, on peut utiliser du matériel rigide - une règle, un crayon, un bout de carton, tandis que pour mesurer la longueur du parcours courbe, il faut du matériel non rigide, une ficelle par exemple,

une ligne  
"oblique" est  
toujours plus  
longue qu'une  
ligne "verticale"

mais pas un élastique parce qu'il se détend ;

- la longueur du parcours droit a été adoptée comme unité de mesure ;
- les deux bouts de ficelle utilisés pour calculer les deux parcours ont été mis l'un à côté de l'autre pour une comparaison.
- Seconde phase : évaluation de l'intervalle de temps écoulé entre le départ et l'arrivée

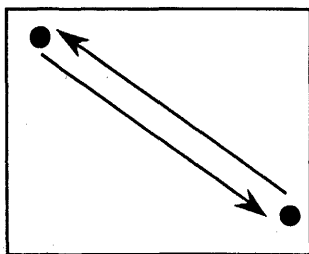


Fig. 4

Dans la salle de gymnastique, comment faire pour savoir "qui est le premier" dans une course où deux enfants partent des coins opposés de la salle ? Les parcours sont ceux de la fig. 4.

Pour trouver une solution, les élèves ont dû résoudre différents problèmes imbriqués les uns dans les autres : le premier étant d'arriver à évaluer qui arrive le premier.

C'est une tâche difficile parce que l'oeil ne peut surveiller les deux bouts opposés de la salle à la fois.

*"Et si on essayait de compter à voix haute ? Si un enfant touche le but au 9 et l'autre au 10, c'est le premier qui gagne".*

Cependant, la mise en pratique n'est pas simple car un autre problème se pose : celui des personnes préposées au compte.

Un élève ne suffit pas parce qu'un seul comptage peut prêter à confusion.

*"Et si on essayait de mettre deux "contrôleurs", chacun surveillant la course d'un élève ?"*

Là encore, la mise en pratique de l'idée donne lieu à un nouveau problème : celui d'établir un rythme commun pour mesurer le temps. En effet, les élèves "contrôleurs" ont chacun un rythme différent de comptage. Si l'un compte plus rapidement, l'autre peut compter moins vite.

*"On peut prendre une montre pour compter les secondes. Celui qui court en moins de seconde est celui qui va le plus vite".* Mais... personne n'a de montre indiquant les secondes.

La maîtresse suggère : *"et si l'on pensait à un rythme ?"*

*"Oui, comptons au rythme d'un tambourin".*

A défaut d'un tambourin on s'évertue en tapant, de façon rythmée, sur un tube en fer. Finalement, les deux élèves "contrôleurs" arrivent à respecter le même rythme et on arrive aussi à évaluer qui est le gagnant de la course.

En général, les enfants ont spontanément recours à la montre pour "mesurer le temps" mais, de fait, ils ne comprennent pas ce que cela veut dire. Il est rare qu'ils sachent que la montre a un rythme, un caractère cyclique. D'autant plus qu'actuellement les enfants ont, presque tous, des montres digitales.

déterminer un  
intervalle de  
temps

un rythme peut  
évaluer le temps

Il nous fallait donc, pour déterminer les intervalles de temps, opérer comme nous l'avions déjà fait à propos de l'espace.

### 3.3. Extension et approfondissement

Pendant cette séance, notre propos était de souligner des intervalles d'espace différents mais parcourus en temps égal pour arriver à une comparaison des vitesses.

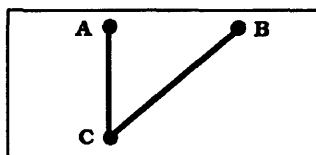


Fig. 5

Ici, les enfants ont approfondi le schéma qui leur avait été proposé et qui peut être décrit comme suit : Deux enfants partent simultanément et respectivement d'un point A et d'un point B et doivent arriver à C simultanément. (fig. 5.)

Tout d'abord, il a fallu mesurer les parcours pour savoir lequel des deux était le plus long. Cela fait, les réactions des élèves pour trouver une solution au problème ont été variées et multiples.

*"Pour arriver ensemble, celui qui accumule du retard doit augmenter la vitesse".*

*"Celui qui part de B doit aller plus vite que l'autre si les deux veulent arriver ensemble parce que s'ils vont à la même vitesse, c'est A qui arrive le premier".*

*"Si A et B vont à la même vitesse, c'est A qui arrive en premier. Si B va plus rapidement, ils auraient des chances d'arriver ensemble, mais il faut que B trouve une bonne vitesse et pas trop rapide parce que la différence de parcours n'est pas très sensible".*

*"B a plus de chemin à faire que A. Ils ne peuvent pas arriver ensemble".*

Dans la réalisation pratique, les solutions adoptées par les enfants sont les suivantes :

*"Moi je regardais sa vitesse. Je me suis aperçue que Paola était plus lente que moi vers la fin, alors j'ai ralenti".*

*"Moi, j'essayais d'aller comme Gustavo, parallèlement".*

*"Maria a modifié son allure parce qu'elle a vu que Anna allait plus vite qu'elle, alors elle aussi elle a augmenté sa vitesse".*

*"A chaque pas je regardais ses pieds, c'est-à-dire qu'ils étaient alignés aux miens".*

*"Celui qui vient de B doit augmenter sa vitesse mais de façon adéquate".*

Bien que les situations où nous avons opéré avec les enfants ne soient pas comparables à celles examinées par Piaget - ce dernier intervenant dans des situations non évolutives et dans des contextes bien différents des nôtres - nous partageons ses considérations finales :

*"Tant que l'ordre temporel n'est pas lui-même constitué, la vitesse se réduit à une intuition insuffisante et parfois trompeuse, celle du dépassement, c'est-à-dire à nouveau d'une intuition spatiale, caractérisée par le changement de position respective du mo-*

la comparaison  
des vitesses

la notion de  
vitesse suivant  
Piaget

les performances  
des enfants dans  
une situation de  
classe

bile... La construction du temps commence donc quand les vitesses différentes sont comparées entre elles, vitesse des activités humaines comme des mouvement matériels, et cette construction s'achève avec la coordination de ces vitesses : les notions de temps et de vitesse sont donc corrélatives" (4).

Même si certains exercices proposés aux élèves exigeaient de leur part la maîtrise opératoire des notions d'espace, de temps et de vitesse et que, à cet âge, ces notions n'ont pas encore été intégrées, les enfants arrivent à des solutions pratiques adéquates et à la formulation des notions d'intervalles d'espace et de temps.

#### 4. REINVESTISSEMENT ET EVALUATION

##### 4.1. Les dessins des enfants

Le jour suivant, nous avons demandé aux enfants de redessiner les parcours de leur dernière activité, notamment le schéma proposé pour l'activité décrite au point 3.3.

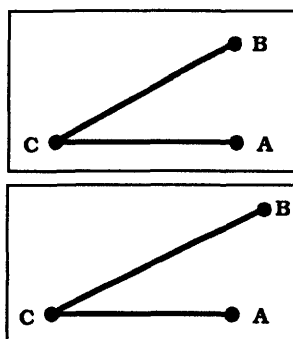


Fig. 6 et 7

Sur 16 élèves, onze ont reproduit fidèlement le parcours AC et BC (fig. 6), alors que cinq ont prolongé la distance BC. Cette représentation souligne, à notre avis, plus la variable temps que celle de distance.

Les enfants qui ont dessiné la fig. 7 étaient ceux qui, le jour précédent estimaient que "B avait plus de chemin à faire que A; qu'ils ne pouvaient arriver ensemble" et que B avait besoin de plus de temps pour parcourir son trajet s'il gardait la même vitesse que A.

##### 4.2. Le jeu des parcours est à nouveau proposé, comme évaluation

La situation décrite au paragraphe 3.2. est à nouveau proposée aux enfants sous forme de question :

"Il y a deux routes pour aller de la maison de deux amis à l'école : l'une droite, l'autre courbe. Les deux amis partent à la même heure et veulent arriver, chacun de son côté, en même temps à l'école. Le premier choisit le parcours droit, l'autre le parcours courbe. Est-ce possible?"

(4) J.PIAGET, *La genèse de la notion de temps chez l'enfant*, Paris, P.U.F. 1946, p. 8.

relation espace -  
temps - vitesse

Désormais, tous les enfants sont unanimes et estiment que le parcours courbe est plus long que le parcours droit. Le problème géométrique a donc été résolu, mais il faut trouver des solutions plus concrètes pour résoudre le problème physique.

Quelques enfants décident d'aller à la même vitesse mais décident de s'arrêter de temps en temps pour attendre le camarade qui a le plus de chemin à faire sur le parcours long, d'autres optent pour des vitesses différentes, ce dernier choix recueillant un consensus plus vaste dans la classe.

Dans une autre classe :

*"Si les enfants veulent arriver en même temps et s'ils vont à la même vitesse, l'enfant qui choisit le chemin droit devra attendre de temps en temps son camarade qui, lui, a plus de route à faire sur le parcours courbe."*

*"Pour arriver en même temps, l'enfant qui choisit le parcours droit devra faire des pas plus petits et plus lents ; l'autre, en revanche, devra allonger son pas."*

*"L'enfant qui choisit le parcours courbe devra faire deux pas chaque fois que son camarade en fait un sur le parcours droit."*

L'accord sur cette dernière option était très large dans un cours de CM1.

### 4.3. Bilan de l'évaluation

En ce qui concerne l'évaluation de l'apprentissage, nous nous sommes principalement fondés sur les discussions faites en classe et sur les dessins des enfants pour comprendre ce qu'ils avaient vu et assimilé, parce que nous sommes conscients du fait que, souvent, la verbalisation écrite peut être une limitation à la communication des enfants de 7-8 ans.

apprentissage  
intériorisé

Lorsque les enfants ont réussi à appliquer de façon correcte des grandeurs physiques à des concepts bien précis, nous avons conclu que ces notions étaient désormais acquises.

Notre intervention visait moins à donner aux enfants la définition de la vitesse qu'à leur faire intérioriser graduellement des concepts théoriques. Notre objectif était que les enfants sachent appliquer ces mêmes notions à d'autres situations et, surtout, qu'ils soient capables d'expliquer, de façon personnelle, leur démarche.

## 5. NOS CONCLUSIONS

### 5.1. Sur les conceptions initiales des élèves

*"Le premier problème qu'il s'agit de résoudre en abordant l'étude de la notion de vitesse est naturellement de déterminer de*

si l'on part d'une  
notion intuitive de  
vitesse  
instantanée...

...les enfants  
arrivent à la  
notion de vitesse  
moyenne

*quelles intuitions initiales procède ce concept" (5).*

C'est de cette idée que nous sommes partis avec, en outre, la préoccupation de formuler une approche didactique adéquate.

Nous avons ainsi relevé :

- que, chez l'enfant, le concept intuitif de vitesse est strictement lié à l'équivalent informel du concept physique de vitesse instantanée ;
- que le concept de vitesse moyenne n'est introduit que bien plus tard par le contexte scolaire et social.

Jusqu'ici, nous avons décrit cette progression dans l'activité "départs et arrivées simultanés" proposée dans une classe de CE1. Chez des élèves de collège (de Sixième, Cinquième et Quatrième) censés déjà maîtriser les trois grandeurs d'espace, de temps et de vitesse, nous avons constaté, conjointement avec d'autres chercheurs de notre groupe de Milan, qu'ils définissent comme "vitesse réelle" la vitesse instantanée (qu'ils relient à celle établie par un compteur de vitesse de voiture) et comme "vitesse théorique" la vitesse moyenne puisque cette grandeur résulte, pour eux, d'une opération mathématique entre espace parcouru et temps de parcours.

Cela porte à croire que même pour des élèves de 11 à 14 ans, le concept primitif de vitesse est celui de vitesse instantanée (6). Si la comparaison de nos résultats avec les considérations de Piaget peut révéler des coïncidences sur plusieurs points, elle n'est cependant pas possible jusqu'au bout. En effet, Piaget, dans les expériences qu'il propose aux enfants au cours des recherches cliniques décrites dans la troisième partie de l'ouvrage cité (note 5), ne considère jamais la vitesse instantanée mais toujours la vitesse moyenne ou, tout au plus, une situation de vitesse constante au cours de laquelle les deux notions physiques de vitesse instantanée et de vitesse moyenne s'identifient l'une à l'autre.

## 5.2. Sur le rôle des interactions sociales

En accord avec d'autres chercheurs (7), nous avons constaté que les enfants, s'ils sont sollicités dans des situations où ils peuvent interagir avec un adulte et des camarades, dépassent nettement leur limite d'âge et arrivent à élaborer des solutions

(5) J. PIAGET, *Les notions de mouvement et de vitesse chez l'enfant*. Paris, P.U.F. 1946, p. 113.

(6) M. GAGLIARDI : "La modélisation et les différents codes de représentation symbolique à l'école élémentaire". *Actes des IXèmes Journées Internationales sur l'éducation scientifiques*, Chamonix 1987, pp. 577-583.

Voir aussi note 2, J.-L. CANAL.

(7) Nous tenons spécialement à remercier MM. G. CAVALLINI et E. GIOR-DANO pour leur contribution critique stimulante sur ce point et pour leur lecture critique de l'article.

auxquelles ils n'auraient pas pensé seuls, ou livrés à un développement spontané. On peut le constater dans l'élaboration des notions d'intervalle d'espace, de temps et de vitesse. Nous avons d'ailleurs observé que, au cours de ces élaborations, les enfants de 7-8 ans développent des procédés qui leur permettent d'arriver à des solutions pratiques du problème donné, sans devoir traiter de façon opératoire les notions d'espace, de temps et de vitesse.

### 5.3. Sur les solutions didactiques

D'un point de vue strictement didactique, nous pouvons faire la synthèse des conclusions de notre recherche comme suit.

points de repères  
didactiques

Pour les enfants de 7-8 ans, il est très artificiel de maîtriser des situations où la distance parcourue n'est pas en relation avec le temps et la vitesse de parcours. En effet, les enfants associent cette notion aux notions d'intervalles d'espace et de temps. Cela s'accorde avec les observations de J. Piaget.

La liaison des trois notions facilite non seulement l'approche de ces notions qui devient plus compréhensible et moins théorique pour l'enfant, mais surtout elle simplifie l'assimilation de ces notions et des interconnexions qui en résultent. Les enfants élaborent spontanément des réponses appropriées pour comparer l'espace, le temps et la vitesse, surtout si la sollicitation fait référence à une situation concrète que ces derniers vivent ou peuvent vivre même en dehors du contexte de l'école.

Nous proposons donc l'hypothèse qu'en agissant sur ces procédés spontanés, on peut plus facilement parvenir à l'élaboration des notions physiques.

Cesare MARIONI, Département de  
physique, Université de Milan  
Susanna INVERNIZZI, Institut de Culture  
et de Langues, Milan  
Piera SABADINI, Ecole Elémentaire, Via  
Bodio, Milan  
Unité de Milan du Groupe National de  
Didactique de la Physique