

LE RAISONNEMENT SCIENTIFIQUE : DES PRATIQUES DE RÉFÉRENCE AU SAVOIR CONSTRUIT PAR LES ÉLÈVES

Pierre Fillon

Ce numéro d'ASTER est centré sur le raisonnement scientifique. Plusieurs entrées sont possibles pour un tel sujet.

Si on se place au niveau des pratiques de référence, on peut distinguer deux approches différentes :

- le raisonnement scientifique tel que les chercheurs le mettent en œuvre dans leurs pratiques quotidiennes au laboratoire ;
- le raisonnement scientifique tel qu'il apparaît dans le discours scientifique (écrit ou oral) de ces mêmes chercheurs.

Pour éclairer ces deux approches, une étude épistémologique du raisonnement scientifique est nécessaire.

Mais comme cette revue traite de didactique des sciences, on peut se placer sur le plan de la **transposition didactique** de ce savoir de référence (on entend ici par savoir, les différents modes de raisonnement cités plus haut) vers le savoir à enseigner. Les deux domaines précédemment distingués gardant leur pertinence.

Enfin on peut se situer au niveau du **savoir enseigné et du savoir effectivement construit par les élèves**. À ce niveau d'analyse, trois aspects sont envisageables :

- l'étude des raisonnements spontanés des élèves ;
- l'étude des raisonnements mis en œuvre pendant les situations d'apprentissage ;
- l'étude des raisonnements utilisés dans les écrits demandés dans ces mêmes situations.

Les articles de ce numéro abordent plusieurs de ces points. Certains se situent prioritairement dans un domaine d'analyse tandis que d'autres sont souvent à l'intersection des pratiques de référence et du savoir enseigné dans les classes.

Du côté des pratiques de référence

Trois articles sont plus particulièrement centrés sur les pratiques de référence relatives au raisonnement scientifique. Ce sont ceux de G. Gohau, de A.-M. Hubat et J.-P. Gaudillère et enfin celui de J.-B. Grize.

G. Gohau, dans son article, analyse les différents modes de raisonnement utilisés en science (raisonnements inductif, déductif et hypothético-déductif) et cerne rapidement leurs limites respectives. Il en déduit que la science, dans son fonctionnement habituel, utilise un « inductivisme pratique » dans lequel les hypothèses corroborées sont considérées

une analyse des raisonnements des chercheurs

une transposition didactique

une étude des raisonnements enseignés et de ceux mis en œuvre par les élèves

un mode de raisonnement privilégié en science

nécessité de distinguer entre le raisonnement réel et celui des discours des chercheurs

apprendre à reconnaître les dispositifs argumentatifs et langagiers pour mieux cerner les enjeux des discours scientifiques

un discours scientifique est une reconstruction a posteriori

un discours scientifique est une mise en forme d'un raisonnement qui est orienté vers un auditeur déterminé

comme vérifiées provisoirement. L'auteur se démarque des thèses de Kuhn et présente en les valorisant les phases du développement de la science entre les révolutions scientifiques. Par ailleurs, en critiquant les travaux de Popper, sur le déductivisme, l'auteur est amené à distinguer le raisonnement réel du chercheur et la reconstruction logique à des fins d'exposition. En effet, la prétendue logique de la découverte scientifique n'est, pour G. Gohau, qu'une reconstruction a posteriori et qui n'est logique que dans la mesure où elle se fait sur ce qui est su. Ce point sera repris dans plusieurs articles notamment celui de A.-M. Hubat et J.-P. Gaudillère et celui de J.-B. Grize pour les pratiques de référence et ceux d'Anne Vérin et A. Dumas-Carré, M. Goffard, D. Gil pour ce qui est du savoir à enseigner. Pour terminer, l'auteur propose, lors de l'apprentissage du raisonnement scientifique, une limitation de l'initiative des élèves accompagnée d'un guidage plus serré de ces derniers.

A.-M. Hubat et J.-P. Gaudillère se placent par contre du côté de l'analyse des discours scientifiques. En partant du constat que les étudiants ont des difficultés à distinguer les différentes parties d'un discours (hypothèse, preuve, argumentation, démonstration), les auteurs examinent les articulations entre les enjeux et les dispositifs argumentatifs et langagiers qui le composent. Ils proposent d'engager les étudiants dans des activités d'analyse des contenus et dispositifs langagiers de plusieurs discours comme apprentissage de cette distinction. À titre d'exemple, ils proposent l'analyse, menée avec des étudiants, de deux recueils de textes correspondants à des controverses récentes (l'un sur la découverte du virus du sida, et l'autre sur la mémoire de l'eau). Ces deux recueils de textes permettent de montrer entre autres que le discours scientifique est une reconstruction a posteriori ; c'est un récit simplifié qui élimine tout ou partie des inconnues et des problèmes rencontrés au cours du travail de laboratoire effectif. Dans le premier texte, les arguments et les éléments démonstratifs peuvent s'imbriquer en effaçant les enjeux scientifiques. Dans le second l'argumentation peut faire intervenir des éléments extra-scientifiques dans le but de valider la qualité des travaux.

Pour J.-B. Grize un discours d'information correspond également à la « mise en forme d'un raisonnement » ; mais cette reconstruction est orientée d'un locuteur vers un auditeur déterminé. Dans son article, l'auteur analyse, en présentant des exemples, les différentes attitudes et méthodes que peut employer le producteur du discours pour qu'une communication (aussi univoque que possible) puisse s'établir avec l'auditeur. Le discours scientifique est caractérisé par l'emploi de langages spécifiques mêlés au langage naturel. J.-B. Grize fait remarquer la tendance qui conduit souvent à privilégier la cohésion sémantique du discours à la cohérence de l'information.

Du côté de l'apprentissage

Le point de vue de l'apprentissage de la démarche scientifique en classe est plus particulièrement abordé dans les articles de M.-G. Séré et de A. Dumas-Carré, M. Goffard et D. Gil ainsi que celui d'A. Vérin.

un conflit socio-cognitif peut aider à rendre un savoir procédural opératoire

un changement de modèle demande une réorganisation cognitive qui peut être catalysée par un conflit socio-cognitif

le problème traditionnel ne place pas l'élève en situation d'apprentissage du raisonnement scientifique

M.-G. Séré centre son article sur les aspects épistémologiques, cognitifs, psychologiques et sociaux de la mise en œuvre d'une pratique scientifique avec des élèves de collège dans le cadre d'activités de modélisation. À partir d'une première étude de cas portant sur l'apprentissage de la modélisation à propos des gaz, l'auteur analyse surtout les difficultés d'ordre psychologique rencontrées par un groupe d'élèves pour réaliser la rupture épistémologique qui consiste à passer de son propre modèle spontané à un modèle particulière proposé par le professeur. En particulier, M.-G. Séré montre que posséder un savoir procédural ne suffit pas pour le mettre en œuvre dans un raisonnement complexe et que l'implication dans un conflit est également nécessaire pour faire progresser les capacités cognitives. Cet aspect est repris dans la deuxième situation où des élèves doivent, avec l'aide du professeur, améliorer le modèle précédent pour élargir son champ d'investigation aux réactions chimiques. Dans cette partie, ce sont les caractéristiques et les conditions d'émergence du conflit socio-cognitif, moteur du changement de modèle, qui sont plus particulièrement analysées. La transformation du modèle nécessite de la part de l'élève une réorganisation cognitive qui laisse malgré tout un reliquat de conceptions préalables. Dans cette étude, M.-G. Séré égratigne «l'inductivisme naïf» latent dans l'enseignement secondaire en mettant en évidence que l'observation n'est jamais neutre et qu'elle est influencée par les schèmes de pensées présents à l'esprit.

Une autre manière de placer les élèves en situation d'apprentissage du raisonnement scientifique consiste à utiliser la résolution de problèmes. C'est l'approche qu'ont choisi A. Dumas-Carré, M. Goffard et D. Gil. Pour eux, le problème classique en sciences physiques, fermé, en partie modélisé, ne permet pas cet apprentissage. D'autre part, les solutions exposées par le professeur (le raisonnement y est reconstruit de façon linéaire dans une logique d'enchaînement des idées) incite l'élève à reproduire le schéma précédent dans une situation qu'il juge voisine sans mettre en œuvre une réelle démarche scientifique. Les auteurs partent donc du postulat que l'apprentissage du raisonnement scientifique ne peut se faire qu'à partir de problèmes ouverts, non modélisés et sans données numériques. Ce modèle d'apprentissage (1) est une transposition papier-

(1) André DUMAS-CARRÉ, Michel CAILLOT, Joaquin MARTINEZ TORREGROSSA, Daniel GIL "Deux approches pour modifier les activités de résolution de problèmes en physique dans l'enseignement secondaire : une tentative de synthèse", *Aster*, n° 8, 1989, pp. 135-160.

placer les élèves
devant des
problèmes
ouverts à l'image
du scientifique

les deux objectifs
divergents du
compte rendu en
science

deux sortes
d'écrit pour
favoriser
l'apprentissage
de
raisonnements
de natures
différentes

crayon des pratiques du chercheur. Dans l'article de ce numéro, les auteurs dégagent les difficultés, de tous ordres, rencontrées par les élèves dans ce type d'activités et émettent des hypothèses sur leurs origines. Enfin, ils proposent quelques solutions pour y remédier.

Dans l'enseignement secondaire, l'apprentissage du raisonnement scientifique passe aussi par l'intermédiaire de l'écrit au cours d'activités expérimentales. Cet écrit se résume bien souvent à un compte rendu d'expérience. Or celui-ci correspond à des objectifs divergents que doit gérer seul l'élève ; c'est un texte reconstruit dans une logique d'exposition, selon un modèle codé, des activités intellectuelles qui se sont déroulées selon une logique heuristique. A. Vérin analyse des dispositifs qui organisent un apprentissage différencié de ces deux modes de raisonnement en centrant les activités sur des types d'écrits différents. En s'appuyant sur des situations de classe, l'auteur met en évidence qu'en demandant aux élèves une production écrite avec formulation d'hypothèses et conception d'expériences on favorise la mise en œuvre de raisonnements heuristiques. Par contre, les raisonnements de type expositif sont induits par des productions de comptes rendus d'expériences. Le fait de favoriser l'un ou l'autre des types d'écrit, renvoie à des problèmes d'épistémologie scolaire. L'assimilation, dans l'enseignement, de la démarche de recherche à celle du discours scientifique se rattache aussi à ce qui précède.

Du côté des raisonnements spontanés

La construction de situations d'apprentissage du raisonnement scientifique nécessite une connaissance des raisonnements spontanés des élèves.

Deux articles traitent de ce point de vue : ce sont ceux de J.-L. Closset et de L. Viennot. Le premier compare les modes de raisonnement des étudiants dans deux domaines de la physique tandis que le deuxième s'intéresse à un type de raisonnement transversal à l'ensemble de la discipline.

Pour aider à la construction de concepts ou de modèles, il est souvent fait usage en science, de métaphores. C'est le cas en électricité où, pour rendre compte des différents phénomènes relatifs aux circuits électriques, l'analogie avec un circuit hydraulique est utilisée de façon quasi systématique. J.-L. Closset, dans son article, caractérise et compare les différents raisonnements spontanés utilisés par les étudiants dans ces deux domaines. Son étude montre que les raisonnements sont de même nature dans les deux domaines. L'utilisation de l'analogie hydraulique ne fait donc que déplacer les difficultés rencontrées par les élèves d'un domaine dans un autre. L'analyse de ces raisonnements fait apparaître que certains sont plus élémentaires que d'autres. L'auteur émet l'hypothèse d'une hiérarchisation de ces raisonnements ; les raisonnements élémentaires constituant un passage obligé pour atteindre les raisonnements plus élaborés.

l'analogie
hydraulique en
électricité ne fait
que déplacer,
dans un autre
domaine, les
difficultés
rencontrées par
les élèves

une tendance à la réduction du nombre des variables dans les raisonnements spontanés

un raisonnement linéaire et causal est privilégié

des activités de classe pour construire une approche de la conservation de l'énergie

quels effets provoque l'introduction de logiciels producteurs d'images sur les pratiques de classe et les représentations des élèves ?

L. Viennot, met en évidence un mode de raisonnement spontané transversal à tous les domaines des sciences physiques : son étude porte sur le raisonnement à plusieurs variables. L'auteur, dans son travail sur des étudiants du premier cycle universitaire, dégage leur tendance à réduire, dans les raisonnements, le nombre de variables. Par ailleurs, lors d'une analyse fonctionnelle, les étudiants sont aussi tentés de favoriser les grandeurs dont dépend le phénomène étudié plutôt que les grandeurs pertinentes dont il ne dépend pas. Enfin, lorsque les étudiants traitent le nombre voulu de variables, ils le font généralement de façon linéaire et causale. Ces modes de raisonnements spontanés sont des obstacles à la construction d'un raisonnement scientifique et il faut en tenir compte lors de l'élaboration de stratégies d'enseignement. Aussi L. Viennot s'interroge-t-elle sur le type d'entrée à privilégier pour traiter ces raisonnements spontanés. Elle propose des approches croisées à partir des contenus et des raisonnements mais toujours en favorisant le raisonnement fonctionnel.

Deux articles viennent s'ajouter aux précédents et peuvent dans une certaine mesure se rattacher au thème central de ce numéro.

L'un de ces articles, celui de J.-L. Canal, propose à partir d'une situation-problème, de construire avec des élèves de l'école élémentaire un premier niveau de formulation de la conservation de l'énergie. Les propositions pédagogiques, faites dans cette étude spécifique, en tenant compte des conceptions des élèves et en essayant de les transformer, permettent en même temps de les initier à la démarche scientifique.

L'autre article, celui de F. Monnet et Y. Paquellier, présente des modalités particulières de travail sur le raisonnement dans le domaine des mathématiques. Les auteurs s'intéressent aux modifications des pratiques de classes que peut induire l'utilisation de logiciels producteurs d'images. Ils analysent en même temps les activités faisant appel à la démarche expérimentale et les représentations, produites par les élèves, provoquées par l'utilisation de ces logiciels.

Ce numéro d'*Aster* rassemble des articles dont le sujet principal est le raisonnement scientifique. Pour cerner un tel sujet, dans une revue traitant de didactique des sciences, il est nécessaire d'avoir à l'esprit les différents axes d'analyse présentés au début de cette introduction. Les articles présents permettent des éclairages ponctuels de certains de ces domaines d'étude. D'autres champs restent à explorer ; en particulier l'épistémologie du raisonnement scientifique et la transposition didactique des pratiques de référence au

savoir enseigné. Ils seront, espérons-le, abordés dans des numéros ultérieurs de la revue, qui reste ouverte à tous les auteurs qui voudraient apporter leur contribution à cette construction du savoir sur le raisonnement scientifique.

Pierre FILLON
Collège «Charles Péguy», Paris 19e
Équipe de didactique des sciences
expérimentales, INRP

ESPRIT DÉDUCTIF versus ESPRIT INDUCTIF

Gabriel Gohau

Le raisonnement déductif est rigoureux, mais il n'apporte aucune vérité nouvelle. L'induction pose de nouvelles vérités, mais sans certitude. Pour résoudre ce dilemme, il faut comprendre que déduction des mathématiques et induction des sciences empiriques ne se ramènent pas au syllogisme et à l'amplification des philosophes. C'est la part d'invention qu'ils contiennent qui leur donne leur valeur.

Critiquant le "déductivisme" poppérien, l'auteur cherche à montrer la part de tâtonnement et de bricolage qui accompagne la recherche. Contre Kuhn, il valorise la science normale par rapport aux révolutions, et conclut sur la nécessité de limiter l'initiative des élèves en les guidant étroitement.

En simplifiant à l'extrême, on dira que la déduction procède du général au particulier, tandis que l'induction chemine dans le sens opposé. Mais c'est sûrement trop simple, car il existe des intermédiaires entre ces procédés. Et il se pourrait bien que l'essentiel soit dans ce domaine.

En effet, la déduction pure se réduit au syllogisme de la logique formelle. Pour démontrer que Socrate est un mortel (conclusion), je dois partir de l'énoncé : tous les hommes sont mortels (majeure) et m'apercevoir que Socrate est un homme (mineure ou moyen terme). Dans le vocabulaire moderne de la mathématique ensembliste, j'applique à un élément (ou à un sous-ensemble) la propriété qui est possédée par l'ensemble.

Une induction tout aussi pure consiste à généraliser à partir d'une série limitée d'observations. Aussi classique que le syllogisme précédent : tous les cygnes que j'ai rencontrés étaient blancs, je pose donc que tous les cygnes (incluant ceux que je n'ai pas vus et ceux à naître) sont blancs.

une opposition
trop simple

D'où sort l'induction ?

Cette opposition appelle deux remarques :

1°) La conclusion de l'induction a le même degré de généralité que la majeure de la déduction. Mais alors, d'où sort celle-ci, si ce n'est d'une précédente induction ?

2°) Hélas, le raisonnement inductif est dépourvu de validité. C'est Hume qui a dit qu'il n'existait aucun moyen terme joignant l'énoncé "tel objet est accompagné de tel effet" à l'autre énoncé : "d'autres objets en apparence semblables s'accom-

pagnent d'effets semblables" (1). En sorte que la déduction est un raisonnement rigoureux, mais qui exige une induction préalable. Or celle-ci est dépourvue de toute validité. Nous sommes en plein cercle vicieux.

Force est alors de chercher des formes intermédiaires, qui pourraient prendre en compte ... les raisonnements scientifiques. Aristote réservait le nom d'induction à un raisonnement rigoureux mais de portée limitée, car exigeant le recensement de l'ensemble (nécessairement fini) considéré. Homme, cheval et mulet ont une grande longévité. Or ils sont les seuls animaux sans fiel (sic). Donc, les animaux sans fiel vivent longtemps. L'inférence est valide (quoique l'énoncé soit faux !), mais elle ne fait que résumer ce qu'on a préalablement établi pas à pas.

la récurrence
mathématique

De façon plus intéressante, Henri Poincaré nomme induction le raisonnement mathématique par récurrence, qui "contient, condensés pour ainsi dire en une formule unique, une infinité de syllogismes" permettant "de passer du fini à l'infini". C'est une induction, mais qui, à la différence de "l'induction appliquée aux sciences physiques (...) incertaine parce qu'elle repose sur la croyance à un ordre général de l'Univers (...) s'impose parce qu'elle n'est que l'affirmation d'une propriété de l'esprit" (2).

Le terme d'induction convient-il dans ce cas ? La tradition n'est-elle pas d'identifier le raisonnement mathématique à la déduction ? Mais le vocabulaire n'importe guère. Ce qui est clair est que le raisonnement par récurrence se distingue, à la fois, du syllogisme simple et de l'induction des sciences empiriques. Un philosophe kantien comprendrait parfaitement cette division. Les énoncés (ou jugements) déductifs sont analytiques, tandis que ceux des sciences empiriques sont synthétiques a posteriori. Or entre les deux, il y a place pour des jugements synthétiques a priori, c'est-à-dire, qui ont leur source hors de l'expérience. Et qui sont donc les propriétés de l'esprit que retrouve Poincaré.

Une conjecture ... et sa réfutation

L'induction des sciences empiriques est, selon le vocabulaire de Sir Karl Popper, une conjecture que l'on soumet à réfutation (3). Au siècle dernier Claude Bernard, et avant lui

-
- (1) HUME David. *Enquête sur l'entendement humain*. 1748. Réédition, Paris : Aubier. 1947.
 - (2) POINCARÉ Henri. *La science et l'hypothèse*. 1902. Réédition, Paris : Flammarion, coll. *Champs*. 1968.
 - (3) POPPER Karl R. *Conjectures et réfutations. La croissance du travail scientifique*. Traduction Launay. Paris : Payot. 1985. Egalement GOHAU Gabriel. "Vers l'extinction du poppérisme", in : *Raison présente*, 81. pp. 79-88.

l'induction des
sciences
empiriques

William Whewell, avaient tracé les grandes lignes de ce raisonnement. A partir d'observations en nombre plus ou moins élevé, on formule une hypothèse dont on déduit certaines conséquences qui sont confirmées ou infirmées par l'expérience. Ce raisonnement, dit pour cela hypothético-déductif, est assez connu pour qu'on n'ait pas besoin de présenter mieux.

Toutefois, on remarque qu'il introduit un élément déductif dans l'induction scientifique. De sorte que sans aller jusqu'au paradoxe en inversant les valeurs des deux raisonnements scientifiques traditionnels, il est clair qu'il existe une induction mathématique autant qu'une déduction en physique et biologie. L'induction amplifiante des philosophes n'est pas plus le modèle des lois naturelles que le syllogisme n'est identifiable au raisonnement par récurrence. Si déduction et induction pures forment les extrêmes d'un segment, les modes de pensée scientifiques se placent quelque part entre elles.

définir la science
par l'invention ...

R. Blanché a comparé, de façon suggestive, la différence entre induction généralisante et raisonnement hypothético-déductif à celle qui sépare un saut en longueur d'un saut en hauteur (4). En disant que tous les Cygnes sont blancs (avant qu'on ne connût la variété noire australienne), on étend à l'infini une observation multipliée et encore jamais démentie. L'énoncé d'une hypothèse n'exige pas une observation préalable répétée. Elle peut naître sans que l'observation la soutienne. Elle vient à l'esprit d'une manière qu'on ne saurait codifier. C'est au sens propre une invention, d'autant plus pénétrante souvent qu'elle est plus inattendue et moins directement dérivée des données disponibles. Les chercheurs disposent des mêmes données. Et cependant, ils ne formulent ni les mêmes hypothèses, ni des suppositions d'égale valeur.

Karl Popper exagère à dessein la part d'originalité de l'hypothèse quand il la mesure à son degré d'improbabilité. Il n'a malgré tout pas tort de souligner ce critère et d'insister sur l'aspect inventif de toute hypothèse. S'il existe une spécificité de l'esprit inductif, c'est peut-être par cette opération qu'on pourrait le caractériser. En l'opposant à la stricte déduction syllogistique. Mais ce critère ne distingue cependant pas rigoureusement le raisonnement déductif du raisonnement inductif, car il existe de l'invention dans tout raisonnement. Il vaudrait peut-être mieux dire alors que toute inférence se compose d'une phase d'invention et d'une phase d'application brutale de règles. Induction et déduction auront l'une et l'autre des deux phases, distribuées de façon plus ou moins inégales. Mais curieusement, on se rend compte que l'induction classique des philosophes et la déduction la plus simple se rejoignent.

(4) BLANCHÉ Robert. *L'induction scientifique et les lois naturelles*. Paris : PUF. 1975.

La part de l'invention

En effet, la découverte du moyen terme qui unit la majeure à la conclusion d'un syllogisme résulte d'un effort d'invention, qu'on peut en général considérer comme faible. Mais il en ira de même, à l'autre bout du segment, dans l'induction amplifiante, où l'énoncé à généraliser s'impose irrésistiblement par la répétition de la même observation. Ainsi décrit, en fonction de la part qu'il réserve à l'invention, notre segment ... est circulaire. La science, qu'elle soit mathématique ou empirique, se distinguerait de la pensée commune par la part qu'elle réserve à l'invention, en se situant au point diamétralement opposé aux précédents.

Cependant, il serait imprudent de faire de cette phase éminemment noble du raisonnement qu'est l'invention une entité mystérieuse, inaccessible, sorte de don inégalement distribué par la nature, comme nous y invitent les thèses poppériennes. En réalité, l'intuition nécessaire à l'invention pourrait s'identifier à l'esprit de finesse, cher à Pascal (5). L'esprit de géométrie auquel il s'oppose (encore que ce terme soit, selon moi, malencontreux pour le lecteur contemporain dans la mesure où la géométrie, au moins celle de mon enfance (!) était la branche des mathématiques qui faisait la meilleure part à l'invention, notamment dans la recherche des fameux lieux géométriques) s'applique aux situations dont toutes les composantes sont simultanément présentes à l'esprit. Tandis que l'esprit de finesse intervient quand la multiplicité des facteurs rend impossible cette appréhension directe.

Peut-être pourrait-on dire, aussi, que cet esprit est celui de l'"analyse", au sens que donne Edgar Poe à ce mot, dans le *Double assassinat de la rue Morgue*. L'analyse consiste à démêler les fils multiples d'un écheveau de circonstances enchevêtrées. "Il faut opérer par la dissociation" dit Jules Renard à propos de l'invention littéraire, pour ajouter une référence totalement extra-scientifique qui fera mieux sentir la généralité des domaines d'application de cette forme d'esprit (6).

Philosophes ou "bricoleurs" ?

La préférence donnée à l'esprit d'analyse (ou de finesse) sur la libre et folle "conjecture" poppérienne n'est pas sans conséquence pédagogique. Elle signifie, en effet, que le chercheur est soumis, dans son travail quotidien, à tout un réseau de connaissances antérieures, qu'il subit ainsi la contrainte des systèmes en place et qu'il n'invente guère que dans ce cadre.

(5) PASCAL Blaise. *Pensées*.

(6) RENARD Jules. *Journal*.

bricolage des
concepts

C'est ce qui explique le divorce entre scientifiques et philosophes. Les premiers se sentent volontiers empiristes et inductivistes. S'ils sont obligés, sous la pression de l'expérimentation, de modifier leurs idées préconçues, ils le font, selon le mot heureux de François Jacob, par "bricolage" des concepts et théories en vigueur. Aussi ne se reconnaissent-ils pas dans l'image que vient donner le philosophe de leur activité, lorsqu'elle est reconstruite en un édifice où création d'hypothèses, déduction, expérimentation ont été séparées et articulées par des liens logiques.

Au fond, mieux encore que les *Histoires extraordinaires* de Poe, que j'ai longtemps pris pour modèle de l'investigation scientifique (7), on pourrait invoquer le *Nom de la rose* d'Umberto Eco, où la vérité sur la série des meurtres se construit progressivement, à travers une hypothèse totalement erronée.

Si nous entrons, selon la célèbre formule de Valéry, "dans l'avenir à reculons", il faut bien comprendre que la science, comme Janus, a deux visages, selon qu'on la voit de l'amont, où elle est incompréhensible et imprévisible, et de l'aval où tout s'éclaire en se réorganisant. "Tout se tient quand tout est construit" (Bachelard). En plaidant naguère pour un inductivisme modéré (8), c'est un peu ce que je visais. Peut-être vaut-il la peine de reprendre l'argumentation sous une autre forme. Et si possible... plus clairement.

et raisonnement
hypothético-
déductif

Dans le raisonnement hypothético-déductif le résultat (R) des multiples expériences destinées à tester l'hypothèse (H) se déduit de celle-ci. En sorte qu'on peut poser $H \Rightarrow R$. C'est ce qui fait dire à Sir Karl que l'hypothèse est réfutable mais non vérifiable. Car si l'on vérifie R, on n'établit qu'une des conséquences de l'hypothèse. On n'a donc pas vérifié (au sens plein) H. En revanche, si R est réfuté, l'hypothèse l'est aussi. Car en bonne logique, si $A \Rightarrow B$, il n'est pas possible d'en déduire que $B \Rightarrow A$, tandis qu'on peut écrire non $B \Rightarrow$ non A. (Les deux propositions sont équivalentes, ce qu'on écrit symboliquement, si non A et non B se notent \bar{A} et \bar{B} : $A \Rightarrow B \Leftrightarrow \bar{B} \Rightarrow \bar{A}$. En français, on dira plus explicitement que la réfutation d'un seul résultat prévu suffit à réfuter l'hypothèse. Et si l'on parle franglais, on préférera dire qu'elle la "falsifie".)

L'argument est irréfutable. Il n'appartient d'ailleurs pas à Popper, qui sait bien que c'est le *modus tollens* de la scolastique. On le retrouve, au demeurant, chez Pascal ou Robert Hooke, au XVII^e siècle, et chez Browallius et Dolomieu au

(7) GOHAU Gabriel. "Deux esprits scientifiques", in : *Cahiers pédagogiques*, 141. février 1976. pp. 18-19. Cf. également : "Difficultés d'une pédagogie de la découverte dans l'enseignement des sciences", in : *Aster*, 5. 1987. pp. 49-69.

(8) GOHAU Gabriel. "Plaidoyer pour un inductivisme modéré", in : *Biologie-Géologie (Bulletin de l'APBG)*, 4. 1985. pp. 705-708. Egalement : "Pour un popperisme relatif", *ibid.*, 1. 1984. pp. 137-143.

qu'est-ce
qu'un test
expérimental ?

siècle suivant (9). Et pourtant, dans l'article précité (7), j'ai tenté de le contourner, en étudiant le passage de l'expérience à l'hypothèse (donc dans le sens rétrograde), tel que le font nos élèves dans les exercices d'examen, notamment dans l'analyse de documents au baccalauréat.

Conditions pour qu'une hypothèse soit "testée"

Je suis parti de la recherche des conditions pour qu'une expérience teste une hypothèse. Cela se réalise si, lorsque l'hypothèse est vraie l'expérience donne toujours un certain résultat, noté \bar{R} , tandis que lorsque l'hypothèse est fautive, le résultat est nécessairement différent, de telle sorte qu'il est noté R . En ce cas, naturellement, le résultat R ne se produit que si H est vraie. Il doit donc, s'il se réalise, démontrer la vérité de l'hypothèse. C'est-à-dire qu'il la vérifie au sens plein.

Cela peut surprendre dans un premier temps. Pourtant, la raison en est simple. Quand Pascal nous affirme que *"pour faire qu'une hypothèse soit évidente, il ne suffit pas que tous les phénomènes s'ensuivent"*, il le justifie en prenant l'exemple d'une pierre chaude qui peut s'expliquer par un grand feu, mais aussi par d'autres hypothèses. Une même donnée de fait peut être conséquence de plusieurs suppositions contradictoires. Or quand je dis que, si l'hypothèse H est fautive, on obtient le résultat \bar{R} , j'affirme qu'**aucune autre hypothèse** ne pourrait donner R . C'est en cela que je contourne le raisonnement de Pascal. Mais d'où me vient cette assurance ?

Pascal prend l'exemple d'une observation commune (la pierre chaude), pas plus scientifique que les cygnes blancs ou les corbeaux noirs des inductivistes. L'expérience scientifique répond à une question précise, étroitement circonscrite et, pour cela, riche de contenu informatif. Le tort des logiciens est sans doute de vouloir décrire le rapport Hypothèse-Expérience sur le modèle des énoncés et observations de la connaissance commune, que Bachelard nous a appris à séparer de la connaissance scientifique.

La science se distinguerait, selon ce qui précède, du savoir commun par sa capacité de constituer de véritables tests probants. Ou plutôt, car la prétention que toute hypothèse à venir ne pourra jamais conduire qu'à \bar{R} étant sûrement démesurée, le scientifique sait se contenter de limiter son problème à une alternative ou à un jeu circonscrit d'hypothèses. Eu égard aux possibilités du moment, je peux affirmer qu'aucune solution ne donnerait R .

(9) GOHAU Gabriel. "Karl Popper et la naissance de la géologie", in : *Revue de Métaphysique et de Morale*, 4, 1984. pp. 505-514.

L'imagination et la contrainte

C'est ce qui me fait dire que la science utilise un inductivisme pratique. En droit, bien sûr, l'argument du *modus tollens* n'est pas contourné. Mais, de fait, on peut s'en passer et considérer les hypothèses corroborées (selon le vocabulaire poppérien) comme vérifiées provisoirement.

une armature de contraintes

Le logicien, qui doute que tous les cygnes soient blancs, bien qu'il n'en ait jamais vu d'une autre couleur, a de bonnes raisons pour le faire : il y a tant de variations de couleurs chez nombre d'espèces ... Et il n'a pas de difficulté à **imaginer** des cygnes d'autre couleur. Le chercheur qui teste une nouvelle hypothèse contre une théorie en place est déjà bien content d'avoir trouvé une idée nouvelle. Au fond, si la science est moins imaginative, c'est aussi parce qu'elle n'a pas une palette infinie de solutions à chaque problème. Elle est **contrainte** par tout le savoir déjà constitué et par la précision du problème à résoudre.

Pour définir, donc, l'esprit inductif - ou l'esprit d'invention - tel qu'il s'exerce dans la recherche, il faut tenir compte de ces deux éléments complémentaires, d'apparence contradictoire : il doit être beaucoup plus original que dans le savoir commun, et en même temps, il est étroitement guidé par toute une armature de contraintes.

Dans l'exemple des exercices scolaires d'exploitation de documents (utilisé dans l'article précité), cette contrainte permet de "remonter" de l'expérience à l'hypothèse par un cheminement qui suit un guide logique. En effet, en bonne méthodologie bernardienne, l'expérimentateur doit comparer entre elles deux situations qui diffèrent par une condition unique. Dès que l'élève a repéré celle-ci - nommons-la ΔC - il la met en regard des différences entre les résultats des deux expériences ΔR , et il énonce que $\Delta C \Rightarrow \Delta R$. Ce qui, en quelque sorte, est l'hypothèse testée.

J'ôte le pancréas d'un chien, et je note tous les troubles qui s'en suivent. J'en déduis (?) le rôle de la glande par comparaison avec le témoin sain.

on ne peut isoler un unique facteur

Le problème est que, lorsqu'on passe de l'exercice scolaire à l'expérimentation réelle, la situation se complique. Le témoin, pour éliminer toute influence du choc opératoire, devrait avoir subi la même ouverture de l'abdomen, etc. Quand je dis qu'une seule condition a changé, je veux dire, en réalité, que j'ai, d'une part, fait varier cette condition, et, d'autre part, empêché que ne changent n autres conditions. Mais il reste une infinité d'autres facteurs de l'environnement dont je n'ai pas tenu compte. Soit parce que je savais (ou croyais) qu'ils étaient sans influence : la couleur de ma blouse pendant l'intervention ou l'orientation de la table d'opération ... Soit parce que je les ai oubliés. L'expérimentateur est fautif quand il omet un paramètre décisif : tel chercheur qui dépeçait des grenouilles pour observer le rôle

de la peau dans la sensibilité ne se rendait évidemment pas compte de la multiplicité des facteurs qu'il faisait intervenir (anecdote garantie vraie, quoiqu'on ne citera aucun nom). C'est l'incertitude sur tout ce qui varie sans qu'on s'en préoccupe qui fait que d'autres hypothèses sont possibles, c'est-à-dire que plusieurs d'entre elles (correspondant à tous les paramètres qui ont changé à notre insu) sont simultanément testées par le même protocole expérimental. En sorte que, si mon hypothèse implique le résultat R, sa négation n'implique pas non-R.

En ce sens, les logiciens ont raison de prétendre que les réfutations sont seules définitives (encore que si le facteur insoupçonné annule le résultat attendu, il conduit indûment à la réfutation), mais ils le démontrent mal sur l'exemple des corbeaux noirs ou des cygnes blancs. Car l'expérience scientifique n'est pas une simple collection de faits d'observation.

l'hypothèse
existentielle

J'avais aussi tenté, dans ces mêmes articles de la revue de l'APBG, d'examiner le cas des hypothèses de la forme existentielle. K. Popper nous dit que les hypothèses ne sont pas vérifiables pour la raison que ce sont des énoncés universels, de la forme : pour tout x ... Et qu'on ne peut examiner, un à un, tous ces x qui sont en nombre infini. Une fois encore, l'assertion vaut à plein pour la couleur des oiseaux. Mais résume-t-elle toutes les situations scientifiques ?

La prétendue "logique de la découverte" ...

J'ai pris le cas de l'expérience fameuse de Bayliss et Starling (1902) qui démontrait l'**existence** de corrélations humorales. Quand les auteurs coupaient les nerfs d'une anse isolée du jéjunum, ils cherchaient à montrer que le contenu acide de l'anse, en stimulant sa paroi, pouvait transmettre une information au pancréas par une voie non nerveuse. Et que, par conséquent, il existait au moins une telle corrélation. L'hypothèse testée repose sur un quantificateur existentiel : il existe au moins un x ...

pas de logique
des découvertes
en cours

Certes, sous cette forme, c'est une hypothèse destinée à réfuter la théorie qui ramenait toutes les corrélations à un message nerveux. Elle n'établit une corrélation humorale qu'à la condition de réduire à deux les voies de transmission du message. Le logicien peut en être insatisfait, mais le chercheur s'en contente *hic et nunc*. La prétendue "logique de la découverte scientifique" n'est en réalité qu'une reconstruction postérieure, qui est logique dans la mesure où elle se fait sur ce qui est su. Elle n'a aucune valeur pour le scientifique à sa pailasse. Je dirais même qu'elle ne vaut que pour les théories ... condamnées, ou pour les théories (anciennes) relativisées, incluses dans des théories postérieures.

J'aime à prendre, pour préciser ce point, l'exemple simple de la chimie des éléments. Celle-ci, au XIXe siècle, prétend que les éléments sont autant d'entités indépendantes, entre lesquelles aucun passage n'est possible. Ainsi dit, c'est faux, puisque les réactions nucléaires (radioactivité naturelle, fission, fusion) passent d'un élément à l'autre (hydrogène à hélium dans la fusion nucléaire). Mais ce qui est vrai, c'est qu'on ne peut réaliser ce passage que par des énergies très supérieures à celles des phénomènes chimiques, qui ne mettent en jeu que des échanges électroniques. La théorie, dûment restreinte au niveau énergétique des expériences chimiques, est confirmée - disons-le - définitivement. Sa logique peut être entièrement livrée aux réflexions des logiciens qui travailleront sur elle... comme sur des cygnes. Mais les théories encore actuelles ont ce redoutable défaut de n'avoir pas encore subi la réfutation qui les relativisera, en montrant les limites de validité. En sorte que les expériences qui les "prouvent", ou les corroborent, sont sujettes à réinterprétation. Certes, le logicien qui soutient la thèse de la précarité des théories s'en réjouira. Mais comme il ne peut dire, plus que quiconque, où sont ses points faibles, ceux où elle dépasse présentement les limites autorisées par la démonstration expérimentale, il lui est conseillé de ne pas les prendre en exemple s'il ne veut être un jour démenti.

Enfin, les auteurs des édifices épistémologiques qui prétendent découvrir les règles générales du fonctionnement de la science auraient intérêt à travailler de manière ... un peu plus inductive, en analysant la science elle-même dans sa démarche quotidienne. Ce qu'ils nous disent nous éloigne de l'esprit de la recherche, ainsi que de la forme élémentaire de l'invention scientifique. Quand Thomas Kuhn étudie "la structure des révolutions scientifiques" et montre que nos démonstrations expérimentales contiennent une part d'éléments sociaux qu'il réunit (avec d'autres) dans son concept de paradigme, il n'a sans doute pas tort. Malgré tout, les procédures un peu stéréotypées qu'il range péjorativement dans la rubrique de "science normale" ne sont pas si méprisables qu'il le laisse entendre. Ce sont elles qui font l'essentiel de la recherche, les "révolutions" radicales, du type de la relativité ou de la tectonique des plaques (?) étant des moments rares, auxquels ne participent activement qu'un nombre réduit d'acteurs.

Si l'on réserve le nom de théories à ces grands édifices révolutionnaires, la science quotidienne a pour seule préoccupation de les consolider (ou de confirmer celui qui est en place), en les nourrissant de faits nouveaux. Mais comme rien n'est jamais aussi simple que prévu, elle les modifie insensiblement par des séries de distorsions. On nomme hypothèses annexes les suppositions dont il faut constamment habiller la théorie - qui est un peu comme l'homme invisible, et n'est testable que par des vêtements. Ce sont elles qui supportent le va-et-vient $H \Rightarrow R$ et $R \Rightarrow H$ (ou $H \Leftrightarrow R$). Elles seules aussi qui conduisent au sentiment de

certitude, lequel ne se dissout que ... lorsque la théorie se fissure. Car évidemment, les hypothèses testées ne semblent pleinement vérifiées, et non simplement corroborées (contre Popper) que pour autant que la théorie qui les soutient est vraie. Or, elle-même n'est pas directement testable. Quand elle sera réfutée, on saura que les hypothèses n'étaient pas vraiment vérifiées, et le logicien pourra dire qu'il nous en avait prévenus. Mais en attendant, faisons comme s'il n'était pas là, puisque nous cherchons seulement (si on ose dire) le vrai, et que pour ce faire il faut mal raisonner ou encore ne pas raisonner! En tout cas, il faut éviter de suivre les exigences "déductivistes" du logicien trop rigoureux.

Quelles conséquences pédagogiques ?

une autonomie
limitée de l'élève

Après de tels propos, volontairement provocants, il n'est pas facile de conclure sur des considérations pédagogiques. Sans aller jusqu'à professer l'absence de rigueur, on peut tout de même faire apparaître des conséquences surprenantes et quelque peu hétérodoxes. Si l'on décide de favoriser la science "normale", au détriment de la découverte "révolutionnaire", et d'y entraîner nos élèves, voyons clairement que ce choix nous éloigne des conceptions pédagogiques réputées "libertaires", dans lesquelles, sous prétexte de l'entraîner au travail indépendant, le jeune est abandonné à sa seule initiative. L'idéologie de la pédagogie des sciences, longtemps naïvement inductiviste, quand y régnait l'idée qu'on peut sans effort "redécouvrir" le corpus des connaissances, ne doit pas, sous prétexte qu'elle s'est convertie à la méthode hypothético-déductive, rejeter toute induction.

L'autonomie de l'élève sera d'autant mieux assurée qu'elle portera sur une bande plus étroite d'initiative personnelle. Puisque, selon une formule pluriséculaire, nous sommes des nains juchés sur les épaules de géants, nous ne pouvons inventer que dans le cadre de l'édifice en place. Le travail de l'élève, comme celui du chercheur, n'est productif que si le regard est pénétrant. Et il ne peut l'être que si on lui pose un problème à sa portée.

L'ambition ne doit pas être au départ de la recherche. Elle se trouvera, dans le meilleur des cas (c'est à dire exceptionnellement, pour le génie seul), à la fin de l'investigation s'il se trouve que par chance et par perspicacité, ainsi que par l'obstination du chercheur, le choix de départ était fécond. Songeons que Pasteur révolutionna biologie et médecine pour avoir tiré le fil d'un petit problème de chimie sur deux tartrates qui avaient mêmes propriétés chimiques, mais des propriétés optiques différentes.

Quitte à prendre le contrepied des idées à la mode, vantons le travail étroitement guidé, celui, par exemple, où l'on

reprend une recherche antérieure en en modifiant un seul facteur (essayer une substance donnée sur une espèce nouvelle). On peut y manifester toutes les qualités scientifiques : maîtrise de technique expérimentale, attention portée à des effets inattendus éventuels, etc. C'est ainsi que se forme l'esprit inductif, c'est-à-dire l'aptitude à inventer.

Il y a là tout un terrain privilégié pour les techniques actives, car l'élève ne peut acquérir l'esprit inductif que par l'apprentissage personnel, par l'exercice. On ne se forme à l'esprit inventif que par l'entraînement méthodique, comme on n'apprend à sauter à la perche que par essais. Le tout est de disposer d'une bonne méthode. Il n'existe pas de recettes qu'on trouverait dans les vademecums, mais des techniques d'entraînement programmé et progressif qui supposent qu'on soit solidement guidé.

Gabriel GOHAU
Lycée «Janson-de-Sailly», Paris

ARGUMENTER ET DÉMONTRER : RHÉTORIQUE ET ENJEUX SOCIAUX DANS LES DISCOURS SCIENTIFIQUES

Anne-Marie Hubat
Jean-Paul Gaudillère

Une étude interdisciplinaire sur le langage a rassemblé des enseignants de lycée en français, histoire, géographie, sciences économiques et sociales, biologie, philosophie, dans le cadre de plusieurs "projets d'action éducative" et plus particulièrement au cours d'un stage de deux jours. L'exemple analysé ici porte sur l'analyse de deux controverses scientifiques : la découverte du virus du sida, et l'hypothèse de "la mémoire de l'eau". Le dispositif adopté associe étroitement communication du savoir et constitution historique des connaissances, argumentation et enjeu social du discours, approche épistémologique, didactique et pédagogique, formation des enseignants et des élèves.

modifier la
représentation du
savoir et de
l'apprentissage

L'évolution des conditions d'enseignement, par le renouvellement des savoirs et le prolongement généralisé de la scolarité, impose à la formation permanente des enseignants, une double nécessité : continuer à former les maîtres tout au long de leur carrière en leur apportant de nouvelles connaissances, et modifier leurs représentations de l'apprentissage pour les amener à repenser leur pédagogie. Si les **deux nécessités** sont **disjointes**, on ne voit pas bien comment l'objectif pourrait être atteint. Autrement dit, si le savoir transmis aux enseignants continue de l'être sous forme purement expositive, on risque de ne jamais parvenir vraiment à modifier leurs pratiques de classe. Le risque majeur est de marginaliser la réflexion pédagogique, "comment faire passer ce que l'on sait", sans s'interroger sur la manière dont on l'a appris.

C'est pourquoi, dans la démarche qui va être exposée, on a tenté de faire **tenir ensemble les deux dimensions de la formation**. Il n'est pas indifférent que nous ayons choisi de travailler sur le **langage** de façon transdisciplinaire. Le langage est en effet un moyen tout autant qu'un contenu, et la transversalité imposait un **dispositif collectif**. Il n'est pas indifférent non plus que ce travail ait réuni des équipes d'établissements voisins, impliqués dans des projets d'action éducative (PAE). Enfin le problème de la **communication** du savoir n'est pas envisagé séparément de celui de sa constitution et la connaissance est appréhendée dans son historicité.

1. MAÎTRISER LE LANGAGE : UN ENJEU POUR TOUTES LES DISCIPLINES

associer les
élèves à notre
propre formation

La maîtrise du langage et de ses enjeux est stratégique pour la formation dans toutes les disciplines. On constate bien souvent que les élèves échouent faute d'avoir correctement interprété les consignes. De même la formation continuée des maîtres ne suppose-t-elle pas un renouvellement constant de leurs performances de lecteurs ? Dans l'optique d'un apprentissage méthodologique destiné à préparer les élèves à se former durant toute leur vie, nous avons essayé de concevoir des dispositifs nous permettant de travailler sur le langage en interdisciplinarité, tout en associant le travail avec les élèves au renouvellement de notre propre formation.

associer des
stages de
formation et des
PAE

Depuis trois ans ont donc été associés des stages d'enseignants en formation continue et des "projets d'action éducative" (PAE) avec les élèves de lycée autour du thème de l'argumentation. Plusieurs essais ont été faits avec des classes de différents niveaux (Seconde, Terminale). Ils ont permis de définir les difficultés des élèves en français, histoire, géographie, sciences économiques et sociales, en analysant un corpus de textes et de productions d'élèves. Par la suite se sont également joints des enseignants de biologie et de philosophie.

Avec la collaboration d'un professeur de linguistique de l'Université de Picardie, nous avons envisagé diverses notions de typologie des discours, de stratégies et de structures discursives, nous nous sommes initiés à l'analyse des présupposés, à celle du fonctionnement de certains connecteurs argumentatifs. Enfin nous avons été amenés, du fait de l'interdisciplinarité de nos démarches, à nous interroger sur le langage en situation, sur les liens étroits, qui ne relèvent pas uniquement de la description du linguiste, entre les fonctionnements langagiers et les enjeux des situations : personnels, sociaux, politiques, institutionnels... d'où **l'intérêt de l'étude de la controverse**, de polémique réunissant autour d'un thème plusieurs textes émanant de sujets diversement positionnés.

la controverse
scientifique,
exemple
privilegié

Nous avons donc décidé de prolonger le travail mené sur l'argumentation en y intégrant **la controverse scientifique**. C'est plus particulièrement ce travail que nous voudrions relater ici. La possibilité d'étudier des textes et de s'interroger sur la lecture et le langage dans les cours scientifiques de travailler sur des textes se référant à des notions scientifiques en cours de français offrait une dimension nouvelle. Le choix d'un même objet n'excluait pas, au contraire, la diversité des approches. Mais cela ne pouvait se faire dans le cadre du dispositif habituel de cours, le professeur de biologie n'ayant pas, aux yeux des élèves, la légitimité requise pour traiter de telles questions.

Nous avons donc décidé d'entreprendre un PAE où seraient intégrés les travaux que nous venons d'évoquer, en **associant des professeurs de Seconde, de Terminale et des élèves**, dans un stage sur l'argumentation et la controverse. Ce stage a réuni les professeurs stagiaires et une classe de **Terminale F7** (option biochimie) **pendant deux jours**.

un stage de deux jours

La première journée a été consacrée à deux ateliers pour les professeurs. Le premier portait sur la **controverse R. Gallo, L. Montagnier** à propos de la **découverte du virus du sida**. Le second sur la polémique suscitée par les **travaux de J. Benveniste** sur la "**mémoire de l'eau**". L'objectif était de procéder simultanément à une analyse des enjeux scientifiques, épistémologiques et sociaux de ces débats, et à une approche des dispositifs argumentatifs et langagiers utilisés par les protagonistes.

La matinée de la seconde journée était consacrée au travail avec les élèves sur le même corpus de documents concernant l'affaire J. Benveniste (coupures de presse tirées du *Monde** et de *Paris-Match*) qui avait été utilisé la veille. L'après-midi était réservé à l'évaluation du travail avec les professeurs en stage.

La classe était ce jour-là, composée de vingt-six élèves qui ont été distribués en sept groupes. Les seize professeurs en stage étaient répartis dans les groupes d'élèves à raison de deux ou trois par groupe. Ils avaient été présentés aux élèves comme personnes ressource pouvant les aider dans la lecture des textes. Mais ils avaient aussi une mission d'observation. Le formateur a présenté les problèmes posés par l'hypothèse de la "**mémoire de l'eau**" défendue par J. Benveniste. L'animatrice est restée hors jeu, pour gérer le dispositif. Le travail devait être réalisé en deux heures. Au cours de la première heure, chaque élève avait reçu un texte, chaque groupe ayant la totalité du dossier. Il devait le lire et en rendre compte brièvement à ses camarades. Au cours de la discussion qui suivait ce compte rendu, un rapporteur devait noter ce qui se disait pour présenter le débat à l'ensemble des groupes pendant la deuxième heure.

lire un texte, puis en rendre compte

Les comptes rendus des élèves et des rapporteurs-adultes ont fait apparaître de nombreuses questions que nous n'analyserons pas ici :

- méthode de lecture des textes,
- aptitude à questionner le texte de manière autonome,
- usage de la métaphore à des fins de vulgarisation,
- lecture linéaire sans retour ni va-et-vient,
- identification des interlocuteurs,
- prise de notes, prise de parole,
- distinction entre expérience, hypothèse, preuve, argumentation, démonstration,
- etc.

* Article «La mémoire de la matière» de Jean-Yves NAU et Frank NOUCHI, *Le Monde*, 30/6/88.

associer
épistémologie et
linguistique

Incontestablement, ces deux études menées parallèlement ont permis, après mise en commun, de pointer plus précisément **l'écart entre discours démonstratif et argumentaire**, en associant par leur complémentarité l'approche épistémologique et scientifique avec l'approche linguistique. Cela a permis d'atteindre plus complètement nos objectifs didactiques concernant l'étude des fonctionnements discursifs de la controverse scientifique. Deux journées se sont avérées insuffisantes, et le pédagogique – l'intérêt du dispositif, de la transversalité des disciplines, de la participation et des difficultés des élèves – l'a emporté sur le didactique – la diversité des discours scientifiques, leurs enjeux socio-historiques et épistémologiques.

Les deux aspects de la démarche, pédagogique et didactique, sont pourtant liés. C'est faute de s'être suffisamment interrogés sur les enjeux de leur discipline et sur sa spécificité que les professeurs ont du mal à s'associer en groupes interdisciplinaires. C'est sur la rigueur épistémologique que doit se fonder une pédagogie soucieuse d'éviter l'amalgame des méthodes et des objets. Mais il faut aussi que les didacticiens tiennent compte de la spécificité de la situation scolaire et des contraintes qu'elle fait peser sur les transferts de notions et de savoir-faire du champ scientifique au domaine pédagogique.

2. DÉMONTRER ET ARGUMENTER : ANALYSE DE DEUX CONTROVERSES SCIENTIFIQUES

En prenant pour point de départ d'une analyse transdisciplinaire du discours scientifique, deux débats récents, largement présentés dans les médias, notre objectif était, à la fois de limiter les difficultés liées à la réappropriation des contenus scientifiques par des professeurs de différentes disciplines, et de privilégier l'analyse d'un problème encore "vivant", où les enjeux épistémologiques et sociaux de la recherche ne sont pas encore figés par la transformation des pratiques scientifiques en savoirs acquis.

convaincre
autrui

Sortir (même temporairement) de la problématique usuelle de la transmission des connaissances pour faire surgir les problèmes posés par le processus de création de ces connaissances est, en effet, un moyen permettant d'illustrer les liens qui unissent création des connaissances et apprentissage, un instrument pour révéler les enjeux didactiques d'une formation critique pensée comme une découverte, une remise en cause des notions communes et une initiation méthodologique, et non comme une acquisition de règles et de compétences "techniques".

Les corpus de textes retenus pour l'analyse de ces deux problèmes privilégiaient donc la part d'argumentation propre à toute situation où **la conviction d'autrui est encore un enjeu**, où **la démonstration d'un savoir fait encore problème** :

- dans le cas du sida, il s'agissait de trois récits successifs de la découverte du virus du sida, ceux proposés dans *La Recherche* et *Pour la Science* par L. Montagnier en 1985, R. Gallo en 1987 et leur version commune élaborée en 1988 ;
- dans le cas des recherches de J. Benveniste, nous avons associé deux discours de J. Benveniste destinés à des publics différents (les lecteurs du *Monde* et ceux de *Paris-Match*) et les commentaires contradictoires publiés dans *Le Monde* immédiatement après la présentation publique de l'hypothèse de la mémoire de l'eau.

deux
controvertes

Dans les deux cas, l'analyse des contenus et des dispositifs linguistiques visait à repérer la nature et les objectifs de chacun de ces discours, à élucider les étapes de la démonstration et les moyens de l'argumentation. Cela pour permettre une approche des **enjeux épistémologiques et sociaux sous-jacents** à ces deux controverses :

- pour le sida : nature de la découverte scientifique avec ses fausses pistes et ses incertitudes, enjeux thérapeutiques et économiques de l'antériorité de la découverte, importance de la négociation dans la création du discours de vérité de la communauté scientifique ;
- pour la mémoire de l'eau : nature de la conviction scientifique, rôle de la vulgarisation, intervention de la demande sociale sur l'origine et le sort réservé à une hypothèse.

2.1. La découverte du virus du sida

Il n'est sans doute pas besoin de rappeler longuement l'ampleur des problèmes posés par l'apparition de cette nouvelle maladie à la fin des années soixante-dix : le nombre des séropositifs (porteurs du virus malades ou non) se chiffre par millions aujourd'hui. Dans l'imaginaire social, le sida occupe désormais une place qui combine les caractéristiques qui avaient été celles de deux fléaux majeurs dans l'histoire de la médecine : la syphilis (maladie sexuellement transmissible, associée à la perversion et au mal) et le cancer (maladie mortelle, alors incurable). Le sida était donc un enjeu décisif pour la médecine scientifique moderne ; sa crédibilité dépendait de la capacité à mettre en œuvre les étapes de recherche qui ont, à partir de la seconde moitié du XIX^{ème} siècle, permis l'éradication (au moins en Europe) des grandes maladies infectieuses : identifier le micro-organisme responsable de la maladie, vacciner et trouver une thérapeutique efficace.

un nouveau
fléau majeur

Seul le premier de ces objectifs est atteint aujourd'hui ; en cinq ans (de 1980 à 1985) l'agent viral à l'origine du sida a été isolé et il y a aujourd'hui un large consensus pour admettre que la maladie est due à une catégorie de virus particulière : les rétrovirus. Cela même si certains considèrent que le virus HIV n'est pas la seule cause mais un des facteurs d'apparition des symptômes. Ces rétrovirus ont pour caractéristiques principales de pouvoir pénétrer dans

les cellules du système immunitaire, d'y rester à l'état latent en s'intégrant aux chromosomes de la cellule, ce jusqu'à ce que des circonstances diverses et encore mal connues activent la multiplication de ces cellules et déclenchent la reproduction du virus en un grand nombre d'exemplaires, processus qui a pour conséquence la destruction de la cellule-hôte.

les étapes de la découverte

Cette découverte a fait intervenir trois étapes principales :

- une étape clinique avec la description des caractéristiques de la maladie (dont les manifestations peuvent être très variées) ; l'attribution de ce syndrome à une déficience du système immunitaire ;
- une étape épidémiologique permettant de définir le mode de transmission de la maladie (par l'intermédiaire du sang et du sperme), étape centrée sur l'identification de groupes à haut risque : les hémophiles, les héroïnomanes, les homosexuels...
- une étape biologique avec la caractérisation du virus, de son mode de reproduction et son rattachement à une catégorie déjà connue pour son pouvoir pathogène chez l'animal.

La polémique sur la découverte de cet agent viral est un cas classique de querelle de priorité au sein de la communauté scientifique. Avant de rebondir très récemment (avec les révélations de la presse américaine suggérant que l'équipe de R. Gallo aurait utilisé pour sa "découverte indépendante" le virus fourni par l'Institut Pasteur), la controverse avait abouti à un premier consensus accepté en 1987 qui avait ceci d'original que les deux équipes en cause (celle de R. Gallo aux États-Unis, et celle de L. Montagnier à l'Institut Pasteur) se partageaient le mérite de la découverte. Ce résultat, annoncé conjointement par R. Reagan et J. Chirac, permettait la mise sur le marché des deux tests de diagnostic de la maladie mis au point par chacune des équipes à partir de leur propre virus. Enjeu non négligeable s'il en est puisque le marché du diagnostic du sida était alors estimé à 3 millions de dollars par an.

Gallo versus Montagnier

Après avoir rappelé quelques-unes des notions scientifiques indispensables à la compréhension des textes (acronymes utilisés, nature des cellules infectées et étapes du cycle de reproduction), les conseils de lecture donnés aux stagiaires (répartis en trois groupes ayant chacun un texte à analyser et comprenant quatre ou cinq professeurs de disciplines littéraires et scientifiques), consistaient à dégager le plan du texte, la structure du récit, la chronologie utilisée, les mécanismes d'association des discours scientifiques et non scientifiques, la place de l'argumentation et de la démonstration. Nous limiterons cette présentation du travail à quelques exemples de traitement qui ont été particulièrement importants lors de la présentation des travaux de chaque groupe.

Cette discussion a par exemple permis l'établissement d'un tableau comparatif des **repères chronologiques** utilisés

**TABLEAU 1 : CHRONOLOGIE COMPARÉE DES RÉCITS
DE LA DÉCOUVERTE DU VIRUS DU SIDA**

L. MONTAGNIER (1985)	R. GALLO (1987)	Récit commun (1988)
Juin 1981. Diagnostic SIDA.	Années cinquante. Premiers cas de SIDA, non détectés.	1982-84. Travail épidémiologique.
1982. Formation d'un groupe français d'étude du SIDA.	1978. Isolement d'un rétrovirus humain : HTLV I (Laboratoire Gallo)	1970. Découverte des rétrovirus*.
Janv. 1983. Culture des cellules infectées. Hypothèse d'un nouveau type de rétrovirus : LAV.	1982. Formulation de l'hypothèse virale, l'agent du SIDA est du type HTLV.	1980. Isolement de HTLV I*.
Mai 1983. Publication des résultats parisiens.	Fin 1982. HTLV I présent chez les malades atteints du SIDA.	1981. Diagnostic du SIDA.
Sept. 1983. Hostilité américaine à l'hypothèse "LAV".	Mai 1983. Échec culture continue du virus.	Janv. 1983. Culture de cellules infectées à Paris.
Mai 1984. Isolement du même virus par R. Gallo, appelé HTLV III.	Automne 1983. Obtention d'une culture de cellules infectées immortelles.	Oct. 1983. 40% des malades ont des anticorps contre le LAV.
	Déc. 1983. Réactif spécifique du virus. L'agent du SIDA est un nouveau rétrovirus.	
	Mai 1984. Publication résultats tests systématiques.	
	1985. Mise au point du test commercial.	

* L'ordre de présentation ne suit pas ici l'ordre chronologique.

dans chacun des textes (tableau 1) dont l'analyse a dégagé les éléments suivants :

comparer les
repères
chronologiques

- dans le **premier texte, celui de L. Montagnier**, ces **repères sont peu nombreux**, ils concernent uniquement la période d'émergence des recherches et le moment où l'équipe rivale défendait l'idée selon laquelle le virus du sida était semblable aux virus responsables de leucémies que le groupe américain avait étudiés (HTLV), hypothèse contestée par le groupe français qui considérait que le virus du sida était différent notamment parce qu'il ne provoquait pas de multiplication des cellules du système immunitaire (processus à l'origine de cette variété de cancer que sont les leucémies) ;
- dans le **second texte, celui de R. Gallo**, les **repères chronologiques sont beaucoup plus nombreux**, les premières dates sont plus anciennes, de façon à intégrer dans l'argumentation le travail de son groupe sur les virus de type HTLV et à insister sur la continuité des recherches ; les **indications** sont beaucoup plus **précises** en ce qui concerne **l'année 1983** qui voit L. Montagnier présenter les travaux qui ont permis l'isolement de son virus (le LAV) et où R. Gallo affirme avoir obtenu les premières cultures du sien (HTLV III) ;
- le **troisième texte, consensuel**, intègre d'**autres repères anciens** qui concernent les premiers travaux sur les rétrovirus de façon à insérer les recherches des deux équipes dans la continuité d'un travail de l'ensemble de la communauté des biologistes moléculaires ; par contre, en ce qui concerne **l'année 1983**, la chronologie est **beaucoup plus floue** et laisse dans l'ombre les dates mises en avant dans les textes précédents : seule la répartition thématique de l'œuvre de chaque équipe est détaillée ; ainsi les questions portant sur la date d'isolement des deux virus, sur leur identité troublante sont éliminées de la présentation "officielle".

Le plan du récit de L. Montagnier (tableau 2) a fourni d'autres indications importantes : la **structure** adoptée est celle d'un **enchaînement** :

observation - hypothèse - tentative de vérification par l'équipe française - réfutation expérimentale - nouvelle hypothèse - confirmation expérimentale - résistance - consensus.

un
enchaînement

Il associe donc une épistémologie classique de la découverte scientifique avec l'utilisation du dialogue théorie-expérience comme pivot de la démonstration et une vision beaucoup plus historique (sociale) des étapes de la démarche scientifique avec l'introduction des résistances de la communauté, les pressions collectives freinant l'acceptation d'une nouvelle perspective.

TABEAU 2 : STRUCTURE DU RÉCIT DE L. MONTAGNIER (1985)

1. Observation clinique surprenante.
2. La maladie a des caractéristiques épidémiologiques originales.
3. R. Gallo propose une explication : l'agent est un rétrovirus appartenant au groupe des HTLV connus pour provoquer une immunodéficience associée à une prolifération des lymphocytes.
4. Le groupe français d'étude du SIDA réussit la culture de cellules infectées en utilisant les lymphocytes d'un malade en "pré-SIDA".
5. Les propriétés du virus parisien sont en contradiction avec l'hypothèse de R. Gallo (il détruit les cellules). L'équipe propose une nouvelle hypothèse : il s'agit d'un nouveau type de rétrovirus.
6. L'hypothèse est confirmée par l'expérience : les réactifs de détection des HTLV ne marchent pas, les constituants du LAV sont spécifiques.
7. La communauté américaine s'oppose à la nouvelle approche.
8. De nouvelles expériences la confirment : le virus contient une protéine spécifique, absente des HTLV.
9. L'équipe américaine trouve le même virus mais l'appelle HTLV III.

La **première vision** est celle qui sous-tend la plupart des récits de découverte ; elle s'appuie sur une **vision spontanée** qui utilise suivant les circonstances **différentes épistémologies**. En premier lieu, l'empirisme basé sur la possibilité de l'induction par observation répétée des mêmes faits ; ensuite le positivisme logique qui conclut à l'impossibilité logique de la généralisation inductive et qui résout le problème de la vérité des énoncés scientifiques en supposant que l'expérience ne peut faire qu'une chose : démontrer la fausseté d'une hypothèse à partir d'un contre-exemple. Comme le suggère la juxtaposition des événements de l'année 1983 présentés dans les récits de R. Gallo et L. Montagnier, il s'agit d'une reconstruction a posteriori, d'un récit simplifié qui élimine tout ou partie des inconnues et des problèmes rencontrés au cours du travail de laboratoire effectif. La mise en forme démonstrative est donc difficilement séparable de l'argumentation et de l'utilisation des représentations communes à la communauté scientifique et à ses observateurs.

et une
épistémologie
"spontanée"

La **seconde vision** est celle qui n'apparaît que dans les discours scientifiques en situation, ceux qui participent d'une controverse, son entrée en scène a une fonction rhétorique évidente : **introduire les représentations spontanées de l'activité du savant** (le précurseur, la lutte contre le conservatisme, le désintéressement, le héros persécuté...) dans le dispositif de conviction et de mobilisation de l'intérêt et de la sympathie du lecteur. Mais cette fonction n'est pas la seule, la valeur démonstrative de l'argument tient à **l'influence** tout à fait réelle **des conditions sociales** de la recherche sur l'émergence et l'acceptation d'un résultat.

“Vérité” utilisée de façon implicite par le texte car n'appartenant ni au mode habituel de réflexion sur la science, ni à la présentation vulgarisée de ses résultats. Ce sont ces paragraphes de polémique implicite qui ont le plus facilement permis une analyse des enjeux ; ressentie par certains stagiaires (scientifiques) comme une violence faite au texte, un piège tendu à l'auteur.

intrication de
l'argumentation
et de la
démonstration

Du fait de cette intrication de l'argumentation et de la démonstration, les enjeux scientifiques de la polémique ne peuvent apparaître nettement qu'avec la **juxtaposition des différents récits** ; pris isolément chacun d'entre eux est en effet trop cohérent, trop plein pour laisser voir la difficulté et la complexité de la démonstration scientifique, il faut alors (comme dans toute démarche historique) **utiliser les arguments** de R. Gallo **contre** L. Montagnier et ceux de L. Montagnier contre R. Gallo pour appréhender les étapes de la recherche et les points faibles de chaque démonstration, ceux que la rhétorique viendra masquer. **Les questions majeures**, telles qu'elles sont apparues au cours des comptes rendus de lecture et de la confrontation avec les informations complémentaires apportées par le formateur, **sont les suivantes.**

- Multiplicité des causes possibles de l'apparition de la maladie

Le choix de l'hypothèse virale par les deux équipes est la conséquence de l'**élimination d'un déterminisme complexe** qui associerait le virus à d'autres agents (par exemple une déficience génétique ou physiologique chez certains patients) ceci permet de considérer comme secondaire la diversité des tableaux cliniques (par exemple les conséquences neurobiologiques), la question de l'inévitabilité de la transition de l'état de porteur du virus à celui de malade ou encore la possibilité que le sida soit dû à une combinaison de plusieurs virus ou agents pathogènes.

un raisonnement
par analogie

- Rôle essentiel des procédures d'interprétation

La “fausse piste” d'origine américaine consistait à supposer que l'agent du sida était un virus du type HTLV, d'abord identifié comme un HTLV I, à l'origine de leucémies chez l'homme (tableau 3). Cette hypothèse s'appuyait sur un **raisonnement par analogie** : chez le chat un virus de la même catégorie pouvait provoquer à la fois des leucémies et un déficit immunitaire aux conséquences semblables à celles du sida. L'attitude de l'équipe américaine face aux résultats français qui indiquaient que le virus avait des propriétés différentes d'un HTLV I fut d'admettre que ce n'était pas HTLV I mais un parent alors appelé HTLV III. L'interprétation des “données”, processus indispensable à la formulation de toute perspective de travail, implique donc le fait de **choisir** parmi toutes les **informations** disponibles celles qui sont **les plus signifiantes**. Le modèle félin, l'acquis des

recherches sur les HTLV amenaient les chercheurs américains à privilégier une propriété de l'agent du sida : sa persistance dans les cellules immunitaires alors que l'équipe française retenait une autre propriété biologique, considérée comme la cause directe de la maladie : le fait que la reproduction virale entraîne la lyse des cellules.

TABLEAU 3 : STRUCTURE DU RÉCIT DE R. GALLO (1987)

1. Le SIDA est un fléau moderne ; la situation épidémiologique est tragique mais les recherches ont été particulièrement rapides.
2. Le virus HIV, responsable de la maladie, est un rétrovirus qui infecte les lymphocytes.
3. C'est le mieux connu des rétrovirus grâce aux méthodes d'études des HTLV.
4. À cause des études épidémiologiques, il doit s'agir d'un nouveau virus.
5. Il doit être apparenté aux HTLV car leur équivalent félin (FeLV) entraîne soit une leucémie soit une immunodéficience.
6. L'équipe américaine détecte un nouveau rétrovirus en utilisant (comme L. Montagnier) les techniques mises au point pour rechercher les HTLV.
7. L'équipe française ne peut pas démontrer la nature de son virus (LAV) sans cultures de cellules pour le produire en masse. Celles-ci sont obtenues par l'équipe américaine en 1983.
8. Les chercheurs américains vérifient systématiquement la présence du nouveau virus HTLV III chez les patients.
9. HTLV III est finalement reconnu comme identique au LAV.

• Difficulté de la démonstration expérimentale et importance de la mise en cause des procédures techniques

les procédures techniques

Dans chacun des textes, l'accent est mis, non sur les cadres interprétatifs différents, mais sur la fiabilité de la technique utilisée pour définir l'identité du virus, sur le caractère significatif ou non des corrélations observées entre l'apparition de la maladie et la présence d'un virus répondant à tel ou tel test. L. Montagnier avance l'absence de résultats positifs pour HTLV I sauf dans quelques cas (interprétés comme la conséquence d'une infection secondaire), R. Gallo répond que le LAV de l'équipe française n'est présent que dans 20 % des cas du petit nombre de cas analysés, que les conditions permettant d'exclure une contamination n'étaient pas réunies... Il s'agit d'un trait général des controverses scientifiques qui est directement lié à la situation polémique et à l'empirisme spontané des chercheurs : il est beaucoup plus efficace de mettre en cause la maîtrise technique de l'adversaire que d'admettre la pluralité des points de vue résultant des procédures interprétatives. Puisque **la valeur démonstrative des "faits"** implique une série d'hypothèses implicites et des choix qui ne sont pas immédiatement ratio-

la valeur
démonstrative
des "faits"

nalisables, le débat technique est en partie un dialogue de sourds. Si L. Montagnier demande une démonstration de la parenté moléculaire entre le virus HTLV III et les autres HTLV, R. Gallo exige de l'équipe française la mise au point d'une méthode de culture efficace du virus. Chacun des protagonistes utilise son domaine de compétence pour souligner les points faibles de la démonstration adverse et poursuit sa propre logique : à Paris on cherche un test montrant que le LAV n'a pas les mêmes constituants que les HTLV, à Bethesda on se focalise sur la culture massive du virus car on pense qu'il doit pouvoir survivre dans les cellules immunitaires en entraînant leur multiplication.

• Les enjeux économiques et sociaux de la querelle de priorité

Ils n'apparaissent qu'en toile de fond des récits, en tant qu'applications. Ils n'ont en effet pas de place dans la description normale du processus de recherche même s'ils jouent un rôle fondamental dans l'évolution et la résolution de la controverse.

la "fin" de la
controverse

L'examen de la structure du **texte commun des deux chercheurs** (tableau 4) révèle sa **nature négociée**. Il reprend des éléments de chacun des textes précédents pour aboutir à un ensemble, qui malgré l'affirmation d'une égalité de contribution, fait du travail de l'équipe américaine la pièce maîtresse de la réussite. La répartition des apports est en effet organisée selon un axe théorico-pratique qui attribue à l'équipe américaine la formulation des hypothèses fondamentales, à l'équipe française la mise en avant d'une expérience très suggestive, et à leur travail parallèle l'accomplissement de la démonstration finale.

Les problèmes abordés auparavant font l'objet d'un double traitement : d'une part pour ce qui est de la controverse directe de 1983, il y a production d'une lecture rétrospective et logique avec introduction de nouveaux éléments factuels (par exemple le transfert de l'hypothèse "rétrovirus" des États-Unis vers la France, la description détaillée de la transformation de l'agent du sida en HTLV III) ; d'autre part les difficultés générales de la mise en évidence du lien causal entre présence du "nouveau" virus et apparition de la maladie sont considérées comme résolues : les hypothèses pluri-virales ou physiologiques disparaissent avec la fin de la controverse sur l'identité du virus. La structure de la communauté de recherche (avec des deux laboratoires "leaders") a donc produit un consensus qui est en partie factuel, en partie négocié et qui ne peut être contesté que par l'arrivée de nouveaux protagonistes dans ce champ de recherche et de discussion. C'est ce que montre le sort réservé aux arguments techniques des deux textes précédents : les points faibles de chaque démonstration qui auparavant avait une valeur démonstrative sont désormais associés

la
complémentarité

pour illustrer la complémentarité des recherches. Ainsi le problème de la culture massive des virus est isolé de son contexte (l'hypothèse "leucémie" américaine, la volonté de démontrer la parenté avec HTLV) pour devenir un succès technique qui corrobore la validité de la démarche française. De même les résultats révélant la présence de HTLV I chez certains malades sont tenus pour réels mais dépourvus de signification (ils sont désormais assimilés à un artefact dû à une infection secondaire, interprétation partagée sans qu'il ne soit plus nécessaire d'en faire la démonstration complète).

TABLEAU 4 : STRUCTURE DU RÉCIT COMMUN (1987)

1. Les rétrovirus ne sont pas une nouveauté scientifique. Leur étude remonte à 1970 (N).
2. Jusqu'en 1978, pas de rétrovirus humain. Le premier, HTLV I est découvert par R. Gallo (G).
3. Formulation de l'hypothèse "HTLV" basée sur la présence d'un rétrovirus de leucémie féline provoquant une immunodéficience (G).
4. L'hypothèse rétrovirale française vient des États-Unis (N).
5. Le groupe français met en culture les cellules infectées. Échec des tests de détection des HTLV (M).
6. Le groupe français montre que l'agent du SIDA n'infecte que certains lymphocytes. Il possède une protéine spécifique (M).
7. Hypothèse LAV peu évidente : le HTLV est présent chez les malades, la détection du LAV n'est pas systématique (N).
8. Le groupe américain considère que la détection systématique est prioritaire et cherche à mettre au point des cultures viables (G).
9. R. Gallo trouve le même virus appelé HTLV III (G).
10. L'agent du SIDA est définitivement identifié, c'est un nouveau rétrovirus (M-G).

(M) : présent dans le texte de L. Montagnier (1985).

(G) : présent dans le texte de R. Gallo (1987).

(N) : nouvel item.

2.2. La controverse sur la mémoire de l'eau

l'homéopathie

L'origine de cette deuxième controverse est la publication en juin 1988 dans *Nature*, une revue prestigieuse, d'un article de J. Benveniste suggérant que l'eau posséderait des propriétés de "mémoire" et de spécificité qui pourraient constituer la base scientifique des pratiques homéopathiques. La démonstration de J. Benveniste utilisait le phénomène biologique qui est à l'origine de la réaction allergique.

Il s'agit d'une réaction biologique qui fait intervenir des cellules sanguines particulières (les basophiles) qui libèrent les substances chimiques responsables de l'inflammation

(contenues dans des "granules") lorsque les anticorps qu'elles portent à leur surface réagissent avec les molécules auxquelles l'organisme est allergique. Le phénomène est extrêmement spécifique : chaque basophile porte un seul type d'anticorps dont la structure chimique caractéristique ne permet une réaction qu'avec un seul type de molécule, un allergène dont la forme est complémentaire de l'anticorps. C'est cette spécificité qui explique que tel individu soit allergique à tel ou tel composé.

des dilutions
nombreuses

L'expérience réalisée dans le laboratoire de J. Benveniste consistait à déterminer le nombre de cellules réagissant avec des dilutions de plus en plus importantes d'une solution contenant une substance provoquant la dégranulation. Après des dilutions telles qu'il n'y ait plus dans le liquide utilisé aucune molécule de la substance initiale, on pouvait encore obtenir une réaction significative, réaction observée au microscope en comptant le nombre de cellules dont les granules ne peuvent plus être colorés. Puisqu'il y avait réaction sans molécule, il fallait donc admettre que l'eau ayant servi aux dilutions avait conservé la capacité à mimer la structure de la molécule initiale, qu'elle gardait une trace transmissible du contact préliminaire, que les propriétés de l'eau permettaient une mémoire spécifique.

Ces résultats devaient susciter **une polémique** d'autant plus vive qu'ils entraînent en contradiction avec les conceptions de la structure et des propriétés de l'eau des physiciens et des chimistes, avec la base fondamentale des recherches biologiques modernes : le fait que toute activité cellulaire spécifique ait pour origine une réaction chimique impliquant des molécules particulières. Bien qu'émanant d'un laboratoire reconnu pour ses travaux sur l'allergie, l'hypothèse de la mémoire de l'eau semblait d'autant plus difficile à admettre par la communauté des biologistes qu'elle était **directement liée à la discussion sur le statut de l'homéopathie** : effet placebo ou phénomène biologique.

la médiatisation
de la
controverse

Du fait des conditions de la controverse, en particulier son extrême médiatisation, la contestation des résultats du laboratoire de J. Benveniste a pris une tournure particulière ; d'une part les tentatives de reproduction des résultats ont été très peu nombreuses (du moins si l'on en juge d'après le nombre de résultats négatifs publiés), d'autre part, la revue *Nature* a, tout de suite après la publication de l'article, créé une **commission d'enquête** (composée du rédacteur en chef, d'un physicien spécialiste des fraudes scientifiques et d'un prestidigitateur) pour vérifier les expériences dans le laboratoire de J. Benveniste. En conséquence, alors que lors des premières étapes de la discussion on avait mis en cause une erreur expérimentale (absence de certains contrôles), les difficultés d'utilisation du test de dégranulation ou encore un artefact inexpliqué, après l'enquête, le soupçon de fraude est devenu dominant.

reproduire les
résultats, critère
de scientificité...

ici minimisé par
rapport à des
arguments plus
généraux voire
extra-
scientifiques

Cette controverse montrait donc nettement **la multiplicité des critères** qui interviennent dans la prise en compte de résultats présentés par d'autres scientifiques. L'insistance traditionnelle sur le fait de pouvoir reproduire les résultats et l'approche purement empirique (un fait est un fait même s'il est inexplicable) sont passées au second plan.

À la place de la présentation usuelle de la pratique du laboratoire (largement employée par J. Benveniste), on a vu invoquer publiquement des arguments qui d'ordinaire sont réservés aux discussions informelles entre chercheurs : **concordance** avec les résultats classiques de la discipline, rôle de la **conviction** du chercheur dans la construction et l'interprétation des expériences, influence des **sources de financement** (le laboratoire de J. Benveniste étant financé par une firme de produits homéopathiques), prestige du laboratoire, rôle des liens personnels entre chercheurs dans la production et la publication d'un résultat... L'ensemble de ces facteurs "extra-scientifiques" étant invoqué soit pour contester la fiabilité et l'objectivité du travail soit pour expliquer la réaction de rejet et "l'ostracisme" de la majorité des biologistes.

Quelle que soit l'appréciation finale portée sur ce travail, cette discussion montre à nouveau la nécessité des choix présidant à la prise en compte d'un problème ou à l'interprétation d'un fait, **la non réductibilité de la pratique scientifique** à un système de règles méthodologiques dont la seule application garantirait l'objectivité du savoir élaboré.

chaque groupe
de stagiaires
analyse un texte

Sans nous intéresser davantage aux conditions d'un jugement sur l'hypothèse de la mémoire de l'eau, nous avons (pour ne pas prolonger la reproduction de la controverse au sein du groupe de stagiaires) orienté l'analyse vers **l'étude de l'argumentation utilisée dans la discussion médiatique**. Pour cela les stagiaires étaient à nouveau répartis en groupes ayant chacun un texte dont il fallait dégager le plan, les univers lexicaux, les articulations logiques et la rhétorique, les images employées, la structure temporelle, le rôle des pronoms et des connecteurs... L'objectif final étant de procéder à une caractérisation du texte en fonction des interlocuteurs visés, de la conviction à gagner et des stratégies d'argumentation.

Pour illustrer ce travail, nous présentons un seul exemple de traitement, celui qui concerne le texte de J. Benveniste publié dans *Le Monde*. Quatre professeurs de disciplines différentes ont étudié cet article. Après quelques tâtonnements dus à des divergences sur le découpage du texte, les professeurs ont fait ressortir **la progression de l'argumentation** en se fondant sur ses articulations explicites pour dégager les étapes indiquées dans le tableau qui suit.

- Exposé du problème dans le premier paragraphe
- Présentation de l'hypothèse de l'équipe et de ses implications dans le second
- Concession sur les doutes légitimes, d'ailleurs ressentis par l'équipe elle-même comme par ses adversaires dans le troisième
- Conclusion partielle du quatrième paragraphe qui ne souffre plus le scepticisme
- Long développement, contre les adversaires, sur les conséquences de résultats désormais considérés comme établis
- Conclusion prospective, faisant appel à l'imaginaire

Les stagiaires ont repéré dans le texte les marques d'**une stratégie**. Aucune référence chronologique précise n'est mentionnée, la démonstration, dès le premier paragraphe, s'appuie sur **des images** ; le chercheur présente d'emblée les résultats de son travail comme révolutionnaires : ils **remettent en cause un dogme**. C'est ce thème qui est le fil directeur de l'article.

L'**usage des indices personnels** révèle l'ambiguïté du statut du chercheur et de son équipe par rapport à la communauté scientifique. "Notre recherche" au début du premier paragraphe, comme "nous-mêmes" au début du troisième, renvoient au petit groupe que forme l'équipe de J. Benveniste. En revanche, dans les premier et troisième paragraphes de la quatrième colonne, "nous devons..." et "nos systèmes biologiques..." ne renvoient plus au même groupe, mais à l'ensemble de la communauté scientifique dans laquelle l'équipe de J. Benveniste est incluse. Entre les deux, la dénonciation de l'esprit "*rétrograde*" des adversaires de l'hypothèse de la mémoire de l'eau a permis de justifier le passage de l'hypothèse de travail à la connaissance acquise. Le "nous" de la fin de la troisième colonne : "*L'ensemble des résultats expérimentaux que nous avons obtenus...*" représente encore l'équipe, mais la suite de la phrase affirme sa légitimité et son universalité : "*démontre sans aucune discussion possible que l'on peut obtenir des effets biologiques spécifiques...*", l'usage de «on» élargit alors la communauté de référence en généralisant la démarche. Il n'en allait pas tout à fait de même du «on» du deuxième paragraphe : "on comprend dès lors les réticences voire l'agressivité..." qui prenait à témoin le lecteur : nous comprenons, et vous comprenez aussi, comme tout témoin non impliqué peut comprendre. L'usage de «on», corrélé à celui de «nous», est toujours particulièrement intéressant dans la polémique en ce qu'il permet d'introduire de fines variations dans la référence aux diverses communautés, l'enjeu étant de **reconstituer l'image de la communauté légitime** (et consensuelle) dont on s'estime exclu en la reconstruisant, après en avoir

personnalisation
du débat

- dépassé les divisions, par exclusion de l'adversaire (ici sur la base d'une non fidélité aux "règles" de la méthode scientifique identifiée au primat de la simple observation). En rendant compte de la division de la communauté scientifique à l'occasion de la publication des résultats, l'auteur l'explique à son profit de façon à l'intégrer à sa propre vision et à récupérer pour lui-même le statut de rassembleur qu'il illustre à la fin en envisageant les prolongements de sa recherche, les profits que l'ensemble de la communauté, scientifique et humaine, peut en escompter. Ainsi le «*on*» du dernier paragraphe a-t-il un statut complètement indéfini : "*Pourra-t-on un jour... ?*" qui correspond à l'**extension de la problématique à l'univers de l'imaginaire**.
- le réel et l'imaginaire
- L'étude du lexique ne fait que confirmer cette analyse. Les termes scientifiques sont distribués de façon régulière dans le texte, mais il faut distinguer les termes qui renvoient au contenu des travaux (molécule, enzyme...), qui sont nombreux, de ceux qui rendent compte de l'expérience et de la méthode (protocoles, double codage...) qui sont particulièrement présents dans les troisième, quatrième et cinquième paragraphes. Le débat porte en effet sur la validité des résultats, donc des conditions de l'expérimentation. Remarquable également est l'abondance du vocabulaire psychologique : *angoisse*, *doute* dans le troisième paragraphe, *incroyables* et *angoissants* dans le quatrième, définissent ce qu'a ressenti l'équipe ; *pusillanimité* et *conformisme* définissent de façon péjorative l'attitude des adversaires dans le cinquième paragraphe.
- le vocabulaire
- La rhétorique, au sens traditionnel du mot, est mobilisée à des fins polémiques, dans des expressions telles que «*au nom de la Déesse Raison*». Il faut souligner le statut que l'usage ironique de cette allégorie confère au discours interprétatif. La méthode scientifique est présentée ici comme excluant l'interprétation. La fin du quatrième paragraphe est à cet égard stratégique. Le chercheur y adopte la position qui paraît la plus acceptable par ses collègues : **attitude purement positiviste** selon laquelle les faits existent hors de toute interprétation. Le fait scientifique est assimilé au fait empirique. Cette représentation de la science relève plus des représentations spontanées, dominantes dans la communauté des chercheurs que de la réflexion épistémologique.
- la rhétorique...
- À noter enfin (en particulier dans un travail avec des élèves) la différence entre les usages de la rhétorique ; elle est soit utilisée à des fins polémiques comme dans l'expression que nous venons d'analyser, soit à des fins de vulgarisation comme dans les deuxième et troisième paragraphes où l'auteur use d'une **métaphore filée** (la "clé") qui appartient à la fois au lexique de la communauté biologique et à celui des lecteurs néophytes.
- utilisée à différents usages

3. CONCLUSION

Le travail effectué durant ces deux journées de stage, et dont nous avons rendu compte de façon nécessairement lacunaire, permet de faire apparaître **les enjeux d'une approche transdisciplinaire** suivants.

1. En ce qui concerne **la maîtrise du langage** tout d'abord, on voit que son étude ne peut se réduire à celle de la langue, entendue au sens étroit de grammaire, mais qu'elle la pré-suppose pour pouvoir s'attacher au fonctionnement des discours et à leurs enjeux, ce qui implique la prise en compte du contexte, y compris de ses enjeux sociaux.

2. L'analyse de l'hétérogénéité discursive passe par la diversification des dispositifs. C'est en effet en partie par la **multiplication des situations de communications différentes** que l'on peut sensibiliser les apprenants, élèves comme professeurs, à cette diversité. L'uniformité des situations scolaires induit au contraire celle des productions orales ou écrites, et la standardisation des modèles de lecture avec ses effets réducteurs.

3. En ce qui concerne **la formation au raisonnement scientifique**, on voit qu'elle ne peut faire l'économie de l'histoire des sciences et de l'étude des communautés et de la communication scientifique. Nous avons vu comment, parfois dans les textes eux-mêmes, **les représentations** schématiques de l'activité scientifique (tout particulièrement à propos du concept de **fait**) participent à la production de la conviction et donc à la reconnaissance et/ou à l'altération du raisonnement.

4. Il faut enfin insister sur **les implications** de ce type d'analyse de la pratique scientifique. Si le discours scientifique est comme d'autres, mais avec ses spécificités, une pratique conjointe de l'argumentation et de la démonstration, aucune épistémologie normative ne saurait garantir l'universalité et la vérité des démarches pédagogiques supposées rationaliser les apprentissages.

L'idée selon laquelle l'acquisition des savoirs impliquerait le franchissement des mêmes étapes chez tous les sujets, a souvent été présentée en faisant référence à l'épistémologie génétique de J. Piaget. De façon analogue, la notion d'**objectif-obstacle** est construite sur celle d'obstacle épistémologique de G. Bachelard. Aussi fécondes que soient ces généralisations, elles ont pour inconvénient majeur de laisser entendre que des pédagogies similaires pourraient permettre la disparition des représentations spontanées qui font obstacle à l'acquisition des savoirs, cela quels que soient la discipline, le lieu et le moment.

Si les recherches récentes en épistémologie et en histoire des sciences ont quelque chose à apporter à la pédagogie et aux didactiques, c'est sûrement de contribuer à remettre en cause ces schémas trop linéaires et trop universels. Si la

les
représentations
de l'activité
scientifique

pratique scientifique est une activité "en situation" insérée dans un temps, un espace et un milieu social donné, si sa vérité tient plus de la diversité des démarches interprétatives que de l'application de règles méthodologiques, alors cela doit être encore plus vrai de la transmission des savoirs. La transformation des représentations doit alors être pensée comme particularité, comme pratique d'un discours qui est lui aussi "en situation".

Anne-Marie HUBAT
Lycée "J.B. Delambre", Amiens
Jean-Paul GAUDILLÈRE
INSERM, U 158
Hôpital "Necker", Paris

SUR LA NATURE DU DISCOURS D'INFORMATION SCIENTIFIQUE

Jean-Blaise Grize

Un discours d'information, partie intégrante de toute mise en forme d'un raisonnement, est autre chose qu'une base de données. C'est une organisation d'énoncés produite par un locuteur pour des destinataires situés. L'article examine successivement la façon dont sont construits les objets du discours, comment le locuteur prend en charge les déterminations qu'il propose de ces objets ainsi que la façon dont il étale ses dits et les aménage pour la compréhension des destinataires.

un raisonnement
traite
d'informations

Un raisonnement est une "activité de pensée intentionnelle qui, une fois mise en forme, se présente comme un enchaînement de propositions" (1). Une telle définition est assez incomplète en ce qu'elle ne dit rien de trois points pourtant essentiels. Le premier est qu'un raisonnement ne se déroule que sur des données, c'est-à-dire sur des informations plus ou moins explicites mais qui sont présentes à la pensée. Sherlock Holmes, qui s'y connaissait, disait dans *Le Signe des Quatre* : "L'observation m'indique que vous vous êtes rendu à la poste de Wigmore Street ce matin ; mais c'est par déduction que je sais que vous avez envoyé un télégramme" (c'est moi qui souligne). Le deuxième est relatif à la mise en forme, laquelle requiert nécessairement de se servir d'un système de signes et le troisième a trait à l'intentionnalité.

... dont une
grande partie est
fournie par des
textes

Les objets qui supportent un raisonnement peuvent avoir des origines fort différentes les unes des autres. Ils peuvent résulter de l'expérience acquise, de l'observation donc de la perception immédiate mais, et tout particulièrement dans le discours scientifique, ils sont essentiellement fondés sur des textes. Je sais bien que l'enseignement actuel s'efforce de mettre les apprenants en contact direct avec le concret, élaboré d'ailleurs de façon *ad hoc*, mais il suffit d'imaginer des classes dans lesquelles le maître serait totalement muet pour s'apercevoir du rôle déterminant des discours de toutes sortes - et ceci y compris dans les laboratoires universitaires.

Il est vrai qu'une grande partie des textes scientifiques, et très particulièrement ceux des sciences de la nature, se servent non seulement d'une langue naturelle, mais d'autres langages dont éminemment celui des mathématiques.

(1) *Dictionnaire de psychologie*, article Raisonnement, Paris, PUF, 1991.

Comme l'ont bien fait voir toute une série de travaux (2), cela ne va pas sans présenter un certain nombre de difficultés. Ainsi, pour prendre un exemple hors du domaine des mathématiques, l'élève auquel on parle de *masse* doit s'abstraire complètement de l'idée habituelle de grande quantité, naturellement associée à celle de poids, pour ne retenir plus que le quotient d'un vecteur force par un vecteur accélération. On pourrait évidemment imaginer des textes - s'il est encore possible de se servir de ce terme - qui ne feraient aucun usage d'une langue naturelle, fors leur titre, mais ils sont extrêmement rares, quasi tératologiques et je n'en traiterai pas.

L'intentionnalité enfin d'un raisonnement n'est pas sans influencer sa nature. Schématiquement en effet, il est possible de raisonner pour atteindre trois objectifs distincts :

raisonner sert à garantir les connaissances, à en acquérir de nouvelles et à les expliquer

- 1) Le propos est de garantir une connaissance. J'ai toute raison de penser que la somme des angles d'un triangle plan est égale à deux droits, mais je veux le prouver. Rien de nouveau n'apparaît. J'énonce mon idée, je continue par *en effet*, je développe une démonstration, je termine par *donc* et je conclus *quod erat demonstrandum* : ce qu'il fallait démontrer, mais qui m'était déjà connu à un certain niveau épistémique.
- 2) Certains raisonnements servent à acquérir des connaissances nouvelles. Ainsi par exemple, s'il est tout à fait impossible d'aller voir ce qui se passe à l'intérieur de la terre, c'est le raisonnement seul qui permet, à partir de faits, eux parfaitement observables, de répondre aux questions que le géologue se pose sur sa structure interne (3).
- 3) Les raisonnements enfin peuvent servir à expliquer. C'est en quelque sorte le mouvement inverse du précédent. En présence d'un fait *F*, la pensée peut suivre deux voies. Ou bien sa démarche est proactive, elle tire une conséquence *C* de *F* ; ou bien elle est rétroactive, elle cherche une autre donnée *D* dont découle *F* qui est par là-même expliqué.

raisonner n'est pas calculer

Je reviens sur un point qui pour moi est fondamental : c'est l'usage d'une langue naturelle pour mettre les raisonnements en forme. Se servir d'une langue, et non pas d'un langage logico-mathématique (4), c'est se placer dans une

(2) Voir par exemple VIENNOT Laurence, *Le raisonnement spontané en dynamique élémentaire*, Paris, Hermann, 1979 ; LABORDE Colette, *Langue naturelle et écriture symbolique*, Thèse, Université scientifique et médicale de Grenoble, 2 vol., 1982.

(3) Un exemple très clair est fourni par l'article de GUYOT François, "Le manteau inférieur de la terre", *La Recherche*, octobre 1990, no. 225, pp. 1238-1246.

(4) La distinction fondamentale entre une langue naturelle et un langage logico-mathématique repose sur la nature de leurs termes. Ainsi, en français, le mot "groupe" renvoie à toutes sortes de notions plus ou moins bien déterminées, tandis qu'en mathématique il désigne un ensemble d'éléments muni d'une structure explicitement définie.

situation de communication et y produire des discours, c'est-à-dire comme l'écrit Benveniste, une "énonciation supposant un locuteur et un auditeur et, chez le premier l'intention d'influencer l'autre de quelque manière" (5).

Il en découle une conception de la communication qui n'emprunte pas à la métaphore de la transmission de bits d'information, mais à celle de la résonance au sens physique du terme. Lorsque un locuteur A se propose de communiquer l'idée qu'il se fait de quelque phénomène à un auditeur B, il construit pour lui une représentation verbale - je l'appelle une *schématisation* - et B la reconstruit. Puisque j'en suis à jouer de la métaphore, je dirai que locuteur A et auditeur B sont comme deux solénoïdes placés l'un en face de l'autre. Tout courant électrique qui parcourt A induit en B un courant analogue.

... c'est
communiquer
avec quelqu'un

Je voudrais encore insister sur ce que, dans cette façon de voir les choses, une schématisation (6) est toujours destinée à celui qui va la reconstruire. Il s'ensuit plusieurs conséquences. D'abord une "même" idée n'est pas présentée, n'est pas énoncée, de la même façon devant des auditeurs différents. Cela est fondamental dans l'enseignement et dans la vulgarisation (7). On ne parle pas en effet de la même façon pour ses pairs, pour ses étudiants et pour le public. Ensuite, celui auquel est destinée une schématisation est toujours un locuteur en puissance. Il peut se refuser à la reconstruire ou, s'il accepte de jouer le jeu, il peut le faire d'une façon qui n'était pas souhaitée. Enfin et tout spécialement dans ce qui a trait à l'information scientifique, il se peut que le destinataire ne comprenne tout simplement pas de quoi il s'agit, qu'il ne parvienne pas à relier à l'ensemble plus ou moins flou des connaissances qui sont les siennes ce qui lui est présenté.

Ceci me conduit à examiner trois points : 1) la construction des objets de pensée, 2) les prises en charge par le locuteur des contenus de jugement qu'il propose et 3) la façon dont il étaie ses dits.

1. LES OBJETS DE PENSÉE DU DISCOURS

Ce dont il est question, sauf dans les systèmes formels au sens strict du terme et qui sont accompagnés d'une sémantique explicite, renvoie immédiatement à des connaissances

-
- (5) BENVENISTE Emile, *Problèmes de linguistique générale*, Paris, NRF, 1986, p. 242.
- (6) J'appelle *schématisation* toute représentation discursive de ce que conçoit un locuteur. Pascal a "schématisé" l'homme comme un roseau pensant et La Mettrie comme une machine.
- (7) Voir à ce propos la remarquable étude innovatrice de JACOBI Daniel, *Textes et images de la vulgarisation scientifique*, Berne, Peter Lang, 1987.

se servir d'une
langue c'est
s'appuyer sur des
savoirs inscrits
dans une culture

préalables. Il est important de souligner que celles-ci sont toujours entourées d'une zone mal définie et qu'elles sont relatives à leur possesseur. Le faisceau dans lequel est situé le *vin* n'est pas le même pour l'oenologue, le vigneron, le chrétien et le poivrot. Il s'agit de ce que j'appelle le *préconstruit culturel*, tant il est vrai que, la langue étant un phénomène social, la culture du groupe et de l'individu en fait partie intégrante.

C'est nécessairement sur une telle base que le discours, et le discours scientifique aussi dans cette perspective, va reposer. L'un de ses rôles va consister à construire un objet de pensée aussi univoque que possible. Il est coutumier de se moquer des dictionnaires qui "tournent en rond". Ainsi, par exemple, le *Petit Larousse* nous apprend ce qui suit :

temps : grandeur caractérisant à la fois la durée des phénomènes et les instants successifs de leur déroulement ;

durée : intervalle de temps que dure une chose ;

instant : moment très court ;

moment : espace de temps.

Sourire est agréable, mais réfléchir est préférable. Il y a là un parcours qui apporte de la connaissance. Dans un dictionnaire qui se veut bouclé, dans un discours qui reste ouvert, dans tous les cas, l'activité discursive crée quelque chose. Le problème technique est de rendre compte explicitement de ce que produit l'activité discursive. Nous - mes collaborateurs et moi - avons introduit pour cela le concept de *classe-objet* (8).

parler c'est
construire des
objets de
pensée, créer
quelque chose,
donner à voir des
"classes-objets"

J'en ferai comprendre l'idée sur un exemple très simple, que j'emprunte volontairement à un manuel scolaire, tant je suis persuadé que l'un des aspects les plus significatifs de la science est qu'elle peut être enseignée. Si je ne suis pas sensible aux poèmes de Mallarmé, personne ne peut véritablement m'aider, mais si je ne comprends pas la loi de la chute des corps, un maître me conduira.

La sauge officinale, un sous-arbrisseau qui vit à l'état spontané en Europe méridionale, est souvent cultivée dans les jardins, soit comme plante condimentaire, soit comme plante médicinale.

Les rameaux sont grisâtres, tomenteux, à section quadrangulaire [...].

Les feuilles ont une texture épaisse, elles sont rugueuses au toucher [...].

Les fleurs sont assez grandes, bleu violacé ou bleu clair [...].

Le calice est campanulé [...].

La corolle tubuleuse est munie à sa base d'un anneau de poils [...](9).

(8) GRIZE Jean-Blaise, *Logique et langage*, Paris, Ophrys, 1990.

(9) *Manuel de français pour la 8e année*, Département de l'instruction publique et des cultes du canton de Vaud, Lausanne, 1986.

Par la répétition d'une même opération, que l'on peut considérer comme une opération d'ingrédience, le texte construit la classe-objet "saugé officinale" en y introduisant successivement divers éléments, à savoir :

s = la saugé officinale = { un sous-arbrisseau, les rameaux, les feuilles, les fleurs, le calice, la corolle }.

... qui ne sont pas
des classes
ensemblistes

Ce genre de classe est extrêmement intéressant, en ceci qu'il ne correspond nullement à la définition classique des classes ou des ensembles mathématiques : x est élément d'une classe a si et seulement si x possède la propriété a . Les éléments d'une classe-objet ne sont pas homogènes en ce sens-là, ils correspondent plutôt à des parties de l'objet. Le modèle mathématique de cette sorte de classe a été développé par un logicien polonais, Lesniewski, malheureusement peu connu des milieux informatiques pour des raisons qui tiennent à la fois aux contingences de l'histoire (l'invasion allemande), à son originalité profonde et à son système de notation, dont il faut honnêtement reconnaître qu'il est un peu déconcertant (10).

Il existe d'autres opérations d'objet (11), mais mon propos n'est pas ici d'en traiter. En revanche, je voudrais mettre en évidence l'importance que joue la construction préliminaire de ce dont il s'agit. Voyons donc comment *Le Grand Dictionnaire Encyclopédique Larousse* conçoit le même objet.

La saugé officinale, spontanée dans le midi de la France, à fleurs violettes et à feuilles finement gaufrées, vert-grisâtre, est utilisée en pharmacopée.

un raisonnement
dépend de
l'élaboration des
objets sur
lesquels il porte

Le référent est bien le même, les discours sont tous deux informatifs, mais il est évident que les raisonnements qui peuvent se dérouler sur les objets de discours ainsi créés ne peuvent être identiques.

Toutefois dira-t-on, la saugé a bel et bien une existence propre qui ne dépend pas de ce qui en est rapporté. Certes, mais les raisonnements, dès qu'ils sont formulés, ne portent pas sur les choses, ils portent sur ce qui en est dit et c'est un trait pertinent des schématisations, scientifiques ou non, que de construire un monde propre. Ainsi existe-t-il une opération logico-discursive qui renvoie, non au monde tel qu'il est naïvement donné, mais à celui qui vient d'être construit : "ceci montre que", "cette idée ne devait être explorée que", "cette préférence donnée à ce qui précède", etc.

la cohésion
interne d'un texte
importe plus que
son adéquation
avec la réalité
de tous les jours

On est ainsi conduit à s'interroger davantage sur la cohésion des textes d'information que sur leur cohérence. J'entends ici, à la suite de certains linguistes (12) que la

(10) MIEVILLE Denis, *Un développement des systèmes logiques de Stanislaw Lesniewski*, Berne, Peter Lang, 1984.

(11) BOREL Marie-Jeanne, GRIZE Jean-Blaise, MIEVILLE Denis, *Essai de logique naturelle*, Berne, Peter Lang, 1983.

(12) MARTIN Roger, *Pour une logique du sens*, Paris, PUF, 1983 ; RASTIER François, *Sémantique interprétative*, Paris, PUF, 1987.

cohésion est relative aux relations sémantiques internes au contexte linguistique et que le cohérence l'est relativement à de l'extra-linguistique. La distinction est importante dans les discours d'information scientifique. L'exemple de la masse, que j'ai signalé plus haut, le fait bien voir. Si l'apprenant se réfère à ce qu'il appréhende de la notion commune, il ne comprendra rien ; s'il s'en tient à ce qui lui est proposé, il réussira son examen, ce qui d'ailleurs ne manque pas de faire problème. Mais c'est une autre histoire, comme disait Kipling.

2. LES PRISES EN CHARGE DES CONTENUS DE JUGEMENT

Appliquer un prédicat à un objet, c'est le déterminer de quelque façon, c'est construire un contenu de jugement, mais sans pour autant prendre parti sur sa valeur de vérité. La façon usuelle de s'exprimer est ici assez trompeuse. Avant de dire

- (1) "2 + 3 est égal à 5" ou
 (2) "2 + 3 n'est pas égal à 7".

asserter c'est
 prendre en
 charge ce que
 l'on dit

il faut d'abord concevoir les déterminations "que 2 + 3 être égal à 5" et "que 2 + 3 être égal à 7" (13). Or, il n'y a véritablement jugement que dans les assertions (1) et (2), assertions qui sont prises en charge par un locuteur.

Ce qui est ici remarquable, c'est que dans ces exemples le locuteur est effacé, contrairement à ce qui serait le cas si l'on avait :

- (1') "Je dis que 2 + 3 est égal à 5" et
 (2') "Je dis que 2 + 3 n'est pas égal à 7".

... quitte à laisser
 entendre que les
 choses parlent
 d'elles-mêmes

Or, il faut bien voir qu'il ne saurait être question de discours sans que quelque sujet ne le produise, sans qu'un énonciateur n'en assume les déterminations dont il est question. Un tel effacement est assez coutumier dans les discours d'information scientifique, où tout se passe comme si personne ne parlait et que les choses parlent d'elles-mêmes. Toutefois à y regarder de plus près, on s'aperçoit qu'il s'agit-là d'une sorte d'idéal qui n'est véritablement atteint que dans le calcul, lequel n'est plus un discours en langue naturelle. A. Ali Bouacha l'a fort bien fait voir en analysant par le détail le discours universitaire : cours de linguistique, cours de biologie cellulaire, cours d'informatique (14). Ceci laisse d'ailleurs entendre qu'il faut distinguer avec soin les informations scientifiques telles qu'elles peuvent se donner à voir en leur état achevé et telles qu'elles se présentent soit en leur état naissant, soit dans leur reconstruction didactique.

(13) FREGE Gottlob, *Ecrits logiques et philosophiques*, Paris, Seuil, 1971.

(14) ALI BOUACHA Abdelmadjid, *Le discours universitaire*, Berne, Peter Lang, 1984.

mais le locuteur se laisse souvent deviner et il se manifeste à travers certains types de modalités

Toutefois, même lorsque le locuteur veut s'effacer, il lui arrive souvent de laisser pointer l'oreille. Cela est plus ou moins manifeste et c'est ce que j'illustrerai par quelques emprunts à un texte de *La Recherche sur La sismologie des étoiles* (15). Les auteurs écrivent par exemple :

Les étoiles animées de vibrations similaires à celles du Soleil sont beaucoup plus difficiles à observer,

ce qui contraste avec d'autres assertions, comme :

Les naines blanches ont une masse moyenne d'environ 0,6 fois la masse du Soleil.

La "difficulté" relève d'un jugement de valeur et ce sont les auteurs qui en prennent la responsabilité, tandis que la masse des naines blanches est donnée comme un fait totalement indépendant d'eux.

Mais le locuteur peut intervenir de façon encore plus explicite à l'aide de modalités (16). Je n'entrerai pas dans les détails, et je ne veux ici que distinguer deux cas. Le premier a trait aux modalités dites appréciatives, c'est-à-dire à l'expression d'un jugement de valeur que le locuteur porte sur ce qu'il affirme :

Paradoxalement, les causes d'excitation dans une étoile sont peu nombreuses.

deux sortes de modalités : *de dicto* et *de re*

Il est clair qu'il s'agit ici d'une modalité que les logiciens appellent *de dicto* et qui peut être normalisée par la formule : Il est paradoxal que

Le second concerne les modalités dites aléthiques ou épistémiques (17) :

Afin d'éviter cette sorte de brouillage, il est nécessaire que le temps d'observation continu de l'étoile soit le plus long possible.

On est aussi en présence d'une modalité, mais d'une modalité *de re*, que le locuteur prend certes en charge, et qui est toutefois comme inscrite dans la nature des choses.

Dans toutes ces situations de prise en charge, situations dans lesquelles le locuteur apparaît plus ou moins explicitement, il reste responsable de ses dits, il est la source des informations transmises. Mais il est des circonstances dans lesquelles il souhaite être, non la source de ce qu'il propose,

(15) VAUCLAIR Gérard et Sylvie, "La sismologie des étoiles", *La Recherche*, novembre 1991, no. 237, pp. 1280-1287.

(16) On distingue deux sortes de modalités. Les unes consistent en des prises de position sur ce qui est dit, elles sont *de dicto* : Il est nécessaire que la TV soit indépendante du pouvoir. Les autres, modalités *de re*, reflètent des états de chose : La TV est nécessairement indépendante du pouvoir. Ce n'est pas du tout la même chose !

(17) Les modalités aléthiques sont celles qui portent sur les valeurs de vérité : nécessaire, possible, impossible, non nécessaire. Les modalités épistémiques portent sur le rapport à la connaissance : vérifié, falsifié, non décidé. On peut consulter WRIGHT George Henrik von, *An Essay in Modal Logic*, Amsterdam, North-Holland, 1951.

mais seulement le témoin (18). Il se réfugie alors derrière une autre autorité, et on a ce que j'ai appelé quelque part "l'effet parapluie". Une illustration *ad hoc* serait la suivante :

Gallée a dit que la Terre tournait autour du Soleil.

Si vous n'êtes pas d'accord, prenez-en vous à lui, moi je n'y suis pour rien. Il est vrai qu'en science - je ne dis rien des textes de philosophie politique ou non - l'autorité à laquelle il est fait recours se fonde en principe sur d'autres faits établis par ailleurs :

L'astrophysicien anglais Léon Mestel montra, en 1952, comment les naines blanches tirent l'énergie qu'elles rayonnent du refroidissement de leur noyau,

ce qui est accompagné d'ailleurs d'une note bibliographique, autre façon d'en appeler au lecteur : il se convaincra en y allant voir.

Je voudrais ouvrir ici une parenthèse. Les procédures discursives de l'information scientifique, dans la mesure où elles sont tributaires d'une langue naturelle, ne sont pas totalement détachées des discours de tous les jours et, tout particulièrement, de ceux de la publicité qui, en un certain sens, sont aussi informatifs. Or, il est frappant de constater à quel point l'effet parapluie joue un rôle important. La moindre pâte dentifrice est garantie, non par son fabricant, mais par quelque autorité extérieure, des savants américains de préférence à des savants vénézuéliens. Il s'agit de ce que la tradition considèrerait comme l'argument d'autorité. Cet argument a fort mauvaise presse, la "science" ne saurait y recourir et le temps est passé où "Aristote l'a dit" était un argument décisif. Il n'en reste pas moins que tout article scientifique comporte des références explicites à des auteurs qui font autorité sur le sujet traité.

Il faut de plus noter que les deux sortes de modalités que j'ai distinguées, se combinent le plus souvent. En voici un exemple :

Leur luminosité [celle des étoiles] peut varier au cours du temps de façon spectaculaire.

"Peut varier" est une modalité aléthique qui équivaut à "il est possible que" mais "de façon spectaculaire" est une modalité appréciative du locuteur.

Ce qui précède a trait à l'activité du locuteur mais, dans la perspective que j'ai esquissée plus haut, le rôle de l'auditeur est non moins important puisque il doit reconstruire la schématisation qui lui est proposée. Il s'agit donc, d'une part de le stimuler et, d'autre part de lui fournir des aides appropriées.

l'actualité de
l'argument
d'autorité

(18) Voir pour cette distinction GRIZE Jean-Blaise, *De la logique à l'argumentation*, Genève, Droz, 1982, Chapitre 12.

Considérons un énoncé simple, par exemple, le premier du texte :

Les étoiles vibrent comme des instruments de musique.

J'examinerai plus loin l'analogie pour ne souligner ici que le fait que, dans une perspective dialogique de la communication telle que Bakhtine l'a conçue (19), l'énoncé complet doit se concevoir comme :

JE VOUS dis que les étoiles vibrent comme des instruments de musique.

celui qui lit est un partenaire actif qui reconstruit pour son compte l'information

Locuteur et auditeur sont des places théoriques nécessaires à la compréhension des mécanismes, encore qu'il soit souvent habituel d'en effacer les traces en surface. Mais, et tout particulièrement dans les discours didactiques, il existe diverses façons d'engager le destinataire dans sa reconstruction en s'adressant explicitement à lui. On peut le faire en lui posant directement des questions, même si bien entendu les réponses suivent, ou en l'associant tout simplement à la démarche. Voici un fragment de texte scolaire (20) qui procède ainsi.

Avant d'aller découvrir la seconde famille des ballons libres, ceux qui sont gonflés non avec de l'air chaud, mais avec des gaz - vous vous souvenez de Jacques Charles et de l'hydrogène - faisons un petit tour du côté de la science aérostatique. [...] Pour tenter de comprendre ce phénomène, nous allons appeler à l'aide le vieil Archimède et son fameux principe. [...] C'est un peu compliqué, non ? Pourtant ce principe, vous l'avez déjà mis à l'épreuve. Quand ? Tout simplement lorsque vous êtes dans l'eau.

On pourrait parler d'un style convivial, bien différent de ce que l'on trouve souvent. Par exemple :

L'eau de pluie s'infiltré en profondeur en cheminant dans les petits espaces (pores), entre les grains du sol. Les couches géologiques qui autorisent cette infiltration sont dites poreuses et perméables. Ce sont souvent des sables, des graviers, ou une roche compacte mais fissurée, traversée de fractures.

Il y a là deux façons tout à fait distinctes de concevoir un texte d'information. Je ne dis pas que l'une soit préférable à l'autre, mais la première oblige bien davantage le lecteur à reconstruire l'information avec son auteur et même des textes scientifiques, disons plus "graves", l'associent volontiers explicitement à leur propos. Les auteurs de *La Sismologie des étoiles* ne s'en privent pas :

Supposez qu'un trompettiste ou un violoncelliste vous présentent leur instrument.

Imaginez par exemple un ballon de rugby qui se transformerait en soucoupe volante.

Mais pour quelles raisons les étoiles se mettent-elles à vibrer ?

(19) Voir TODOROV Tzvetan, *Michaïl Bakhtine : le principe dialogique, suivi de Ecrits du cercle Bakhtine*, Paris, Seuil, 1981.

(20) Voir la note (9).

il convient donc de l'aider dans sa reconstruction

Cela toutefois reste encore insuffisant. Il ne suffit pas de mobiliser le lecteur, encore faut-il l'aider dans sa reconstruction. Les procédures sont multiples, ce sont des résumés du genre " nous venons ainsi de voir que " ; des annonces, "je vais montrer que" ou "comme nous le détaillerons plus loin" ; des mises en garde, "ce qui suit est plus délicat" ; et ainsi de suite.

Tout ceci relève certes plus de la rhétorique que de l'information pure et certains, tel Jean-Claude Gardin (21), estiment que c'est inutilement gaspiller du papier par des bavardages. Peut-être faut-il en effet s'en tenir à des banques de données, mais la communication entre hommes n'est pas de la même nature que la communication homme-machine et une information que "ne passe pas", une information maladroitement restituée, est-elle encore véritablement utile ?

3. LES ÉTAIS

il peut se poser des questions auxquelles il convient de répondre par avance

Il faut aussi être attentif à ce qu'un discours d'information n'est pas une simple collection de faits, comme peut l'être un inventaire. Ses faits sont organisés et, dans une large mesure interdépendants les uns des autres. Ils le sont de par leur nature, mais aussi en fonction du lecteur qui peut fort bien se poser des questions sur ce qui lui est proposé, ne ne pas comprendre le pourquoi de ce qu'il est en train de reconstruire. Il appartient donc au locuteur d'anticiper ses questions, d'y répondre par avance, en d'autres termes d'étayer ses assertions.

quelques "bonnes raisons" : les étais

Les étais peuvent être conçus selon les deux directions de pensée que j'ai signalées, proactive et rétroactive. Je ne dirai rien ici de la première, signalée par des marques comme *donc*, *ainsi*, *en conséquence* et je me limiterai à la seconde, marquée par un *parce que* ou par un équivalent. Il convient de remarquer que, pour des raisons qui m'échappent encore, l'ordre du discours ne correspond pas nécessairement à l'ordre logique (22). On peut avoir aussi bien l'assertion sur laquelle le locuteur estime qu'une question peut se poser, suivie de son étai :

Je prends mon parapluie pour ne pas être mouillé
qu'une assertion qui va servir d'étai à une autre :

Pour ne pas être mouillé, je prends mon parapluie.

(21) Il s'en est expliqué à maintes reprises, par exemple GARDIN Jean-Claude *et al.*, *La logique du plausible*, Paris, Maison des Sciences de l'Homme, 2e éd., 1987.

(22) Ceci est bien mis en évidence dans APOTHELOZ Denis et MIEVILLE Denis, "Cohérence et discours argumenté", *The Resolution of Discourse*, M. Charolles (éd.), Hamburg, Helmut Buske Verlag, 1989, pp. 68-97.

(J'ai souligné et je soulignerai les énoncés qui sont censés donner lieu à un "pourquoi").

Les états fournissent ce que Raymond Boudon appelle de bonnes raisons de croire (23) et peuvent être de diverses natures. Ainsi, et sans chercher aucunement à être exhaustif, on trouve :

1. Des causes efficaces

Du fait de leur grande densité, les modes g de ces étoiles [les naines blanches] ont des périodes relativement courtes, comprises entre cent et mille secondes.

On remarquera que "comprises entre cent et mille secondes" ne constitue pas un état à proprement parler, mais que c'est une aide au lecteur qui doit lui permettre de se faire une idée de ce qu'il doit entendre par des périodes courtes.

2. Des causes finales

Afin d'éviter ce genre de brouillage, il est nécessaire que le temps d'observation continu soit le plus long possible.

3. Des raisons

L'enjeu de cette étude est de taille, car on attend d'elle une révolution dans notre compréhension de la structure de l'intérieur des étoiles.

On trouve enfin dans les discours d'information, un procédé très général qui sert moins à étayer un énoncé qu'à faire comprendre une situation globale. Il s'agit de l'analogie qui correspond, comme on sait, au passage d'un thème - ce dont on veut traiter - à un phore, c'est-à-dire à une situation dont on suppose qu'elle est mieux connue de l'interlocuteur, et ceci soit pour simplement éclairer un objet de pensée, soit pour transporter sur le thème un raisonnement facile dans le phore, soit enfin pour marquer que l'objet du phore est réellement comparable à celui correspondant du thème (24).

... et l'analogie

Les exemples dans l'article cité sont nombreux. J'en ai déjà rapporté un, en voici un autre :

Les mouvements dus au passage des ondes dans l'étoile sont comme des vagues qui se propagent à la surface des océans. Au passage d'une onde, certaines régions de la surface se soulèvent, d'autres s'affaissent.

Ce nouvel exemple me permet de souligner la proximité entre l'analogie et l'exemple (25). Il aurait été tout à fait possible de renverser l'ordre du discours et d'écrire :

Au passage d'une onde, certaines régions de la surface de l'étoile se soulèvent, d'autres s'affaissent, comme par exemple les vagues sur l'océan.

(23) BOUDON Raymond, *L'art de se persuader des idées fausses, fragiles ou douteuses*, Paris, Fayard, 1990.

(24) Sur le rôle de la pensée analogique on peut voir GRIZE Jean-Blaise, "Le discours analogique", *Représentation des connaissances et raisonnement dans les sciences de l'homme*, Institut National de Recherches en Informatique et en Automatique, Roquencourt, 1979, pp. 428-439.

CONCLUSION

Considérer, comme je viens de le faire, les raisonnements au sein des discours qui servent à les communiquer ne constitue de toute évidence qu'une approche, sinon superficielle, tout au moins partielle. Les procédures d'inférence, de déduction, d'induction, d'abduction n'apparaissent pas et l'appareil logique sous-jacent n'est pas envisagé. Je crois en revanche qu'il peut être de quelque intérêt d'attirer l'attention sur les contraintes auxquelles il faut se soumettre pour amener ceux auxquels on s'adresse à raisonner véritablement avec soi et non seulement à calculer.

Elles sont de deux sortes. Les unes relèvent de l'information fournie par le texte et viennent s'inscrire dans les connaissances préalablement acquises par celui qui reçoit le message. Cela fait qu'il peut arriver, comme c'est souvent le cas dans l'enseignement, que l'information nouvelle se trouve être plus ou moins incompatible avec celles déjà présentes, ce qui exige des précautions de présentation particulières.

Les autres sont relatives aux raisonnements qui s'appuient sur ces informations et il convient de prendre en considération deux aspects. Le premier est interne à l'information fournie, il en découle logiquement. De ce qu'un nombre est multiple de 6, il s'ensuit qu'il est pair. Le second relève du contexte au sein duquel se déroule la communication. On n'affirme pas à quelqu'un qu'un nombre est multiple de 6 sans quelque raison, sans penser à l'usage qu'il fera de cette information, usage qui d'ailleurs n'est pas toujours arithmétique. Une assertion ne prend sens que dans la mesure où elle répond à une question, question que se pose certes le locuteur, mais qu'il doit faire partager à celui auquel il s'adresse. Il en découle que tout texte d'information présente nécessairement un certain aspect argumentatif.

Jean-Blaise GRIZE
Centre de Recherches Sémiologiques
Université de Neuchâtel

(25) MIEVILLE Denis, "Exemples et pédagogie", *Discours, savoir, histoire, Revue Européenne des Sciences Sociales*, Tome XVII, no. 45, Genève, 1979, pp. 119-142.

DIFFICULTÉS DES ÉLÈVES LIÉES AUX DIFFÉRENTES ACTIVITÉS COGNITIVES DE RÉOLUTION DE PROBLÈMES

Andrée Dumas-Carré
Monique Goffard
Daniel Gil

Pour résoudre des problèmes de physique il faut utiliser des connaissances conceptuelles mais il faut aussi effectuer différentes activités cognitives dont l'enchaînement constitue le processus de résolution. Dans cet article nous nous intéressons aux difficultés des élèves liées à ces activités cognitives de résolution. A partir de l'observation des élèves résolvant (en groupe) une série de problèmes différents nous repérons leurs difficultés spécifiques et nous recherchons des "racines" communes reliées à l'une ou l'autre des activités cognitives du processus de résolution.

La résolution de problèmes papier-crayon est, depuis quelques décennies, comme le montre une abondante littérature (Garrett, 1986) une des lignes importantes dans les recherches en didactique des Sciences. Cela est dû à l'importance que ces activités ont dans l'apprentissage des sciences et dans l'évaluation des acquisitions des élèves (Dumas-Carré, 1987) et au constat de l'échec généralisé des étudiants (Gil, Martinez-Torregrosa & Senent, 1988-a).

Généralement, les causes de cet échec sont attribuées, par les professeurs, presque exclusivement à des lacunes chez les étudiants. Ceci exprime, sans doute, un des traits les plus caractéristiques de la "pensée spontanée" des enseignants (Gil, 1991). Un argument souvent entendu est : il y a toujours des étudiants qui apprennent correctement ce qui prouverait que l'enseignement est correct et que l'échec des autres élèves est dû à leurs propres déficiences, même si ces "autres élèves" sont la majorité. De façon cohérente avec ce point de vue, les recherches en résolution de problèmes, en général, ne s'intéressent pas suffisamment à l'activité des professeurs. Sans une remise en question profonde et totale des activités de résolution de problèmes, les solutions proposées par les chercheurs peuvent, au mieux, être efficaces localement mais le manque d'interprétation dans un cadre général les réduit à ne traiter que des cas particuliers.

Il est bien établi, en histoire et en philosophie des sciences, que l'un des obstacles majeurs au développement d'une science est dû à l'acceptation d'idées et de suppositions implicites qui échappent ainsi à tout examen critique (Bachelard, 1938). Nous avons mené une étude critique de

un échec
généralisé

remettre en
question des
évidences

la pédagogie utilisée et des recherches en résolution de problèmes ; celle-ci, tout en remettant en cause ce qui est habituellement accepté comme évident, essaye de construire un fondement théorique qui tienne compte des acquis des recherches sur l'enseignement/apprentissage (Posner, Strike, Hewson & Gertzog, 1982 ; Driver & Olsdham, 1986). Ce travail qui s'est développé en parallèle en France (Dumas-Carré, 1987 ; Goffard, 1990) et en Espagne (Martinez-Torregrosa, 1987 ; Ramirez-Castro, 1990) a entraîné une profonde réorientation de l'enseignement de la résolution de problèmes (Gil & Martinez-Torregrosa, 1983 ; Gil, Dumas-Carré, Caillot, Martinez-Torregrosa & Ramirez-Castro, 1990) que nous avons mis à l'épreuve, dans des classes, avec des résultats très positifs ((Gil D. et al 1988-a).

Nous rejetons l'interprétation de l'échec généralisé comme étant dû principalement aux déficiences des étudiants, de plus, plutôt que de raisonner en termes de manques nous nous intéresserons aux difficultés des élèves et nous montrerons dans cet article que la nouvelle orientation que nous proposons permet de les cerner plus finement et, par là même, de mieux les prendre en compte et les traiter. Nous commencerons donc par présenter brièvement les caractéristiques essentielles de notre modèle de résolution. Ensuite nous relaterons les difficultés détectées en situation de classe pendant des séances enregistrées en vidéo. Nous montrerons ainsi que les difficultés rencontrées par les élèves sont bien plus complexes que celles habituellement considérées, liées d'avantage aux processus de résolution qu'à des lacunes dans les connaissances des élèves et, partant, dues à un manque d'apprentissage plus qu'à des déficiences des étudiants. La cohérence entre une analyse épistémologique a priori et ce que nous avons observé devient ainsi un appui supplémentaire au modèle et une aide à sa mise en oeuvre.

cerner les
difficultés pour
mieux les
dépasser

1. LA RÉOLUTION DE PROBLÈMES COMME ACTIVITÉ DE RECHERCHE

Comme nous l'avons déjà dit dans l'introduction notre conviction de départ est que, pour expliquer un échec massif comme il l'est, on ne peut pas ne pas remettre en question l'enseignement lui-même.

Nous ne pouvons pas reproduire ici l'ensemble de l'argumentation qui nous a conduits à choisir comme activité de référence, pour la résolution de problèmes, les activités de recherche ; nous essayerons simplement de résumer les traits fondamentaux de ce modèle en renvoyant à d'autres articles pour un exposé plus complet (Gil & Martinez-Torregrosa, 1983 et 1987 ; Gil, Martinez-Torregrosa, 1983 ; Gil, Dumas-Carré, Caillot, & Martinez-Torregrosa, 1990 ; Garrett, Gil, Martinez-Torregrosa & Satterly, 1990).

qu'est ce qu'un problème ?

Notre point de départ est une analyse de l'idée même de problème. Bien étrangement, beaucoup de chercheurs en résolution de problèmes ne se posent pas cette question et utilisent sans critique les énoncés de problèmes usuels (Krulik & Rudnik, 1980). Par contre il y a accord, parmi ceux qui se posent cette question, pour considérer un problème comme une situation qui présente des difficultés, pour lesquelles le résolveur ne possède pas de solution toute faite. Partant de cette idée nous nous sommes demandés dans quelle mesure la façon habituelle de conduire les activités de résolution de problèmes se rapproche d'un traitement de situations inconnues pour lesquelles on ne possède pas de solutions toutes faites. Il est facile de constater qu'habituellement nous proposons les solutions des problèmes sans tentatives ni doutes ; nous connaissons la solution (pour nous professeurs il ne s'agit pas de problème !) et nous la développons de façon linéaire et le plus clairement possible. En conséquence, les élèves peuvent apprendre cette solution, la reproduire dans des situations suffisamment voisines mais, en aucun cas, les élèves n'apprennent à faire face aux difficultés d'un vrai problème. De plus, implicitement, nous véhiculons une fausse image du problème.

C'est à partir de la mise en évidence de cette profonde incohérence (conséquence d'une conception de l'enseignement comme simple transmission de connaissances) que nous avons élaboré notre modèle de résolution de problèmes comme une activité proche de celle du chercheur scientifique.

1.1. La suppression des données dans l'énoncé

pas de données

Le fait que dans les problèmes usuels on trouve les données (littérales et/ou numériques) comme point de départ est révélateur d'une conception empiriste, aux antipodes de ce qu'est une activité de recherche, où la quête des données pertinentes dérive des hypothèses émises et des stratégies de résolution retenues. La suppression des données est donc absolument nécessaire ; elle contribue à transformer les énoncés fermés habituels en situations problématiques ouvertes.

1.2. Le choix d'une orientation méthodologique

Celle-ci vise à éviter une résolution mécanique et à rapprocher la résolution des problèmes d'une démarche scientifique. Dans cette optique, les différentes activités que doivent accomplir les élèves sont :

- 1) Commencer par une étude qualitative en précisant la situation, en formulant un problème, en prenant des décisions à propos des conditions. Nous insistons sur la nécessité de conduire les élèves à élaborer et expliciter

une
représentation
qualitative
d'abord

de la
représentation
phénoméno-
logique aux
concepts
physiques

une représentation(1) du problème. Pour cela nous avons élaboré des "aides métacognitives" qui sont des heuristiques guidant et facilitant l'élaboration d'une représentation globale qualitative. Ces aides suivent une double démarche analytique/synthétique (pour plus de détails voir l'annexe en fin d'article). D'une part elles décomposent la représentation totale en représentations partielles intermédiaires plus simples (chacune centrée sur un seul type de descripteurs), d'autre part elles organisent l'articulation, la synthèse de ces représentations partielles (Dumas Carré, Caillot, Martinez Torregrosa & Gil 1989 ; Caillot & Dumas-Carré 1987 ; Caillot & Dumas-Carré 1989). L'analyse du but du problème fait partie de cette représentation. Cette activité de représentation est critique dans le processus de résolution car c'est là que le passage de la vie courante (faits, événements) à la physique (grandeurs physiques) se fait.

- 2) Emettre des hypothèses fondées (en s'appuyant sur les connaissances "déjà là" quelles soient de physique ou qu'il s'agisse de conceptions) à propos des facteurs qui peuvent intervenir sur ce que l'on cherche et de la façon dont ils vont jouer (en envisageant, par exemple, des cas limites d'interprétation facile).

Nous attirons l'attention sur le fait que cette construction d'hypothèses est une bonne opportunité pour que les élèves expriment leurs conceptions. Dans la pratique habituelle cette activité de construction d'hypothèses, qui pourtant est le coeur de la pensée scientifique, est totalement absente des activités de résolution de problèmes (Gil & Martinez- Torregrosa, 1984).

- 3) Elaborer et expliciter des chemins de résolution (planifier) avant de commencer à traiter dans le détail. Notre modèle demande d'envisager **plusieurs** chemins de résolution pour rendre possibles les comparaisons des résultats obtenus par les différents chemins et pour mettre en évidence la cohérence du corpus des connaissances.
- 4) Instancier complètement un chemin de résolution en expliquant ce qui est fait, en verbalisant au maximum ; ceci pour empêcher encore une fois, une résolution mécanique sans signification physique.
- 5) Analyser les résultats à la lumière des hypothèses et tout particulièrement des cas limites considérés.
- 6) Envisager des prolongements possibles : pourrait-on résoudre à un niveau de modélisation et/ou de complexité différent ? Pourrait-on envisager une situation expérimentale pour vérifier les résultats ?...

Nous insistons sur le fait que les orientations précédentes ne constituent pas un algorithme pour guider pas à pas l'activité des élèves ; bien au contraire, il s'agit d'indications génériques destinées à attirer l'attention sur des "biais

(1) "Représentation du problème" au sens de LARKIN & REIF (1979)

imagination,
créativité et
rigueur

méthodologiques" néfastes du comportement habituel des élèves. Parmi ces biais on peut citer la tendance à accepter les "évidences" de sens commun, ce qui conduit à penser en termes de certitudes et non d'hypothèses, à ne pas douter des résultats... Ce modèle prétend donc aider les élèves à traiter des problèmes ouverts de façon imaginative, créatrice et rigoureuse en accord avec la pensée scientifique.

2. LE STATUT DES DIFFICULTÉS ET/OU ERREURS DANS CETTE CONCEPTION DE LA RÉOLUTION DE PROBLÈMES

les raisons
d'échec citées
par des
enseignants

Nous allons considérer les difficultés des élèves lors de résolutions dans une perspective qui rompt avec les conceptions spontanées des enseignants. Une étude réalisée avec plusieurs centaines de professeurs de physique et chimie de l'enseignement secondaire (Martinez-Torregrosa, 1987) sur les causes d'échec des élèves dans les activités de résolution de problèmes a montré que les seules raisons invoquées par un pourcentage significatif d'enseignants sont :

- a) le manque de connaissances théoriques,
- b) le manque de connaissances mathématiques,
- c) le manque d'attention lors de la lecture de l'énoncé.

Ces explications révèlent une conception de la résolution de problèmes comme simple application de connaissances théoriques déjà acquises ; les difficultés seraient donc dues seulement à un manque d'étude et d'attention des élèves ; cette conception va souvent de pair avec un enseignement s'appuyant sur la transmission/réception de connaissances toutes faites (conception d'ailleurs sous-jacente aux commentaires de programmes et Instructions Officielles). Les possibilités de remédiation seraient ainsi très limitées et relèveraient exclusivement de la responsabilité de l'élève et/ou de la répétition.

Comment peut-on envisager cette même question si la résolution de problèmes devient une activité proche de celle des chercheurs ?

L'idée de difficulté change de statut : elle perd sa connotation négative (défiance de l'élève) pour devenir un passage "normal", "naturel". En effet les difficultés pour résoudre sont consubstantielles à toute situation réellement problématique, résoudre un problème ne se limite pas à se rappeler une solution déjà vue mais consiste à chercher, essayer, surmonter des obstacles (et ceci tout au long du processus de résolution). Les difficultés, dans ce cadre, ont alors un rôle positif ; une difficulté explicitée, située, surmontée au cours d'un problème donné constitue un apprentissage pour les problèmes suivants, alors qu'éviter ou contourner la

statut des
difficultés et
erreurs

même difficulté (ce qui est très souvent fait dans les problèmes usuels) n'apporte rien en termes d'apprentissage.

Nous allons maintenant décrire une expérience au cours de laquelle nous avons observé, en situation de classe, les difficultés effectivement rencontrées par les élèves et nous les interpréterons et les situerons par rapport aux différentes activités cognitives de résolution explicitées par le modèle.

3. SITUATION EXPÉRIMENTALE

Le premier pas (premier dans le temps et premier par son importance) pour apprendre à affronter et à surmonter une difficulté est qu'elle soit identifiée comme telle, qu'elle soit d'abord ressentie puis explicitée. En conséquence, il faut que le travail des élèves consiste à résoudre de vrais problèmes, pour eux, en laissant réellement à leur charge les diverses activités cognitives, sans les court-circuiter par des énoncés trop stéréotypés. Ensuite, bien que le modèle épistémologique ne dise rien à propos du mode de travail pédagogique, il faut, pour être cohérent, mettre les élèves en situation d'identifier et d'explicitier leurs difficultés. Pour cela, une solution consiste à les faire travailler de façon autonome, en petits groupes, avec des mises en commun périodiques animées par le professeur. De telles mises en commun arrivent après que chaque groupe ait élaboré une représentation qualitative de la situation, de façon à confronter ces représentations. De même il convient de faire une mise en commun pour obtenir un accord sur les décisions et simplifications choisies, de confronter les hypothèses faites, de comparer les différents chemins de résolution proposés. La dernière mise en commun concerne la discussion des résultats et les ouvertures possibles. Cette façon de gérer l'activité permet à chaque groupe de confronter son travail à celui des autres (ce qui obligera à mieux expliciter et à justifier sa pensée) et aux résultats établis par la "communauté scientifique" représentée par le professeur. Cette façon de travailler se rapproche ainsi d'une recherche faite par des chercheurs débutants sous la direction d'un chercheur confirmé -le professeur- (Gil & Martinez-Torregrosa, 1987). De cette manière les difficultés ont l'occasion d'être exprimées, explicitées, situées et surmontées.

L'expérience que nous décrivons s'est déroulée au lycée Henry IV, dans une classe de Première S, à l'occasion d'un projet d'établissement. Les élèves, par demi-classe (16 élèves), ont eu, pendant un semestre, une séance supplémentaire de 1h30 consacrée exclusivement à la résolution de problèmes avec leur professeur de physique habituel. Les élèves travaillent en suivant le modèle décrit et en utilisant les aides métacognitives pour élaborer la représentation (ces aides ont été enseignées pendant l'horaire "normal") ; cest la première fois qu'ils travaillent de cette façon. A chaque

mode de travail
pédagogique

quels élèves
concernés ?

séance nous avons enregistré en vidéo le travail d'un groupe et les mises en commun (soit 2 x 11 séances différentes). Nous sommes donc dans des conditions d'observation de classe privilégiées, nous avons, grâce aux enregistrements vidéo, la possibilité de voir et revoir, de revenir en arrière pour ressituer, si besoin est, une intervention d'un élève... Ces conditions, hélas, ne sont pas celles du professeur seul dans sa classe. C'est pourquoi nous avons pu analyser finement et "voir" des choses qui échappent habituellement à l'enseignant.

Nous avons analysé différentes séances à partir des transcriptions (nous ne travaillons que sur le verbal ; la prise en compte du gestuel étant en dehors de nos compétences). Séance par séance nous avons repéré les difficultés rencontrées par les élèves pendant les phases de travail autonome en petits groupes (qu'elles débouchent sur une erreur ou non). A ce niveau d'analyse il s'agit de difficultés particulières, contextualisées, exprimées dans le cadre de la situation physique étudiée. Puis nous avons comparé, mis en parallèle ces cas particuliers pour détecter des "racines" communes reliées à l'une ou l'autre des activités cognitives explicitées dans le modèle de résolution.

4. LES DIFFICULTÉS RENCONTRÉES PAR LES ÉLÈVES AU COURS D'ACTIVITÉS DE RÉOLUTION DE PROBLÈMES

catégories de
difficultés

Pour organiser notre analyse nous avons retenu la catégorisation suivante :

- 1) les difficultés liées aux connaissances,
- 2) celles liées au processus de résolution (plus ou moins ponctuelles mais toujours de l'ordre des métaconnaissances),
- 3) celles liées à la situation de travail, aux interactions entre individus dans un groupe ou entre groupes.

Nous allons centrer la suite de l'exposé essentiellement sur les catégories 2 et 3, la catégorie 1 étant bien connue de tous. En effet les causes d'erreurs a) et b) citées par les professeurs (cf 2.) relèvent de cette catégorie 1 ; la cause c) est plus complexe et apparaîtra dans l'analyse suivante.

4.1. Difficultés liées aux connaissances

A propos des connaissances nous ne détaillerons qu'un seul point, qui au cours de ce travail, nous est apparu très important : il s'agit de la modélisation du temps ; celle-ci est

une modélisation
de base en
physique toujours
ignorée

considérée comme acquise par les professeurs mais, de fait, ne l'est pas pour une proportion non négligeable d'élèves (rappelons que les élèves inclus dans cette expérience sont en Première S d'un très bon lycée parisien donc de "bons" élèves, si ces élèves-là n'ont pas les prérequis supposés on peut penser que cette difficulté sera présente chez d'autres).

Dès lors que l'on formalise, que l'on utilise des principes il est indispensable de modéliser les situations étudiées. Certaines modélisations sont considérées comme déjà connues et, en conséquence, restent non explicitées non discutées. Or bon nombre d'élèves de Première (ceux de cette expérience mais aussi d'autres inclus dans les expériences du groupe PROPHY 1987) n'ont pas conceptualisé le temps en différenciant l'instant et la durée. Ils restent au niveau événementiel celui des phénomènes. Il y a des événements longs et d'autres brefs, mais l'instant de durée nulle comme passage à la limite n'a pas de sens pour eux. Cette modélisation n'est généralement jamais explicitée ni discutée elle est considérée comme déjà acquise (quand ? on peut se poser la question).

Le temps, grandeur physique, nécessite comme toutes les autres un travail de conceptualisation pour le différencier du sens commun de la vie courante ; ce travail de conceptualisation est fait pour des grandeurs comme la force, par exemple, pourquoi le temps du physicien serait-il "compris" spontanément sans élaboration conceptuelle ? Une modélisation correcte demanderait deux étapes :

- 1) l'instant est de durée nulle, l'instant est à la durée ce que le point est à la longueur ;
- 2) certains événements peuvent être modélisés comme instantanés.

Habituellement on passe directement au deuxième aspect sans avoir abordé le premier (supposé connu) d'où la confusion entre instant et phase très courte qui peut même aller jusqu'au refus du concept d'instant (refus légitime tant que ce concept reste accroché aux événements qui ne sont jamais vraiment instantanés).

un dialogue
révélateur

Voici un exemple. La situation étudiée est la suivante : un ressort horizontal est maintenu comprimé par une ficelle, une bille est posée contre l'extrémité du ressort, on brûle la ficelle. Décrire temporellement cet événement. Deux élèves (représentants de deux groupes différents) ont le dialogue suivant :

...élève 1" *On a défini deux phases (2), une phase où la bille est contre le ressort comprimé et une phase où la bille a quitté le ressort, où le ressort est détendu et entre les deux la ficelle a brûlé...*

(2) Dans les aides cognitives du groupe PROPHY le mot phase désigne une durée bornée par deux instants caractéristiques identifiés comme correspondant à un changement des conditions physiques.

...élève 2 *(on a une phase de plus) une phase où le ressort se détend et la bille est contre le ressort...*

...élève 1 *c'est un instant ça, ça c'est un instant, c'est très court parce que le ressort est comprimé et dès que la ficelle aura fini de se casser, toc, la bille va partir. Donc c'est un instant...*

4.2. Difficultés liées aux processus de résolution

différentes
activités
cognitives
entraînent
différentes
difficultés

Dans le processus de résolution on peut identifier différents types d'activités cognitives (que nous n'appellerons pas des étapes ou des phases pour ne pas introduire une idée de succession dans le temps qui ne pourrait qu'être fautive) que nous avons présentées dans les paragraphes précédents. Nous avons organisé les difficultés des élèves en suivant ce découpage en activités de résolution de natures différentes.

- Difficultés liées à l'analyse qualitative, la représentation du problème, l'émission d'hypothèses

Cette activité dans le processus de résolution de problème est première à la fois dans le temps et par son importance. De nombreuses recherches ont montré que c'est surtout sur ce point-là que les experts et les novices ont des comportements différents (entre autres : Chi M.T.H. et al., 1982).

les difficultés de
représentation
sont
généralement
masquées

Dans l'utilisation habituelle des problèmes, l'élaboration d'une représentation et l'émission d'hypothèses sont rarement prises en compte (il n'est que de voir les corrigés proposés dans les manuels qui les ignorent totalement). Les difficultés des élèves correspondant à ces activités ne sont donc pas vues. La seule chose observable est la proportion élevée d'élèves qui ne démarrent pas du tout le problème. Souvent, ceci est analysé comme un manque de compréhension de l'énoncé et attribué à des problèmes de langue ; mais en fait l'obstacle est de passer d'une description phénoménologique à une description en termes de concepts de physique et qui fasse intervenir des relations causales. Ce n'est pas la compréhension du langage qui est en jeu mais bien celle de la physique. Notre façon de travailler (les aides PROPHY, les énoncés utilisés, la gestion des activités...), au contraire, réunit des conditions pour que les difficultés des élèves concernant l'analyse physique et la représentation du problème puissent émerger.

Nous allons donner des exemples spécifiques observés qui, dans notre interprétation, incarnent les difficultés de cette partie du processus de résolution.

A propos de l'élaboration ou de la prise de conscience d'une modélisation

Cette difficulté des élèves se retrouve, sous des formes un peu différentes, aussi bien dans les problèmes ouverts que

dans des problèmes fermés (3). Dans les premiers elle est de faire la modélisation, les passages à la limite, les épurations. Dans les deuxièmes elle est de prendre conscience, de donner du sens à la modélisation présentée toute faite par l'énoncé. Il est difficile de donner un exemple suffisamment bref car cette difficulté est diffuse, présente tout au long de l'élaboration de la représentation. Il faudrait citer des transcriptions entières.

A propos de l'explicitation ou de la prise de conscience du but du problème

quel but ?

Résoudre un problème n'a de sens que si l'on sait ce que l'on cherche ! Dit autrement le problème doit avoir un but. Combien d'élèves commencent à "faire des choses" sans savoir ce qu'ils cherchent ! On peut différencier deux causes : le but n'est pas identifié (pour les problèmes fermés) ou n'est pas explicité (pour les problèmes ouverts) ou bien le but identifié est erroné non pertinent ou oublié.

Dans nos transcriptions d'observation nous retrouvons très souvent des phrases du type "à propos qu'est-ce qu'on cherche ?" qui illustrent la première des difficultés citées ; ou des phrases du type "n'oublie pas que c'est X que l'on cherche" qui illustrent la seconde.

A propos de la précision de la situation étudiée et des décisions à prendre

Ceci concerne essentiellement les problèmes ouverts pour lesquels il faut décider de la situation à étudier en précisant les conditions (les hypothèses de travail).

A ce niveau nous avons observé trois causes de difficultés et d'erreurs.

l'explicitation est nécessaire à la communication

1) **Les décisions prises restent implicites** (pas seulement au niveau de la communication dans le groupe mais pour celui même qui les a prises). Une manifestation en est la peine que les élèves ont à prendre conscience du fait que, à partir du moment où ils décrivent le comportement d'un dispositif, ils ont pris des décisions à propos des conditions de fonctionnement.

Par exemple : nous donnons une description phénoménologique d'un dispositif (une meule pour aiguiser des outils) sans aucune indication sur les conditions de fonctionnement (quel type de moteur...) et nous leur demandons de décrire ce qui se passe. Bien sûr, les différents groupes, ayant fait des choix différents (moteur à vitesse constante pour les uns, moteur à puissance constante pour les autres) mais non explicités, décrivent des fonctionnements différents. Il nous a fallu presque une séance entière pour les amener à prendre conscience qu'ils avaient fait des choix

(3) Par *problème fermé* nous entendons un problème à solution et résolution unique puisque la modélisation, les conditions, les données sont imposées par l'énoncé ; à l'opposé un *problème ouvert* même s'il a une et une seule solution peut avoir plusieurs résolutions possibles.

différents et que, dans le cadre de ces choix, bien que leurs descriptions soient différentes, les raisonnements étaient également valables. Nous ne considérons pas que ce long temps passé soit du temps perdu, bien au contraire ! Il était nécessaire pour expliciter et surmonter, cette fois-là, la difficulté ; c'est du temps gagné pour la suite. Cette remarque est valide de façon générale ; passer beaucoup de temps pour surmonter une difficulté c'est acquérir des outils des moyens pour plus tard ; c'est donc du temps gagné puisqu'il y a eu un apprentissage significatif.

sans explicitation
les décisions
peuvent fluctuer.

2) Certaines conditions de fonctionnement ne sont pas précisées (certaines décisions ne sont pas prises) ce qui conduit généralement à les faire changer en cours de résolution au gré des interventions des participants du groupe ou selon la plus grande facilité du moment. En définitive, la résolution paraît incohérente et on ne sait pas à quelles conditions correspond le résultat obtenu.

Ainsi dans le problème "autoroute" (on étudie le mouvement de deux voitures qui roulent dans le même sens sur une autoroute où la vitesse est réglementairement limitée ; sur une portion avec des travaux, la vitesse est limitée à une valeur inférieure à la vitesse réglementaire : tracer l'allure de la courbe donnant en fonction du temps la distance séparant les deux voitures) à aucun moment les élèves ne précisent où se fait le ralentissement (on peut inférer que pour certains c'est avant le début des travaux -en accord avec le code de la route- alors que pour d'autres c'est à partir du début des travaux) et cet implicite perdure jusqu'à la fin, les conclusions partielles se référant à l'une ou l'autre de ces conditions.

3) Une méconnaissance de la différence de nature entre

- **des décisions** : des choix arbitraires parmi des possibles également pertinents,
- **des hypothèses** : des constructions tentatives qui prennent leur source dans les connaissances des élèves et qui tiennent compte des décisions prises,
- **des déductions faites** : le déroulement d'un raisonnement à partir de prémisses claires, et s'appuyant sur les principes et les lois de la physique.

hypothèses,
décision,
inférences ce
n'est pas la
même chose

Le statut différent de ces trois actions différentes mais interdépendantes n'est pas reconnu.

Une manifestation de cette difficulté est un emmêlement des trois actions : des hypothèses sont émises et des débuts de déductions hâtifs sont faits alors même que les conditions n'ont pas été suffisamment précisées, ce qui conduit souvent à des impasses. Par exemple dans un problème de mouvement sur un plan incliné les élèves ne font pas la différence entre l'hypothèse "vi la vitesse initiale de l'objet en mouvement est un facteur intervenant dans l'étude" et la décision " $v_i = 0$ ".

Une autre manifestation de cette non connaissance des statuts différents apparaît lorsqu'on change une (des) condition(s) de fonctionnement choisie(s), alors, pour les élèves il

s'agit d'un problème nouveau, ils ont beaucoup de mal à considérer qu'une partie des hypothèses et du raisonnement peut être conservée.

Ainsi nous avons enchaîné trois situations découlant, pour nous, l'une de l'autre : dans la première il n'y a pas de frottements, dans la seconde il y a un frottement constant (le reste étant inchangé) enfin le frottement devient proportionnel à la vitesse ; dans la présentation orale, le professeur précise la modification intervenue d'un problème à l'autre. Malgré cela, la plupart des élèves traitent les situations 2 et 3 comme des situations nouvelles en recommençant la totalité du raisonnement sans tenir compte du fait que seule une force est changée.

A propos du statut de l'hypothèse

Généralement les élèves ne savent pas ce qu'est une hypothèse ; ceci se traduit pour eux, commençant à travailler de cette façon, par certains comportements.

les arguments
employés

Ils n'argumentent que très peu et généralement se contentent d'affirmations (aussi bien comme émetteur que comme récepteur) ; ils énoncent les facteurs dont pourrait dépendre le résultat cherché sans aucune justification, sans aucune référence à des connaissances. Ils pensent en termes de certitudes, d'évidences qui n'ont pas besoin d'être questionnées ou argumentées.

Dans les séances observées les exemples en sont permanents ; c'est le comportement "normal" ; il n'y a argumentation qu'en cas de conflit, de désaccord reconnu.

variables et
paramètres

Dans une situation donnée il y a des variables (la vitesse d'un objet par exemple) et des paramètres qui ne varient pas dans cette situation mais qui pourraient avoir une autre valeur dans une expérience semblable (la masse d'un objet par exemple). Les élèves ont beaucoup de mal à faire intervenir des paramètres comme hypothèse (puisque dans l'expérience étudiée ils ne varient pas !). Un paramètre particulier g (intensité de la pesanteur) est encore plus problématique que les autres (et c'est bien compréhensible puisque g garde la même valeur dans la très grande majorité des expériences étudiées). La plupart des groupes ignorent complètement ce paramètre lors de l'émission des hypothèses et quand, parfois, l'un des membres du groupe le propose les autres le refusent, souvent avec violence.

Ainsi dans le problème "skate board" (où l'on cherche à déterminer la vitesse acquise par un sportif sur sa planche au bas d'une pente sachant que la force de frottement peut être considérée comme constante le long de la pente) un seul groupe sur les cinq propose g comme paramètre intervenant dans la valeur de cette vitesse.

Pour beaucoup d'élèves trouver un paramètre qui explique une variation est suffisant, il est inutile de pousser l'analyse plus loin et de chercher d'autres causes. En fait, le plus souvent, ils n'émettent pas des hypothèses ils cherchent des facteurs explicatifs et un seul leur suffit.

- Difficultés liées à l'élaboration de plusieurs chemins de résolution

A propos de "plusieurs"

une solution
suffit!

Un des aspects les plus nouveaux de notre façon d'envisager la résolution de problèmes par rapport à la tradition est la demande de prendre en considération plusieurs chemins de résolution possibles (même si on ne les mène pas tous jusqu'au bout). Les élèves, au début, résistent à cette demande. On peut rapprocher ceci de difficultés déjà signalées : celle de prendre en compte plusieurs paramètres et celle de prendre conscience des choix implicitement faits. Un même comportement les sous-tend : ils ont trouvé une solution (un paramètre qui explique ou un chemin pour résoudre ou une façon de fonctionner) cela suffit, il est inutile de poursuivre plus loin !

définition n'est
pas chemin de
résolution

Souvent un chemin de résolution apparaît évident aux élèves, c'est l'utilisation de la définition générique formelle (la formule qui a servi pour définir la grandeur cherchée à partir de grandeurs déjà connues). Ce chemin de résolution est tellement prégnant pour les élèves qu'ils tentent de le mettre en oeuvre même s'il n'est pas viable dans la situation particulière étudiée.

Par exemple dans un problème où il leur est demandé de calculer un travail ils ne voient pas d'autres voies possibles que l'application de la formule $W = F \cdot l$. Ils ne pensent pas à relier ce travail à d'autres grandeurs physiques (l'énergie cinétique par exemple).

Une autre manifestation de cette difficulté à propos des chemins de résolution différents concerne les conditions de validité. Lorsqu'on demande aux élèves d'envisager un deuxième chemin, ils ne remettent pas en question systématiquement les choix stratégiques faits pour mettre en oeuvre le premier. Ils les reconduisent sans se demander s'ils sont encore valides.

Par exemple après avoir traité un problème (de chute libre) en appliquant le théorème de l'énergie cinétique (l'objet tombant étant le système pertinent), lorsqu'on leur demande d'utiliser la variation de l'énergie mécanique comme deuxième chemin de résolution possible ils conservent le même système, sans aucune réflexion à ce sujet (alors qu'il faut changer de système étudié et considérer l'ensemble objet-Terre, ou objet dans le champ de pesanteur) ce qui les conduit à une erreur.

A propos de "élaborer"

Les élèves planifient difficilement la résolution entière et conçoivent rarement l'ensemble du chemin du début jusqu'au résultat, à exécuter pas à pas. De façon plus détaillée nous décrirons des manifestations plus ponctuelles et plus facilement observables.

les hypothèses
pour planifier

N'ayant pas été initiés à ce genre de démarche, ils n'utilisent pas les hypothèses comme guide pour la planification. Ceci se manifeste dans des difficultés à choisir le système, et/ou la (les) phase(s) à prendre en compte. Si les hypothèses étaient claires et servaient de guide ces choix se feraient plus explicitement sur des bases solides et non pas de façon arbitraire voire changeante en cours de résolution ! De la même façon on constate que parfois, la mise en équation est faite avec des grandeurs physiques autres que celles concernées par les hypothèses ce qui prouve bien que celles-ci ne sont pas utilisées comme guide.

refus des
variables
intermédiaires

Une autre difficulté de la planification concerne les variables intermédiaires (des grandeurs que l'on ne connaît pas, que l'on ne cherche pas, mais qu'il faut momentanément utiliser avant de les éliminer). Les élèves ont beaucoup de mal à identifier et à donner leur statut à de telles variables intermédiaires. Souvent ils refusent un chemin de résolution qui en fait intervenir parce qu'ils n'ont pas suffisamment anticipé, qu'ils n'ont pas vu qu'à la fin, elles disparaîtront, et que ne pas avoir les moyens de les connaître n'a pas d'importance.

Nous avons rencontré cette attitude chaque fois que la résolution demandait l'utilisation d'une variable intermédiaire. Ainsi dans le problème "flipper" (une bille lancée par un ressort qui se décomprime parcourt d'abord un plan horizontal puis monte le long d'un plan incliné ; il n'y a pas de frottements et on demande de relier la hauteur h atteinte par la bille sur le plan incliné au travail donné par le ressort) le chemin de résolution utilisant la vitesse de la bille lors de sa séparation d'avec le ressort comme variable intermédiaire (chemin pertinent et seul possible en classe de Première) est évoqué par l'un des élèves mais refusé par les autres "parce qu'on ne connaît pas cette vitesse "

Une autre manifestation du manque d'anticipation, de vision globale de la résolution est la suivante : nous n'avons jamais vu les élèves utiliser spontanément la comparaison entre nombre de relations indépendantes possibles et nombre d'inconnues alors que cette comparaison serait un indicateur de planification. En effet cette heuristique générale demande de prendre en compte l'ensemble des informations disponibles, la demande du problème et le principe à utiliser (sans résoudre mathématiquement pour autant) ; c'est donc bien une anticipation de l'ensemble du chemin de résolution qui est en question.

• Difficultés liées à l'analyse des résultats

Dans l'enseignement traditionnel il arrive que l'on vérifie le résultat obtenu (ordre de grandeur, cohérence de la précision du résultat avec celle des données, analyse dimensionnelle...). Pour nous il ne s'agit pas seulement d'une vérification, il s'agit d'une véritable analyse au cours de laquelle on confronte le résultat et les hypothèses, le résultat et les connaissances de physique que l'on a déjà. Il ne suffit pas

confronter
résultat et
hypothèses

de s'assurer que le résultat est crédible il faut le questionner en profondeur, aller aux limites pour, éventuellement, mettre à jour des incohérences. La description la plus globale des difficultés des élèves vis-à-vis de cette activité peut être faite en terme de comportement : leur tendance est de conforter, pas de mettre en question. Ils cherchent à vérifier que "c'est bon", "que ça marche" et se contentent d'un premier accord même superficiel, ils ne cherchent pas de contre-exemples. Nous allons maintenant décrire des manifestations plus ponctuelles de ce comportement.

remettre en
question les
hypothèses

En cas de désaccord entre les hypothèses et le résultat, leur première et seule réaction est de refaire les calculs, ce qui n'est pas stupide compte tenu de ce que nous savons sur leurs étourderies en mathématiques, mais qui souvent se révèle insuffisant.

Ce comportement peut être interprété comme une conséquence de ce que nous avons développé plus haut à propos de la non connaissance du statut de l'hypothèse. Si les hypothèses étaient vraiment des hypothèses elles pourraient être questionnées.

Un exemple observé est le suivant : au cours du problème "objet jeté vers le haut" (on lance un objet vers le haut : déterminer la hauteur qu'il atteindra) après avoir cherché les facteurs dont dépend la hauteur h les élèves avaient effectivement calculé cette hauteur en appliquant le théorème de l'énergie cinétique au système objet ; à l'incitation du professeur ils ont recalculé cette hauteur en utilisant la conservation de l'énergie mécanique, ceci sans remettre en question le système utilisé (comme déjà signalé à propos du problème de chute libre) ce qui conduit à une erreur, le travail du poids étant compté deux fois. Face à ces deux résultats différents leur réaction est de reprendre les calculs depuis le début dans les deux démonstrations ; cette première vérification ne leur permettant pas de sortir de l'impasse, ils la recommencent deux fois puis appellent le professeur au secours. Une nouvelle explication à propos de l'énergie potentielle, du système concerné... a, dans ces conditions, toutes les chances d'être bien reçue et efficace.

Dans l'analyse du résultat ils ne cherchent pas les limites du champ de validité ; ils ne relient pas conditions d'étude choisies au début et champ de validité du résultat obtenu. Il semble qu'ils n'aient pas du tout l'idée que, puisque des conditions de fonctionnement sont fixées, par là même, est fixé un champ de validité restreint au résultat.

- Difficultés affectant tout le processus de résolution

Les difficultés que nous décrivons maintenant concernent tout le processus de résolution et se retrouvent plus ou moins dans toutes les activités.

De façon générale les élèves verbalisent très peu, il est très difficile d'obtenir d'eux qu'ils expliquent ce qu'ils font. Ils agissent, écrivent des formules, font des calculs mais argu-

peu de verbalisation

mentent peu ne justifient que très rarement, n'expliquent pas. Une analyse superficielle pourrait rattacher ceci à des problèmes de maîtrise du langage "ils ne savent pas s'exprimer !". Notre interprétation est que les racines de ce comportement sont au niveau de la compréhension de la physique et d'une pensée en termes d'évidences (qui n'ont donc pas besoin d'être expliquées ou argumentées).

les effets de fixation

Souvent des erreurs sont dues à ce que nous appelons des "effets de fixation". Les notions sont introduites, et c'est incontournable, dans un certain ordre. Par exemple on rencontre en premier le travail d'une force constante au cours d'un déplacement rectiligne ; on reste à ce niveau longtemps sans rien connaître d'autre ; ensuite on évolue vers des situations plus complexes. Alors on voit fréquemment apparaître $W = F \cdot L$ même si la force n'est pas constante ou le déplacement non rectiligne. C'est cela que nous appelons un effet de fixation : un cas particulier simple étudié en premier devient, pour les élèves, la règle générale, universelle, toujours valable.

Tout au long du processus la symbolisation est difficile : quelles lettres choisir pour représenter les grandeurs dans les cas où la tradition n'en impose pas ou dans les cas où il y a possibilité d'ambiguïté. Mais aussi, et ceci est plus délicat, comment indiquer les symboles ? Faut-il 0, 1, 2 indices ou plus ? Comment choisir ces indices pour à la fois avoir les notations les plus claires et les plus simples possibles ?

Nous avons fréquemment constaté ces difficultés tout spécialement à propos des analyses temporelles où il est nécessaire d'indiquer de façon cohérente les phases à partir des instants et les autres grandeurs physiques en relation avec la phase concernée ; une indiciation non commune aux différents membres du groupe conduit certains groupes dans une impasse totale. De fait, cette opération d'indiciation traduit une analyse très profonde de la situation étudiée : choisir de mettre deux indices (v_{A1} par exemple) traduit le fait que pour une même grandeur physique (ici v la vitesse) on aura besoin de repérer deux caractéristiques différentes (A le corps concerné et 1 l'instant concerné par exemple). Cette opération d'indiciation est donc loin d'être triviale, il n'existe pas de "recette" générale ; il n'est donc pas surprenant que les élèves ne sachent pas le faire. Dans la pédagogie traditionnelle ce travail de symbolisation est déjà fait, l'énoncé donne toutes les notations (qui, bien sûr, respectent les deux critères de simplicité et de non ambiguïté) cet embarras des élèves ne peut donc pas apparaître. Mais comme il n'ont jamais à faire ce travail ils ont peu de chances d'apprendre à le faire.

refus de l'insécurité

Nous pourrions résumer tout ce que nous avons décrit dans ce paragraphe en disant que les élèves refusent l'insécurité, l'erreur, les impasses et les retours en arrière ce qui révèle une méconnaissance épistémologique de la démarche scientifique.

4.3. Difficultés liées à la situation de travail, aux interactions sociales

Nous distinguerons deux catégories : celles liées à ce qui se passe à l'intérieur d'un petit groupe et celles liées aux interactions entre groupes.

- Intra-groupe

le conflit affectif
contre le conflit
cognitif

Différents travaux (entre autres Perret-Clermont, 1979 et Mugny, 1985) ont montré le rôle positif du conflit socio-cognitif pour la construction des connaissances mais il arrive que certains groupes fonctionnent au niveau d'un conflit affectif. Dans ces cas le résultat peut être un blocage. En effet, au lieu de coopérer, les participants du groupe, se contrent mutuellement, s'empêchent d'avancer pour que personne ne puisse avoir le rôle de leader. Nous avons rencontré une telle situation une fois au cours de notre expérimentation ; en général, au contraire les groupes sont plutôt coopératifs.

Une autre difficulté liée au travail en groupe est due au fait que les différents élèves ont des rythmes de travail différents ; mais ceci existe toujours et n'est pas pire en travail de groupe que dans les autres dispositifs d'enseignement.

Le nombre des participants à un groupe est critique. S'il est trop faible il n'y a pas assez d'idées différentes à confronter (on s'éloigne peu du travail individuel) ; s'il est trop élevé le groupe se scinde en sous-groupes, il existe des dialogues différents qui se croisent et le risque est celui de la confusion totale. Dans notre expérience les groupes allaient de 2 à 5 participants. A 2 cela fonctionnait très bien mais ils n'y avait pas assez d'apports différents, à 5 la dispersion était importante ; pour le travail proposé le groupe de 3 nous a semblé le meilleur.

les dangers de la
spécialisation

Un autre risque du travail en groupe est celui souligné par Meirieu, (1987) : celui de la spécialisation, chacun faisant ce qu'il sait déjà faire, ce pour quoi il est compétent, et ne cherchant pas à faire le reste (ce qui est antinomique avec l'idée d'apprentissage).

Nous avons vu cette dérive dans un groupe où, systématiquement, l'un s'intéressait à tout ce qui était analyse qualitative puis passait la main à un autre qui effectuait la formalisation et les calculs.

- Inter-groupe

Nombreux sont les élèves qui s'expriment à l'intérieur d'un petit groupe mais qui, face à la classe entière n'osent plus. Ils ont peur de se tromper, de dire des "bêtises" et s'autocensurent à tel point qu'ils évacuent toute idée un peu originale ne correspondant pas à ce que les autres ont déjà dit.

la
communication
entre groupes

Au cours des séances, nous avons constaté de grands progrès sur ce point ; travailler en groupe et communiquer n'est pas spontané, là aussi un temps d'apprentissage est nécessaire.

Il arrive que la communication entre les groupes se fasse mal ; chacun des groupes reste autocentré et ne s'intéresse pas à ce qu'ont fait les autres. Dans ces cas il est difficile de démarrer la discussion de la classe entière qui pourtant est critique dans cette façon de travailler.

Malgré toutes ces difficultés nous restons persuadés que le travail en groupe est positif. D'une part toutes les recherches autour du conflit socio-cognitif (Mugny, 1985 ; Perret Clermont, 1979) le prouvent ; d'autre part les avis des élèves sont très majoritairement positifs.

CONCLUSION

Nous avons fixé deux objectifs à ce travail :

- premièrement vérifier que les tâches utilisées et le mode de travail employé permettraient aux élèves d'exprimer et de prendre conscience de leurs difficultés. Ce premier objectif semble largement atteint ;
- deuxièmement mettre en place un cadre d'analyse désenglué des situations particulières, se situant à un niveau suffisamment général pour que chaque difficulté spécifique révélée dans un problème particulier puisse être interprétée comme une incarnation d'une difficulté d'ordre plus général rattachée à l'une des activités cognitives de la résolution. Nous avons construit ce cadre et nous avons vérifié qu'il fonctionne effectivement : d'une part les nombreuses difficultés observées au cours de nombreux problèmes, tous différents, s'interprètent dans ce cadre et, d'autre part, on trouve des expressions particulières différentes d'une même difficulté dans plusieurs problèmes (même si nous ne donnons qu'un seul exemple à chaque fois).

Les relations possibles entre les différentes catégories n'apparaissent pas dans ce cadre d'interprétation : certaines difficultés pourraient être considérées comme conséquences d'autres préalables mal surmontées. Ceci mériterait une étude plus approfondie.

Si nous avons systématiquement cherché à révéler et à interpréter des difficultés des élèves habituellement cachées ce n'est pas pour être négatifs et désespérer les enseignants en leur annonçant des obstacles nouveaux !

une grille de
lecture

Cette analyse peut être utilisée comme une grille de lecture de ce que font les élèves. Elle permet de dépasser le niveau de la simple constatation d'une erreur particulière pour

dépasser les
difficultés

interpréter à un niveau plus général qui reste le même d'un problème à l'autre. C'est donc un moyen de diagnostic et de suivi des élèves ; on peut ainsi suivre pour chaque élève les progrès vis-à-vis de tel ou tel élément de la résolution.

Partant de cette analyse, on peut aussi mieux prévoir et mieux gérer les activités de résolution de problèmes (mieux au sens de «étant plus efficaces vis-à-vis de l'apprentissage»). A partir du moment où les difficultés des élèves ont été cernées, situées, interprétées, il est plus facile d'envisager des moyens d'apprentissage correspondants. Ainsi les travaux faits d'une part en Espagne d'autre part en France montrent qu'il est possible d'aider les élèves à dépasser l'état initial décrit ici.

Les travaux de l'équipe espagnole qui a utilisé l'orientation "résolution de problèmes comme des activités semblables à des recherches" systématiquement et pendant une année entière avec les mêmes élèves montre une nette amélioration sur bien des points et en particulier sur l'émission d'hypothèses, l'élaboration de stratégies et la verbalisation.

En France, les aides cognitives élaborées par le groupe PRO-PHY, enseignées comme des heuristiques et des méthodes (partielles) de résolution ont été assimilées par les élèves et leur ont permis, effectivement, d'affronter certaines activités, qui, habituellement, créaient des obstacles. C'est le cas pour les analyses spatiales et temporelles. A propos de ces activités-là nous avons constaté que, très rapidement (2 ou 3 séances), les élèves faisaient ces analyses sans hésitations, pratiquement sans erreurs et surtout sans angoisses, avec une certaine assurance.

Andrée DUMAS-CARRÉ
Monique GOFFARD
GDSE P7 - LIREST,
Université Paris VII (France)

Daniel GIL
Département de Didactique
des Sciences,
Université de Valencia (Espagne)

RÉFÉRENCES

- BACHELARD, G. (1938) *La formation de l'esprit scientifique*. Paris : Vrin.
- CAILLOT, M. & DUMAS-CARRÉ, A. (1987) "Résolution de problèmes et apprentissage de la physique". In *Didactique et acquisition de connaissances scientifiques*. Paris : La pensée sauvage.
- CAILLOT, M. & DUMAS-CARRÉ, A. (1989) "Teaching decision making to solve textbook problems". In Ed Mandl H., de Corte E., Bennett N., Freidrich H.F.(Eds) *Learning and instruction*, Vol 2.2 ,67-84. Oxford : Pergamon press.
- CHI, M.T.H., GLASER, R. & REES, E. (1982) "Expertise in Problem Solving", In R STERNBERG (Ed) *Advances in Psychology of Human Intelligence 5* vol 1, 7-75. Hillsdale N J. : L.E.A.
- DRIVER, R. & OLSDHAM, 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 ; Le Procédural : Apprentissage et Evaluation*. Thèse d'état Université Paris 7.
- DUMAS-CARRÉ, A., CAILLOT, M., MARTINEZ TORREGROSA, J. & GIL, D. (1989) "Deux Approches pour Modifier les Activités de Résolution de Problèmes dans l'Enseignement Secondaire. Une Tentative de Synthèse". *ASTER* 8, 135-160.
- GARETT, R. M. (1986) "Problem Solving and Creativity in Science Education". *Studies in Science Education* 13, 70-95.
- GARETT, R.M., GIL, D., MARTINEZ TORREGROSA, J. & SATTERLY, D. (1990) "Turning Exercises into Problems ; An Experimental Study with Teachers in Training", *International Journal of Science Education* 12 (1), 1-12.
- GIL, D. & MARTINEZ TORREGROSA, J. (1983) "A Model for Problem Solving in Accordance with Scientific Methodology". *European Journal of Science Education*. 5, 447-455.
- GIL, D. & MARTINEZ TORREGROSA, J.(1984) "Problem Solving in Physics : a Critical Analysis", In *Research on Physics Education*, Paris : Editions C N R S.
- GIL, D. & MARTINEZ TORREGROSA, J. (1987) "La résolution de problèmes comme activité de recherche ; un instrument de changement conceptuel et méthodologique". *Petit X* . 14-15, 25-38.
- GIL, D., MARTINEZ TORREGROSA, J. & SENENT, F. (1988-a) "El aprendizaje de conceptos científicos : aspectos epistemológicos, cognitivos y lingüísticos. *Ensenanza de las ciencias* . 6(2), 131-146.

GIL, D., DUMAS-CARRÉ, A., CAILLOT, M., MARTINEZ TORREGROSA, J. & RAMIREZ CASTRO, L. (1988) "La Resolución de Problemas de Lapiz y Papel Como Actividad de Investigación". *Investigación en la Escuela* . 6, 3-20.

GIL-PEREZ, D., DUMAS-CARRÉ, A., CAILLOT, M. & MARTINEZ TORREGROSA, J. (1990) "Paper and pencil problem solving in the physical sciences as a research activity". *Studies in Science Education* . 18, 137-151.

GIL, D. (1991) "Que hemos de saber y saber hacer los profesores de ciencias ?" *Ensenanza de las ciencias*. 9(1), 69-77.

GOFFARD, M. (1990) *Modes de Travail Pédagogiques et Résolution de Problèmes en Physique*. Thèse ; Université Paris 7.

KRULIK, S. & RUDNIK, K. (1980) *Problem Solving in School Mathematics, National Council of Teachers of Mathematics*. Reston Virginia : Year book.

LARKIN, J.H., & REIF, F. (1979) "Understanding and teaching problem solving in physics", *European Journal of Science Education* 1, 191-203.

MARTINEZ TORREGROSA, J. (1987) *La Resolución de Problemas de Física como Investigación : un Instrumento de Cambio Metodológico*. Thesis Doctoral, Université de Valencia.

MEIRIEU, P. (1987) *Outils pour apprendre en groupe*. Lyon : Chronique Sociale.

MUGNY, G. (1985) *Psychologie Sociale du Développement Cognitif*. Berne : Peter Lang.

PERRET-CLERMONT, A. N. (1979) *La Constuction de l'intelligence dans l'interaction sociale*. Berne : Peter Lang.

POSNER, G., STRIKE, K., HEWSON, P. & GERTZOG, W. (1982) "Accomodation of a scientific conception : Toward a theory of conceptual change". *Science Education* 66(2) , 211-217.

PROPHY, (1987) *Une Méthode pour Résoudre des Problèmes de Physique*. Paris, Publication n° 167 LIRESPT ASSOCIATION Tour 123.

RAMIREZ CASTRO, L. (1990) *La Resolución de Problemas de Física y de Química como Investigación en la Enseñanza Media : un Instrumento de Cambio Metodológico*. Thesis Doctoral Université Autonome de Barcelone.

ANNEXE

Les aides à l'élaboration de la représentation du problème (en mécanique au lycée) mises au point par le groupe "PROPHY" engagent les élèves dans une double démarche analytico-synthétique s'appuyant sur des représentations symboliques (diagrammes, schémas...). La partie analytique consiste à décomposer la représentation totale en plusieurs analyses partielles chacune centrée sur un type de descripteur physique ; la partie synthétique consiste à relier ces différentes représentations partielles. Ainsi les différentes activités demandées aux élèves sont :

- La "**représentation temporelle**" qui demande d'analyser le déroulement au cours du temps du phénomène étudié, de repérer les "instants caractéristiques" et les "phases", d'attribuer à chacun un symbole et un (des) indice(s).
- En complétant par des schémas représentant les objets et leurs positions relatives à chaque instant caractéristique et à chaque phase, on obtient une "**représentation spatio-temporelle**".
- Une **analyse cinétique** permet de décrire, en termes de vitesses, autant que faire se peut, le mouvement des différents objets au cours de chaque phase et ceci à partir des informations de l'énoncé et d'inférences immédiates, sans traitement formel et sans mise en œuvre de principes. Après une **indiciation des vitesses** (cohérente avec celle faite au début) cette analyse cinétique complète la représentation spatio-temporelle déjà établie (figure 1 a).
- La **représentation interactionnelle** clot la représentation. Nous avons pris le parti de faire représenter les interactions entre objets et non pas les forces pour la raison suivante : l'interaction est symétrique, prend en compte, à égalité, les deux objets concernés alors que représenter des forces ne peut être fait que si on a déjà choisi "un point de vue" c'est-à-dire si on a désymétrisé la situation étudiée en donnant à l'un des objet le statut de "système étudié", tous les autres objets devenant "le reste de l'univers" ; or, nous n'en sommes pas encore là ! Nous n'en sommes qu'à essayer de comprendre ce qui se passe et à en faire une représentation en termes de grandeurs physiques ; le choix du système ne peut se faire qu'à partir de celles-ci et de la question posée. En représentant les interactions ce problème ne se pose pas. Pour réaliser concrètement cette représentation interactionnelle nous avons mis au point le "*Diagramme Objets-Interactions*" (figure 1-b) dans lequel les objets sont repérés par leurs noms (sans tenir compte des positions relatives et des formes) et les interactions par des doubles flèches reliant les deux objets impliqués (de plus les interactions de contact et à distance sont différenciées par des codes différents). A chaque phase est associé un *Diagramme Objets-Interactions*.

Nous appelons "*bande dessinée du problème*" le produit final de ce travail (figure 1). Cette bande dessinée a été élaborée en centrant l'analyse successivement sur le temps, l'espace, les mouvements et les interactions mais des allers et retours sont en général nécessaires. L'analyse du but du problème fait partie de cette représentation : il s'agit d'explicitement la demande, éventuellement de la traduire d'une formulation événementielle en une formulation en termes de grandeurs physiques.

La représentation du problème ainsi élaborée présente les avantages suivants :

- elle est compacte, articulée, systématique,
- elle est extériorisée sur le papier et non plus seulement "dans la tête", par là même elle peut devenir un objet de communication, de discussion,

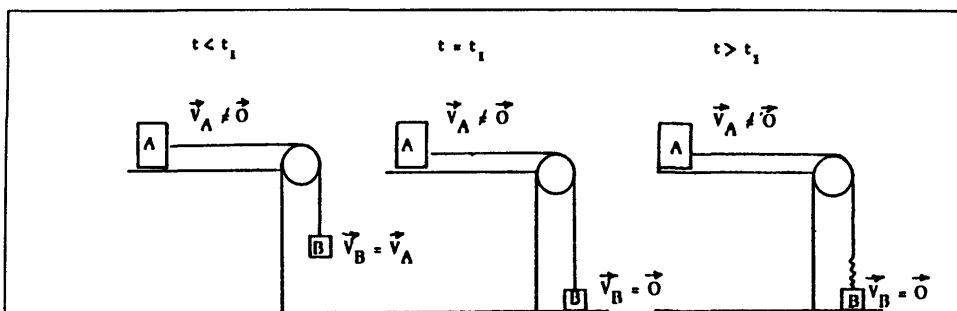


Figure 1 a

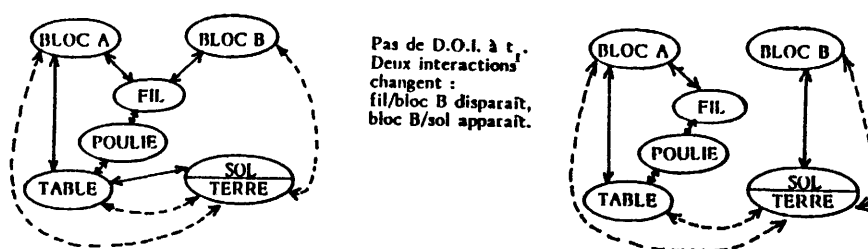


Figure 1 b

Figure 1

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 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) À l'instant t_1 , le bloc B touche le sol ; déterminer la valeur de l'accélération de A à cet instant.

- elle est "permanente", ne risque pas d'être oubliée comme c'est souvent le cas quand elle est seulement interne. Ceci permet un comportement plus heuristique tout en étant raisonné et conscient, s'éloignant de l'essai-erreur sauvage. En effet, à partir de cette *bande dessinée*, il est facile de tenter des choix et/ou des stratégies de résolution ; si cela ne marche pas il est toujours possible d'essayer autre chose à partir de la représentation du problème sans devoir tout recommencer.

GUIDER LE RAISONNEMENT D'ÉLÈVES DE COLLÈGE AVEC DES MODÈLES PARTICULAIRES DE LA MATIÈRE

Marie-Geneviève Séré

Au cours de cette expérience pédagogique, nous avons fait décrire à des élèves de collège les principales étapes d'une démarche expérimentale. Ils ont eu le loisir d'observer des expériences et de les interpréter avec leurs modèles spontanés jusqu'à ce qu'ils se trouvent confrontés à des contradictions. L'enseignant a pris en compte les conflits qui ont surgi à cette occasion, conflits que nous décrivons comme socio-cognitifs. Deux modèles particuliers de la matière, aptes à dépasser ces conflits, ont alors été exposés aux élèves. Ceux-ci ont ainsi été en situation de lire les mêmes expériences à des niveaux différents, de s'approprier des modèles qui leur étaient imposés (comme c'est souvent le cas dans l'enseignement), et de comprendre que de nouvelles expériences conduisent parfois à remplacer un modèle par un autre. Dans cette démarche guidée d'appropriation de modèles, les élèves ont mis en oeuvre des opérations intellectuelles dont certaines sont bien, à un niveau élémentaire, celles du raisonnement scientifique.

amener les
élèves de collège
à un savoir de
type
scientifique...

...et à faire
différentes
lectures des
mêmes
expériences

Les expériences pédagogiques que nous allons relater ont engagé les élèves dans la pratique du raisonnement scientifique. Leur âge, onze ou douze ans au début de l'expérience qui s'est étalée sur deux années scolaires, fait qu'il s'agit d'un tout début, d'une initiation, telle qu'elle peut être proposée au niveau du collège. Mais dans cette initiation, étaient présents de nombreux aspects du raisonnement scientifique, c'est-à-dire d'une activité intellectuelle dont le terme est un savoir scientifique. La notion de modèle se trouvait au centre des objectifs des séquences didactiques qui ont constitué l'essentiel de l'expérimentation, puisque le thème de l'enseignement était la modélisation particulière de la matière.

Nous avons souhaité contraster deux "lectures" que peuvent faire des élèves de cet âge, d'un corpus d'expériences de physique et de chimie. La première est une lecture spontanée, alors qu'ils ne disposent encore que de leurs propres conceptions, ce que certains auteurs appellent des modèles spontanés. Ces modèles sont connus, dans leur grande ligne, pour les élèves de cet âge (Séré 1985). La seconde lecture, beaucoup moins spontanée, est celle qu'ils font quand une modélisation des situations, ainsi que les concepts physiques qui les décrivent leur ont été fournis au cours de l'enseignement.

les deux modèles particuliers sont des modèles dynamiques

Les élèves ont eu à utiliser et à appliquer deux modèles différents à un an d'intervalle. Les modalités de passage ont été étudiées par ailleurs (Séré 1989). Le premier était un modèle particulière de la matière à l'état gazeux, rendant compte des propriétés physiques d'un gaz à l'équilibre (covariations et contravariations des grandeurs masse, volume, quantité, pression, forces pressantes). Le deuxième était également un modèle particulière de la matière à l'état gazeux, présentant quelques différences avec le premier, de façon à rendre compte de certaines réactions chimiques où interviennent des gaz (combustions dans l'air et dans le dioxyde de carbone). L'originalité de ces deux modèles par rapport à ceux que, classiquement, on propose aux élèves de collège, est que, d'emblée, ils décrivent le mouvement de particules. Ce sont les conceptions des élèves qui ont directement dicté ce choix.

Les observations dont nous disposons pour cet ensemble d'expériences pédagogiques sont de deux types :

- 1) des séquences d'enseignement organisées suivant une méthodologie mise au point par A. Tiberghien (Tiberghien 1980). Il s'agit d'un enseignement sous la responsabilité d'un enseignant de Sciences Physiques, destiné à une dizaine d'élèves volontaires qui s'engagent à venir travailler après la classe pendant plusieurs semaines. Ils savent qu'un chercheur observera l'ensemble des séances qui seront également enregistrées en vidéo. Les élèves sont invités à s'exprimer très librement et à proposer des expériences. Les élèves que nous avons observés étaient en 6ème la première année (ils avaient 11 ou 12 ans). Certains sont revenus l'année suivante, étant en 5ème.
- 2) des entretiens individuels réalisés par l'enseignant ou le chercheur avec chaque élève avant et après chaque séquence d'enseignement. Ils ont été enregistrés et transcrits intégralement.

Nous analyserons ces deux types de données d'un triple point de vue :

- 1) Un point de vue épistémologique

Il s'est en effet agi pour les élèves de mettre en oeuvre des modèles successifs, et nous nous sommes efforcés de leur faire comprendre quelques spécificités des modèles en physique, en particulier le fait que la modélisation de la matière est multiple et que les contradictions se révélant à l'occasion de l'interprétation de nouvelles expériences, peuvent amener à modifier un modèle.

- 2) Un point de vue cognitif explicitant les opérations intellectuelles mises en oeuvre par les élèves, dans le but de discerner celles qui sont et celles qui ne sont pas constitutives d'un raisonnement scientifique

les recherches de cohérence sont la base indispensable d'un raisonnement scientifique

Les premières sont essentiellement des recherches de cohérence et des inférences. Elles se manifestent par la reconnaissance d'une unité dans l'interprétation d'expériences

différentes et par l'acquisition de schèmes de conservation. Les inférences sont de différents types (déduction, induction essentiellement) et permettent l'interprétation des phénomènes observés.

3) Un point de vue psychologique de façon à décrire les conditions dans lesquelles ces activités cognitives ont pu être mises en oeuvre

certaines conditions psychologiques sont favorables à l'élaboration d'un savoir

Nous décrivons donc le contexte pédagogique. Après une phase où les interprétations spontanées étaient privilégiées, les élèves ont dû faire fonctionner les modèles exposés. Nous décrivons aussi tous les événements qui ont favorisé l'expression personnelle, les échanges entre élèves ainsi que les conflits qui ont surgi au sein du groupe.

Dans une première partie, nous décrivons les séquences d'enseignement. Puis nous suivrons l'ordre chronologique pour décrire les raisonnements des élèves et les analyser. En premier lieu nous rendrons compte de leur évolution du point de vue des schèmes de conservation nécessaires à la formation des concepts décrivant la matière. Nous montrerons ensuite comment les élèves s'approprient successivement les deux modèles enseignés. La conclusion tentera de dégager en quoi, dans ce contexte de guidage, certaines des démarches de pensée des élèves participent d'un raisonnement scientifique.

1. DESCRIPTION DES SÉQUENCES D'ENSEIGNEMENT

Une première séquence a été réalisée dans un collège de Paris. Elle s'adressait à dix élèves. Cette séquence a été dupliquée dans un collège de Sannois et prolongée l'année suivante avec les mêmes élèves. Vingt élèves au total ont ainsi été impliqués.

1.1. L'expérience de Paris : les élèves passent d'un modèle macroscopique de la matière à un modèle microscopique

Nous exprimons notre reconnaissance à Monsieur Alain Chomat qui a été l'enseignant responsable de cette séquence.

l'étude des grandeurs quantité, volume et masse d'un gaz a précédé celle des forces pressantes

Le thème général était : "Les propriétés physiques des gaz. Les forces qu'ils exercent. Interprétation par le concept de pression." Il a d'abord été étudié au niveau macroscopique pendant quelques séances qui constituent la séquence que nous appellerons "Paris 0". Les activités tendaient en premier lieu à faire acquérir les concepts de quantité, volume et masse de l'air et des gaz.

L'étape suivante était l'acquisition de la notion de force exercée par l'air.

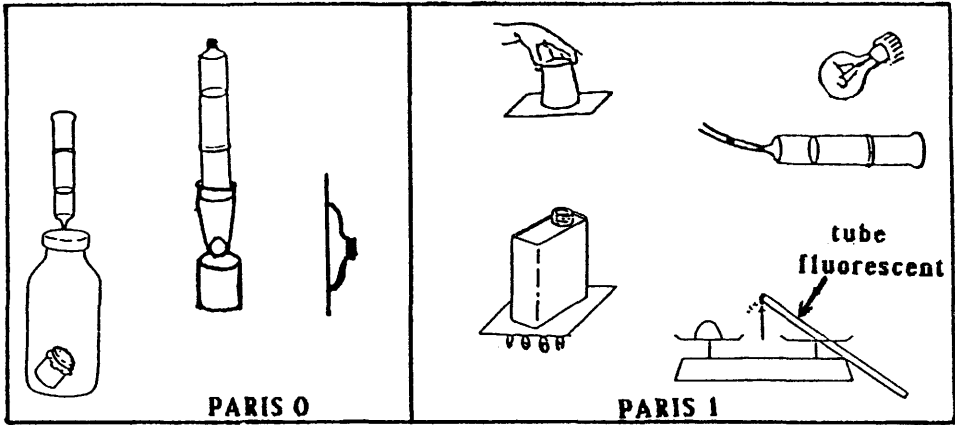


Figure 1
(extraite de Séré M.G. 1990)

les élèves ont
réalisé eux-
mêmes des
expériences et
répondu à des
problèmes
expérimentaux

les élèves ont des
exigences de
cohérence et
n'acceptent pas
tout ce qu'on
leur dit

La figure 1 montre les principales expériences réalisées dans ce but :

- un problème expérimental : ayant distribué des petites capsules (boîtes fermées dont une paroi est constituée par une baudruche), l'enseignant demandait : "Imaginez comment on pourrait gonfler cette "capsule" sans y toucher". Les élèves ont choisi de se servir d'un bocal et d'une seringue en communication avec son intérieur.
- chercher la masse que l'on peut suspendre au piston d'une seringue bouchée sans que celui-ci tombe.
- la ventouse.

C'est à ce sujet que des difficultés surgirent : les élèves eurent à préciser et formuler leur refus des interprétations données par l'enseignant. Pour eux, il y avait non-cohérence avec ce qu'ils observaient. Aussi nous avons décidé de changer profondément les activités que nous avons projetées.

A la séance suivante nous avons distribué un texte contenant un modèle particulière de la matière et propre à répondre aux objections à nos interprétations. Ce texte est donné par la figure 2. Nous l'appellerons le "modèle 1".

Toute quantité de gaz est formée de petites particules qui ressemblent à des boules. Ces boules sont tellement petites qu'on ne les voit pas.

Chacune de ces boules, bien que minuscule, a une masse (un poids).

Ces petites boules sont sans arrêt en mouvement : on sait même qu'elles décrivent des droites à grande vitesse.

Quand l'une d'elles en heurte une autre, elles rebondissent l'une sur l'autre. De même, quand elle heurte quelque chose (la paroi d'une seringue, ou un morceau de baudruche ou n'importe quel objet plongé dans le gaz), elle rebondit. Sans cela, tant qu'elle ne rencontre rien, une petite boule va tout droit.

Donc tout objet plongé dans le gaz est sans arrêt bombardé par des millions de petites boules. et si cet objet peut bouger (c'est le cas pour un morceau de baudruche), il se trouve poussé par ce bombardement et même déplacé. S'il y a du gaz qui le touche des deux côtés, il est poussé des deux côtés : c'est le côté où les bombardements sont les plus nombreux qui gagne.

Plus les particules sont tassées, c'est-à-dire plus elles sont nombreuses par unité de volume, plus les bombardements sont nombreux et la poussée forte.

Quand on chauffe le gaz, les particules vont plus vite. Le bombardement devient plus rapide.

Les liquides sont aussi formés des mêmes particules, mais très rapprochées les unes des autres.

Les solides sont aussi formés de ces particules, mais elles sont non seulement très proches les unes des autres, mais encore solidement reliées les unes aux autres.

Figure 2
Le "modèle 1"

Nous appelons "**Paris 1**" la phase suivante pendant laquelle les élèves ont commenté le modèle 1 et dû l'utiliser dans leurs interprétations. Malgré cette contrainte, ils s'exprimaient très librement et ont pu, comme nous le verrons, poser de nombreuses questions. les principales expériences réalisées sont représentées par la figure 1 :

- l'expérience du verre plein d'eau recouvert d'un carton, que l'on renverse sans que l'eau s'écoule.
- l'expérience du bidon métallique que l'on vide de l'air qu'il contient et qui s'écrase sous l'action de la pression atmosphérique.
- la dilatation de l'air d'une seringue, caractérisée par le déplacement d'une goutte colorée située dans un tube prolongeant la seringue.
- la pesée de l'air que l'on fait rentrer dans un tube fluorescent (pratiquement vide) dont on casse une extrémité.

les élèves se sont exprimés librement, que leurs interprétations soient spontanées ou guidées

1.2. L'expérience de Sannois : les élèves passent d'un modèle microscopique à un autre

Nous exprimons notre reconnaissance à Monsieur Michel Moppert qui a été l'enseignant responsable de cette séquence.

Sannois 1

Cette séquence a été une duplication de Paris 1. Elle s'adressait également à une dizaine d'élèves de 6ème. Elle a débuté par une courte introduction semblable à Paris 0, destinée à compléter ce que les élèves avaient déjà étudié dans leur classe habituelle. Nous avons observé à Sannois des réactions et conceptions des élèves très semblables à celles de Paris. Nous n'avons donc eu aucun mal à provoquer le même type de contradictions et de conflit, et à proposer de les résoudre à l'aide du même texte de référence qu'à Paris. La duplication d'une même séquence pédagogique avec des élèves différents nous a permis en particulier de mieux cerner le rôle du conflit que nous avons suscité, dans la motivation et le travail des élèves.

Le texte de référence, le modèle 1, a été présenté à Sannois sous forme d'un logiciel pour aider à la mémorisation. Celui-ci comprenait des questions fermées, une correction pour chaque question et l'énoncé correct en cas d'erreurs multiples. Le logiciel ne comprenait aucune animation graphique.

Sannois 2

Une année plus tard, les mêmes élèves, maintenant en 5ème acceptèrent de suivre une séquence semblable à la première.

Le thème général était : "Les réactions chimiques impliquant un réactif gazeux". La succession des séances était la suivante :

- entretiens individuels avec chacun des dix élèves de l'année précédente pour repérer ce dont ils se souvenaient de Sannois 1
- une séance pour rappeler ce que l'on avait appelé le modèle 1
- présentation et réalisation de "tests" permettant de différencier des gaz apparemment identiques car incolores. Le gaz A (dioxygène) ravive une petite flamme. Le gaz B (dihydrogène) éteint une même petite flamme avec un léger bruit. Le gaz C (dioxyde de carbone) éteint rapidement cette flamme. On demandait alors aux élèves de plonger dans le gaz A un morceau de charbon de bois enflammé, qui s'y consumait. Le contenu du récipient était alors à nouveau testé et les élèves constataient un changement : ils trouvaient du gaz C ainsi que quelques gouttes d'eau. Le groupe cherchait alors à comprendre ce qui s'était passé, en particulier à l'aide du modèle 1. Ils n'y parvinrent pas, ce qui constitue un deuxième conflit.
- Le professeur donna alors un texte de référence, contenant un deuxième modèle particulière des gaz. Ce texte, appelé le "modèle 2", est reproduit figure 3. Il présente des

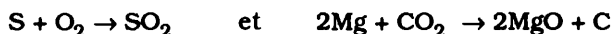
dans les deux groupes, un conflit a surgi à propos de la même affirmation de l'enseignant

un an après avoir étudié la physique des gaz, un groupe étudie la chimie des gaz

ce groupe comprend lui-même que le modèle 1 est inadapté pour les réactions chimiques

similitudes et des différences avec le modèle 1. Elles sont schématisées dans la figure 4 ci-après. Un logiciel permit aux élèves de le mémoriser.

- Les mêmes expériences ont été refaites et les élèves ont dû les interpréter à l'aide du modèle 2.
- Deux nouvelles réactions :



ont été réalisées et interprétées à l'aide du nouveau modèle. Des dessins ont été demandés.

- L'ensemble s'est terminé par des entretiens individuels composés d'une partie verbale de reformulation du modèle et d'une partie expérimentale autour de la réalisation (à l'aide d'une flamme) de la réaction suivante :



On dispose donc de quatre entretiens pour chaque élève de Sannois.

Les petites particules dont nous avons parlé dans le modèle 1, qui sont en mouvement et qui s'entrechoquent, ne ressemblent pas à des boules et ne sont pas toutes identiques. Elles peuvent avoir des formes, des masses et des dimensions différentes.

Ce sont des associations de particules plus petites qui, elles, ont vraiment la forme de boules.

Chaque association renferme plusieurs petites boules (parfois une seule), identiques ou non, collées les unes aux autres. Ces associations ont bien les propriétés (mouvement, chocs, ...) dont nous avons parlé. Les associations ne se font pas n'importe comment, il y a des règles pour les expliquer.

Tous les gaz, (mais aussi les liquides et les solides), sont constitués de ces associations. Nous appellerons ces associations des groupes.

Si on met des groupes en présence, il peut y avoir, à cause des chocs, destruction de ces groupes et réorganisation de nouveaux groupes différents des premiers.

Ce processus de destruction / réorganisation ne se fait pas n'importe comment. Il y a des règles. En particulier, toutes les boules qui constituent les groupes initiaux se retrouvent dans les nouveaux groupes.

Si on augmente la température, la vitesse des groupes augmente. D'ailleurs certains groupes ne peuvent pas se former à température ordinaire.

les petites boules s'appellent des *atomes*.

Les groupes s'appellent des *molécules*.

Les processus de destruction / réorganisation s'appellent des *réactions chimiques*.

Figure 3
Le "modèle 2"

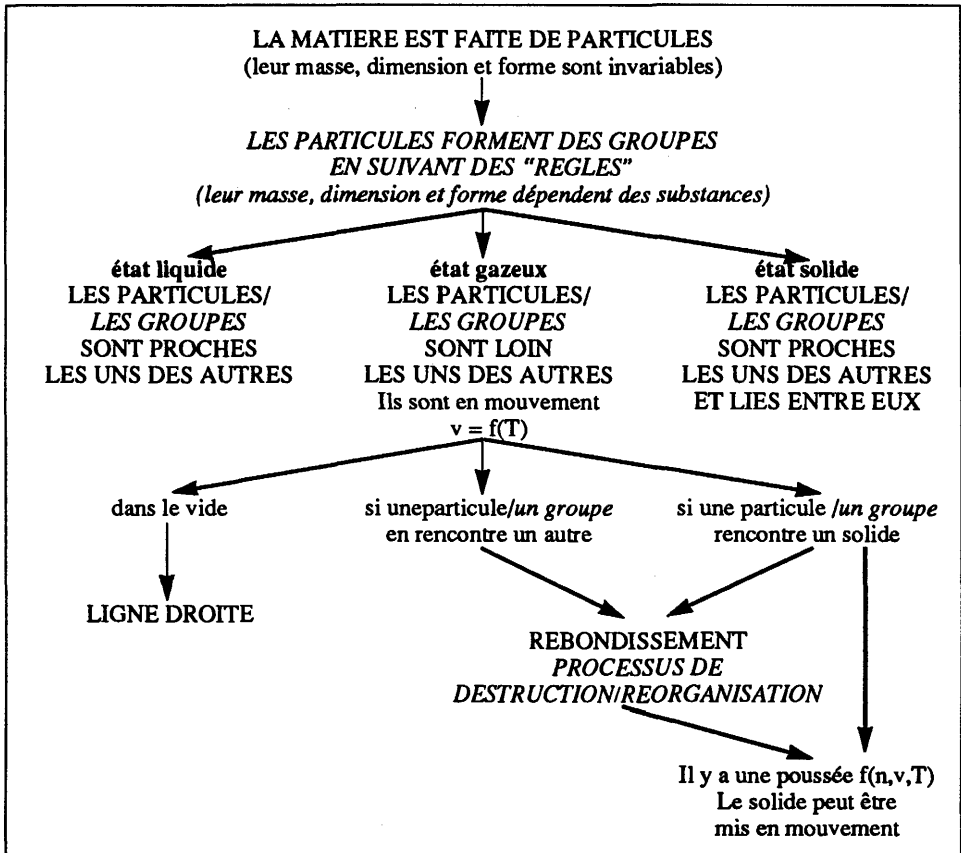


Figure 4 : Une schématisation des similitudes et des différences des modèles 1 et 2
Les mots et propositions en caractères standard font partie des deux modèles.
Les mots et propositions en italiques font partie du deuxième modèle.

2. L'EXIGENCE DE CONSERVATION CHEZ LES ÉLÈVES

J. Piaget a
montré que les
concepts
physiques se
construisent sur
les schèmes de
conservation

C'est une exigence de la pensée que de repérer ce qui ne change pas dans les variations perçues lors d'une expérience. C'est également une démarche de la physique que d'élaborer des grandeurs physiques qui se conservent au cours des transformations qui constituent les expériences. Les élèves, à un niveau élémentaire, adoptent eux aussi cette démarche et tentent volontiers de discerner ce qui se conserve et ce qui ne se conserve pas. L'intérêt d'une telle investigation est évident. J. Piaget (1962) a d'ailleurs montré que l'acquisition de schèmes de conservation accompagne et constitue les fondements de l'évolution intellectuelle des enfants.

Des études que nous avons précédemment menées (Séré 1985) ont montré que l'acquisition de ces schèmes de conservation sont indispensables à la reconnaissance du gaz en tant que matière (surtout s'il s'agit d'un gaz incolore), ce qui revient à attribuer le statut d'objet à une quantité de gaz. Dans le cas de l'enseignement que nous décrivons, tous les élèves sont parvenus à son terme ayant acquis ces schèmes de conservation. C'est un résultat généralement obtenu à cet âge, au moins si l'enseignant a le souci d'attirer l'attention des élèves sur ce sujet. L'originalité de notre enseignement est que cette acquisition s'est faite de façon concomitante avec l'apport de modèles particuliers. Pour en décrire les modalités, nous suivrons l'évolution d'un élève de Sannois, Alex, qui nous a paru particulièrement représentatif de l'ensemble. Il a fait l'objet d'une étude longitudinale (Séré 1991).

2.1. Comment Alex attribue un statut d'objet aux quantités de gaz

les interprétations spontanées des élèves sont très liées aux perceptions

Comme d'autres enfants, Alex privilégie d'abord dans ses descriptions l'air qui donne lieu à des perceptions : l'air en mouvement et l'air qui résiste. Dans son premier entretien, il donne une seule bonne réponse de conservation dans le cas le plus simple : une seringue fermée dont on modifie le volume. Dans des cas à peine plus complexes, comme par exemple le petit ballon enfermé dans une seringue dont on modifie le volume par compression ou par dépression, il dit qu'il ne peut comprendre comment un ballon fermé peut devenir plus gros ou plus petit. Quand on chauffe de l'air, il pense qu'"un gaz apparaît". "Il disparaît" quand le récipient refroidit.

La première séquence (Sannois 1) permet à Alex d'évoluer beaucoup : aux mêmes questions posées au deuxième entretien, il répond bien sans hésitation. Les quantités d'air ont maintenant pour lui une identité, elles occupent un espace, notion dont il se sert pour expliquer des actions de l'air. Il se sert spontanément du modèle particulière 1 :

"Comme il y a plus de place dans la seringue, les "petites boules" du ballon bougent pour prendre cette place" (Les particules ont été nommées "petites boules" par tous les élèves, que ce soit à Paris ou à Sannois)

Il ne parle plus de gaz qui apparaîtrait quand on chauffe l'air.

se représenter un gaz comme un ensemble de particules, évite de se le représenter comme "apparaissant" et "disparaissant"

Il semble qu'un modèle particulier donne à Alex une justification de la conservation. Ainsi, dans l'entretien final, à plusieurs reprises, il montre que, pour lui, chaque particule est comptée. A propos de la synthèse de l'eau, l'interviewer demande :

- *"Est-ce que tu dirais que des particules ont disparu ?"*
- *"On les retrouve toutes, à la fin. Mais toutes mélangées. Elles se sont réorganisées."*

La reconnaissance de différents gaz semble acquise seulement pendant la séquence Sannois 2. Ainsi, quand il s'agit de caractériser les gaz A, B et C incolores, avec tout le groupe, Alex se demande ce qui peut différencier leurs "petites boules". Il participe activement à la discussion où les élèves suggèrent que ce sont la masse, la vitesse et la taille qui peuvent changer d'un gaz à l'autre. Il semble bien que, pour lui, une quantité de gaz est devenue un ensemble de particules qui ne peuvent ni apparaître, ni disparaître, chaque gaz ayant un type de particules.

2.2. Comment Alex attribue un statut d'objet aux particules

De nombreuses études ont signalé une difficulté chez les élèves à qui l'on enseigne la nature particulière de la matière : ils attribuent souvent aux particules les mêmes propriétés qu'à la matière elle-même. C'est ce que fait spontanément Alex pour une propriété des particules dont il n'est question dans aucun des deux textes de référence : la couleur. Il suppose que les particules d'un gaz verdâtre sont aussi verdâtres. Il ne commet pas d'autre confusion de ce genre. C'est que dans les deux modèles que nous avons utilisés, une différence fondamentale existe entre le macroscopique et le microscopique : dans un gaz immobile (niveau macroscopique), les particules sont en mouvement (niveau microscopique).

Effectivement, Alex parle toujours de particules en mouvement (D'ailleurs deux élèves seulement sur les vingt observés ont évoqué la possibilité pour les particules de s'arrêter). Il pose des questions la première fois que le professeur parle de particules :

"Est-ce qu'on peut les percer ? ...Est-ce qu'on peut les casser ?"

(Notons que le professeur répond négativement, et qu'un an plus tard, il affirmera qu'elle peuvent être "détruites" à la suite de chocs).

"Est-ce qu'il y a des particules dans le ciel ?"

Durant Sannois 2, Alex parle souvent de chocs, de violence, de particules se heurtant. Il donne dans l'entretien final la description suivante à propos des différents états de la matière :

(Les particules) *"vont plus vite que des voitures dans tous les sens... Il y en a des millions et des millions..."*

"Dans les liquides les particules sont plus serrées que dans un gaz. Elles bougent un peu."

Il est vraisemblable que la capacité qu'Alex a acquise de considérer des particules que l'on compte une à une comme constitutives de la matière, provient d'un effort constant de l'enseignant, qui engage les élèves à raisonner en ces termes au lieu de les laisser à leur lecture spontanée. Dans le cas des réactions (voir § 4.1), celle-ci consiste à donner un rôle

dans les modèles 1 et 2, les particules sont en mouvement et non la matière

se représenter un gaz comme des particules en mouvement, évite de se représenter des particules "noyées" dans le gaz

un guidage de l'enseignant consiste à toujours repérer les particules avant/après

spécial à la flamme (destructrice, productrice de gaz) et à donner des rôles différents aux réactifs (le carbone consomme l'oxygène, l'oxygène se colle sur le magnésium, etc...). Au contraire, sans cesse il demande :

"Quelles sont les particules avant ? ...Quelles sont les particules après ?..."

C'est une "nouvelle" façon de raisonner que l'on peut peut-être qualifier de "scientifique" dans la mesure où elle repose sur la reconnaissance de conservations, et non sur des analogies qui prennent en compte des traits saillants et spectaculaires de l'expérience.

Notons enfin que le fait que nous ayons nommé les "petites boules" des atomes et leurs "associations" des molécules, a semblé entraîner la confiance des élèves pour les modèles que nous leur fournissions (voir § 4.4).

3. LA TRANSITION D'UN MODÈLE SPONTANÉ AU MODÈLE PARTICULAIRE 1 : Paris 0 et 1, Sannois 1

3.1. Le modèle spontané des actions exercées par des gaz

les élèves disposent d'un modèle non scientifique pour interpréter les expériences

Bien sûr chaque élève se réfère à un modèle personnel pour interpréter un corpus d'expériences et l'observateur ne peut en saisir toute la complexité. Cependant, dans ces modèles non scientifiques, on repère des régularités d'un élève à l'autre. Nous les avons également retrouvées chez les élèves de Paris et Sannois. Nous en donnons ici un bref résumé.

a) A la température ambiante (température constante)

Un mouvement (d'une paroi élastique, d'un piston de seringue, etc...) est toujours causé par un autre mouvement. Les expériences sont interprétées en terme de transmission de mouvement. Par exemple quand de l'air est envoyé dans un récipient contenant une "capsule" (une petite boîte fermée par une baudruche, voir figure 1), les élèves disent :

"C'est le flux d'air qui pousse la membrane et la fait se creuser. Il y a une poussée seulement quand l'air arrive. ...L'air pousse seulement sur la membrane "

spontanément les élèves interprètent l'état de repos par l'absence d'interaction

Le "mouvement-cause" et le "mouvement-effet" ont la même direction. Dans cette expérience, si l'on renverse la capsule (la baudruche occupant le fond de la capsule), les élèves prédisent que les mêmes actions que précédemment ne peuvent plus changer la forme de la baudruche.

A l'équilibre, il n'y a pas de mouvement et, donc, pas d'action produite par l'air. Dans l'expérience ci-dessus, quand on cesse d'envoyer ou de retirer de l'air, les élèves disent que l'air cesse de pousser. Une conséquence est que l'air atmosphérique n'exerce pas d'action. L'air "a une pression" (en tant que paramètre et en tant que force) seulement

quand il est "tassé", c'est-à-dire quand la quantité par unité de volume est supérieure à celle correspondant à l'air ambiant. Pour l'atmosphère, "il ne se passe rien, il n'y a pas de pression".

b) A une température différente de la température ambiante
 Quand la température augmente, l'air chaud se déplace de bas en haut et est capable de mettre en mouvement, de pousser, d'exercer une pression. Quand la température diminue, les élèves ont peu à dire : l'air froid est immobile, ne fait rien.

Ce modèle s'adapte assez bien à toutes les expériences de chauffage où la source de chaleur est, pour des raisons pratiques, située sous le dispositif à chauffer. Il convient moins bien quand la source est au-dessus du dispositif (une telle expérience a été faite durant Paris 1 et Sannois 1. Voir figure 1).

Le lien établi entre force et mouvement est très proche de ce que décrivent J. Piaget (Piaget 1973) et L. Viennot (Viennot 1977). Une des principales caractéristiques est l'identification entre les directions du mouvement et de ses effets.

3.2. Les contradictions qui ont conduit à un conflit

Le modèle spontané rend bien compte d'expériences où l'air est en mouvement. Ce n'est pas surprenant qu'il fasse difficulté quand l'enseignant montre des situations d'air immobile. Ainsi pendant la septième séance de Paris 0, les élèves eurent à interpréter deux des expériences schématisées figure 1 : la ventouse et le piston de la seringue qui supporte des poids.

Les élèves ne purent jamais se mettre d'accord sur une interprétation. Les uns affirmaient que le caoutchouc de la ventouse était collant, d'autres que c'était l'air à l'intérieur qui était compressé et qui résistait. Nathalie donna une interprétation tout à fait correcte en terme de pression atmosphérique mais elle ne put se faire entendre. Finalement l'enseignant donna cette interprétation : "l'air pousse toujours". A partir de ce moment il fut en conflit avec les élèves qui refusaient de le croire.

Stéphane (Paris) : "Je ne suis pas d'accord que ça pousse. L'air presse vers le bas sur ma tête mais pas sur mes pieds. L'air ne peut pas grimper!"

Nicolas (Paris) : "Je dis qu'il ne pousse pas. Il est là, il ne bouge pas. Il reste sans rien faire."

Roberto (Paris) : "Ce n'est pas parce qu'il touche la ventouse qu'il pousse. On peut toucher sans pousser."

Boris (Sannois) : "Je pense que l'air glisse sur la ventouse. Il ne fait rien."

"Angelina (Sannois) : "Alors tous les objets colleraient au mur si l'air poussait toujours de la même façon !"

plusieurs élèves
se mettent
d'accord pour
rejeter
l'affirmation :
"L'air pousse"

ils argumentent
leur refus

Chacune de ces interventions peut s'interpréter comme le refus d'accepter une explication, celle de l'enseignant, sans cohérence avec leur propres structures explicatives. En effet, ils n'avaient pas les structures logiques nécessaires à l'appropriation de cette explication macroscopique. Ce qui leur manquait est : l'équilibre peut résulter de forces non nulles, antagonistes. Nous avons fait l'hypothèse qu'il serait vain de leur apporter cette information sous forme verbale, sachant combien il serait difficile de l'articuler à d'autres connaissances, comme l'a montré la suite de l'enseignement (cf § 3.5.2.).

Quoi qu'il en soit, ces élèves ont montré qu'ils étaient conscients d'une incohérence et qu'ils savaient l'exprimer. L'étape suivante a été leur demande d'une autre explication dont ils puissent chacun vérifier et admettre la cohérence.

3.3. Le conflit a eu une dimension sociale

L'objet du conflit a été le même à Paris et à Sannois, et dans les deux cas, le conflit a été pris en charge peu à peu, au fil des interventions, par l'ensemble du groupe. Cependant les élèves de Paris se sont montrés plus passionnés et ont eu des attitudes plus contrastées, que nous allons décrire maintenant.

des élèves
s'impliquent plus
que les autres
dans le débat

Stéphane s'exprimait souvent, réclamait des explications, interrogeait le professeur directement, refusait de se laisser convaincre, trouvait des arguments contre les affirmations du professeur.

Nicolas semblait moins concerné au commencement de la discussion. Puis il s'est rangé aux côtés de Stéphane et lui a fourni de nouveaux arguments.

Alain était le "bon élève" qui a toujours des arguments irréfutables, souvent finalistes, par exemple :

"l'air doit toujours revenir à sa place normale... Il ne doit pas y avoir de vide Pour qu'un objet tombe, il doit y avoir de l'air dessus et dessous."

Il n'aimait pas être influencé par ses pairs. Il s'est rangé aux côtés du professeur avec l'argument suivant :

"Puisque l'air touche la ventouse, il l'appuie contre le mur"

Ce bon élève, capable de faire fonctionner le modèle fourni ultérieurement, a fait preuve d'une rigidité telle qu'il n'en a rien retenu et que son entretien final est l'un des moins riches.

des élèves,
d'abord passifs,
finissent par
s'intéresser au
débat

Roberto et Philippe ne se sont pas intéressés au débat, au moins à son commencement. Ils ont eu l'attitude typique des élèves perdus au fond de la classe, qui doivent faire leurs des observations, des raisonnements et des conclusions de leaders. Philippe se taisait mais Roberto a fini par intervenir pour soutenir Stéphane. Quelques minutes après cette intervention, il accepta l'affirmation de l'enseignant. Malgré un certain manque d'initiative, il a suivi, compris et a tiré des conclusions correctes du modèle particulière proposé ensuite. Nous avons pu le constater car c'est lui qui a

été envoyé au tableau le premier après l'énoncé du modèle, pour donner une nouvelle interprétation particulière d'une expérience. Spontanément, il s'est saisi d'une des flèches (en papier adhésif) et l'a renversée. Il a donc compris. Dans les séances suivantes, il dit que *"les petites boules se trimbalent"*. Certes il n'a pas été très loin dans l'appropriation du modèle, mais plus loin que Philippe qui s'est très peu impliqué, et qu'Alain et Nathalie, élèves beaucoup plus avancés que lui, mais qui n'éprouvaient nul besoin d'un nouveau savoir.

Le fonctionnement de ces groupes de dix élèves ne nous paraît pas très éloigné de celui d'une classe, où il n'y a souvent que quelques élèves qui expriment des opinions personnelles. Les autres se rangent à l'une ou l'autre des opinions exprimées. Mugny (1985) interprète cette attitude en disant que c'est l'occasion pour eux d'exercer leur jugement, de découvrir qu'il y a plusieurs jugements possibles, d'identifier leurs propres contradictions et de se donner les moyens d'argumenter et de progresser. Vraisemblablement Philippe et Roberto n'étaient pas habitués à une telle attitude de recherche et une telle exigence de cohérence. Ils ont été présents au débat et Roberto s'y est impliqué tardivement.

La résistance que les élèves ont opposée aux suggestions de l'enseignant quand il a donné des explications au niveau macroscopique, a exprimé leur besoin d'"autre chose". Leur attitude a connu un revirement complet quand l'enseignant à la séance suivante leur a apporté ce "quelque chose" : un modèle particulière. Nicolas écouta attentivement et, avant même la fin de la présentation du texte de référence, saisit une feuille de papier pour mimer le bombardement des particules et s'exclama :

" Là, il y a toujours de la pression!"

Stéphane déclara que

"...comme ça, il comprend que l'air pousse".

Bien sûr ils ont fait preuve de curiosité en posant des questions mais ils ont fait totalement confiance à l'enseignant. Les questions ont porté sur les quantités (*"Y en a-t-il beaucoup ? Peut-on en avoir une seule dans un verre ?"*), sur la réalité du modèle (*"Et vous, vous les avez vues les petites boules ? Et si on les met toutes les unes à côté des autres ?"*). Le professeur ayant répondu qu'il ne les a jamais vues, ils décidèrent que *"probablement quelqu'un d'autre les a vues"*.

Beaucoup de traits du conflit tel qu'il a eu lieu à Paris se sont retrouvés à Sannois : même méfiance des élèves envers les affirmations du professeur quand il a interprété au niveau macroscopique, même attitude d'élèves qui suivaient et finissaient par s'impliquer, même expression communautaire d'un besoin d'explication remplaçant ce que proposait l'enseignant, même confiance totale dès qu'il a proposé un

l'enseignant
n'est plus
contesté quand il
parle au niveau
microscopique

modèle plus savant au niveau microscopique. Au total, même recherche de cohérence. Le conflit qui a été créé là n'a donc pas été lié à la présence d'élèves à la forte personnalité comme Stéphane ou Nicolas. Il a été cognitif en ce sens qu'il a été lié à un point précis pour lequel les élèves ne peuvent réellement s'approprier une explication, et sociocognitif en ce sens que cela a été le groupe dans son ensemble qui a adopté une attitude critique et exigeante, et l'a formulée.

3.4. Les informations données par le professeur

A la séance qui suit l'expression de ce conflit, le professeur donna des explications au niveau microscopique par le texte appelé "modèle 1", qui a les caractéristiques suivantes :

le modèle
exposé s'adapte
aux
connaissances
des élèves

- Il est directement adapté aux difficultés des élèves, explicitées dans les séances précédentes. L'essentiel est que l'air immobile est composé de particules en mouvement, et donc que l'air immobile est capable d'exercer des actions. Dans un même souci d'adaptation il reprend le vocabulaire des élèves et utilise quelques images. Le gaz qui "touche" la paroi... Une quantité d'air "gagne"... Les particules "bombardent" les parois...
- Le modèle particulaire sous-jacent propose aux élèves des invariants qui sont des petites boules indéformables et pesantes. Les relations entre ces invariants sont leur description dans l'espace et le temps. Ces particules suivent les lois de Newton : tant qu'elles ne rencontrent rien, elles vont en ligne droite. Les élèves ont donc à admettre l'existence d'un mouvement sans cause.

le modèle 1
permet une
dissociation du
mouvement-
cause et du
mouvement-effet

Le modèle établit une relation mouvement-action différente de celle que les élèves attribuent à l'air en mouvement. En effet pour les particules, le mouvement et l'action (c'est-à-dire les forces pressantes), ne vont pas dans la même direction. Le mouvement est dans toutes les directions et la force qui en résulte peut également s'exercer dans toutes les directions, suivant les positions des objets sur lesquels elle s'exerce. Il y a mouvement-cause, et mouvement-effet (ce sont des points d'ancrage pour les élèves), le mouvement-cause étant multidirectionnel et le mouvement-effet dépendant de la position de l'objet mis en mouvement. Quand l'objet en contact avec le gaz est maintenu immobile, le mouvement-cause explique l'existence d'une force pressante en l'absence de mouvement.

Au sujet des variations de température, le modèle est un appauvrissement de la théorie cinétique des gaz. Il postule que si l'air est chauffé, les chocs sont plus fréquents.

- Le modèle dit quelques mots de la nature particulaire des solides et des liquides. (Cela n'a pas empêché les élèves de dessiner les parois des récipients contenant les gaz par une ligne continue, ce qui en constitue une représentation macroscopique).

- Dans ce texte intervient également le savoir qui fait difficulté au niveau macroscopique : l'équilibre peut résulter de forces non nulles, antagonistes.

3.5. Chacun des élèves a reconstruit un modèle

Nous avons assisté au cours des séances ultérieures à une reconstruction par chaque élève, de ses connaissances. L'analyse de leurs affirmations met en lumière un certain nombre de raisonnements que nous allons tenter de décrire en distinguant ce que tous les élèves ont acquis, ce qui différencie le fonctionnement intellectuel d'un élève à l'autre et les inférences qu'ils ont faites à partir du modèle.

- Ce que tous les élèves ont acquis

- L'air atmosphérique exerce toujours des actions.

Cette affirmation apparaît maintenant comme cohérente avec la relation "mouvement-force" défendue avec vigueur par les élèves de Paris comme de Sannois. De plus, tous les élèves sauf un de chaque groupe, expriment dans toutes les situations étudiées que l'air exerce des actions. Voilà deux interprétations données par Alex de la même expérience : les embouts de deux seringues sont reliés par un tuyau souple et le mouvement d'un piston entraîne le mouvement de l'autre.

Entretien initial : "L'air va à travers le tuyau vers le deuxième piston. Quand ça s'arrête, l'air ne continue pas de pousser."

Entretien après Sannois 1 : "Une fois que tout est arrêté, les boules frappent toujours, mais elles ne font plus bouger le piston."

- L'action d'une quantité de gaz dépend de la quantité par unité de volume et de la température.

Au niveau macroscopique, cette double dépendance est particulièrement difficile à acquérir et à faire fonctionner. Le modèle introduit un paramètre unique : le nombre d'impacts par unité de surface et par unité de temps, paramètre dont les élèves se font une représentation aisée, semble-t-il. Grâce à la relation température-vitesse, les élèves semblent s'être approprié la double dépendance énoncée ci-dessus. Nicolas l'exprime de la façon suivante :

"Quand les particules sont chauffées, elles font bang-bang-bang (rythme rapide), au lieu de bang - bang - bang (rythme lent). Mais si on photographie les petites boules, qu'elles soient chaudes ou froides, on trouve la même chose dans un petit cm³"

On voit ici que Nicolas est capable d'inférer de la description des particules, leur comportement au cours du temps et leur disposition à un instant donné, probablement parce que le modèle remplace plusieurs étapes du raisonnement au niveau macroscopique par une représentation qui fait partie des représentations disponibles chez les élèves.

la relation mouvement-force du modèle 1 amène à comprendre que "l'air pousse"

le nombre d'impacts par unité de surface et de temps est intuitif pour les élèves

• Ce qui a différencié les élèves

Des études précédentes (Séré 1985) ont montré que tous les élèves de 6ème ne sont pas capables de prendre en compte deux systèmes et leurs interactions pour en déduire leur évolution. La procédure qui consiste à considérer l'évolution d'un seul système dans le temps est plus facile. Les élèves qui ont été le plus loin dans leurs interprétations sont ceux qui sont capables de tenir compte de deux systèmes de la façon suivante :

Thomas (Sannois) : *"L'objet est bombardé de la même façon de tous les côtés. Donc il ne bouge pas."*

Cécile (Sannois) : *La force des boules du ballon (intérieur du ballon) et de la seringue (extérieur du ballon) s'équilibre"*

les élèves les plus sûrs d'eux s'impliquent peu dans le débat et progressent peu

L'implication dans le conflit décrit précédemment a été également un facteur prépondérant dans les progrès réalisés. Les deux élèves de Paris qui avaient les meilleurs résultats scolaires : Alain, disposant d'un savoir qu'il ne souhaitait pas remettre en question, de même que Nathalie, n'ont pratiquement rien appris du modèle particulaire.

• Quelques inférences faites par les élèves à partir du texte des modèles 1 et 2

A travers les acquisitions des élèves, nous avons vu des déductions et des inductions légitimes. D'autres au contraire conduisent à des distorsions du texte originel.

le modèle scientifique fonctionne sur une nouvelle représentation des gaz qu'ont les élèves

a) Les élèves se sont construit une représentation du comportement des particules. Dans un premier temps, ils n'ont pas retenu l'idée du "bombardement" sur les parois et les objets en contact avec l'air. Ils ont été plus intéressés par les chocs au sein du gaz, et ont insisté sur la répartition homogène des particules à titre de conséquence de leur mouvement. Ce n'est que peu à peu qu'ils ont déduit des interprétations des impacts sur les parois. Ils ont élargi le vocabulaire utilisé par le texte pour décrire le mouvement des particules. *"Elles n'arrêtent pas de bouger, se touchent, dévient, font n'importe quoi, foncent, se bousculent, cherchent de la place, courent, cognent, etc"*

Ils ont également induit des propriétés des particules de celles qui leur ont été énoncées : *"elles rebondissent parce qu'elles sont légères ; la pression dépend du nombre d'impacts par unité de temps en un point au sein du gaz, ou encore du trajet effectué par une particule sans en rencontrer d'autres (sorte de libre parcours moyen)."*

On le voit, les élèves ont articulé la richesse des connaissances intuitives qu'ils ont du mouvement avec les données sur les particules.

b) Quelques distorsions du texte sont apparues. La plupart proviennent de ce que les élèves ont tenté de concilier

quelques inférences articulant modèle et connaissances des élèves sont illicites

leurs représentations préalables avec le modèle, principalement à la fin de l'enseignement.

"Au bout d'un moment, les particules sont tellement tassées qu'elles ne peuvent plus bouger et qu'elles ne bombardent plus rien."

Alex lors de l'entretien final : *"Oui l'air pousse... mais si peu... très souvent on ne le voit pas. C'est comme si je poussais un immeuble. Je ne pourrais pas le faire bouger"*

D'autres distorsions sont provenues de ce que l'enseignant ne disposait d'aucun moyen pour donner une idée de la taille des particules, des distances entre elles et du nombre de particules par unité de volume.

4. DE LA PHYSIQUE À LA CHIMIE : LA TRANSITION D'UN MODÈLE PARTICULAIRE À UN AUTRE : Sannois 2

4.1. Ce que sont les mélanges de gaz et les combustions pour les élèves

les élèves doivent, un an après, aller plus loin dans la différenciation des gaz

Les élèves de Sannois ont donc accepté de revenir hors des heures de classe, une année après Sannois 1, avec la perspective de faire de la chimie. L'année précédente, ils avaient eu l'occasion de parler de mélanges de gaz. Il s'agissait alors de mesurer la masse de l'air en utilisant un tube fluorescent (figure 1). Les élèves avaient alors parlé de *"petites boules à l'intérieur (néon) et de petites boules à l'extérieur (air)"*. Ils s'étaient demandé ce qui arrivait quand on cassait l'extrémité du tube fluorescent. Tous s'étaient ralliés à l'opinion de Thomas : toutes les petites boules se mélangent et continuent ensemble leur mouvement désordonné. Ils semblaient ne pas différencier les particules d'un gaz ou d'un autre, leur attribuant les mêmes lois de mouvement.

pour les élèves, les rôles joués par les réactifs sont dissemblables

La première séance de Sannois 2 a apporté quelques indications sur ce qu'étaient pour eux les combustions. Ils attribuaient un rôle important à la flamme qui, c'est vrai pour tous les enfants, engendre toujours de nombreuses images. La flamme est capable de détruire, de pousser, d'émettre des gaz, d'agir violemment et de façon irréversible. Des analogies ont été également utilisées : consommation de gaz et respiration, principalement. Une dissymétrie dans les fonctions des réactifs a également été exprimée (voir le § 2.2), l'un étant actif, l'autre étant passif : le carbone attire le gaz A et rejette le gaz C par exemple. De telles interprétations ne sont pas questionnables, elles sont fermées sur elles-mêmes et ne donnent pas réellement lieu à des conflits cognitifs.

4.2. Le conflit

l'inefficacité du
modèle 1 déçoit
les élèves

C'est quand les élèves tentèrent d'utiliser le modèle 1 que des échanges s'établirent et que les élèves en arrivèrent à être demandeurs de "quelque chose" de nouveau. En effet il s'agit pour eux d'interpréter le fait qu'on trouve du gaz C dans le récipient où il y avait du gaz A auparavant. Dire comme Alex que les particules de A se sont transformées en particules de C ne convainquit aucun d'entre eux. Ils cherchèrent donc à imaginer ce qui avait pu changer (ce qui nous permit d'observer quelles inférences ils faisaient à partir du modèle 1). En fait ils montrèrent une réelle aisance et considérèrent successivement la masse, la taille et la vitesse des particules et non la forme puisque le modèle 1 décrivait sans ambiguïté les particules comme des "boules". Aucun de ces changements ne fut reconnu comme explicatif. Un élève suggéra que la flamme avait détruit les particules, mais deux autres rappelèrent que celles-ci étaient indestructibles. Manifestement le modèle était impuissant à expliquer les réactions. Le silence du doute s'installa dans le groupe.

Lors de Sannois 1, le conflit avait été pris en charge par l'ensemble du groupe, parce que le modèle questionné, leur modèle spontané, était profondément ancré dans les convictions des élèves. Ici c'est le professeur qui est arrivé à exploiter les interventions de trois élèves tentant d'appliquer le modèle 1 aux réactions chimiques, de façon à ce que les contradictions soient exprimées clairement par l'ensemble du groupe. La dimension sociale a donc eu ici une origine un peu différente. Quoiqu'il en soit cela a bien été le groupe entier qui a été conscient de contradictions et a été demandeur d'"autre chose".

4.3. Les informations données par le professeur : le modèle 2

Les caractéristiques de ce deuxième texte (cf figure 3) donné par le professeur et présenté par un logiciel pour aider à la mémorisation, sont les suivantes :

- a) Comme le précédent, il est adapté aux difficultés des élèves et reprend leur vocabulaire. Ce sont maintenant les atomes qui sont appelés "petites boules". Tout ce qui est microscopique, quelle que soit sa forme est une particule. Il est question d'association et de destruction. Les noms scientifiques d'atome et de molécule sont donnés en fin de texte.
- b) Le modèle sous-jacent à ce texte explique exclusivement la transformation d'une substance en une autre, chaque corps étant reconnu par un "test". Aucune autre observation macroscopique n'est expliquée par le modèle, ni la couleur, ni l'état physique dans lequel se présente un corps (H_2O est liquide, MgO est une poudre blanche, C est tantôt un solide, tantôt une poudre noire, etc.).

tout ne change
pas d'un modèle
à l'autre : le
mouvement
subsiste

Dans les deux modèles il est question de particules ayant un mouvement dans toutes les directions. Elles sont décrites de façon différente dans chacun des modèles. Le deuxième modèle ne redonne pas de description de ce mouvement, identique dans les deux cas.

- c) Une différence est implicitement postulée entre mélange et combinaison, ces mots n'étant pas utilisés. Dans un mélange, les particules ont des mouvements indépendants. Dans une combinaison, les particules s'associent pour suivre les mêmes trajectoires.
- d) Le champ expérimental du deuxième modèle inclut celui du premier, puisqu'il y est dit qu'il "peut" y avoir destruction et réorganisation.

4.4. De la transformation à la réorganisation

Le savoir procédural nécessaire à la mise en oeuvre de ce deuxième modèle est plus simple que pour le premier. Il s'agit de compter les particules dans les groupes avant et après réorganisation. Le plus difficile est d'adopter ce point de vue de bilan de la réorganisation et de se dégager de la conception qu'il s'agit d'une transformation. Nous avons vu (§ 2.2) que le professeur y a engagé souvent les élèves.

On pourrait penser que les élèves étaient quelque peu déroutés qu'on leur ait donné, d'une année sur l'autre, une description différente des particules en mouvement. Leur faculté d'adaptation semble importante comme l'explique Alex dans l'entretien final :

- *Est-ce que tu as été surpris de ces modifications ?*
Alex - *Non, parce que c'était l'année dernière que ce n'était pas tout à fait vrai. Le plus vrai c'est les molécules, parce qu'avec les petites boules, on n'avait rien à dire des mélanges (en fait des réactions) des gaz.*
- *Est-ce que tu penses qu'il y aura encore des modifications l'année prochaine et encore l'année d'après ?*
Alex - *c'est sûr!*
- *Tu trouverais cela normal si on te disait qu'il n'y a plus d'atomes et de molécules ?*
Alex - *ah, ça non !*
- *Alors qu'est-ce que tu penses ?*
Alex - *Je dois d'abord tout apprendre des atomes et des molécules*
- *Est-ce que tu diras que le professeur t'a raconté des histoires ?*
Alex - *Pas du tout... A l'école il y a de plus en plus de choses à apprendre, et très souvent elles changent...*

Hors enregistrement, après l'entretien, il ajoute :

Dans toutes les matières, vous savez, pas seulement en physique, c'est pareil : on apprend quelque chose une année et l'année suivante ça change !

Une autre manifestation de cette faculté d'adaptation a été qu'un élève a trouvé très vite le moyen de concilier les deux

les
dénominations
d'atomes et de
molécules
inspirent
confiance aux
élèves

les élèves
inventent
quelques
compromis peu
scientifiques
entre les deux
modèles

modèles. Il a appelé les particules du modèle 2 des "boules avec des bosses". L'expression a été reprise ultérieurement par les élèves.

Tous les élèves sauf un (Bruno dans l'entretien final dit que la vapeur n'est pas faite de particules) ont décrit et ont toujours dessiné les gaz et les liquides comme particulaires. Les solides ont souvent été composés de particules jointives (voir la figure 4), cernées d'un trait continu, les parois restant des lignes simples continues. Seule la flamme a toujours gardé son aspect macroscopique pour tous les élèves.

Un exemple de l'évolution des élèves est donné par celle d'Alex. La figure 5 montre comment il a représenté une combustion avant et après l'introduction du modèle.

Avant : (C'est-à-dire juste avant que les élèves ne réalisent que le modèle 1 est inadapté). Il ne reprend pas les "petites boules" qu'il utilisait pourtant facilement l'année précédente. Les gaz sont représentés par des points et des croix pour les différencier. (Il est difficile d'affirmer qu'Alex représente ici des formes plutôt que des symboles différents pour des gaz différents).

Après : Les molécules de O_2 et de CO_2 sont représentées comme des "associations" de boules. Seule la représentation de la flamme reste macroscopique.

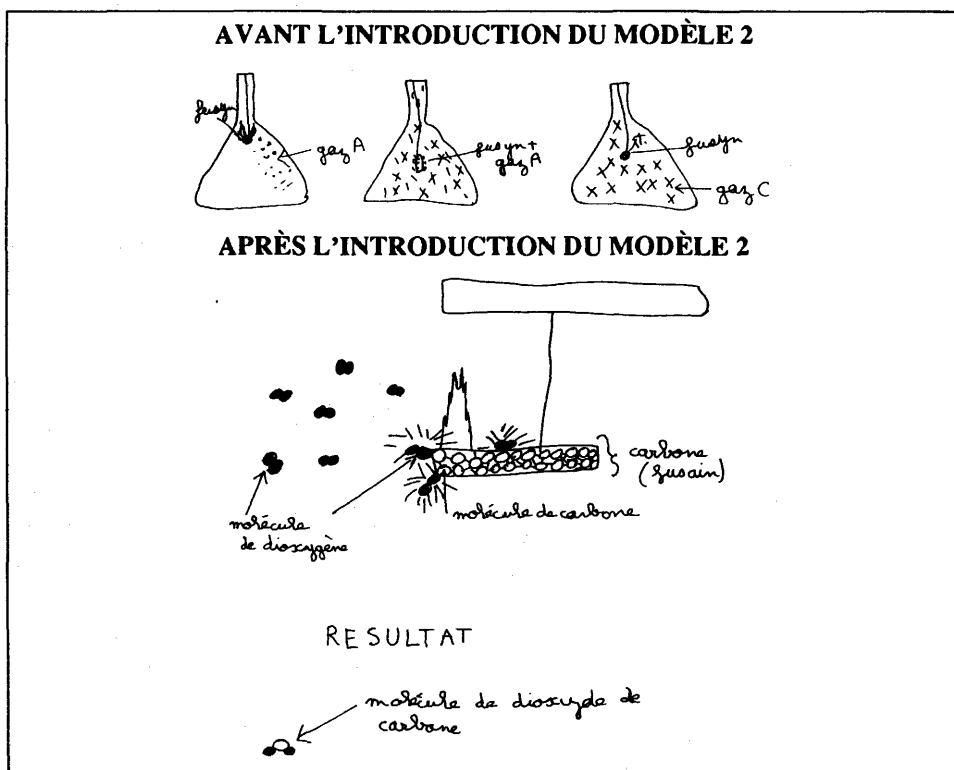


Figure 5

Représentations par Alex de la combustion du fusain dans le gaz A (dioxygène)

4.5. Les inférences faites à partir des représentations du mouvement et des chocs

Durant la séquence Sannois 2, le mouvement et les chocs ont été d'emblée présents dans les interprétations des élèves qui ont utilisé des verbes variés pour décrire le comportement des particules. Tous ont été capables de dire la différence entre un mélange et une combinaison.

"les (mélanges) continuent leur mouvement en ligne droite, les associations partent ensemble"

"O et H forment une paire. Ils continuent ensemble" (synthèse de l'eau)

Le fait que la totalité des gaz soit impliquée dans la réaction (présenté comme la conséquence du mouvement des particules), a semblé être évident pour les élèves.

Les termes utilisés pour décrire les chocs sont variés durant Sannois 2 : les molécules se percutent, se cassent, se détruisent les unes les autres, éclatent, se libèrent. Elles se cassent en morceaux et les morceaux se reforment. Les atomes se séparent, s'en vont, se détachent, tombent, se libèrent, puis se rencontrent, s'accordent ensemble, se joignent, constituent des molécules, se collent ensemble, se réarrangent, se mélangent, s'associent, s'attachent, vont l'un à côté de l'autre.

Les élèves expriment aussi qu'il n'y a pas de destruction / réorganisation toutes les fois qu'il y a un choc, et qu'il peut y avoir des chocs semblables à ceux décrits par le premier modèle, avec un simple rebondissement.

Rappelons que les mouvements décrits par les deux modèles sont identiques et que dans les deux cas une augmentation de température est censée entraîner une augmentation de la fréquence des chocs (§ 3.4.2). Les élèves en déduisent eux-mêmes que les réactions sont plus faciles et plus rapides quand on augmente la température. De plus ils traduisent "plus chaud" par "plus rapide" comme dans les modèles, mais ils ajoutent eux-mêmes "plus violent".

"Si les boules sont trop faibles, il n'y aura pas de résultat (destruction / réorganisation)"

Un élève suggère qu'une augmentation de pression pourrait également augmenter le nombre d'impacts et donc les possibilités de réaction.

A propos des règles qui président aux réorganisations, les élèves éprouvent le besoin d'en justifier l'existence. L'un d'eux par exemple, dit que ces règles sont nécessaires, car sans cela, on pourrait obtenir

"une seule grosse boule faite de toutes les petites boules, ce qui est impossible"

Dans l'entretien final, Angelina exprime que nous ne pouvons pas bien savoir ce qui va se réunir lors de la réaction.

"C'est une surprise"

Elle admet cependant, que malgré la surprise, tous les élèves doivent obtenir les mêmes résultats de réactions, faisant ainsi preuve de cohérence. Quant à Alex, il exprime

les élèves déduisent des propriétés du mouvement des particules

les élèves argumentent pour eux-mêmes la représentation des gaz issue du modèle 2

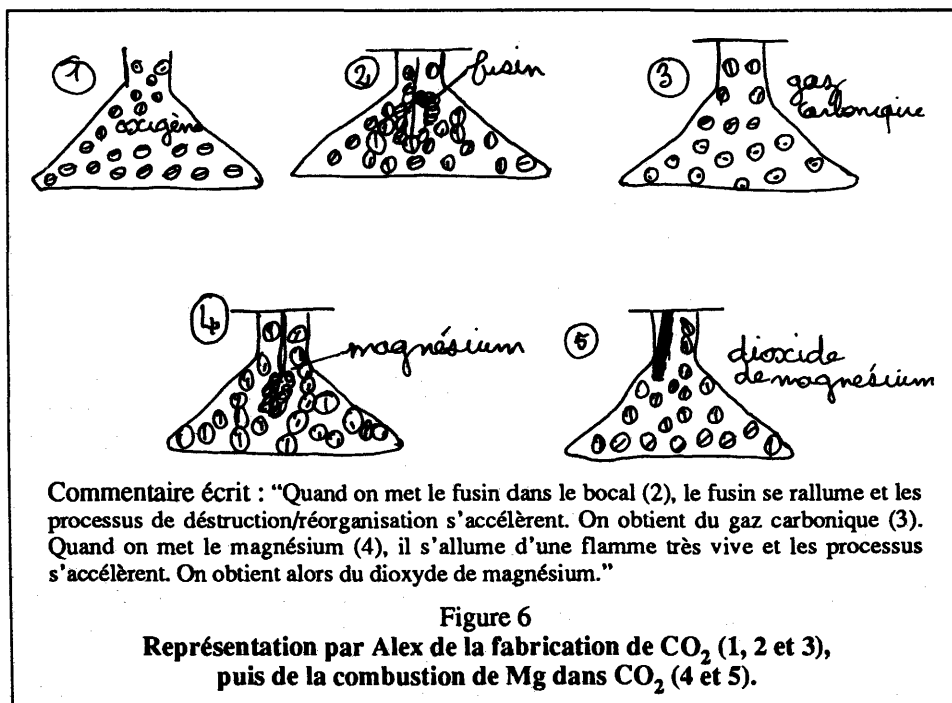
clairement que ces règles, il ne peut les connaître. Dans l'entretien final, il dit qu'il ne peut pas savoir dans quelles proportions l'hydrogène et l'oxygène se sont associés lors de l'expérience de synthèse de l'eau.

4.6. Ce qui reste des conceptions préalables

après exposé du modèle 2, la flamme a un statut bien différent

En ce qui concerne le rôle de la flamme, on peut affirmer qu'il y a acquisition réelle pour l'ensemble des élèves. Après enseignement et même durant les entretiens finaux, la flamme "accélère les particules", produit des chocs plus violents et plus fréquents. Même Bruno attribue ce rôle à la flamme lors de la synthèse de l'eau. Il la rend également responsable du bruit entendu.

Cependant, comme pour le premier modèle, des élèves réalisent parfois un compromis entre leur nouveau savoir et leurs conceptions spontanées. Ils sont tentés de représenter dans une réaction à la fois l'aspect transformation et l'aspect réorganisation. Un dessin d'Alex (figure 6) représentant la combustion du magnésium en donne un exemple : les différentes molécules sont à nouveau des "boules", chacune ayant une couleur différente (brun pour O_2 , vert pour CO_2 , etc...). Ce qui les différencie est bien la couleur. Une ébauche de représentation de structure existe cependant, car les molécules sont des boules coupées en deux moitiés, ce qui n'est pas le cas pour les atomes de carbone et de magnésium.



Alex met dans un même dessin à la fois la "réorganisation" et la "transformation"

Chez les autres élèves, on observe aussi des traces de leurs conceptions préalables. Cinq d'entre eux, cependant, sont capables, dans l'entretien final, d'effectuer un bilan et d'expliquer spontanément que s'il reste un peu d'une substance de départ, c'est qu'il y en avait "trop" et que l'autre réactif a été entièrement utilisé.

CONCLUSION

Lors des séquences d'enseignement qui viennent d'être décrites, ce sont des élèves de 11, 12 ou 13 ans que nous avons tenté d'entraîner dans une initiation à la pratique du raisonnement scientifique. C'est une activité qu'ils ont découverte au fur et à mesure qu'elle se déroulait. Ils étaient venus pleins de curiosité, ce qui s'est manifesté par leur goût et leur facilité à s'exprimer spontanément. Nous les avons encouragés à le faire principalement pendant les phases qui nous permettaient de bien connaître leurs conceptions, mais aussi pendant les phases où leurs raisonnements étaient plus guidés, mais où leurs questions et commentaires étaient précieux.

des expériences familières et/ou construites avec des objets familiers ont posé problème aux élèves

Ils avaient probablement envie de manipuler, de faire et de regarder des expériences, et ils n'ont pas été déçus car nous avons accordé une large place à la réalisation d'expériences malgré les difficultés que cela comporte. Ils ont utilisé des objets qu'ils ne connaissaient pas et des objets qu'ils connaissaient très bien (la ventouse par exemple) mais qui leur ont tout de même réservé des surprises. Ils ont constaté que parfois leurs propres interprétations étaient en défaut.

l'enseignant a souvent demandé ce qui change et ce qui ne change pas dans une expérience

Nous leur avons posé des problèmes expérimentaux, pour lesquels ils ont eu à manipuler après avoir réfléchi, et aussi à réfléchir après avoir réalisé un montage ou un autre pour voir ce qui allait se passer. Et là c'était vraiment le résultat de l'expérience qui décidait si ce qu'on avait pensé et imaginé était valable. Peut-être ne s'attendaient-ils pas avoir à tant réfléchir, peut-être ne savaient-ils pas qu'il faut réfléchir pour faire une expérience et même que les observations que l'on fait dépendent beaucoup de ce à quoi on pense quand on la regarde. C'est que très vite, nous leur avons demandé d'être logique, de faire des rapprochements entre les expériences (des inductions), des rapprochements entre les phases des expériences. Nous leur avons demandé de repérer ce qui se conserve et ce qui ne se conserve pas. Ce faisant nous avons parlé de grandeurs qui ne sont pas accessibles à l'oeil ou à aucun des sens, nous avons parlé de grandeurs imaginaires. D'ailleurs depuis le début, nous leur avons fait regarder quelque chose d'invisible ou plutôt expérimenter des effets de quelque chose d'invisible : l'air. Ainsi, à force de regarder ce qui change et ce qui ne change pas, ils ont disposé de concepts pour "lire" les expériences.

les élèves se montraient exigeants pour la cohérence de leur savoir et du savoir enseigné

un modèle a, par sa syntaxe, une cohérence interne

les élèves ont su reconnaître la fertilité de la sémantique du modèle

ils ont vu les limites d'un modèle et en ont accepté un autre

Ils avaient un certain nombre de convictions en eux qu'on appelle parfois le sens commun et que certains chercheurs essaient d'élucider (Ogborn 1989). Et l'exigence qu'ils avaient et que nous avons renforcée, d'être cohérents, de "com-prendre", c'est-à-dire d'articuler ce que nous leur disions et ce qui était leur conviction, les a rendus exigeants. Ils ont été capables de refuser ce qui heurtait leur sens commun : *"Non, l'air qui ne bouge pas, ça ne fait rien, ça n'agit pas, ça ne pousse pas!"*. Ensemble ils se sont mis d'accord sur cette induction. Ils auraient pu ranger ce type d'affirmation parmi les évidences, et pourtant ils ont été amenés à revenir sur cette évidence. C'est qu'ils se sont alors aperçus qu'on pouvait faire de la physique uniquement avec sa tête sans utiliser ses mains. Car le professeur leur a raconté une histoire de particules. Cette histoire, la syntaxe du premier modèle, leur faisait voir toutes les expériences déjà faites de façon différente. Cette histoire leur semblait cohérente car elle utilisait quelque chose qu'ils connaissaient bien et dont ils ont beaucoup à dire : des objets qui bougent dans tous les sens et qui frappent d'autres objets. Elle leur a semblé cohérente et ils l'ont acceptée au point qu'ils ont pu en inventer quelques suites par déduction. Ils ont pu appliquer cette histoire, exploiter la sémantique de ce modèle pour interpréter des expériences. Certains diraient qu'ils lui ont trouvé une certaine vérité factuelle (Bunge 1975). Pour cela, il fallait avoir en tête le modèle et aussi des observations bien choisies pour faire des raisonnements qui tiennent compte des deux. Cela devenait difficile et parfois, cela leur est arrivé d'observer et de se représenter les choses sans tenir compte du modèle, comme ils se les représentaient avant de le connaître. En fait, exigeants comme ils étaient devenus, ils se sont aperçus que l'histoire ne convenait pas pour rendre compte d'un certain nombre d'expériences de chimie. Ils ont essayé ensemble et c'est ensemble qu'ils se sont rendu compte de leur échec. Cela les a rendus muets.

Nous ne leur avons pas demandé d'inventer une autre histoire, mais nous leur avons fourni un modèle légèrement différent qu'ils ont à nouveau tenté de faire fonctionner. Cela n'était pas facile pour eux d'abandonner la première histoire et ce qu'a imaginé l'un d'eux, des particules qui seraient des petites boules avec des bosses, les a provisoirement aidés à se représenter la nouvelle histoire des nouvelles particules. En réalité ils se sont faits assez bien à cette nouvelle histoire car les nouvelles particules avaient le même mouvement que les autres. Et ils ont réussi en grande partie à se plier au scénario proposé : des petites boules sont assemblées, se détachent à cause de chocs, se recombinaient et repartent ensemble. Il faut faire des bilans, compter les particules avant et après pour comprendre. Tout de même cette histoire n'expliquait pas tout ce qu'ils voyaient : de la lumière, de la fumée, de la poudre noire, de la poudre blanche. Aussi ils avaient bien envie parfois de revenir à ce qu'ils ne

les représentations spontanées et scientifiques auront sans doute à coexister. . .

voyaient pas vraiment mais qu'ils croyaient voir dans le récipient : un certain gaz avant la flamme, un autre gaz après, et donc deux substances sans grand chose de commun avant et après.

Quelques semaines, quelques mois plus tard, qui sait ce qui leur est resté "dans la tête" de ce chemin que nous avons choisi pour eux et que nous leur avons fait suivre ? Peut-être seulement l'expérience d'avoir parcouru quelques étapes d'un raisonnement scientifique.

Marie-Geneviève SÉRÉ
GHDSO-LIREST
Université Paris Sud

BIBLIOGRAPHIE

BUNGE, M. (1975). *La philosophie de la physique*. Paris : Seuil.

MUGNY, G. (1985). *Psychologie sociale du développement cognitif*. Berne : Peter Lang.

OGBORN, J. (1989). Primitive structures of commonsense reasoning and the understanding of Science. In : *Séminaire Anthéna*. J.M. Dusseau (Ed.). Université de Montpellier.

PIAGET J. (1968). *Le développement des quantités physiques chez l'enfant*. Paris : Delachaux & Niestlié.

PIAGET J. (1973). *La formation du concept de force*. Etudes d'Epistémologie Génétique N° XXIX ; Paris : PUF.

SÉRÉ M.G. (1985) *Analyse des conceptions de l'état gazeux qu'ont les enfants de 11 à 13 ans, en liaison avec la notion de pression, et proposition de stratégies pédagogiques pour en faciliter l'évolution*. Thèse de doctorat d'état. Université Pierre et Marie Curie (Paris 6).

SÉRÉ M.G. (1990) Passing from one model to another : which strategy ? In : *Relating macroscopic phenomena to microscopic particles*. P.L. Lijnse, P. Licht, W. de Vos & A.J. Waarlo (Eds). University of Utrecht (The Netherlands).

SÉRÉ , M.G. (1991) Learning by giving and receiving explanations. In : *Research in Physics Learning : Theoretical Issues and Empirical Studies*. R. Duit, F. Goldberg & H. Niedderer(Eds). IPN. University of Bremen (Germany).

TIBERGHIE A.(1980) Modes and conditions of learning. An example : the learning of some aspects of the concept of heat. *Cognitive development research in Science and Mathematics*. Archenhold W.F., Driver R., Orton A. & Wood-Robinson C. (Eds). University of Leeds.

VIENNOT L. (1977) *Le raisonnement spontané en dynamique élémentaire*. Thèse de doctorat d'état. Université Paris 7.

RAISONNEMENT ET ÉCRITURE À PROPOS D'ACTIVITÉS EXPÉRIMENTALES AU COLLÈGE

Anne Vérin

La maîtrise du raisonnement scientifique est attendue des élèves mais fait-elle l'objet d'un apprentissage spécifique en classe ? Une recherche a tenté d'explorer les possibilités de travail sur la production de textes comme une entrée possible pour l'apprentissage des opérations intellectuelles dont ils sont le support. L'analyse de quelques séquences d'enseignement de la physique et de la biologie au collège développées dans ce cadre, montre que celles qui sont centrées sur la production de comptes rendus développent la formalisation d'étapes d'un raisonnement expositif où la théorie est utilisée pour expliquer un phénomène expérimental. Celles qui s'appuient sur la production de textes accompagnant la formulation d'hypothèses et la réalisation d'expériences ouvrent des possibilités de mise en oeuvre de raisonnements heuristiques. La question de l'épistémologie scolaire sous-jacente aux choix pédagogiques des enseignants est posée à l'occasion de ces exemples.

des activités de
classe...

Il est très largement admis que l'apprentissage du raisonnement, en relation avec la construction et l'utilisation de connaissances scientifiques fait partie intégrante de la formation scientifique.

où
l'apprentissage
du raisonnement
en sciences...

Cet apprentissage est rarement pris de front. Le travail sur la rédaction de textes autour d'activités expérimentales peut être le support d'un tel apprentissage.

est abordé à
travers la
production
d'écrits

Quelles possibilités offrent cette entrée particulière, quelles en sont les limites, quels sont les aspects du raisonnement qu'elle permet d'enseigner ? Une analyse des caractéristiques de quelques activités de classe construites dans cette perspective permet de préciser les apprentissages mis en jeu selon les tâches intellectuelles proposées aux élèves, les types de texte demandés et les modalités de travail de ces textes. Elle apporte un éclairage sur ces questions et ouvre une réflexion sur le cadre épistémique sous-jacent aux choix pédagogiques.

1. LA RÉDACTION D'UN COMPTE RENDU D'EXPÉRIENCE EST UNE TÂCHE COMPLEXE

Le compte rendu d'expérience, accompagné de dessins et de schémas, est un texte typique de la tradition scolaire, dans l'enseignement des sciences expérimentales (1).

le compte rendu d'expérience

La tâche que l'on propose habituellement aux élèves n'est pas simple. On y relève une divergence entre des objectifs concurrentiels, divergence qui, d'ordinaire, reste essentiellement gérée par les élèves de façon "privée".

reconstruit le raisonnement argumentatif à la façon de l'article scientifique

- D'une part, le compte rendu doit décrire la suite des opérations conduites, il doit fournir les données recueillies sur les phénomènes provoqués et indiquer les conclusions qui en sont tirées. De ce point de vue, il rejoint la superstructure des articles de revues scientifiques, dans lesquels on reconnaît une introduction (présentant le problème et la méthodologie), l'énoncé de résultats, et une discussion. Dans lesquels, surtout, on distingue une partie "récit" (méthodologie et résultats) utilisant un mode d'énonciation objectif (absence de "je", tournures passives...), et une partie "commentaire" (introduction et discussion) à caractère plus personnel (énonciation subjective laissant place à l'auteur) (2).

expose les connaissances acquises à la façon du manuel scolaire

- D'autre part, et simultanément, le compte rendu doit répondre à des exigences d'exposition du savoir scientifique des programmes, sous une forme codifiée (3). On s'attend à y retrouver, sous la plume de l'élève, la relation de faits scientifiques déjà connus, que l'expérimentation est l'occasion de "redécouvrir". Il rappelle donc, d'une certaine façon, les textes que contiennent les manuels, lesquels décrivent des expériences et en induisent des lois, ou présentent ces expériences comme preuves de la valeur de ces lois.

Il s'agit donc d'un genre composite qui doit rendre compte des étapes d'une démarche expérimentale, reconstruite logiquement d'une façon telle qu'elle permette l'exposition d'un savoir socialisé déjà disponible. Il est demandé aux élèves de

-
- 1 On peut noter, surtout au collège, une tendance à la moindre fréquence de cet exercice au profit de l'interprétation de résultats expérimentaux donnés sur papier, concomitante avec une diminution des activités de manipulation.
 - 2 Liliane SPRENGER-CHAROLLES. "La compréhension du langage", in : *Signes et discours dans l'éducation et la vulgarisation scientifiques*, Actes des 6èmes Journées Internationales sur l'Éducation Scientifique, Chamonix, 1984. Paris : Univ. Paris 7, Didactique des disciplines. 1984.
 - 3 Le schéma OHERIC (Observation, Hypothèse, Expérimentation, Résultats, Interprétation, Conclusion), hâtivement attribué à Claude Bernard, est encore souvent utilisé dans la tradition scolaire pour définir la forme d'exposition attendue.

c'est la phase de structuration logique de la démarche scientifique qui est privilégiée

combiner discours argumentatif et discours expositif dans un raisonnement logique rigoureux qui établit des rapports entre la pensée et la réalité (4).

La rédaction d'un compte rendu répond ainsi à deux fonctions dans l'apprentissage : une fonction d'appropriation et de consolidation des acquis (correspondant au deuxième objectif décrit plus haut) et une fonction d'appropriation d'un des aspects de la démarche expérimentale, la reconstruction a posteriori à des fins de communication du raisonnement effectué en relation avec l'expérimentation (premier objectif).

C'est toujours l'esprit logique - "le deuxième esprit scientifique" défini par Gabriel Gohau (5) - qui est privilégié dans cet exercice, qu'il soit articulé ou non, selon les cas, avec des activités relevant du "premier esprit scientifique", heuristique.

2. LE DÉVELOPPEMENT DU RAISONNEMENT EN RELATION AVEC DES ACTIVITÉS D'APPRENTISSAGE DE L'ÉCRITURE DE COMPTES RENDUS

deux dispositifs

Je me propose d'analyser d'abord deux dispositifs didactiques construits dans le but explicite de favoriser des apprentissages méthodologiques à l'occasion de la rédaction de comptes rendus (6).

centrés sur la mise en forme du raisonnement

Les enseignants ont conçu ces dispositifs en choisissant de mettre l'accent sur des activités de raisonnement et de mise en forme du raisonnement, le compte rendu construit se rapprochant plutôt de l'article scientifique que du modèle scolaire habituel. Les activités mises en place conduisaient les élèves à expliciter certains aspects de la superstructure

-
- 4 Plusieurs articles caractérisent l'épreuve de biologie sur documents au baccalauréat comme la forme extrême de ce type de texte, où par une pseudo-argumentation rhétorique les théories sont inférées des données expérimentales, par exemple :
Gabriel GOHAU. "A propos des épreuves sur documents". *Bulletin de l'APBG*, 3, 1972.
Babacar GUEYE. "L'épreuve écrite de biologie au baccalauréat fait-elle appel au raisonnement en sciences expérimentales ?". *ASTER*, 8, 1989.
- 5 GOHAU Gabriel. "Deux esprits scientifiques". *Cahiers pédagogiques*, 141, 1976.
- 6 Je reprends ici, en me centrant plus spécifiquement sur les composantes de l'apprentissage qui ont trait au raisonnement, des séquences décrites dans : Jean-Pierre ASTOLFI, Brigitte PETER-FALVI, Anne VÉRIN. *Compétences méthodologiques en sciences expérimentales*. Paris : INRP. 1991, chapitre 2 : "Apprendre à écrire des textes variés, fonctionnellement insérés dans la formation scientifique".

et des règles formelles propres à un compte rendu scientifique et initiaient chez eux une réflexion de type métacognitif portant en particulier sur les raisonnements mis en oeuvre à chaque étape.

Les tâches dans lesquelles les élèves sont successivement engagés déterminent la mise en oeuvre d'un raisonnement que je tenterai de caractériser dans chaque cas.

J'analyserai ensuite ce que le travail sur le texte apporte à l'apprentissage de compétences de raisonnement.

2.1. Un cachet d'aspirine ... et le bouchon saute (“expliquer” = “décrire” ou “interpréter”)

L'expérience suivante est proposée à une classe de Troisième, en début d'année. On met un quart de cachet d'aspirine effervescente dans un pilulier contenant de l'eau. On ferme celui-ci et l'on observe rapidement que le bouchon saute.

Les manipulations à effectuer sont des plus simples, le phénomène observé également ; et ceci est délibéré. Ce que souhaite l'enseignant, c'est focaliser le travail des élèves sur ce qui peut faire ici difficulté : l'interprétation du phénomène et sa rédaction par les élèves ; et il a préféré pour cela une réalisation expérimentale qui ne pose pas problème par ailleurs.

Il est annoncé d'emblée aux élèves que l'interprétation du phénomène demandera de mettre en jeu le modèle particulière de la matière. Une formulation en a été construite avec les élèves dans les cours précédents, en relation avec les paramètres caractéristiques d'un gaz : pression, volume, température, nombre de particules.

Je caractériserai deux tâches, qui ne sont pas nécessairement successives pour les élèves mais qui me semblent distinctes : la tâche d'élaboration de l'explication et la tâche de mise en forme du raisonnement explicatif en respectant des normes.

Le phénomène considéré est, pour l'enseignant, un fait expérimental construit de façon déductive en rapport avec le modèle ; l'effet est prévu. Pour l'élève, il a le statut d'une observation surprenante. En effet, l'effet est inattendu (le bouchon saute) et paraît sans commune mesure avec ce qui l'a provoqué (mettre un comprimé dans de l'eau ne provoque rien de particulier dans l'expérience de tous les jours). Il motive la recherche d'une explication rationnelle.

On est là devant une situation transposant au cadre scolaire l'activité du scientifique qui cherche à éprouver les modèles physiques dont il dispose pour voir s'ils peuvent rendre compte de façon satisfaisante de nouvelles classes de phénomènes (ce que Kuhn appelle la science courante). Les élèves auront bien cette référence en tête au moment de la rédaction du compte rendu puisqu'ils chercheront à préciser le but de l'expérience - nous y reviendrons. Mais dans le

réalisation des manipulations indiquées pour provoquer un phénomène simple

mais inexplicable

sans le recours au modèle particulière de la matière

le phénomène n'est pas construit par les élèves

c'est un fait observé

leur activité
intellectuelle :
élaborer une
explication

contexte d'apprentissage scolaire, le phénomène est donné à l'élève déjà construit, l'élève n'a pas d'hypothèse à faire, ni de découpage de la réalité pour en retenir les éléments significatifs, ni de raisonnement argumentatif. On lui demande de produire une explication. L'explication n'étant pas disponible immédiatement, c'est une démarche seconde, nécessitant l'utilisation déductive du modèle, qui donne la clé.

par un
raisonnement
déductif à partir
du modèle
connu

Le travail intellectuel de l'élève, pour l'élaboration de cette explication, comporte alors trois opérations successives :

- dans un premier temps, repérer une suite d'événements observés au niveau macroscopique ;
- puis sélectionner les éléments du modèle qui correspondent aux éléments de la réalité ;
- enfin les utiliser pour nommer ces éléments et pour supposer les mécanismes non visibles qui expliquent le passage de l'état initial visible à l'état d'arrivée visible.

L'interprétation attendue est la suivante :

- 1) les bulles sont l'indice de la formation d'un gaz ;
- 2) ce gaz est produit par la réaction chimique de l'aspirine avec l'eau ;
- 3) le nombre de particules de gaz augmente, et donc également le nombre de chocs sur les parois du pilulier et le bouchon ;
- 4) en conséquence, la pression augmente à l'intérieur du pilulier, et le bouchon saute.

Au moment de la rédaction individuelle du compte rendu, les élèves réinvestissent le travail de définition d'une grille d'évaluation commencé au cours de la séquence précédente (7) : on constate la reprise de certaines rubriques ou même l'utilisation par certains de la grille comme d'un plan-type organisant le compte rendu.

Certaines des rubriques de la grille précisaient des exigences formelles :

*"mettre un titre",
"faire des paragraphes séparés",*

ou encore :

*"donner la liste du matériel utilisé",
"faire un ou des schémas (...)".*

D'autres nous intéressent plus particulièrement ici car elles font référence à différents aspects du raisonnement :

*"expliquer le but de l'expérience : ce qu'on cherche",
"expliquer ce qu'on fait, les consignes, les étapes",*

l'utilisation d'une
grille
d'évaluation au
moment de la
rédaction

7 La grille était présentée aux élèves comme un outil à construire et à perfectionner progressivement. Elle a joué un rôle de support pour des activités de réflexion métacognitive sur la tâche de rédaction d'un compte rendu scientifique. Ce travail a été relaté dans : Anne GOUBE. "Ecrire en sciences au Collège : une aide méthodologique", in : *Les aides didactiques pour la culture et la formation scientifiques et techniques*, Actes des 11èmes Journées Internationales sur l'Education Scientifique, Chamonix, 1989. Paris : Univ. Paris VII, Didactique des disciplines. 1989.

*"mettre les remarques sur ce qui se passe (observations)",
"faire une conclusion".*

facilite la mise en
forme du
raisonnement

Ainsi la première de ces rubriques ("expliquer le but de l'expérience : ce qu'on cherche") place l'expérience dans un raisonnement argumentatif. On a vu que les consignes permettant de réaliser l'expérience étaient données aux élèves, qu'ils n'ont pas eu à faire de conjectures à ce moment-là : il s'agit donc d'une reconstruction par les élèves du point de vue de l'enseignant ou du point de vue d'un chercheur fictif qui aurait imaginé cette expérience.

L'élève qui écrit :

«But : Si on laisse T (température) fixe ainsi que V (volume) et qu'on augmente N (nombre de particules) ; on cherche à savoir ce qui se passe pour P (pression du gaz), on cherche à savoir si notre modèle permet d'expliquer ce qui se passe.»

et sa
reconstruction
sous la forme
argumentative
attendue

propose un raisonnement argumentatif, où les caractéristiques de l'expérience sont déduites du modèle de façon à contrôler deux paramètres, à en faire varier un troisième. Même s'il est laissé en suspens, si l'effet prédictible à partir du modèle n'est pas formulé, en bref, même si ce raisonnement est incomplet, je retiens ici l'idée que l'élève tente de reconstituer le point de vue de celui qui a construit l'expérience. Le dernier membre de phrase change de registre et revient à l'explication du point de vue de l'élève.

Les rubriques suivantes définissent une exigence de définition d'un protocole d'expérience précis : description organisée de la suite des actions réalisées, consignation des résultats observés ; puis une exigence de rédaction d'une conclusion.

Pour un certain nombre de textes d'élèves, ces rubriques sont utilisées comme un plan-type. Le compte rendu adopte alors le schéma suivant, proche de la superstructure des articles scientifiques :

mais la maîtrise
de la forme n'est
pas encore
acquise

- but de l'expérience (le problème),
- protocole (la méthodologie, les résultats),
- conclusion.

Cependant si l'on examine précisément les textes, on constate que ces différents aspects sont mélangés à l'intérieur même des paragraphes.

l'utilisation de la
même grille par
la classe

Le travail proposé aux élèves sur ces textes s'organise de la façon suivante. Le professeur en sélectionne trois, les photocopie et les distribue à tous, en demandant à la classe de les lire et de les analyser de façon comparative. La grille d'évaluation des comptes rendus scientifiques est utilisée dans cette tâche d'analyse comparative : il s'agit de la mettre à l'épreuve et de la modifier chaque fois qu'elle n'apparaît pas suffisamment précise, univoque ou complète. Mais simultanément, à l'occasion de cette activité de définition de critères, c'est une explicitation des savoirs et des opérations mentales en jeu dans la rédaction des comptes rendus analysés que l'enseignant veut favoriser.

facilite une
analyse
distanciée des
textes

Compte-rendus de Sciences Physiques

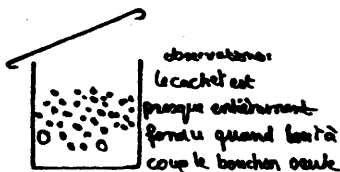
1^{ère} expérience: Pression du gaz

But: Si on laisse T (température) fixe ainsi que V (volume) et qu'on augmente N (le nombre) de particules; on cherche à savoir ce qui se passe pour P (pression du gaz), on cherche à savoir si notre modèle permet d'expliquer ce qui se passe.

Matériel: 1 Boîte à pilules en verre, eau, $1/4$ de cachet d'aspirine, un bouchon en plastique avec la boîte.

Explications: On prend la boîte, on laisse rentrer l'air, on met de l'eau, $1/4$ de cachet d'aspirine et on ferme vite la boîte avec le couvercle, et on laisse fondre le cachet.

Schémas:



observations:
le cachet est presque entièrement fondu quand on a coupé le bouchon avec.

Explications: Comme on n'augmente pas T on pourrait croire que P reste fixe car l'agitation augmente avec t et P augmente avec l'agitation.



départ



fin

En revanche on accroit le nombre de particules on fait fondre le cachet (quand il fond il fabrique des particules) donc le nombre de chocs contre la paroi va aussi s'accroître.

Conclusion: P augmente car le nombre de chocs augmente donc le bouchon saute.

Un des textes d'élèves analysés par la classe

Ce dispositif est repris plusieurs fois au cours de l'année. Mais chaque fois, selon les caractéristiques des productions des élèves, le professeur privilégie une centration particulière qui lui paraît propre à faire réaliser aux élèves un progrès significatif.

qui, ici, conduit à une réflexion métacognitive

sur les opérations en jeu dans le raisonnement à propos d'expériences

Ici le professeur, ayant noté que le mot *expliquer* est utilisé plusieurs fois par les élèves, tantôt avec le sens de *décrire*, tantôt avec celui d'*interpréter*, choisit de centrer la réflexion sur le raisonnement à propos d'une expérience scientifique, en partant d'une réflexion sur les opérations mentales désignées par ce terme.

Après un long débat sur le sens de ces différents mots, après recherche dans le dictionnaire, le terme "*expliquer*" est éliminé. Il est remplacé soit par "*donner le but*", quand il s'agit d'une explication qui cherche à finaliser l'expérience (la question théorique pour laquelle l'expérience a été conçue), soit par "*décrire*" quand l'explication précise la façon dont l'expérience est conduite (le protocole d'expérience), soit par "*interpréter*" quand l'explication rend compte, avec des outils conceptuels théoriques, du phénomène observé. Ces distinctions seront reprises et affinées par la suite. Une discussion s'engage sur ce que peut être le but d'une expérience : répondre à une question, comprendre, explorer.

Ainsi dans ce débat, chacun, par sa participation ou son écoute, cherche à s'appropriier les objectifs, à comprendre, preuves à l'appui, le sens des rubriques de la grille, conçues comme différents moments du raisonnement, et à préciser les différentes opérations intellectuelles auxquelles elles renvoient. Ce travail d'explicitation passionne les élèves et le professeur note une amélioration de la qualité des comptes rendus beaucoup plus rapide que les années précédentes.

2.2. Seringue et pression atmosphérique

(distinguer, puis articuler, séquence descriptive et séquence explicative)

invention du protocole qui permettra d'obtenir l'effet demandé

Les élèves d'une classe de physique de Cinquième viennent d'imaginer et de réussir une expérience mettant en jeu la pression atmosphérique (8). On leur a demandé d'imaginer une expérience dans laquelle l'eau monte dans une seringue, sans que l'on touche au piston de cette seringue au moment de l'ascension de l'eau. Ils ont assez rapidement trouvé qu'il faut créer une dépression dans la seringue et, pour cela, boucher l'embout avec le doigt et tirer le piston avant de plonger la seringue dans l'eau.

L'enseignant propose ici aux élèves un défi technique. Il s'agit comme dans l'exemple précédent de produire un phénomène surprenant, mais cette fois ce n'est pas la marche à suivre qui est donnée, mais le résultat recherché : faire pénétrer de l'eau dans une seringue sans toucher au piston. Du point de vue des élèves, leur activité inventive porte sur la réussite de l'action dans ce premier temps, et non sur

8 Une première analyse de ce travail conduit par Camille DURNERIN et Alain ROBERT a été publiée dans : Anne VÉRIN. "Apprendre à écrire pour apprendre les sciences", in : "*Les élèves et l'écriture en sciences*", Aster, 6. 1988.

rédaction d'une
fiche de T.P. à
l'intention
d'autres élèves

l'élaboration d'une explication. Celle-ci interviendra au moment des activités de production de versions successives du compte rendu.

La consigne leur est alors donnée d'écrire pour les élèves d'une autre classe une fiche décrivant le "comment" et le "pourquoi" de cette expérience :

"Écrivez pour les élèves de Cinquième B comment il faut faire pour que l'eau monte dans la seringue sans toucher au piston au moment de l'ascension de l'eau, et pourquoi il faut le faire."

Un groupe d'élèves rédige le texte suivant :

"Pour arriver à faire monter de l'eau à l'intérieur d'une seringue sans actionner le piston une fois que la seringue est dans l'eau.

1er : Avoir un cristalliseur rempli d'eau et une seringue

2ème : On bouche l'extrémité de la seringue avec un doigt. Ensuite, on actionne le piston comme si l'on aspirait de l'eau pour avoir un vide qui permettra par la suite en plongeant la seringue dans l'eau de faire monter l'eau à l'intérieur de la seringue. Ensuite, on la plonge dans l'eau et on lâche l'extrémité bouchée par le doigt sans lâcher le piston et l'eau montera."

Texte 1 réalisé par un groupe de 5ème A

la fiche est
utilisée pour
réaliser la
manipulation

Chacun des groupes de la classe de 5ème B reçoit l'un de ces textes et l'utilise pour réaliser à son tour la manipulation. Le groupe doit ensuite rédiger ses remarques à l'intention des auteurs, et réécrire le texte *"pour l'améliorer en modifiant ce qui ne va pas et en rajoutant ce qui manque."*

ce qui met à
l'épreuve
essentiellement
le caractère
reproductible du
protocole décrit

En insérant la production du texte dans une situation de communication fonctionnelle, on met l'accent sur la description séquentielle des actions. Les élèves sont amenés à découper de façon clairement identifiable plusieurs actions successives et à décrire l'effet obtenu. Ce qui est mis à l'épreuve lorsque ce texte est utilisé comme fiche de travaux pratiques par d'autres élèves, c'est d'une part la lisibilité de l'aspect prescriptif de la fiche, d'autre part le caractère reproductible de la suite d'actions décrite. Si les élèves utilisateurs comprennent la fiche et parviennent à reproduire cette suite d'actions, ils doivent obtenir le résultat attendu (ce sera un critère de réussite du texte), quelle que soit l'explication qu'on lui donne. C'est la précision du protocole expérimental qui est recherchée.

la réécriture
porte sur la
lisibilité et la
distinction entre
description et
explication

La réécriture par les élèves de la 5ème B porte alors essentiellement sur des modifications de forme (suppression de mots superflus), mais également sur une meilleure distinction entre les aspects descriptifs, explicatifs et injonctifs du texte, initiée par la consigne d'écriture qui différencie "comment" et "pourquoi". L'exemple ci-dessus comporte par exemple une longue phrase de construction complexe, où la description d'une action (*ensuite on actionne*) est liée à son effet futur (*qui permettra*) lors d'une action ultérieure (*en plongeant la seringue*).

parfois au
détriment de
l'explication

Les élèves lecteurs ayant eu du mal à reconstituer la suite des actions, rédigent une seconde version, faite de phrases courtes, précisant chacune une des actions successives à réaliser. Il perd, du coup, la composante explicative de la première version, mais gagne en efficacité sur le plan injonctif.

"Pour arriver à faire entrer de l'eau à l'intérieur d'une seringue.

Matériel : de l'eau, une seringue et un cristalliseur.

Mode d'emploi : remplir le cristalliseur d'eau ; boucher l'extrémité de la seringue. Ensuite actionner le piston sans enlever le doigt de l'extrémité de la seringue. Puis la plonger dans le cristalliseur, enlever le doigt de l'extrémité de la seringue, et vous verrez que l'eau monte."

Texte 2 : réécriture du texte 1 par un groupe de 5ème B

la mise à
l'épreuve
fonctionnelle ne
met pas en
défaut l'expli-
cation non
scientifique

le professeur
demande
d'utiliser les
connaissances
antérieurement
construites

A ce stade, le problème de l'explication du phénomène reste entier. Celle-ci est, certes, complexe et seuls deux textes d'élèves font référence à la pression de l'eau. Pour les autres, l'«horreur du vide» semble tenir lieu assez largement de principe explicatif !

Principe inexact mais qui se révèle avoir une efficacité pratique dans ce cas. Ce n'est donc pas par un échec de l'action que l'explication est remise en question, mais par un jugement du professeur qui la récuse, au nom d'un savoir scientifique précédemment construit avec les élèves et qui s'est révélé performant sur d'autres classes de phénomènes. L'intermède de la manipulation contribue cependant à faire partager aux élèves le projet de construction de connaissance ainsi amené par l'enseignant, qui rendra utile la rédaction d'une explication satisfaisante.

C'est par un retour dans la classe de 5ème A qu'un troisième temps, centré sur l'élaboration d'une explication du phénomène en termes de pression atmosphérique, est organisé. Le texte réécrit par les élèves de 5ème B est à nouveau repris et réécrit par les élèves auteurs du premier texte.

"Pour arriver à faire monter l'eau à l'intérieur d'une seringue, sans activer le piston une fois que la seringue est dans l'eau.

On prend une seringue dont le piston est poussé à fond, on bouche l'extrémité de la seringue avec un doigt (en gardant le doigt sur l'extrémité de la seringue), on actionne le piston comme si on aspirait de l'eau pour que la pression qui est à l'intérieur de la seringue soit inférieure à la pression extérieure, ce qui permettra par la suite à l'eau de monter dans la seringue.

Ensuite, on plonge la seringue dans l'eau en gardant toujours le doigt sur l'extrémité de la seringue ; une fois qu'elle est dans l'eau on enlève le doigt qui bouche l'extrémité où l'eau monte car la pression exercée sur l'eau est plus «puissante» que celle qui est dans la seringue, donc l'eau doit monter."

Texte 3 : réécriture par le groupe de 5ème A auteur du texte 1

La rédaction de cette troisième version du texte vient au terme d'une élaboration de l'explication qui a conduit les élèves à identifier et à travailler différentes opérations intellectuelles complexes telles que :

la réélaboration de l'explication implique un raisonnement déductif et argumentatif

- sélectionner un cadre interprétatif théorique : identification parmi les connaissances disponibles de celles dont la mobilisation est utile dans la situation particulière. Les élèves réexaminent leurs notes de cours dans cette perspective ;
- établir des relations entre faits et cadre interprétatif : articulation entre les faits constatés ou produits, pour les mettre au service d'une chaîne argumentative déductive. Après un temps de réécriture distincte pour les parties injonctive et explicative, il est demandé aux élèves une réécriture individuelle du texte, intégrant ces deux parties dans une écriture continue. C'est l'occasion en même temps d'un travail au niveau de la représentation que se font les élèves de ce qu'est une explication scientifique ;
- organiser le raisonnement sous la forme discursive d'un texte : traduction de ces articulations dans le corps du texte, grâce aux ressources du lexique (emploi des connecteurs, par exemple) et de la syntaxe, ce qui donne lieu simultanément à une analyse des caractéristiques des textes explicatifs par rapport aux textes injonctifs.

et une réflexion sur ce qu'est une expérience scientifique

3. LE DÉVELOPPEMENT DU RAISONNEMENT EN RELATION AVEC LA PRODUCTION D'ÉCRITS ACCOMPAGNANT L'EXPÉRIENCE OU L'OBSERVATION

Les séquences précédentes portaient sur la phase de rédaction d'un compte rendu. Or, il est possible de développer aussi des compétences autour du raisonnement expérimental, en s'aidant d'écrits qui accompagnent la mise au point, la réalisation ou l'interprétation d'une expérience ou d'une observation, sans prendre nécessairement une "bonne forme", si ce n'est dans la phase terminale du travail.

deux dispositifs où les écrits sont des outils pour une démarche heuristique

3.1. Le lapin repère sa nourriture (mise au point d'un plan expérimental)

Deux caractéristiques font l'originalité de cette séquence : les élèves sont engagés dans l'invention d'un dispositif expérimental pour répondre à un problème, et le travail réalisé autour de la production d'écrits a pour fonction d'accompagner la démarche heuristique dans laquelle les élèves précisent le problème, définissent des variables, prévoient des dispositifs permettant d'agir sur ces variables (9).

l'idée d'expérience, rudimentaire au départ

9 Martine SZTERENBARG. "Sur les traces du lapin blanc". *Cahiers Pédagogiques*, 278, 1989, et : "Elaborer l'idée d'expérience" *Aster*, 12, 1991.

Elle s'adresse à des élèves de Sixième qui n'ont pratiquement jamais bénéficié jusque-là d'activités de type scientifique. C'est dire que l'on part d'une méconnaissance presque complète de ce qu'est une expérience.

Les élèves ont assisté, dans une précédente séquence, à la projection d'un film qui relatait des expériences sur le mode de repérage sensoriel chez les Chauves-souris.

Ce film suit une logique expositive et argumentative où des hypothèses sont présentées, des expériences sont construites pour infirmer ou confirmer les hypothèses, les résultats des expériences permettent de valider des connaissances. Le modèle de l'activité scientifique du naturaliste proposé ainsi, malgré ses limites, enrichit le modèle dont disposent les élèves qui, on le voit à la lecture de la majorité de leurs premières productions, est celui de la monographie - sous la forme d'une collection de renseignements descriptifs et non problématisés faisant le tour des différents aspects de la vie d'un animal.

Le raisonnement s'inscrit sur le plan conceptuel dans une redéfinition du concept de milieu. La question ne peut se poser que si l'on admet de "penser le milieu à partir de l'animal comme son environnement, où les possibilités ne sont offertes que si l'animal peut les utiliser ("milieu agi") et non comme un milieu identique pour tous "qui impose ses conditions aux vivants (milieu "subi")" (10). Le cas de la Chauve-souris est intéressant parce que ses possibilités sensorielles sont tellement différentes de celles de l'homme que la décentration en est facilitée.

Le principe en est repris ici, avec la mise en place d'un plan d'expériences "pour savoir avec quel(s) organe(s) des sens le Lapin repère sa nourriture".

Cependant la théorisation qui préside au choix des variables est faible. La proximité de l'animal choisi avec l'homme permet aux élèves de se contenter d'identifier implicitement le milieu du Lapin et ses possibilités sensorielles avec ceux de l'homme pour choisir les variables "vue" et "odorat". La variable "ouïe" retenue également pourrait ouvrir une remise en question conceptuelle, mais elle est peu vraisemblable étant donné le régime alimentaire du Lapin.

C'est sur le raisonnement hypothético-déductif que l'accent est mis, et particulièrement sur l'aspect prédictif de la réalité qui est le propre des hypothèses : la première tâche des élèves consistera à formuler des questions en des termes tels qu'ils pourront orienter la construction d'un dispositif expérimental et qu'ils inclueront une prévision des résultats attendus.

L'idée est la suivante : c'est qu'avant de lancer les élèves dans l'expérimentation proprement dite, il est utile qu'ils planifient aussi précisément que possible le déroulement de leurs actions expérimentales en rapport avec ce qu'ils se proposent de montrer ; même si en cours de réalisation, ils

est enrichie par un film

puis par les activités d'invention d'un dispositif expérimental

le raisonnement hypothético-déductif

10 Brigitte PETERFALVI, Guy RUMELHARD, Anne VÉRIN. "Relations alimentaire". *Aster*, 3, 1987, page 141.

découvrent d'autres aspects des choses qui amèneront à infléchir ce plan.

est soutenu par
un outil
graphique
prévisionnel

Pour aider à la genèse de ce raisonnement anticipatoire, avec émission d'hypothèses, le professeur propose aux élèves de préparer (individuellement ou en groupes), un "outil graphique" ou "document" qui permettra de prévoir la marche à suivre, et de noter les résultats.

L'emploi d'un tel "outil graphique" est un exemple, d'un type particulier, d'utilisation fonctionnelle d'un écrit. Celui-ci se distingue par ses propriétés synoptiques, puisqu'il donne à voir d'un seul coup d'oeil le processus expérimental projeté. La signification des différents moments de la démarche peut plus facilement être mise en relation avec l'ensemble, permettant ainsi une visualisation globale porteuse de signification. D'autant que ce document anticipatoire devra guider par la suite la démarche elle-même.

Mais, pour anticiper, il est nécessaire d'avoir une certaine expérience de la chose, et c'est justement ce qui fait défaut aux élèves dont il est question. C'est pourquoi, les premiers "outils" produits sont très éloignés de ce qu'on pourrait appeler un plan expérimental, les élèves produisant plutôt en majorité des monographies sur le lapin ou sur son alimentation !

quatre
productions sont
analysées
collectivement

C'est alors que survient un moment-clé de cette stratégie didactique : les documents imparfaits (disons même mauvais et hors sujet, qui manifestent une incompréhension de l'idée de plan expérimental), loin d'être écartés, sont pris comme points d'ancrage pour l'élaboration ultérieure. Le professeur reproduit sur transparents quatre des documents d'élèves, qu'il a sélectionnés comme représentatifs des productions de la classe, et il les propose à l'examen critique collectif. Dès cette première projection, les écarts sont repérés entre ce qui a été produit et la fonction que le document était censé remplir. En même temps est esquissée une première prise de conscience des opérations intellectuelles en jeu dans la mise au point d'un plan d'expérience : choisir des variables pertinentes par rapport au problème, définir l'action que l'on exercera sur elles, prévoir l'effet en fonction d'un cadre interprétatif.

amorce d'une
réflexion
métacognitive

en particulier sur
la notion de
variable

Rabbah : *Malgré les dessins, elle n'a pas bien expliqué ce qui était demandé.*

Fabrice : *Elle n'a pas fait d'expérience.*

Alain : *Vous avez demandé comment il repèrait sa nourriture, le document donne d'autres renseignements.*

Mourat : *Dans l'expérience, on ne sait pas s'il voit, s'il sent ou s'il entend !*


Linda : *Ce n'est pas le travail demandé. On ne sait pas si elle veut parler de l'ouïe, de la vue ... des expériences que vous avez demandées.*

réécritures


Le professeur propose alors une réécriture du document anticipatoire, et cette deuxième version sera également soumise à la discussion collective.

Document sur le lapin

Le lapin est un rongeur qui se nourrit de carottes et de laitues.



Le lapin est très prolifique et peut être domestique ou sauvage.



Le lapin vit sur les terrains boisés et saboteux où il creuse des terriers collectifs.


Un exemple de la première version du document anticipatoire

Dolida: dit que c'est grâce à l'ouïe qu'il repère sa nourriture.

Virginie: dit que c'est grâce à l'odorat et à la vue, mais surtout grâce à l'odorat.

Fabrice: dit pareil que Virginie.

1^{er} expérience



Je bouche et je bande ses yeux et je cache une carotte

Je bande et je bouche le nez et je cache la carotte

Je bouche le nez et bande les oreilles et je cache la carotte.

Un exemple de la deuxième version du document anticipatoire

et nouvelles
analyses critiques

On ira ainsi jusqu'à trois versions successives, intégrant progressivement les critiques de plus en plus affinées (les dernières critiques portent sur la correction de la chaîne logique dans l'expérimentation et sur le statut de l'hypothèse, des résultats et de la conclusion).

pour aider à une
meilleure maîtrise
du raisonnement

Il est à noter que sans la médiation de l'écrit, ces échanges entre élèves n'auraient pas eu un caractère si interactif et intense. L'écrit évolutif a donc un rôle clé dans l'élaboration, puisqu'il a été à la fois le support de la réflexion prévoyant l'action, et le support des échanges relatifs à cette prévision. C'est à l'occasion des analyses collectives de textes que l'enseignant a fait réfléchir les élèves au statut des hypothèses et des expériences dans la construction des connaissances.

A ce moment du processus, l'enseignant a substitué aux instruments que les élèves avaient élaborés (et qu'il faut reconnaître encore bien imparfaits pour certains d'entre eux), un tableau qu'il a lui-même construit, et dont il a jugé l'emploi plus efficace pour organiser la réalité du travail expérimental.

la mise en forme
finale est
proposée par
l'enseignant

Il est intéressant de clarifier ce que les élèves ont appris dans ces conditions. On peut, en particulier, faire l'hypothèse suivante : c'est que le respect de ces phases assez longues d'élaboration, de discussion, et de réécriture, telles qu'elles ont été décrites, **a modifié le statut du tableau introduit par l'enseignant**, pour guider la conduite de l'expérimentation. Celui-ci aurait été perçu bien différemment par les élèves, s'il avait été proposé d'emblée comme une fiche-guide, comme un protocole canonique à respecter. Survenant **après** les phases d'élaboration individuelles et collectives, il a pu être perçu par les élèves de façon **comparative** avec l'état des productions auxquelles ils étaient parvenus, et une valeur d'outil, permettant d'examiner la cohérence entre hypothèses, conditions expérimentales et conclusions, a pu lui être attribuée.

ou résulte d'une
mise à l'épreuve
pratique des
outils des élèves

Cette situation a été reprise avec une centration différente de l'enseignant et dans des conditions différentes qui ont permis l'utilisation effective des documents des élèves au moment de l'expérimentation. La mise à l'épreuve de ces documents a fait apparaître des insuffisances fonctionnelles. Les élèves ont été conduits à réaménager les conditions expérimentales, par exemple à introduire une dimension statistique. La prise de conscience **par la mise en pratique** a constitué une source de nouveaux progrès dans les compétences en cours de construction.

3.2. La vipère

(écrire des questions pour construire une interprétation)

Dans cette séquence, l'écrit est utilisé comme un moyen de fixer les doutes et les hésitations, de les valoriser, de les reprendre pour les confronter à de nouvelles données et de montrer qu'ils sont une étape de la démarche scientifique.

valoriser le doute
comme une
étape de la
démarche
scientifique

L'obstacle que l'on veut dépasser est celui de l'adhésion absolue à la première impression. Les élèves ont tendance à éliminer toute interrogation, et à fournir une interprétation qu'ils considèrent comme immédiatement juste. Si celle-ci se trouve remise en cause, ils penseront simplement qu'ils ont commis une erreur, que sans doute ils n'auraient pas dû laisser passer. Et telle est bien, en effet, la règle du jeu communément en vigueur à l'école, que les élèves intériorisent : on attend d'eux des réponses exactes. De ce fait, ils ont du mal à entrer dans une démarche de type scientifique, et à comprendre qu'une des choses qui la caractérisent c'est, en acceptant des erreurs potentielles, d'avancer des interprétations, sans perdre de vue qu'elles présentent un caractère hypothétique.

En choisissant de faire travailler les élèves sur le repas de la Vipère, on se place dans une logique où on veut les sensibiliser au fait qu'il est préférable de se méfier ! En effet, le comportement prédateur de la Vipère est loin d'être évident, puisque, dans un premier temps, l'animal mord sa proie en lui injectant du venin, et dans un deuxième temps, lorsque celle-ci est morte, elle la recherche puis la mange en commençant l'ingestion par la tête. Les organes des sens, en jeu dans le repérage de la proie, ne sont pas les mêmes dans les deux temps.

écrire des
interprétations
alternatives

Au cours de la première phase de la séquence, le professeur demande aux élèves de classer et d'interpréter une série de photos qui décomposent les phases du phénomène, en insistant sur le caractère "piégé", ambigu et incomplet de ces documents. La fiche que les élèves ont à remplir incite par exemple à proposer deux interprétations ; elle leur permet de conserver une trace de leurs doutes, car les photos qui leur posent problème doivent y être cochées en rouge. Les élèves sont ensuite invités à écrire les questions que leur posent ces photos cochées (document page suivante). Ainsi la forme même des écrits sollicités, induit les élèves à formuler des interprétations alternatives et des doutes.



Questions écrites par les élèves à propos de la photo "F"

- Je me demande ce que fait la souris en l'air.
- Pourquoi elle saute ? Pour se défendre , se sauver ?
- Est-ce qu'elle saute pour se défendre ou parce qu'elle est projetée par la vipère ?
- Je ne comprends pas pourquoi elle saute dans la gueule de la vipère alors qu'elle aurait pu se sauver.
- On ne sait pas si la vipère a attrapé la souris qui réagit ou saute, ou si elle saute de peur et se fait mordre.
- On ne sait pas si elle la lâche et la laisse tomber ou si la souris sursaute.
- La photo "F" m'a posé problème. Je me demande pourquoi.
- Je ne sais pas si la vipère attaque la bouche ouverte ou si la proie part.
- Elle se jette dans sa bouche. En se battant, elle s'est fait avoir parce qu'elle se fait piquer.
- Pourquoi la souris saute ? Avant d'être piquée ou après, de peur ou pour s'enfuir ?

permet de les
confronter et de
constater que
plusieurs sont
possibles

On demande ensuite à chaque élève de confronter son travail avec celui d'un élève voisin, de façon à rendre manifeste à tous la possibilité d'interprétations divergentes, pour une même série de données. Ces interprétations duelles sont alors affichées dans la classe, et font l'objet d'un examen comparatif. Même après discussions et ajustements, il apparaît que plusieurs façons, également plausibles, de lire la succession des photos, subsistent. Celles-ci restent donc toutes légitimes, alors qu'il est par contre illégitime, à ce stade, et en l'absence de données complémentaires, d'afficher une certitude interprétative. La "bonne réponse", ce n'est plus d'avoir deviné juste, c'est de disposer de plusieurs interprétations alternatives, et de conserver plusieurs questions en tête.

Le terme d'"interprétation" est pris ici dans un sens particulier. Il désigne le fait de rendre compte d'un comportement observé, de reconstituer un déroulement chronologique qui

prendre conscience que les certitudes hâtives sont un obstacle à la démarche heuristique

les interprétations proposées prennent le statut d'hypothèses qui seront confirmées ou infirmées par l'observation

se déroule de façon trop rapide pour être observé précisément et de s'aider pour cette reconstitution de suppositions sur les organes des sens en jeu dans le repérage de la proie. Cette activité permet d'attirer l'attention sur la phase de construction d'explications plausibles et sur l'importance du doute pour imaginer des explications en rupture avec ce que l'on croit voir ou ce que l'on croit savoir. Il n'y a pas de règle permettant de garantir la validité d'une démarche inductive, mais quelques principes dont celui du doute méthodique, favorisent la fécondité de la démarche.

Dans une deuxième phase, ces hypothèses légitimes vont être confrontées à des données nouvelles, par le visionnement d'un film scientifique. Mais avant ce visionnement, les élèves ont à cocher une ou plusieurs cases d'une fiche sur laquelle le professeur a récapitulé des interprétations proposées pour trois des photos. Il s'agit, par ce mode de travail, d'orienter le visionnement vers la confirmation ou l'infirmité des hypothèses. Chacun notera, sur la même fiche, ce qu'il a compris à propos de chaque photographie.

Comme pour l'exemple précédent, on voit que ce qui est probablement le plus décisif à travers ce travail, c'est la **modification du statut** des propositions didactiques du maître. Là, c'était la signification conférée au tableau qu'il proposait pour conduire l'expérimentation qui évoluait, ici c'est l'attitude face au document informatif qui se trouve transformée. Si, en effet, le visionnement du film était programmé d'emblée en début de séquence (comme auparavant celui sur les Chauves-souris), les élèves conserveraient leur comportement standard de recherche d'une "bonne et unique réponse". C'est le fait de faire précéder ce visionnement, d'un travail hypothético-interprétatif sur un classement de photos extraites du film, qui **problématise** ce visionnement, et met les élèves en situation d'y chercher des réponses à des questions qu'il se sont préalablement posées, de l'utiliser pour trancher entre des modes de lecture alternatifs déjà repérés.

4. LE PROJET DE FORMATION DE COMPÉTENCES DE RAISONNEMENT

Nous sommes en présence de séquences limitées dans le temps ; nous n'avons pas d'éléments d'information sur l'organisation à long terme d'un apprentissage, articulant des séquences de types différents. Ce que nous caractérisons ici, ce sont bien, précisons-le, les options épistémologiques mises en jeu dans ces séquences particulières, plutôt que les conceptions épistémologiques des enseignants qui les ont conduites.

Les deux premiers dispositifs conduisent les élèves à faire fonctionner une théorie. Les deux derniers introduisent une

démarche de pensée exploratoire. On peut remarquer que ce sont des séquences d'enseignement de la physique qui mettent l'accent sur le raisonnement déductif à partir de modèles formalisés et des séquences d'enseignement de la biologie qui mettent l'accent sur la construction d'hypothèses faisant une place à l'induction et ouvrant la possibilité d'erreurs et de doutes, avec un faible degré de théorisation. On peut se demander, si cette tendance était confirmée, dans quelle mesure elle serait liée aux caractéristiques des disciplines et dans quelle mesure elle serait significative d'une tradition scolaire à ce niveau d'enseignement, le collège.

4.1. Mise en forme textuelle et méthode expérimentale

Il apparaît de façon centrale dans l'exemple sur le cachet d'aspirine, mais également dans le suivant, que les élèves sont conduits à exprimer leur activité manipulative et déductive dans une "bonne forme", que le professeur s'efforce de ne pas imposer de façon normée, mais dont il se propose au contraire de leur faire saisir la signification et l'efficacité.

Ces séquences centrées sur la rédaction de comptes rendus développent la formalisation d'étapes dans le raisonnement. Dans la première séquence, l'expérience est insérée dans une argumentation reconstruite a posteriori. Des étapes sont définies qui jalonnent le raisonnement, non pas nécessairement comme un plan linéaire, mais comme un ensemble de raisonnements nécessaires : exposé du but de l'expérience, description du protocole, explication modélisée du phénomène, réponse à la question scientifique. La grille construite avec les élèves résume ce que doit comporter un compte rendu d'expérience, et joue le rôle de référent pour guider la rédaction.

Dans la deuxième séquence, l'accent est mis sur l'articulation précise entre l'explication théorique et les événements successifs du phénomène.

L'importance accordée à cette bonne forme tient probablement à plusieurs raisons convergentes, dont l'une à caractère rhétorique - centrée sur la communicabilité des messages écrits -, et une autre de type épistémologique - relative à l'acquisition d'une méthode expérimentale.

Ce sont alors des règles de rigueur logique et de cohérence qui garantissent la qualité du raisonnement déductif, et qui définissent des étapes identifiées pour ce raisonnement.

D'où l'insistance souvent mise pour que soient méticuleusement distingués résultats, interprétation et conclusion, comme une phase de réorganisation suivant une logique linéaire du raisonnement.

Les deux derniers exemples, plus centrés sur la fonctionnalité d'écrits intermédiaires que sur les normes d'un produit achevé, ne travaillent pas cette "bonne forme" de façon prio-

la mise en forme
du texte de
compte rendu

est dictée par
des règles de
rigueur et de
cohérence de la
chaîne
déductive

il n'y a pas de
méthode ou de
norme
équivalente pour
le raisonnement
heuristique

sinon la vigilance
critique et le
doute

ritaire, mais celle-ci conclut néanmoins le travail. Cependant l'accent est mis essentiellement sur la phase heuristique du raisonnement (11), qui n'apparaît pas dans les séquences précédentes. Il est plus difficile de définir une méthode et des normes pour un tel raisonnement. L'introduction du doute méthodique peut être considéré cependant comme une façon de favoriser la fécondité de ces raisonnements et c'est ce qui est développé à travers les demandes d'écriture d'explications multiples alternatives. La mise en forme finale prend alors un autre sens pour les élèves.

4.2. Rigueur dans la description de l'expérience

Le souci de mise en forme rigoureuse porte par ailleurs sur la précision du protocole expérimental.

une exigence de
précision du
protocole
expérimental

René Thom (12), qui questionne l'illusion de garantir l'intérêt de la recherche scientifique par le biais de la définition de procédures canoniques, situe l'apport de la "méthode expérimentale", non du côté de l'heuristique (*"je ne pense pas qu'il y ait une heuristique - un art de trouver - expérimentale qui soit en rien plus aisée ou plus facile que l'heuristique théorique"*) mais du côté d'un ensemble de règles déontologiques :

1. *Usage correct des instruments, évaluation objective des causes d'erreur et des bornes globales de l'erreur, honnêteté de la pratique, et fidélité des résultats.*
2. *Scrupuleuse précision et exactitude des protocoles de préparation et d'expérimentation (afin de permettre la reproduction de l'expérience)."*

que des dispositifs
de mise à
l'épreuve

Ces aspects sont mis en avant dans les trois premiers exemples. C'est la séquence avec la seringue qui va le plus loin dans l'exploitation pédagogique de la mise à l'épreuve fonctionnelle du texte, avec retour des utilisateurs vers les auteurs. Mais dans les trois cas les textes sont écrits par les élèves pour être utilisés soit par d'autres élèves, soit par eux-mêmes.

et d'analyse
comparative des
textes

Différents procédés de travail des textes, en particulier la comparaison de plusieurs textes et la réécriture, permettent de mettre en évidence les imprécisions, les ambiguïtés, les implicites. Ce qui est recherché, c'est une prise de conscience des conditions d'écriture du protocole qui rendent possible la reproductibilité de l'expérience décrite.

-
- 11 Éliane ORLANDI, in : "Conceptions des enseignants sur la démarche expérimentale", *Aster*, 13, 1991, caractérise deux épistémologies différentes à partir de la façon dont les enseignants qu'elle a interviewés conçoivent les démarches pédagogiques pour une même séquence expérimentale sur la digestion d'un aliment par la salive : la science comme un modèle de rigueur, de méthode, ou la science comme une démarche de tâtonnement, d'errance.
 - 12 René THOM. "La méthode expérimentale : un mythe des épistémologues (et des savants ?)", in : Jean HAMBURGER (dir.), *La philosophie des sciences aujourd'hui*. Paris : Gauthier-Villars, 1986, page 18, et, dans la discussion, page 57.

vont apprendre
à maîtriser

La centration diffère néanmoins : dans les deux premiers cas, où c'est une expérience déjà réalisée qui est décrite, on cherche à améliorer la communicabilité. Dans la séquence sur le lapin, le protocole anticipe l'expérience à réaliser et les élèves réfléchissent aux conditions de définition de ce protocole permettant la faisabilité de l'expérience et le contrôle des variables choisies.

4.3. Décrire et expliquer, les rapports entre théorie et expérience

la distinction
entre textes
descriptifs et
explicatifs

La distinction entre les textes descriptifs et les textes explicatifs occupe une place importante dans les dispositifs que nous venons d'analyser.

Une telle centration est caractéristique de l'enseignement des sciences expérimentales, où le statut du réel apparaît singulier. Alors que le travail sur la langue, ou de type mathématique, s'effectue principalement sur le signe (logique interne des propositions et de la chaîne déductive qu'on peut en tirer, rapports entre signifiant et signifié), le raisonnement expérimental porte aussi - et peut-être d'abord - sur les rapports entre référent et signe.

renvoie à la
relation entre
théorie et
expérience

Il faut bien dire que la complexité de la relation entre théorie et expérience (13) à laquelle elle renvoie n'est pas toujours perçue, et que domine encore aujourd'hui dans l'enseignement scientifique, une "philosophie spontanée" empreinte de positivisme : on observerait avec *précision* les faits expérimentaux, on les interpréterait avec *rigueur* grâce à la mise en jeu d'un raisonnement expérimental, on en *conclurait* telle loi, notion ou théorie.

les choix
d'enseignement
déterminent des
épistémologies
scolaires
différentes

Comme Samuel Johsua le souligne à propos de l'enseignement de la physique, la situation didactique introduit une contrainte particulière : elle "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 idéologiques". (14)

-
- 13 Il faut citer ici les analyses rigoureuses de Gabriel GOHAU, et particulièrement :
- "Faut-il raisonner logiquement ?" (actualité de la redécouverte), in : "Enseigner la biologie", *Cahiers pédagogiques*, 214, 1983.
 - "Pour un poppérisme relatif", in : *Biologie-Géologie (Bulletin de l'APBG)*, 1, 1984.
 - "Plaidoyer pour un inductivisme modéré", in : *Biologie-Géologie (Bulletin de l'APBG)*, 4, 1985.
- 14 Samuel JOHSUA. "Le rapport à l'expérimental dans la physique de l'enseignement du secondaire" in "Expérimenter, modéliser", *Aster*, 8, 1989, page 34.

ici, la théorie est au point de départ,

le raisonnement hypothético-déductif privilégié,

l'option est constructiviste

avec des caractéristiques positivistes

Les séquences présentées ici opèrent un autre choix et placent la théorie au point de départ de l'activité.

Dans les deux premières, la théorie a été construite préalablement. L'expérience est proposée comme un nouveau champ d'application pour faire fonctionner cette théorie. C'est un raisonnement déductif qui permet de construire l'explication du phénomène provoqué (qui n'a pas par ailleurs le statut d'expérience dans le deuxième cas, j'y reviendrai).

Dans les dernières séquences, la construction de l'hypothèse, avec son caractère anticipatoire, est centrale. Le degré de théorisation est faible, on l'a vu, mais l'accent est cependant nettement mis sur l'aspect de construction intellectuelle d'explications plausibles, et sur le rôle argumentatif conféré à l'exploration du réel.

De ce point de vue, elles se démarquent d'une option strictement inductiviste.

On relève cependant des caractéristiques que l'on peut qualifier de positivistes. Ainsi dans les deux premiers cas, la théorie fonctionne, elle permet de rendre compte de façon satisfaisante de phénomènes nouveaux. Mais son champ de validité n'est pas envisagé, elle n'a pas le statut de vérité provisoire. L'expérience en définitive a surtout pour fonction de permettre aux élèves de s'approprier le modèle. Dans les derniers exemples, il n'y a pas à proprement parler de conflit cognitif, la construction du savoir se présente comme un processus linéaire, sans ruptures et sans remodelages. L'expérience ou l'observation jouent un rôle de confirmation qui n'est pas questionné.

4.4. Modification du cadre épistémique des élèves

L'insistance mise dans ces dispositifs sur la distinction entre ce qui relève de la description de faits expérimentaux ou de faits d'observation et ce qui relève de la théorie a pour objectif de répondre à l'obstacle d'adhésion à ce que l'on voit. Pour les élèves, spontanément, l'explication qu'ils donnent d'un phénomène est inscrite dans le phénomène lui-même, ils ont tendance à mêler syncrétiquement les deux. Comme le dit Jacques Désautels (15) :

"Les explications fournies par les jeunes enfants sont tributaires du cadre épistémique d'origine sensualiste qui oriente leurs productions intellectuelles. Celui-ci, sans doute largement inconscient, comporte des prémisses de la nature suivante :

- La réalité est extérieure et indépendante de la connaissance que l'on peut élaborer à son sujet, ce qui consacre en définitive la dichotomie sujet-objet.

15 Jacques DÉSAUTELS. "Développement conceptuel et obstacle épistémologique", in : BEDNARZ Nadine, GARNIER Catherine (dir.). Construction des savoirs. *Obstacles et conflits*. Ottawa : Cirade / Agence d'Arc. 1989.

dépasser la confusion synchrétique entre l'explication et l'observation

- *Les sens permettent aux êtres humains d'avoir un accès direct et immédiat à la réalité.*
- *L'explication d'un phénomène consiste ni plus ni moins à en produire une description fidèle.*
- *Les situations particulières nécessitent des explications particulières.*
- *Les phénomènes dits naturels sont souvent intentionnels, etc."*

le raisonnement scientifique articule les deux sans les confondre

Par delà les différences soulignées précédemment, les quatre séquences analysées ont pour point commun d'initier les élèves à un autre "jeu de connaissance", pour reprendre l'expression de Désautels, qui articule, sans les confondre, construction théorique et recours à la réalité. Ainsi dans l'expérience avec la seringue, une des tâches des élèves est de faire le tri entre la description précise du déroulement des événements successifs et l'explication qu'ils en donnent. Ce tri permet de mettre en question l'explication donnée et d'élaborer une nouvelle explication. La séquence sur la Vipère conduit les élèves à un traitement des informations qui implique un choix parmi plusieurs explications possibles.

la construction de connaissances métacognitives participe à cet apprentissage

Ces séquences engagent les élèves dans une analyse réflexive de leurs démarches. Les connaissances métacognitives que l'on veut ainsi construire font bouger le cadre épistémologique des élèves, tout en restant tributaire d'une épistémologie constructiviste mais qui reste teintée de positivisme. Les activités de production de textes jouent un rôle décisif de facilitation de la distanciation nécessaire pour cette analyse réflexive.

Le petit nombre de dispositifs analysés, leur caractère atypique par la centration sur l'apprentissage de compétences méthodologiques, la variété des contenus et des niveaux de classe, tous ces éléments rendent une généralisation impossible. L'apport d'une analyse de ce type réside dans le mode de questionnement qu'elle permet de préciser. Il est ici réalisé a posteriori, mais pourrait être repris au moment de la conception de dispositifs. Celle-ci gagnerait à expliciter l'épistémologie de référence qui organise les activités dans lesquelles les élèves sont engagés, et les raisonnements qu'ils apprennent à conduire.

Anne VÉRIN
Equipe de didactique des sciences
expérimentales, INRP

RAISONNEMENT À PLUSIEURS VARIABLES : TENDANCES DE LA PENSÉE COMMUNE

Laurence Viennot

A partir de résultats d'enquêtes auprès d'étudiants en sciences, l'article spécifie quelques tendances fréquemment observées dans le traitement de problèmes à plusieurs variables ou dans l'interprétation d'énoncés qui s'y rapportent. On décrit deux modes de réduction de l'analyse des dépendances fonctionnelles en cause : considérer moins de variables que nécessaire, ou bien traiter le nombre convenable de variables mais d'une manière inappropriée qui donne aux explications fournies par les étudiants la structure d'une histoire. On montre que ces traits caractéristiques du "raisonnement linéaire causal" apparaissent sur des contenus variés, ce qui contribue à justifier que l'on aborde aussi l'étude des idées des apprenants par l'entrée des composantes générales de raisonnement, et non seulement par celle des contenus spécifiques.

des études sur la
pensée
commune en
sciences
expérimentales...

Les vingt dernières années ont vu se développer un courant considérable de recherches consacrées à l'exploration des caractères les plus marquants de la pensée commune, notamment dans des domaines relevant des sciences expérimentales. Cet effort a largement pris ses racines dans l'oeuvre de Piaget et, surtout en France, dans celle de Bachelard. L'une et l'autre se rejoignent pour donner toute son importance à l'étude des modes de pensée propres aux individus, a priori non dus à un enseignement préalable. L'hypothèse de l'apprenant vu comme une "tabula rasa" ainsi réfutée, de nombreux chercheurs se sont engagés dans une exploration désormais considérée comme un préalable indispensable à la construction de tout enseignement : celles des tendances communes de la pensée.

abordées par
l'entrée des
contenus...

Mais quelles lignes choisir pour analyser un domaine d'une telle complexité ? L'analyse piagétienne en termes de structures logico-mathématiques et de types généraux d'opérations - concrètes, formelles - s'est trouvée submergée par la multiplicité d'observations débordant une telle classification. La perception de ces limites, la prise de conscience de l'importance décisive des contenus dans les modes de pensée et les difficultés d'apprentissage, ont conduit de nombreux chercheurs à choisir comme unité d'analyse tel ou tel domaine de telle ou telle science. Chez les chercheurs d'origine "disciplinaire", c'est-à-dire enseignants ou enseignants-chercheurs dans une science donnée, cette séparation en "chapitres" était aussi, a priori, la plus naturelle. Ce fut aussi l'occasion de renforcer le caractère résolument axé sur les disciplines d'un champ de recherche émergent : la didactique.

C'est ainsi que, par exemple en physique, ont fleuri les études à propos des "conceptions", "raisonnements spontanés" ou "naturels", "idées naïves",..., sur mécanique, lumière et vision, chaleur et température, circuits électriques, image optique, etc...

ou par celle des formes plus générales de raisonnement

L'article qui suit relève d'un type de préoccupation qui se situe transversalement par rapport à ces explorations liées à des champs particuliers de la physique. Il rend compte d'enquêtes qui ont contribué, au moins chez leurs auteurs, à un renouvellement d'intérêt pour l'étude de formes relativement générales de raisonnement, dont plusieurs travaux récents ont confirmé toute l'importance comme on le verra plus loin. Le thème "transversal" en question ici est celui des raisonnements sur les problèmes à plusieurs variables. Les résultats rappelés concernent principalement des étudiants scientifiques en début d'études universitaires.

1. TENDANCES À LA RÉDUCTION FONCTIONNELLE

La résolution des problèmes considérés ici met en jeu des relations impliquant, donc, plusieurs grandeurs physiques. Il semble que ce soit pratiquement toujours le cas, et que les élèves y soient habitués depuis qu'ils utilisent un formalisme algébrique. Mais toute la question est de savoir quel type d'activité intellectuelle est pratiqué à leur propos.

utiliser une relation entre grandeurs pour un calcul...

Deux points de vue sont à distinguer nettement. Celui qui consiste à utiliser de telles relations dans un calcul algébrique, puis, en fin de compte, comme moyen de calculer une valeur numérique à partir de plusieurs autres, et celui qui autorise des raisonnements du type : si telle grandeur augmente et si telle autre est maintenue constante, alors telle autre diminue. Ces deux points de vue seront qualifiés dans la suite l'un de **numérique** et l'autre de **fonctionnel**.

ou pour une analyse des dépendances fonctionnelles

Avant de poursuivre, il faut souligner toute l'importance de l'aspect fonctionnel. On peut dire que l'on commence à comprendre véritablement un domaine, de la physique en particulier, quand on maîtrise un tant soit peu les dépendances fonctionnelles. C'est notamment un élément majeur du contrôle des résultats qu'on obtient à la fin d'un calcul. Par exemple, un étudiant qui s'intéresse à la trajectoire, de rayon de courbure R , d'une particule de masse m , charge q et vitesse v , dans un champ d'induction magnétique B , peut avoir écrit par inadvertance la relation $R = qB/mv$. Revenir dessus sous l'angle des dépendances fonctionnelles, observer que le rayon de courbure ainsi trouvé diminue avec la masse et la vitesse de la particule, qu'il augmente avec les termes charge et induction qui sont liés à la cause de la déviation peut l'amener à conclure que ce résultat est inexact (*la relation correcte est $R = mv/qB$*).

Les approches numériques et fonctionnelles sont très inégalement pratiquées dans l'enseignement secondaire. Les

une tendance
courante :
réduire la
complexité d'une
telle analyse

élèves y ont l'occasion de manipuler en mathématiques les fonctions d'une seule variable, et en physique des relations impliquant deux grandeurs ou plus, mais essentiellement comme moyen de calcul. L'idée de dépendance fonctionnelle à plusieurs variables est peu travaillée. Les étudiants de premier cycle universitaire ont eux-mêmes des compétences bien inégales sur les plans numérique et fonctionnel (Saltiel 1989).

On sait bien, par ailleurs, que déjà les enfants ont une grande inclination vers une pratique réductrice de ce point de vue. Ainsi une relation telle que celle qui lie distance parcourue, vitesse et durée de parcours donne fréquemment lieu à ces énoncés : "plus vite, donc plus loin", "plus vite, donc moins de temps", qui figent, ou plutôt ignorent, la troisième variable (Bovet et al. 1967, Crépault 1981).

L'objectif des enquêtes dont on évoque ici les résultats est de faire le point sur les pratiques communes des étudiants en matière d'analyse fonctionnelle. Ce qui vient d'être dit laisse prévoir que celles-ci sont, elles aussi, réductrices. Ce sont donc surtout les objets et les modalités de cette réduction qui sont au centre de ces enquêtes.

2. DES CONSTANTES "NUMÉRIQUES" OU "FONCTIONNELLES"

Ce premier thème d'étude peut apparaître comme tout à fait paradoxal ici. La notion de constante est apparemment sans mystère. Pourtant ce terme peut renvoyer à deux significations extrêmes :

constantes: des
non-dépendances
et des
dépendances

- l'une, **numérique**, où le mot "constante" prend le statut d'un nom commun pratiquement synonyme de nombre plus ou moins utile à connaître, depuis une simple caractéristique d'objet telle que la masse de la Terre, jusqu'aux constantes dite universelles, telles que la constante de Planck, h , ou la vitesse de la lumière dans le vide, c .
- l'autre, "**fonctionnelle**", où il s'agit d'un adjectif qui a perdu le nom qu'il qualifie - fonction constante de telles ou telles variables - **tout l'intérêt étant cette fois dans la liste de ces variables** dont on aurait pu croire a priori qu'elles affectaient la "constante".

Lorsqu'on s'efforce de spécifier ces variables qui sont, en bref, sans effet sur la grandeur considérée, on s'aperçoit en général que cette grandeur dépend d'autres variables. Une explicitation fonctionnelle un peu complète comprend dès lors deux volets, celui des "indépendances intéressantes" et celui des dépendances. L'encadré 1 donne une idée de la façon dont une telle explicitation précise et complète des énoncés d'usage tout à fait courants dans la pratique physique.

Énoncé proposé : La vitesse de la lumière est une constante	
Énoncé explicité et complété :	
<p>La vitesse de la lumière NE DÉPEND PAS... de la fréquence du référentiel</p>	<p>La vitesse de la lumière DÉPEND... de la nature du conducteur de la fréquence (sauf dans le vide)</p>
Énoncé proposé : Loi d'Ohm : À température constante, la résistance d'un conducteur métallique est une constante	
Énoncé explicité et complété :	
<p>La nature, les dimensions, la température du conducteur étant fixés, sa résistance NE DÉPEND PAS... de la tension U appliquée à ses bornes du courant I qui la traverse</p>	<p>La résistance d'un tel conducteur DÉPEND... de la nature du conducteur de ses dimensions de sa température</p>

Encadré n° 1 : Deux énoncés d'usage courant explicités et complétés

des enquêtes
auprès
d'étudiants
scientifiques...

La question posée est maintenant celle-ci : comment les étudiants se situent-ils devant ces énoncés lourdement chargés d'implicite ? Dans l'éventail des significations possibles, où vont leurs préférences, quelles sont leurs questions ?

L'enquête menée à ce propos (Viennot 1982) auprès d'étudiants en sciences de première et seconde années universitaires utilise les énoncés cités en tête des tableaux de l'encadré 1.

Les questions posées sont du type :

- Cet énoncé vous paraît-il clair et sans ambiguïté ?
- Vous semble-t-il incomplet ? Si oui, quelles précisions vous semblent indispensables, simplement utiles ?
- Aimeriez-vous le reformuler ? Si oui, comment ?

Les aspects les plus frappants des résultats sont résumés dans les tableaux 1 et 2.

**PRINCIPALES CARACTÉRISTIQUES DES COMMENTAIRES
DES ÉTUDIANTS AUX ÉNONCÉS 1 (TABLEAU 1) ET 2 (TABLEAU 2)**

LA VITESSE DE LA LUMIÈRE EST UNE CONSTANTE				
La grandeur considérée...	Gembloux 1 ^{ère} année Faculté N = 32	Gembloux 2 ^{ème} année Faculté N = 35	Paris 7 1 ^{ère} année Université N = 35	École ingénieurs 1 ^{ère} année N = 100
NE DÉPEND PAS... (1)	28 %	6 %	18 %	9 %
...du référentiel (2)	0 %	6 %	15 %	3 %
DÉPEND... (1)	50 %	74 %	85 %	77 %
...du milieu (3)	50 %	68 %	78 %	77 %
<p>(1) : Pourcentages de réponses mentionnant une non-dépendance (première ligne), ou une dépendance (troisième ligne), quel qu'en soit l'argument.</p> <p>(2) : Pourcentages de réponses mentionnant la non-dépendance vis-à-vis du référentiel.</p> <p>(3) : Pourcentages de réponses mentionnant la dépendance vis-à-vis du milieu.</p>				

TABLEAU 1

À TEMPÉRATURE CONSTANTE, LA RÉSISTANCE D'UN CONDUCTEUR MÉTALLIQUE EST UNE CONSTANTE	
La grandeur considérée...	Gembloux 1 ^{ère} année Faculté N = 32
NE DÉPEND PAS...	6 %
DÉPEND...	47 %

TABLEAU 2

Gembloux : Faculté des Sciences Agronomiques (Belgique)

École d'Ingénieurs : École Supérieure d'Informatique, d'Électronique et d'Automatique (Paris).

montrent une
préférence pour
l'explicitation des
dépendances...

On y apprend essentiellement que les constantes en question, la vitesse de la lumière comme la résistance du conducteur ohmique, ne se réduisent pas, au premier abord, à un nombre pur et simple, $c = 300\,000\text{ km/s}$ par exemple. L'aspect fonctionnel est envisagé mais, paradoxalement, sous l'angle des dépendances beaucoup plus volontiers que sous celui des indépendances. Que la vitesse de la lumière dépende du milieu est largement souligné. De quoi, dès lors, cette grandeur pourrait-elle ne pas dépendre, c'est à dire en quoi est-elle plus "constante" que n'importe quelle grandeur physique ? Bien peu le savent, **aucun** ne s'inquiète de l'ignorer. Mêmes constatations pour la résistance d'un conducteur ohmique, dont un étudiant seulement sur les 41 interrogés a précisé spontanément la propriété essentielle d'invariance, à température fixée, par rapport à la tension appliquée et au courant qui la traverse, alors que deux autres mentionnaient une invariance dans le temps, tandis qu'abondaient les précisions sur les facteurs dont dépendaient la "constante".

On retrouve cette réticence à expliciter les non-dépendances dans les manuels et chez les enseignants. Qui pense, par exemple, à bien spécifier que la vitesse d'un ébranlement mécanique sur une corde ne dépend pas de la violence de la secousse initiale ? L'étude de L.Maurines sur ce point (1986, et Maurines et Saltiel 1988) montre pourtant que ce serait bien utile. On pense avoir tout dit lorsqu'on a dit qu'une grandeur était constante, et les seuls soucis portent sur ce dont la constante pourrait bien dépendre.

Si l'on s'interroge maintenant, à un niveau plus fin et sans doute plus conjectural de l'analyse, sur la manière dont sont perçues et exprimées ces dépendances, d'autres remarques se présentent.

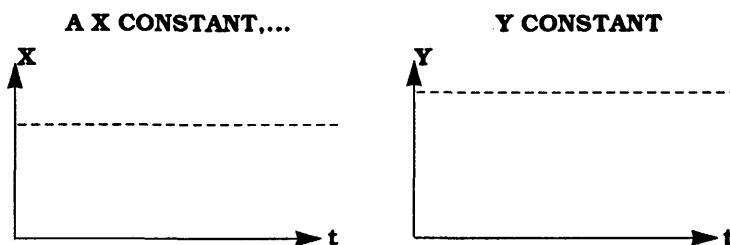
L'expression qui semblerait la plus naturelle est du type : "telle grandeur dépend de telle autre". Or on observe extrêmement fréquemment la forme qui est d'ailleurs celle de l'énoncé 2 :

"à telle grandeur donnée...telle autre est une constante"

"pour un milieu donné....la vitesse de la lumière est une constante"

"à température donnée ...la résistance...est constante"

Ce fait n'est sans doute pas neutre, pas plus que ne l'est le faible taux (17%) de retraduction de l'énoncé 2 sous la forme "la résistance....dépend de la température". Ces deux formes d'expression ne sont pas équivalentes. Très probablement la faveur dont jouit la forme "à $X = \text{Cte}$, $Y = \text{Cte}$ " tient au rôle privilégié du temps comme variable implicite des fonctions dites constantes, ce qui conduit à l'interprétation résumée dans le schéma suivant :



et pour une
conception des
constantes
comme
caractéristique
d'objet...

Cette interprétation rapproche la notion de constante de celle de caractéristique d'objet, l'objet étant lui-même défini par sa permanence dans le temps. Elle éclaire a posteriori les soucis concernant d'éventuelles dépendances, dont témoignent par exemple ces deux commentaires :

"Si les conditions physiques, climatiques, chimiques, sont constantes, la résistance d'un conducteur ohmique est constante."

"On n'a pas facilement un conducteur ohmique. Il faut tenir compte des variations externes autres que la température. A température constante, et à un instant donné, sous des conditions extérieures données, la résistance d'un conducteur métallique est une constante."

A leur lecture vient l'envie de les résumer ainsi : si **tout** est constant, la résistance est constante. Bien entendu, ce résumé lapidaire vide l'énoncé initial de la signification qu'il était censé véhiculer (une non-dépendance), mais il en exprime bien une autre, celle que l'étudiant lui donne : il s'agit de spécifier complètement un objet, afin que ses caractéristiques soient bien définies. La constante n'est plus qu'un nombre sur une étiquette qu'on colle sur l'objet.

Sans doute est-ce pour cela qu'on parle si facilement de constante pour des caractéristiques très particulières d'objets très particuliers, telles la masse de la Terre ou celle de la Lune. Cette vision des grandeurs constantes favorise, bien sûr, le point de vue numérique aux dépens du point de vue fonctionnel.

occultant ainsi
l'idée
fonctionnelle de
non-
dépendance

3. LA DIFFICULTÉ D'EXPRIMER DES NON-DÉPENDANCES

Un premier constat est donc que les non-dépendances ne sont pas volontiers exprimées comme telles. Pour toute grandeur physique, la liste des "non-dépendances" est illimitée. S'agissant d'une constante, tout l'intérêt, et toute la difficulté parfois, est de spécifier celles qui sont intéressantes à connaître.

Mais l'expression même d'une non-dépendance se heurte parfois à une difficulté supplémentaire, qui est associée au

systèmes : des variables d'état mutuellement dépendantes...

fait que certaines variables du problème considéré peuvent être liées, c'est à dire contraintes par une relation.

Dans la formulation courante "telle grandeur G ne dépend pas de telle autre X", l'idée la plus immédiatement présente est celle d'une liaison quasiment mécanique entre G et X : on tire sur un levier X, et G bouge, ou bien ne bouge pas. L'idée de ne pas toucher à tous les leviers en même temps semble de simple bon sens, sans plus. Or, bien entendu, si les variables décrivant l'état du système sont mutuellement dépendantes, c'est à dire si les leviers sont connectés les uns aux autres, les choses se compliquent. Il faut savoir définir parmi ces "variables d'état" un ensemble de variables indépendantes, qui définissent complètement le système sans se heurter à des incompatibilités provenant des contraintes évoquées plus haut. Il faut ensuite, dans l'évocation d'éventuelles dépendances d'autres grandeurs par rapport à celles-ci, spécifier ce qui arrive à **toutes** ces variables indépendantes.

Ainsi, en physique, on ne peut se contenter d'énoncer la loi de Joule sous la forme souvent entendue : "l'énergie interne (U) d'une masse donnée de gaz parfait (*c'est-à-dire tel que les variables pression p, volume V, température T, nombre de particules N sont liées par la relation $pV = NkT$, où k est la constante de Boltzmann*) ne dépend pas de son volume". Il faut ajouter "à température constante", puisque l'énergie interne est fonction du produit NkT . ($U = 3/2 NkT$). On pourrait aussi légitimement dire, en se référant cette fois au jeu de variables indépendantes N, p, T : "l'énergie interne d'une masse donnée de gaz parfait ne dépend pas de sa pression à température donnée". A tronquer de tels énoncés, on peut, en les juxtaposant, déraper vers l'absurde :

"U ne dépend pas de V, U ne dépend pas davantage de p, donc U ne dépend pas du produit pV" (*alors que $U = 3/2 pV$*).

ce qui complique l'expression des non-dépendances...

La non-dépendance n'est plus susceptible d'une expression simple et la seule formulation simple acceptable à la fois par le sens commun et la physique est du type "G ne dépend que de X, Y, Z, ...", formulation qui ne mentionne pas la ou les indépendances intéressantes.

L'expression non ambiguë de ces indépendances prend soit la forme mathématique des dérivées partielles

$\frac{\delta G}{\delta A} \Big|_{X, Y, Z, \dots} = 0$, soit son équivalent verbal ; la difficulté

est qu'une telle forme se glisse difficilement dans le discours et que sa traduction verbale est longue (*"la dérivée partielle de G par rapport à A, à X, Y, Z, ... constants, est nulle", ou bien "G ne dépend pas de A, au premier ordre, à X, Y, Z, ...fixés"*). De plus, elle oblige à envisager simultanément plusieurs variables, ce qui est probablement l'obstacle majeur. Sans doute est-ce pour cela que l'on trouve facilement dans le cours d'exposés ou même de textes écrits des expressions tronquées analogues à celles-ci : "U ne dépend pas de V". La suite, "à T donnée", est implicite.

et conduit souvent à des énoncés chargés d'implicite

Une enquête menée par S. Rozier (1983) s'est attachée à préciser de quelle manière le décodage s'effectuait. Une vingtaine d'enseignants universitaires ou normaliens agrégés ont été interrogés en entretiens à propos précisément d'un extrait de manuel sur la loi de Joule comportant l'énoncé suivant :

"L'énergie interne d'une masse donnée de gaz parfait ne dépend donc pas de son volume."

Les premières questions posées étaient : "l'énoncé vous paraît-il clair et sans ambiguïté ? Préférez-vous le compléter ou le formuler autrement ?" Deux modes de décodage apparaissent :

- **La lecture du spécialiste** (45% de l'effectif) : le "ne dépend pas de" est retranscrit en termes formels : $\frac{\delta U}{\delta V} = 0$; "V ne figure pas dans l'expression de U" ;

"dU = a dT"... La quasi totalité des enseignants concernés ne voit pas que l'énoncé verbal est incomplet. Visiblement, cet énoncé n'est pas analysé pour ce qu'il dit, mais pour le mécanisme formel qu'il déclenche.

- **La lecture de sens commun** (55%) : le texte est pris dans son acception commune : aucun changement sur le volume n'affecte l'énergie interne. L'énoncé est alors contesté et complété par la mention "à T donnée" pour devenir acceptable.

L'esprit critique semble donc réservé aux enseignants qui gardent aux mots leur sens courant, tandis que chez les autres l'adaptation aux mécanismes habituels du domaine masque le caractère incomplet, pour ne pas dire faux, de l'énoncé.

Il est intéressant de voir les spécialistes rejoindre le type de lecture de sens commun lorsqu'ils sont confrontés à une paraphrase de l'énoncé, terme à terme, située cette fois dans un contexte familier :

deux modes de décodage chez les experts...

dont la fréquence varie avec le contexte...

	Enoncé	Partie implicite
Paraphrase	Le prix d'une pièce de moquette ne dépend pas de sa longueur	à surface donnée ($L.l = C^{te}$)
Rappel du texte	L'énergie interne d'un gaz parfait ne dépend pas de son volume	à température donnée ($p.V = C^{te}$)

La réaction est cette fois presque unanimement très vive. Cette étude met donc l'accent sur l'existence de deux registres d'interprétation, l'un formel, l'autre de sens commun, pour ce "ne dépend pas de". Il convient d'en être conscient, sous peine de se trouver, à l'image des "spécialistes" mentionnés plus haut, incapables de comprendre qu'on ne comprenne pas.

en particulier
avec la possibilité
d'imaginer un
objet matériel qui
subit une
transformation

On voit bien également qu'une non-dépendance est d'autant plus difficile à appréhender qu'il n'y a pas d'objet dont la permanence temporelle puisse appuyer l'invariance de la grandeur en question. Une masse donnée de gaz, de température fixée, cela ressemble bien à un objet dont seule une "forme" va changer (les termes du produit invariant pV). C'est d'ailleurs sans doute pour cela que l'on mentionne une grandeur - la masse - qui n'a rien à voir dans la loi de Joule, au lieu du nombre de particules (N) qui est ici la variable à spécifier. Il est plus difficile d'associer une invariance à un produit Largeur x Longueur dont les différentes formes ne sont pas naturellement associées à un même objet.

4. IDÉE D'OBJET ET RÉDUCTION FONCTIONNELLE

Ces quelques éléments de réflexion et d'enquêtes à propos de constantes ou de non-dépendances amènent ainsi à observer des processus de simplification de l'analyse fonctionnelle. Chez les étudiants interrogés, et sans doute beaucoup plus largement, existe une tendance à réduire le nombre des dépendances ou non-dépendances envisagées simultanément. De façon a priori surprenante, les non-dépendances sont moins volontiers exprimées que les dépendances. Elles sont d'ailleurs, nous l'avons vu, difficiles à exprimer dans le cas de plusieurs variables dont on suit une ligne de niveau.

les
raisonnements
observés
s'organisent
souvent autour
de l'idée d'objet
matériel...

En tout état de cause, l'idée d'objet permanent dans le temps est le support le plus naturel à celle de constante, laquelle s'identifie alors à la notion de caractéristique d'objet.

De façon générale, devant des phénomènes où intervient un ensemble complexe de variables, le raisonnement des étudiants s'appuie assez généralement sur l'idée d'objet.

Il pourra s'agir éventuellement d'un objet plus ou moins fictif. Ainsi L. Maurines (1986, et Maurines et Saltiel, 1988) observe que la "bosse" dont on considère le déplacement sur une corde est souvent appréhendée comme un objet matériel dont la largeur serait en quelque sorte figée, non affectée au passage de l'ébranlement d'une corde sur une autre de caractéristiques différentes.

Il se peut aussi que l'idée d'objet favorise des adhérences entre grandeurs physiques, par exemple : vitesse et hauteur d'un ébranlement sur une corde (Maurines, 1986, 1991), force et vitesse d'un mobile (Viennot, 1979), tension et courant pour une pile (Closset, 1983, 1989). Ces grandeurs apparaissent dans ce cas comme les diverses faces d'une caractéristique d'ensemble attachée à l'objet qui, pour l'étudiant, doivent de ce fait évoluer de concert.

Cela dit, on observe de telles covariations dans des cas où cette idée d'objet n'est pas véritablement apparente. Ainsi la

notion d'agitation thermique est-elle, pour les étudiants et bien des enseignants aussi, le lieu d'une adhérence incorrecte entre deux grandeurs physiques, l'énergie cinétique moyenne des particules et la distance moyenne qui les sépare (Rozier 1989, Rozier et Viennot 1991). "Les molécules ont besoin de place pour s'agiter" : telle est l'une de ces phrases communes qui suggèrent, ou plutôt renforcent l'impression que là où elles ont "plus de place", dans un gaz, elles s'agitent aussi plus vite que dans le liquide correspondant, ce qui est faux à l'équilibre thermodynamique entre les deux phases.

ou de celle d'un capital d'"énergie"

Plus largement que l'idée d'objet proprement dite, c'est peut-être la considération d'une sorte de "tonus" - pour prendre délibérément un terme non physicien - qui sous-tend les regroupements de variables que l'on vient de citer : capital dynamique d'un mobile ou d'un ébranlement, agitation des molécules...

Toujours est-il que ces "recollements" de variables contribuent de fait à réduire le nombre de celles que l'on est amené à manipuler pour la situation en cause. Ce type de regroupement de propriétés revient, comme pour les fixations abusives de grandeurs signalées plus haut, à diminuer la complexité fonctionnelle du problème.

5. L'HISTOIRE DES CHOSES : LE RAISONNEMENT LINÉAIRE CAUSAL

les bonnes variables traitées l'une après l'autre, et non simultanément

Un autre cas est celui où toutes les variables pertinentes sont effectivement prises en compte, mais dans une procédure de traitement simplifiée : les relations binaires entre variables sont mises bout à bout dans une chaîne explicative **linéaire**, chaque maillon ne mentionnant qu'une seule grandeur ou un seul phénomène simple. On trouve notamment des exemples des incohérences qui peuvent surgir à ce propos dans l'étude déjà citée de L.Maurines. Celle de S.Rozier, également mentionnée plus haut, fait en outre apparaître un aspect tout à fait important dans ce type d'explication commune des phénomènes physiques : l'aspect **chronologique**, celui, précisément, qui l'a conduite à introduire le terme "causal" dans la caractérisation de tels raisonnements.

Il faut rappeler ici un point fondamental des analyses dites selon les domaines "quasi-statiques" (en thermodynamique) ou "quasi-stationnaires" (en électricité) que la physique met en jeu pour l'étude des systèmes déterminés par plusieurs variables. Il s'agit du fait que les variables considérées sont contraintes par des relations (par exemples $pV = NkT$ pour un gaz parfait) qui doivent être **toutes** satisfaites **simultanément, à tout instant**. En cette matière, l'évidence n'est pas du tout à la mesure de l'implicite : il y a là une difficulté considérable.

Prenons pour illustrer ceci l'exemple suivant, étudié par S.Rozier :

A propos de la dilatation isobare d'un gaz parfait, des étudiants des trois premières années universitaires et classes préparatoires (N= 120, toutes catégories indiscernables au niveau des taux de réponses) sont requis d'expliquer le résultat suivant : "On chauffe un gaz parfait sous pression (p) constante, on observe que la température (T) augmente et que le volume (V) augmente aussi". Une forte proportion d'entre eux ($\approx 40\%$, que l'on mentionne ou non le caractère quasi-statique de la transformation) fournit une explication qui peut se résumer ainsi :

"Apport de chaleur \rightarrow T augmente \rightarrow p augmente \rightarrow V augmente"

On note dans cette réponse type la linéarité de l'argumentation. Contrairement à la réponse correcte, chaque maillon de la chaîne explicative lie une seule variable à une autre. Les variables sont bien toutes là cette fois, mais elle sont liées deux à deux seulement.

un phénomène
en résonance
avec l'ambiguïté
du langage...

Le deuxième aspect marquant du raisonnement linéaire causal émerge notamment à travers cette contradiction entre la donnée de l'énoncé - *le chauffage est isobare* - et un élément de la réponse - *p augmente*. La contradiction s'estompe lorsqu'on comprend que l'argumentation prend, dans le raisonnement naturel, une connotation chronologique. Chaque flèche " \rightarrow " signifie "donc", mais aussi "ensuite". Les termes français "alors" ou anglais "then" amalgament d'ailleurs parfaitement les deux significations. Les événements évoqués dans la chaîne explicative sont implicitement, et parfois explicitement, considérés comme successifs. Dans ce raisonnement, les choses sont comprises ainsi : dans un premier temps, le volume est bloqué, alors il est clair que l'apport de chaleur élève température (aucun travail n'est fourni à l'extérieur) et pression (seule la vitesse moyenne des particules varie, non leur concentration) ; puis, dans un deuxième temps, le piston est relâché, alors la pression reprend la valeur extérieure tandis que le volume augmente. Les covariations mises en jeu s'enchaînent comme les étapes de l'évolution temporelle de l'objet : on est loin de l'idée que les variables température, pression et volume changent simultanément dans une évolution contrainte en permanence par la même relation.

et en particulier
impropre à
l'analyse des
régimes
permanents

Au passage, on remarque qu'à considérer ainsi des relations binaires traduisant implicitement des évolutions **successives** des variables en cause, on évoque par là-même l'idée de phénomènes **temporaires**. Cette séquentialisation implicite est ainsi totalement impropre à l'analyse des régimes permanents. Elle en marque pourtant souvent les pseudo-explications : combien voit-on de ces serres où "il fait plus chaud parce qu'il rentre plus d'énergie qu'il n'en sort", et dont on pourrait - on devrait - se demander comment la chose peut durer.

Ces tendances de la pensée, S. Rozier le montre bien, dépassent largement le cadre de la thermodynamique et même de la physique.

C'est en effet maintenant un ensemble de résultats de recherche conséquent qui étaye l'hypothèse de l'existence des types de réduction fonctionnelle décrits plus haut. On retrouve notamment cette connotation chronologique implicitement mise dans les chaînes explicatives pour des phénomènes variés relevant pourtant d'une analyse quasi-statique.

Cela peut se faire avec le support d'un ordre spatial marqué. C'est le cas à propos des circuits électriques ou hydrauliques (Closset 1983, et article dans ce numéro). C'est aussi en mécanique, à propos de deux ressorts mis bout à bout, que l'on observe (Fauconnet 1981, 1983) des commentaires stipulant qu'une traction (F_{ext}) sur l'extrémité inférieure "se transmet au bout d'un certain temps au point de jonction des ressorts" : la formule $F_1 = F_2 = F_{ext}$ est mentionnée à l'appui, après qu'un début de solution calcule l'allongement final du ressort inférieur comme si le point de jonction n'avait pas bougé.

Parfois le raisonnement linéaire causal se passe fort bien d'un support géométrique. C'est le cas dans les exemples de thermodynamique étudiés par S. Rozier. La difficulté qu'il y a parfois à envisager simultanément translation et rotation pour un même mobile pourra être également contournée par une procédure analogue, introduisant une succession de mouvements simples (Ménigaux 1991).

Bref, une fois ses caractères bien dégagés, le raisonnement linéaire causal apparaît à de multiples occasions, en physique et ailleurs : l'économie n'est sans doute pas le moindre de ses terrains d'intervention.

CONCLUSION

Sur ce thème des dépendances fonctionnelles, depuis la notion de constante jusqu'à l'évolution quasi-statique des systèmes, l'analyse des idées des apprenants par l'entrée des composantes générales du raisonnement se révèle donc pertinente.

Est-ce à dire qu'il faille basculer dans un nouveau dogme, qui conduise à évacuer l'entrée par les contenus ? Rien ne permet de l'affirmer et, beaucoup plus vraisemblablement, ce domaine si riche et complexe nécessite des études croisées selon au moins deux plans de coupe.

Autre question, la plus cruciale : et alors, que faire dans l'enseignement ? Une fois encore, le constat est plus mûr que les propositions. Les réponses, dans un premier temps, peuvent être celles que l'on a beaucoup avancées pour les études plus classiques, "de conceptions" pour dire vite. Prise

le raisonnement
linéaire causal :
une forme de
raisonnement
très transversale
par rapport aux
contenus

pertinence d'une
double entrée
dans l'analyse de
la pensée
commune en
sciences

de conscience du professeur et des élèves sur les difficultés associées, guidage pour l'élaboration d'activités ou de séquences pédagogiques adaptées à un apprentissage à leur propos, et par dessus tout, éclairage sur nos objectifs d'enseignement, tels sont en (très) bref les bénéfices pédagogiques escomptés.

Nul doute pourtant que, concernant des aspects généraux du raisonnement, la difficulté de prise en compte pédagogique soit accrue. A propos de quel chapitre va-t-on décider de prendre du temps pour expliciter et travailler les règles du raisonnement sur plusieurs variables ? Quand rassemblera-t-on les principes qui président à l'analyse quasi-statique des systèmes, lorsque ceux-ci sont étudiés ici ou là selon les concepts qu'ils mettent en jeu ? Plus simplement, quand développera-t-on l'aptitude à considérer un résultat sous l'angle fonctionnel et non seulement sous l'angle numérique ?

la prise en compte pédagogique de ces résultats : d'abord une affaire d'objectif assigné à l'enseignement

Cela suppose une détermination explicite et à longue échéance, puisque ce sont principalement des contenus spécifiques qui sont mentionnés dans nos livres d'enseignement, et qu'un objectif en termes d'aptitude de raisonnement peut sembler a priori décourageant, et d'une efficacité diffuse. Mais, pour qui adopte ces objectifs, des pistes d'action existent, même à propos de contenus tout à fait élémentaires : on peut commencer à travailler les dépendances multifonctionnelles dès qu'on connaît l'expression de la surface d'un rectangle. Et les enjeux correspondants sont d'une importance qui se passe de commentaires.

Laurence VIENNOT
Laboratoire de Didactique de la Physique
dans l'Enseignement Supérieur
Université Paris VII

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

BOVET M., GRECO P., PAPERT S. ET VOYAT G., 1967, "Perception et notion du temps", *Etudes d'épistémologie génétique*, vol XXI, Paris, P.U.F.

CLOSSET J.L., 1983, *Le raisonnement séquentiel en électrocinétique*, Thèse de troisième cycle, Université Paris 7, L.D.P.E.S.

CLOSSET J.L., 1989, "Les obstacles à l'apprentissage de l'électrocinétique", *Bulletin de l'Union des Physiciens* n° 716, pp 931-950

CREPAULT J., "Etude longitudinale des inférences cinématiques chez le préadolescent et l'adolescent : évolution et régression", *Canad.J.Psycho.* 35,3

FAUCONNET S., 1981, *Etude de résolution de problèmes : quelques problèmes de même structure en physique*, Thèse de troisième cycle, Université Paris 7, L.D.P.E.S.

- FAUCONNET S., 1983, "Etude de résolution de problèmes analogues", *Atelier International d'été : Recherche en didactique de la physique*, Paris, Ed. C.N.R.S., pp 261-269
- MAURINES L., 1986 *Premières notions sur la propagation des signaux mécaniques : étude des difficultés des étudiants*, Thèse, Université Paris 7, L.D.P.E.S.
- MAURINES L., SALTIEL E., 1988, "Mécanique spontanée du signal", *Bulletin de l'Union des Physiciens*, n° 707, pp 1023-1041
- MAURINES L., 1991, "Raisonnement spontané sur la propagation des signaux : aspect fonctionnel", *Bulletin de l'Union des Physiciens*. n° 733, pp 669-677
- MENIGAUX J., 1991, "Raisonnements des lycéens et des étudiants en mécanique du solide", *Bulletin de l'Union des Physiciens* n° 738, pp 1419-1429
- ROZIER S., 1983, *L'implicite en physique : les étudiants et les fonctions de plusieurs variables*, Mémoire de D.E.A., Université Paris 7, L.D.P.E.S.
- ROZIER S., 1989, *Le raisonnement linéaire causal en thermodynamique élémentaire*, Thèse, Université Paris 7, L.D.P.E.S.
- ROZIER S., VIENNOT L., 1991, "Students' reasoning in thermodynamics", *International Journal of Science Education*, Vol 13, n°1, pp 159-170
- SALTIEL E., 1989, "Les exercices qualitatifs fonctionnels", *Actes du colloque sur Les Finalités des Enseignements Scientifiques*, Marseille, pp 113-121
- VIENNOT L., 1979, *Le raisonnement spontané en dynamique élémentaire*, Paris, Hermann
- VIENNOT L., 1982, "L'implicite en physique : les étudiants et les constantes", *European Journal of Physics*, vol 3, pp 174-180

RAISONNEMENTS EN ÉLECTRICITÉ ET EN HYDRODYNAMIQUE

Jean-Louis Closset

Les raisonnements des étudiants en électricité sont connus. Dans cet article nous les rappelons et les comparons avec ceux que les étudiants utilisent à propos des circuits hydrauliques. Nous montrons qu'ils sont qualitativement semblables mais quantitativement très différents à cause d'une dépendance par rapport au contenu. Nos conclusions portent sur l'usage de l'analogie hydraulique. Nous formulons aussi l'hypothèse selon laquelle ces "raisonnements naturels" peuvent être hiérarchisés et constituent un passage obligé dans l'apprentissage des sciences.

la "métaphore
du fluide en
mouvement"
utilisée par les
élèves et les
étudiants à
propos des
circuits
électriques...

Dans sa thèse Joshua (1) soutenait l'idée que les élèves et les étudiants, dans leur analyse des circuits électriques, avaient tendance à utiliser "la métaphore du fluide en mouvement". Nous-mêmes (2) indiquons que le support du raisonnement séquentiel à propos des circuits électriques était une "notion", espèce de concept flou aux contours mal définis, baptisée le plus souvent "courant" par les élèves et les étudiants et qui possède, outre des propriétés énergétiques, certaines des caractéristiques d'un fluide. Enfin Schwedes (3) a présenté à Ludwigsburg une expérience d'enseignement de l'électricité mettant en oeuvre des circuits hydrauliques.

Par ailleurs, les modes de raisonnements des étudiants à propos des circuits hydrauliques n'avaient jamais été étudiés. Il nous est donc apparu intéressant non seulement de procéder à cette étude mais aussi de comparer nos résultats à ceux plus anciens (2,4) que nous avons obtenus en électricité et que nous rappellerons ci-dessous. Une première

- (1) JOSHUA S., *L'utilisation du schéma en électrocinétique : aspects perceptifs et aspects conceptuels. Propositions pour l'introduction de la notion de potentiel en électrocinétique.* Marseille. Thèse Université de Provence, 1982.
- (2) CLOSSET J-L., *Le raisonnement séquentiel en électrocinétique.* Paris. Thèse Université Paris VII, 1983.
- (3) SCHWEDES H., The importance of water-circuits in teaching electric circuits. *Proceeding of an international workshop.* Pädagogische Hochschule Ludwigsburg, 1984.
- (4) CLOSSET J-L., Sequential reasoning in electricity. Research on physics education. *Proceeding of the first international workshop on physics teaching.* C.N.R.S. La Londe les Maures, 1983.

qu'en est-il à propos des circuits hydrauliques ?

étude (5) menée avec Lafontaine D., Blondin C. et Lafontaine A. a porté sur la résolution de problèmes d'hydrodynamique face à un circuit concret et s'est poursuivie avec les deux premiers auteurs et Lejoly S. au moyen d'un circuit simulé sur ordinateur (6). Nous présentons ici les résultats d'une enquête "papier crayon" menée parallèlement auprès de 92 étudiants d'une première année d'université dans une filière scientifique après un enseignement des éléments d'hydrodynamique.

1. CIRCUITS ÉLECTRIQUES

Nous ne présentons ici que deux questions proposées à une seule population d'étudiants de première année d'université dans une filière scientifique avant enseignement de l'électricité à ce niveau. L'information de ces étudiants en électrocinétique datait donc du secondaire.

La première question est la suivante (figure 1).

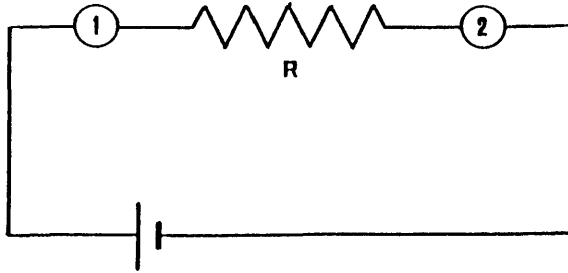


Figure 1

Question 1

a) L'ampoule 1 va-t-elle briller aussi fort, plus fort ou moins fort que l'ampoule 2 ?

On augmente la résistance R .

b) L'ampoule 1 va-t-elle briller aussi fort, plus fort ou moins fort qu'avant ?

c) L'ampoule 2 va-t-elle briller aussi fort, plus fort ou moins fort qu'avant ?

(5) LAFONTAINE D., BLONDIN C., CLOSSET J-L., & LAFONTAINE A., Résolution de problèmes d'hydrodynamique face à un circuit concret - Comparaison des stratégies avant et après apprentissage. *European Journal of Psychology of Education*, V, 4, 517-531 (1990).

(6) LAFONTAINE D., BLONDIN C., CLOSSET J-L., & LEJOLY S., Experts et novices face à un circuit simulé sur ordinateur, à paraître.

Nous résumons dans le tableau 1 l'essentiel des réponses obtenues.

TABLEAU 1 : Réponses à la question 1	N = 50
Réponse correcte a) 1 brille aussi fort que 2 b) 1 brille moins fort qu'avant c) 2 brille moins fort qu'avant	22 %
Raisonnement séquentiel a) 1 brille plus fort que 2 b) 1 brille aussi fort qu'avant c) 2 brille moins fort qu'avant	52 %
Raisonnement à courant constant a) 1 brille aussi fort que 2 b) 1 brille aussi fort qu'avant c) 2 brille aussi fort qu'avant	6 %

Les réponses correctes se passent pour l'instant de commentaires.

Voici quelques exemples de justifications recueillies chez les étudiants ayant fourni l'ensemble des réponses correspondant à ce que nous appelons un **raisonnement séquentiel** : *"R influence 2 mais pas 1", "Si R augmente, il y aura encore moins de courant qui passera et l'ampoule 2 brillera encore moins fort"*.

Tout se passe comme si le courant quittait la pile avec un débit initial indépendant du circuit et parcourait celui-ci éprouvant des "aventures" au fur et à mesure de la progression.

Une dernière catégorie d'étudiants, très minoritaires ici, conserve le courant le long du circuit mais hypergénéralise cette conservation spatiale pour en faire une conservation temporelle lorsqu'on modifie la résistance du circuit. Ce **raisonnement à courant constant** est accompagné de justifications du type suivant :

"La résistance n'influence pas le courant", "Augmenter la résistance ne fait rien car le courant passera toujours de la même façon ; le courant n'est pas arrêté par la résistance, il ne fait que la traverser".

Le questionnaire utilisé pour l'étude du raisonnement séquentiel ne comportait aucune question au sujet de ce qui se passe à l'intérieur de la résistance mais certains commentaires fournis à l'appui d'une réponse correcte montrent que celle-ci peut être produite par un raisonnement qui l'est beaucoup moins :

"L'intensité du courant reste la même à l'entrée et à la sortie" (lorsqu'on augmente la résistance), "On peut faire une analo-

le courant éprouverait des aventures au fur et à mesure de sa progression

hypergénéralisation de la conservation spatiale : conservation temporelle

une action locale
sur le courant
n'aurait d'effet
que localement

gie avec un circuit hydraulique : dans la résistance le débit diminue ($i \searrow$) ; après il reprend son cours normal”.

Nous parlerons à ce propos de **raisonnement local**, le définissant comme un raisonnement selon lequel toute action sur le courant, et de façon plus générale sur le flux, n'a d'effet que localement, là où elle se produit, sans conséquence ni en aval, ni en amont.

Nous voudrions encore rappeler les résultats obtenus avec la question suivante (figure 2) ayant trait à un circuit présentant une dérivation.

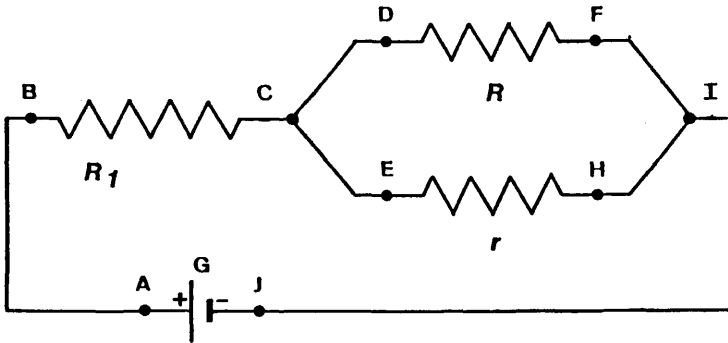


Figure 2

Question 2 ($R > r$)

- a) Le courant est-il plus grand, plus petit ou le même en CD qu'en CE ?
- b) Le courant est-il plus grand, plus petit ou le même en FI qu'en HI ?

Cette question a donné lieu aux résultats rassemblés dans le tableau 2 suivi de quelques commentaires d'étudiants.

TABLEAU 2 : Réponses à la question 2 (i : intensité)	N = 47
Réponse correcte a) $i^{CD} < i^{CE}$ b) $i^{FI} < i^{HI}$	36 %
Raisonnement séquentiel a) $i^{CD} = i^{CE}$ b) $i^{FI} < i^{HI}$	51%
Raisonnement à courant constant a) $i^{CD} = i^{CE}$ b) $i^{FI} = i^{HI}$	6 %

mêmes
raisonnements
dans les circuits
en série et dans
les circuits en
parallèles

Raisonnement séquentiel :

"Dans CD et dans CE, on ne voit pas encore se marquer la différence qu'il y a entre R et r", "Il n'y a aucune raison pour que l'intensité soit plus grande dans une portion (CD ou CE), car il n'y a aucune résistance qui intervient".

Raisonnement à courant constant :

"Le courant est constant dans tout le circuit", "La différence entre R et r n'a aucun effet : le courant aura partout la même intensité".

Les modes de raisonnement sont ici également les mêmes que ceux rencontrés dans la situation précédente. Nous allons maintenant rechercher les modes de raisonnement mis en oeuvre par les étudiants à propos de situations extrêmement semblables relatives à des circuits hydrauliques.

2. CIRCUITS HYDRAULIQUES

La population utilisée pour cette étude est tout à fait équivalente à celle utilisée pour l'étude relative aux circuits électriques. Il s'agit de 92 étudiants de première année d'université dans une filière scientifique après enseignement des éléments d'hydrodynamique. La question 3 (figure 3) est relative à un circuit qui est la réplique hydraulique du circuit de la question 1.

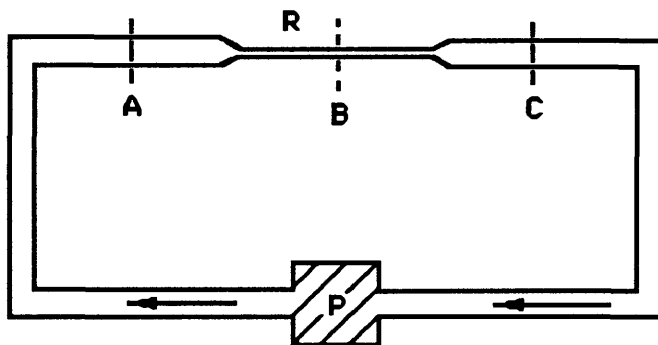


Figure 3

Question 3

Dans le circuit hydraulique ci-dessus, P est une pompe qui établit la circulation de l'eau dans le circuit. Celui-ci est horizontal et la direction de l'eau est indiquée par deux flèches.

- La quantité d'eau par seconde en A sera-t-elle la même, plus grande ou plus petite que celle en B ?*
- La quantité d'eau par seconde en B sera-t-elle la même, plus grande ou plus petite que celle en C ?*

pour l'étude des circuits hydrauliques : des questions très semblables à celles utilisées pour les circuits électriques

- c) La vitesse des particules d'eau en A sera-t-elle la même, plus grande ou plus petite que celle en B ?
- d) La vitesse des particules d'eau en B sera-t-elle la même, plus grande ou plus petite que celle en C ?
- Dans le même circuit, par un procédé quelconque, on rend le rétrécissement R encore plus étroit.
- e) La quantité d'eau par seconde en A sera-t-elle la même, plus grande ou plus petite qu'avant ?
- f) La quantité d'eau par seconde en B sera-t-elle la même, plus grande ou plus petite qu'avant ?
- g) La quantité d'eau par seconde en C sera-t-elle la même, plus grande ou plus petite qu'avant ?

Les réponses obtenues aux questions 3 a) et b) sont rassemblées dans le tableau 3.

TABLEAU 3 : Question 3 a) et b) (Q = débit)		N = 92
Réponse correcte $Q^A = Q^B = Q^C$	Conservation du flux	76
Raisonnement séquentiel $Q^A > Q^B = Q^C$	Non-conservation du flux	6
Raisonnement local $Q^A \approx Q^B \approx Q^C$		10

Nous illustrons ci-dessous ces résultats par deux exemples de commentaires d'étudiants.

Raisonnement séquentiel :

"Parce que le tube A est plus grand qu'en B ; parce que C est après B et la quantité d'eau en C n'a pas d'autre origine que B".

Raisonnement local :

"Parce que le volume d'eau est proportionnel à la section".

Tous les étudiants qui ont fourni une réponse correcte aux questions relatives au flux fournissent aussi une réponse correcte aux questions relatives à la vitesse.

En ce qui concerne les étudiants qui ne conservent pas le flux, nous n'avons pu établir aucune corrélation entre les réponses fournies aux questions relatives au flux et celles relatives à la vitesse. Ou ils identifient la vitesse et le flux, ou ils les déconnectent complètement. Dans le premier cas, ils fournissent tous (3) une réponse "locale" et dans l'autre cas, ils peuvent aussi bien fournir une réponse correcte (5), produire un raisonnement à débit constant (4) ou un raisonnement séquentiel (4) mais toujours sans aucun rapport avec les réponses aux questions relatives au débit.

Le tableau 4 rassemble les réponses aux questions 3 e), f) et g).

TABLEAU 4 : Question 3 e), f) et g)	N = 92
Réponse correcte $Q^A \downarrow ; Q^B \downarrow ; Q^C \downarrow$	8
Raisonnement séquentiel $Q^A = ; Q^B \downarrow$ ou $\uparrow ; Q^C \downarrow$ ou \uparrow	8
Raisonnement local $Q^A = ; Q^B \downarrow$ ou $\uparrow ; Q^C =$	12
Raisonnement à débit constant $Q^A = ; Q^B = ; Q^C =$	55
Pas de réponse ou divers	9

Nous illustrons ci-dessous ces résultats par quelques exemples de commentaires d'étudiants.

Raisonnement séquentiel :

"En A, le débit ne subit aucune contrainte ; en B, la section est réduite ; en C, à moins que l'on apporte de l'eau d'une autre origine, le débit doit être le même qu'en B".

Raisonnement local :

"En A, le débit doit être le même qu'avant parce que rien n'a changé à la pompe ; en B, parce que la section est rétrécie, la pression sera plus grande et le débit doit aller plus vite ; en C, la section est la même qu'avant et donc aussi le débit".

Raisonnement à débit constant :

"En A, la section du tube est toujours la même et donc aussi le débit ; en B, la quantité d'eau est constante mais elle va plus vite".

mêmes modes de raisonnement mis en évidence dans le cas des circuits hydrauliques en série

Nous retrouvons ici qualitativement les mêmes raisonnements que ceux rencontrés en électricité mais avec des fréquences très différentes spécialement dans le cas du raisonnement séquentiel (8,7% au lieu de 52%) et dans le cas du raisonnement à débit constant (60% au lieu de 6%). L'explication est évidemment relative aux contenus différents : il est plus facile de "consommer" du courant que de l'eau ! Il est également intéressant de noter que tous les raisonnements à débit constant sont fournis par des étudiants qui conservent le flux lors des questions 3 a) et b). Nous discuterons plus tard le problème général de la cohérence des réponses des étudiants.

La seconde situation que nous avons utilisée est présentée à la figure 4 et les questions relatives sont résumées ci-dessous.

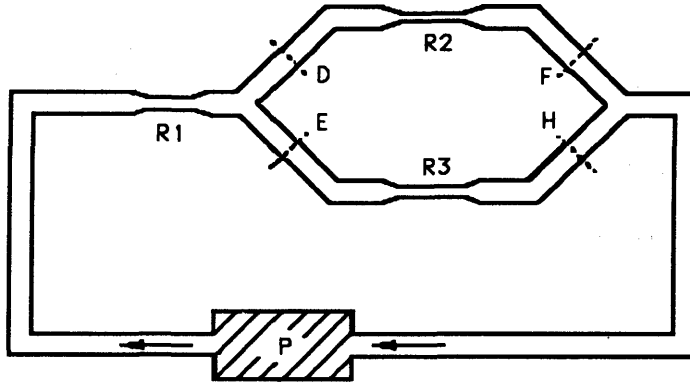


Figure 4

Question 4 ($R2 < R3$)

- a) La quantité d'eau par seconde en D sera-t-elle la même, plus grande ou plus petite que celle en E ?
- b) La quantité d'eau par seconde en F sera-t-elle la même, plus grande ou plus petite que celle en H ?

Le tableau 5 résume les réponses obtenues.

TABLEAU 5 : Question 4 a) et b)	N = 92
Réponse correcte $Q^D < Q^E$ et $Q^F < Q^H$	23
Raisonnement séquentiel $Q^D = Q^E$ et $Q^F \geq Q^H$	12
Raisonnement local $Q^D = Q^E$ et $Q^F = Q^H$	8
Raisonnement à débit constant $Q^D = Q^E$ et $Q^F = Q^H$	40
Divers et sans réponse	9

Il n'est pas aisé de faire une différence entre les deux derniers modes de raisonnement puisqu'ils conduisent aux mêmes réponses ; seules les justifications fournies par les étudiants permettent de les distinguer. Ces justifications n'étant pas toujours suffisamment explicites des erreurs ne sont pas à exclure.

Nous présentons ci-dessous quelques exemples des commentaires des étudiants à propos de la question 4.

mêmes modes de raisonnement mis en évidence dans le cas des circuits hydrauliques parallèles

Raisonnement séquentiel :

"L'eau venant de R1 est divisée en deux parties égales entre D et E ; parce que la section de R2 est plus petite que la section de R3".

Raisonnement local :

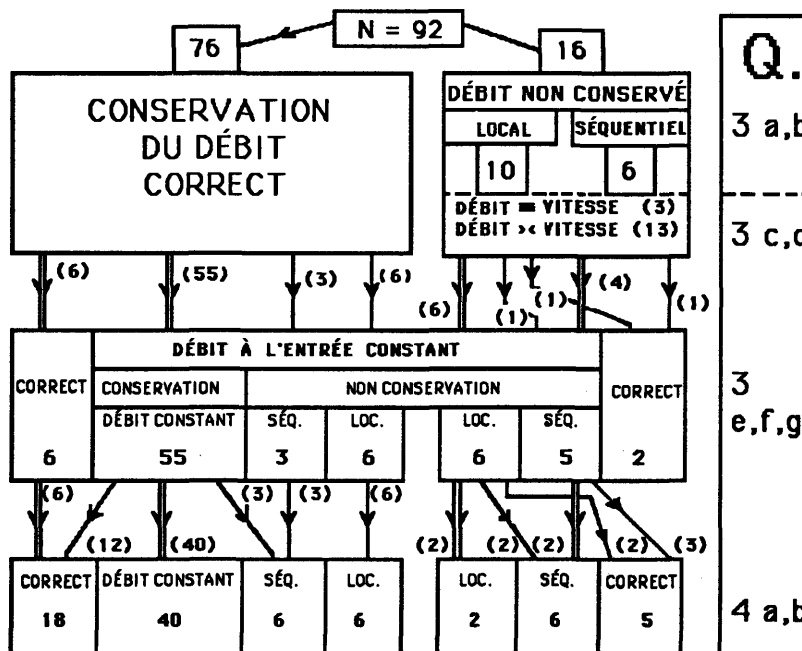
"Comme la section en D = la section en E, les quantités d'eau en D et en E sont les mêmes. Comme les sections en F et en H sont les mêmes, les quantités d'eau sont les mêmes aussi".

Raisonnement à débit constant :

"Parce que les rétrécissements R2 et R3 n'ont aucune influence sur le débit", "Les sections en F et en H sont les mêmes, ainsi les débits sont les mêmes mais les vitesses en R2 et R3 sont différentes".

mêmes raisonnements en électricité et en hydrodynamique mais inversion des fréquences majoritaires

Le tableau ci-dessous présente une vue générale des raisonnements mis en oeuvre par les étudiants pour répondre aux questions 3 et 4. Ils sont qualitativement identiques à ceux rencontrés à propos de questions semblables en électricité, mais leurs fréquences d'apparition sont très différentes. Ce phénomène est à l'évidence imputable à la différence de nature entre les deux "fluides" en cause.



Le tableau précédent fait apparaître quatre modes de raisonnement cohérents au travers des diverses questions : le raisonnement correct (6), le raisonnement séquentiel (2), le raisonnement local (2) et le raisonnement à débit constant (40). Dans chacun des trois derniers raisonnements le débit "à l'entrée" est constant et dans le dernier cas la constance spatiale du débit se transforme en conservation temporelle et en une identité et une constance spatiale dans deux branches en parallèle.

D'autres étudiants passent d'un mode de raisonnement à un autre, mais ce passage, dans l'ordre de la séquence de questions, ne se fait pas vraiment au hasard : soit ils passent d'une conservation spatiale du débit (Q.3 a,b) à un raisonnement local (6) ou à un raisonnement séquentiel (3) (Q.3 e,f,g et Q.4 a,b) qui ne respecte pas cette conservation, soit ils passent d'un raisonnement local (Q.3 a,b) ou (Q.3 e,f,g) à un raisonnement séquentiel (1+2) (Q.3 e,f,g ou Q.4 a,b) ce qui constitue, en termes de conservation spatiale, un léger progrès. Certains encore passent d'un raisonnement à débit constant (12) (Q.3 e,f,g) à un raisonnement correct (Q.4 a,b) ou encore d'un raisonnement local (1+2) ou séquentiel (1+3) (Q.3 a,b ou Q.3 e,f,g) à un raisonnement correct (Q.3 e,f,g ou Q.4 a,b) ce qui constitue chaque fois un progrès.

La tendance majoritaire (50/92) est donc d'être cohérent sur l'ensemble des questions ; une autre tendance importante (22/92) est de progresser vers une conservation du débit et/ou une réponse correcte dans l'ordre de la séquence des questions qui est celui de leur présentation aux étudiants. Il y a là soit un phénomène d'apprentissage, soit une simple dépendance par rapport au contenu ce qui ne peut être déterminé dans le cadre de cette étude, encore qu'un argument en faveur de la dépendance par rapport au contenu ressort du fait que quelques étudiants (12/92) passent d'une réponse correcte à un raisonnement séquentiel ou local. Huit étudiants enfin ne répondent pas à toutes les questions ou ne fournissent pas de justification.

Pour disposer d'arguments à propos de l'utilisation éventuelle des circuits hydrauliques dans le cadre de l'enseignement de l'électrocinétique, il nous est apparu intéressant d'examiner les raisonnements des étudiants à propos des différences de pression. C'est pourquoi nous avons proposé au même échantillon d'étudiants la question 5 suivante (figure 5).

une majorité
d'étudiants
adopte un même
mode de
raisonnement au
travers des
différentes
questions

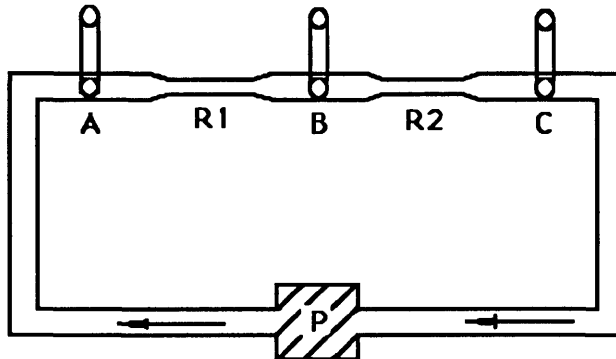


Figure 5

Question 5

a) La hauteur d'eau sera-t-elle la même, plus grande ou plus petite en A qu'en B ?

b) La hauteur d'eau sera-t-elle la même, plus grande ou plus petite en B qu'en C ?

On augmente la vitesse de rotation de la pompe et donc aussi le débit.

c) La hauteur d'eau en A sera-t-elle la même, plus grande ou plus petite qu'avant ?

d) La hauteur d'eau en C sera-t-elle la même, plus grande ou plus petite qu'avant ?

Le tableau 6 ci-après résume les résultats obtenus à l'occasion de la question 5.

questions à propos des différences de pression qui servent parfois d'analogies aux différences de potentiel

TABLEAU 6 : Question 5 a,b puis c,d (h = hauteur)	N = 92
Pression constante dans le circuit $h^A = h^B = h^C$ puis $h^A =$; $h^C =$ (25) $h^A \nearrow$ ou \searrow ; $h^C \nearrow$ ou \searrow (25)	50
Le débit crée les différences de pression $h^A \geq h^B \geq h^C$ puis $h^A \nearrow$ ou \searrow ; $h^C \nearrow$ ou \searrow ou =	26
Réponse correcte $h^A > h^B > h^C$ puis $h^A \nearrow$; $h^C \searrow$	1
Pas de réponse et divers	15

Nous illustrons maintenant ces résultats par quelques exemples de commentaires d'étudiants.

Pression constante dans le circuit :

"La pression est la même dans tout le circuit ; la vitesse change mais pas la pression", "Même section, même vitesse, même débit ; si la vitesse augmente le débit augmente et la hauteur d'eau aussi".

Le débit crée les différences de pression :

"Il y a une différence de pression entre A et B, la vitesse augmente, la pression augmente", "Il est plus aisé pour l'eau de grimper en A que de passer en B ; plus d'eau passe dans le circuit, donc plus de pression".

penser qu'une différence de pression est nécessaire pour obtenir un débit est exceptionnel

A l'exception d'une seule réponse correcte, aucun étudiant ne pense qu'une différence de pression est nécessaire pour obtenir un débit. La majorité des étudiants estime qu'il n'y a pas de différence de pression dans le circuit. Les autres inversent la causalité dans leur analyse du circuit.

3. CONCLUSIONS

Cette étude montre à l'évidence que les étudiants rencontrent les mêmes difficultés à propos du circuit hydraulique qu'à propos du circuit électrique. Il apparaît donc vain d'espérer utiliser une analogie hydraulique qui se fonderait sur une connaissance "naturelle" du circuit hydraulique.

Néanmoins, il y aurait peut-être intérêt à faire précéder l'étude des circuits électriques par celle des circuits hydrauliques qui pourraient constituer une première approche de l'enseignement de l'électricité indépendamment de l'intérêt qu'ils ont pour eux-mêmes. En effet, l'eau est une substance concrète et se prête bien à l'expérimentation : on peut visualiser le débit et les différences de pression sont aisément observables. Enfin, comme nous l'avons montré les étudiants conservent plus aisément le flux hydraulique que le flux électrique.

faire précéder l'étude des circuits électriques par celle des circuits hydrauliques ?

Cependant, deux difficultés importantes devront être rencontrées. La première est l'absence pour les deux circuits de raisonnement systémique de la part des étudiants : la pompe ou la pile détermine le débit ou le courant et parfois ce raisonnement conduit à la réponse correcte ! La seconde difficulté est, pour les étudiants, la non-nécessité d'une différence de pression ou de potentiel pour obtenir un débit ou un courant ; un étudiant déclare : *"L'eau circule et c'est tout !"* Pour obtenir un débit ou un courant, il suffit d'une pompe ou d'une pile et ... c'est vrai !

Une autre conclusion concerne l'importance des raisonnements comme outils de description des représentations des élèves et des étudiants en physique et probablement d'une façon plus générale en science. Ils sont, comme ici, dépen-

dants du contenu mais possèdent une signification très générale et sont particulièrement bien adaptés à l'étude de la résolution de problèmes. Ceci n'est plus à démontrer.

les modes de
raisonnement
des élèves
éclairent sur leur
apprentissage
des sciences

Le vrai problème est plutôt de savoir en quoi la connaissance des modes de raisonnement des élèves et des étudiants nous éclaire quant à l'apprentissage par ceux-ci de la physique et plus généralement des sciences. Nous voudrions tenter d'y répondre sous forme d'hypothèse. On a déjà montré, particulièrement en électricité, et dans cet article en hydrodynamique, qu'à propos d'une même situation on peut rencontrer toute une série de modes de raisonnement possibles. Lorsque les études portent sur des élèves d'âges différents ou de compétences différentes le nombre de raisonnements utilisés augmente encore. Les plus primitifs, ou si l'on préfère les plus simples, sont les plus fréquents chez les sujets a priori les moins compétents. Il semble donc qu'il existe une voie "naturelle" (avec peut-être quelques détours possibles ou quelques variantes) qui conduise à la connaissance du "physicien" dans un domaine ou à propos d'un sujet déterminé. Ainsi en électricité, parmi les raisonnements que nous avons évoqués (il en existe d'autres (7)) le plus primitif est le raisonnement local ; le passage au raisonnement séquentiel constitue déjà un progrès par rapport à celui-ci puisqu'il conserve le débit "avant". Le raisonnement à courant constant qui respecte la conservation spatiale du débit serait l'étape suivante avant d'en venir au raisonnement systémique correct.

Notre hypothèse, formulée sous forme d'affirmation, serait la suivante : **les modes de raisonnement peuvent être hiérarchisés et constituent alors un passage obligé dans la construction de la connaissance scientifique de nos élèves et de nos étudiants.** Les rencontrer et les dépasser en ne tentant pas de bousculer leur hiérarchie naturelle serait la garantie de l'acquisition des compétences cognitives nécessaires à une connaissance scientifique stable d'un sujet déterminé. Nous parlerons à ce propos de "chemin cognitif". Ce concept devrait, nous semble-t-il, orienter la recherche tant à propos des modes de raisonnement qu'à propos de l'apprentissage durant les prochaines années en didactique des sciences.

Jean-Louis CLOSSET
Service de physique,
Faculté des Sciences Agronomiques,
Gembloux, Belgique

(7) CLOSSET J.-L., Les obstacles à l'apprentissage de l'électrocinétique. *B.U.P.*, n° 716, pp. 931-949 (1989).

ON N'A RIEN SANS RIEN ou L'ÉNERGIE, ÇA SE PAYE !

Jean-Loup Canal

L'exploitation d'une situation-problème permet ici à des élèves du cours moyen de découvrir une des propriétés de l'énergie : son caractère conservatif. Les résultats de leur recherche sont contraires à leur représentation immédiate : il y a remise en cause de l'évidence, rupture, et première élaboration du difficile concept d'énergie. Des exercices complémentaires montrent combien ce début d'acquisition est fragile. L'auteur propose enfin une suite possible pour des élèves plus âgés.

Le concept d'énergie est apparu tard dans l'histoire des sciences. Constatons également avec quel acharnement les hommes ont cherché et cherchent encore le moteur perpétuel ! Aussi, ne faut-il pas s'étonner si nous rencontrons des difficultés pour introduire cette grandeur dans l'enseignement.

D'une manière générale, il n'est pas admissible d'introduire une grandeur physique sous forme d'une simple définition. Une grandeur complexe s'impose lentement à l'intelligence des hommes et il est essentiel de pouvoir fournir aux élèves au moins une situation qui leur en donne l'intuition. Le mot "énergie" est connu d'eux mais quel sens y mettent-ils ? Ici, nous avons pris le parti de ne pas utiliser ce mot pendant la recherche expérimentale et de ne l'introduire qu'en conclusion. Toutefois nous l'emploierons dans la description et l'analyse données dans cet article pour ne pas alourdir le texte. Précisons enfin que nous n'avons pas ressenti la nécessité d'un pré-requis. Cet exercice pourrait servir à d'introduction à une étude de l'énergie.

difficultés et
précautions

Si nous voulons nous assurer d'une certaine réussite dans l'acquisition de ce concept scientifique, nous devons nous entourer d'un maximum de précautions : situation prise dans l'environnement scolaire des élèves, situation simple et accessible, adoption d'une démarche pédagogique du type résolution d'une situation-problème. Cette méthode n'est pas nouvelle, même si parfois elle est qualifiée ainsi. On en trouve les fondements chez Montaigne, Rousseau. Freinet, en praticien de l'éducation l'introduit en classe suivant des méthodes très pragmatiques en opposition avec des méthodes oppressives traditionnelles : "l'enfant qui sent un but à son travail et qui peut se donner tout entier à une activité non plus scolaire mais simplement sociale et humaine, cet enfant sent que se libère en lui un besoin puissant d'agir, de chercher, de créer".*

(*) Cité par Élise FREINET dans *Naissance d'une pédagogie populaire*, Petite Collection Maspéro, 1981, p. 83.

La situation expérimentale proposée ici, permet de constater qu'il y a "quelque chose" qui se transforme et non pas création spontanée. Les élèves pourront exprimer leurs représentations, formuler des hypothèses, rechercher des moyens de vérification. C'est en adoptant cette forme de travail que plusieurs classes du cours moyen, de troisième (au moment où l'énergie faisait partie du programme de la classe de troisième) ou d'adultes en stage ont travaillé. Les représentations, les déroulements, les étonnements et les conclusions furent comparables. Nous développerons essentiellement les résultats obtenus dans la classe du CM de Jean-Louis Costes. La dernière partie correspondant aux "nouvelles techniques pour produire de l'électricité sur une bicyclette" n'a pas été testée, elle est proposée comme simple perspective de travail.

1. LE CHOIX D'UNE SITUATION-PROBLÈME

1.1. Le problème à résoudre

"En plein jour, une bicyclette a son alternateur qui est bloqué dans la position de son entraînement. Est-il possible de diminuer l'effort qui est fourni pour entraîner le galet de cet alternateur ?"

Les réponses spontanées vont toujours dans le sens d'une intervention "musclée" sur l'alternateur: "avec un marteau, ou une pierre...", "tordre l'attache...". Voici, par exemple, un dialogue relevé dans un CM2 :

E - *Il faut casser les ampoules !*

M - *Casser les ampoules ? Qu'est-ce que cela va faire de casser les ampoules ?*

E - *Ça va empêcher le courant de passer.*

M - *Tu penses que si le courant ne passe pas on forcera moins ?*

E - *Je le pense; oui !*

E' - *Si on casse l'ampoule, ça tournera quand même la dynamo !*

M - *Tu n'es pas d'accord avec ton camarade ?*

E' - *Le courant ne passera plus mais on forcera quand même, ça fera tout de même tourner !*

Pour la majorité des élèves, jeunes et moins jeunes, leur représentation est la suivante: "l'effort fourni sert à faire tourner la dynamo" (sous-entendu, seule l'énergie mécanique est envisagée), mettre en mouvement et vaincre les forces de frottement pour maintenir la rotation qu'il y ait production ou pas d'électricité.

La tâche des élèves est maintenant définie :

- comment savoir si le fait d'enlever les ampoules va modifier l'effort à fournir ? Leur conviction est déjà faite : "ce n'est pas la peine de chercher, c'est évident, cela ne changera rien !"

la situation de départ conduit à la formulation du problème

- ils savent en outre qu'ils devront, par groupe, présenter les résultats de leur recherche.

1.2. Objectifs possibles

• Les connaissances

Si les objectifs à atteindre aux différents niveaux sont les mêmes, leurs formulations seront fonction de l'âge des élèves.

→ À l'école primaire :

formulation de connaissances qualitatives à l'école primaire et au collège

- . Si le galet de l'alternateur est entraîné et le circuit fermé, l'ampoule brille. Si le galet de l'alternateur est entraîné et le circuit ouvert, l'ampoule ne brille pas, mais l'effort à fournir sur l'alternateur sera moindre.
- . Plus on veut faire briller d'ampoules, plus il faut accroître l'effort pour entraîner l'alternateur (point de vue de l'enfant sur sa bicyclette).
- . Si on veut avoir plus, il faut donner plus.
- . On n'a rien sans rien.

→ **Au collège**, les objectifs précédents seront formulés ; mais il est possible d'accéder à un registre plus élevé :

- . L'énergie mécanique fournie à un alternateur permet de le maintenir en rotation (il faut vaincre les forces de frottements) et de produire de l'électricité.
- . La quantité d'énergie électrique produite dépend de la quantité d'énergie mécanique fournie.
- . Plus la demande d'énergie électrique est grande, plus l'énergie mécanique doit l'être. En extrapolant à une centrale hydraulique, il est évident que cette centrale atteint sa limite de production quand le robinet d'accès de l'eau sur la turbine est totalement ouvert.
- . L'énergie n'est pas gratuite.
- . L'énergie ne se crée pas.
- . L'énergie se transforme.
- . Toute l'énergie mécanique fournie à l'alternateur ne se transforme pas en énergie électrique : il y a des frottements qui se traduisent par des échauffements, c'est-à-dire qu'une partie de l'énergie mécanique s'est transformée en chaleur. Une faible partie a servi à mettre en mouvement le rotor de l'alternateur (énergie cinétique).

• Les méthodes

Ces objectifs constituent des points d'appui pour la tâche à accomplir : proposer une expérience pour vérifier une hypothèse, ressentir la nécessité d'une mesure, choisir des repères, choisir des unités, exprimer un résultat sous forme d'encadrement, présenter des résultats dans un tableau, répéter une mesure afin de comparer les résultats obtenus, interpréter les résultats de l'expérience.

Pour les plus jeunes élèves, certaines méthodes seront découvertes en cours d'expérimentation, en particulier celles relatives aux mesures.

2. LE DISPOSITIF DIDACTIQUE CHOISI POUR L'APPRENTISSAGE

2.1. L'organisation de la séquence

- Les modes de groupement des élèves : la classe est divisée en groupes de 4 élèves. La recherche faite dans chacun des groupes est ensuite communiquée à l'ensemble de la classe.
- La gestion du temps : avec des élèves jeunes ou moins jeunes, le temps d'expérimentation, de confrontation et d'interprétation des résultats fut pratiquement le même, deux heures et demie. La trace écrite avec de jeunes élèves se fit ensuite collectivement. Par contre, avec des élèves plus grands (classe de troisième), il fut demandé à chaque groupe, à partir des notes prises en classe, de faire un compte rendu complet de cette recherche.
- Le matériel sélectionné : une bicyclette par groupe et, sur demande, des masses de 1 à 2 kilogrammes, des boîtes de masses marquées avec des crochets et éventuellement le dispositif de la figure 1 : ses liaisons électriques ont été découpées dans du feillard vendu dans le commerce pour l'isolation des portes et fenêtres.

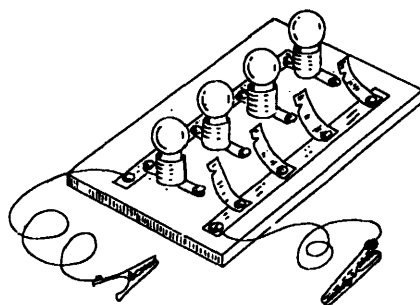


figure 1

- Les modes d'intervention du maître : leurs fonctions sont multiples. Le maître essaye de se cantonner dans des rôles de régulation, d'organisation, d'animation, d'observation et de conseil. Il n'est plus celui qui, *ex cathedra*, distribue son savoir. Les élèves de troisième peu habitués à cette forme de travail adhèrent sans aucune difficulté.

2.2. Les activités expérimentales

- Recherches par comparaison des sensations physiologiques

A partir d'une recherche en groupe et collective, rapidement chaque groupe convient de comparer l'effort fourni pour

des difficultés
pour objectiver
les résultats

entraîner la pédale de la bicyclette renversée, les ampoules branchées ou pas.

Les premiers résultats sont confus : *“tout en tournant, j'ai débranché les fils sans m'arrêter et je n'ai pas trouvé de changement. William non, plus mais Fuech trouve que c'est plus facile quand on a débranché”*. Le maître leur fait remarquer que leurs résultats sont peu objectifs puisque celui qui expérimente en tournant la pédale voit en même temps si les contacts sont effectués ou pas ! Le protocole expérimental est modifié : celui qui pédale ferme les yeux et ce sera un autre élève qui réalisera le branchement ou le débranchement des lampes :

- *Allez vas-y!*
- *Ca fait une impression, là c'est un peu plus dur, là c'est plus léger.*
- *Stop, à moi... C'est plus léger ; oh ! C'est plus dur, là c'est plus dur. Là, c'est plus facile.*
- *Ah tu vois !*

Cependant, même si une tendance se dessine pour ressentir un allègement de la force à exercer quand les fils sont débranchés, les avis ne sont pas unanimes. Le maître les incite à trouver “une démarche moins “pifométrique”, plus rigoureuse et plus scientifique”. Les propositions sont multiples :

- *“Il faut que ce soit la même personne qui essaye sur tous les vélos : peut-être que cela dépend des vélos”*. Le maître récuse cette idée car les autres peuvent toujours contester les sensations de l'expérimentateur et ce dernier sera peut-être plus fatigué au dernier vélo qu'il ne l'était au premier.
- *“Il faudrait faire avec le petit doigt pour tourner la pédale. Là on sentirait parce que notre petit doigt est faible”*. L'élève ressent bien que la différence, si elle existe, est légère. Le maître reprend l'argument précédent et écarte cette proposition.

Le maître intervient à nouveau et les oriente vers des mesures qui seules permettraient de conclure sur des bases objectives.

• Premières propositions de comparaison

Chaque groupe qui dispose de sa bicyclette fait des recherches mais en reste encore à la phase des propositions et non de l'expérimentation. En voici les résultats.

◇ **Premier groupe :**

Les enfants ont voulu appuyer sur la pédale à partir d'une même position de départ jusqu'à une même position d'arrivée :

E - *Et puis après, on a dit qu'il y en avait qui avaient de la force plus que d'autres. Alors pour éviter cela, on a voulu mettre un poids sur une pédale ou entre les rayons (figures 2 et 3).*

M - *Et pourquoi un poids s'il te plaît ?*

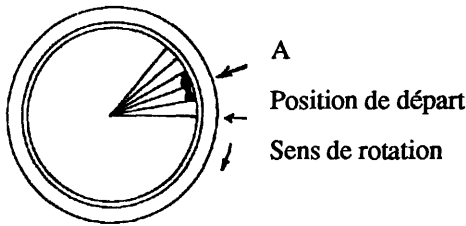


figure 2

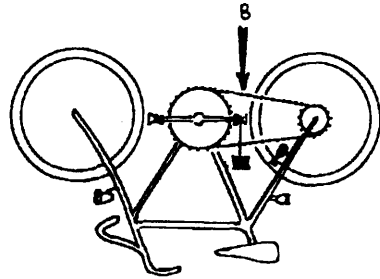


figure 3

propositions pour
fournir une
même énergie et
comparer

- E - *Pour que ça tourne pareil !*
 M - *Autrement dit tu remplaces la force de chacun par quelque chose qui est uniforme et qui est un poids.*
 E - *oui mais il faudrait que ce soit le même partout comme ça, ça..., ça ne sera pas fatigué à force de faire.*

Ce groupe a ainsi trouvé le moyen de fournir toujours la même énergie : il sera possible de comparer les effets avec le circuit fermé ou ouvert.

◇ **Deuxième groupe :**

- E - *On a pensé à mettre un papier entre les rayons puis enlever et mettre les fils sur la dynamo et voir le son que donne le papier. Mais il y a un problème : comme on pédale plus ou moins vite (avec la main) alors le papier il peut avoir des sons différents (et il ne sera pas possible de conclure).*

◇ **Troisième groupe :**

- E - *On a trouvé de mettre un compteur de vélo (un compteur de vitesse). On pédalerait par exemple à 20 km/h et on débrancherait le fil. On pédalerait à 20 km/h et on verrait si ce serait plus dur ou moins dur sur la pédale !*
 M - *On retombe sur le problème du départ ?*
 E - *Oui parce que le garçon sera plus fatigué à la fin qu'au début.*

Le quatrième groupe a repris l'idée d'un compteur de vitesse.

• Des repérages et des mesures

Reprenant l'idée proposée par le premier, tous les groupes expérimentent. Ils proposent finalement trois types de mesure qu'ils présentent aux autres.

Expérimentation 1 :

- E - *On va accrocher un kilo à une pédale (figure 3). On met la pédale à un endroit du cadre (en position horizontale) et on va chronométrer avec une montre combien de temps avec le kilo, elle met pour descendre et s'arrêter avec la dynamo branchée (circuit fermé) ; puis avec la dynamo*

débranchée (circuit ouvert).

Circuit fermé : 3 secondes et un peu plus alors que la pédale n'arrive pas à la position verticale.

Circuit ouvert : 2 secondes et la pédale atteint presque la position verticale.

des résultats
différents à partir
de mesures
différentes

E - *En circuit ouvert, elle a mis moins de temps pour faire un parcours plus long ; alors on prouve bien qu'en débranchant les ampoules, ça aide, ça aide puisque en appuyant avec un kilo, ça part plus vite et plus loin.*

Expérimentation 2

Ce groupe a choisi lui aussi une position de départ pour la pédale (figure 3) et a essayé de déterminer la plus petite charge qui permette l'entraînement de la pédale vers le bas dans les deux situations, circuit ouvert et circuit fermé. Ils ont constaté et montrent aux autres que dans le dernier cas la charge devait être plus forte.

Expérimentation 3

Dans ce groupe, ils ont accroché quatre masses de 500 grammes à la pédale (figure 3). Dans un premier temps ils se sont contentés de repérer la position terminale de la pédale après l'avoir lâchée d'une position déterminée au départ ; puis, sur l'injonction du maître leur faisant remarquer que ce repérage manquait de fiabilité, ils ont suivi et mesuré la rotation de la roue. Ils constatent que sa rotation passe de 1,5 tour en circuit ouvert à 1 tour avec le circuit fermé, ces mesures restèrent approximatives, les élèves ne ressentirent pas le besoin d'une plus grande précision : le résultat était probant.

Conclusion

Les trois méthodes adoptées conduisent à la même conclusion :

- le cycliste se fatiguera moins en débranchant les ampoules ;
- les ampoules ne brillent pas sans rien, "produire du courant exige un effort".

- Des expérimentations en changeant le nombre de lampes

La question avait été posée par un des élèves : "Que se passe-t-il si on change le nombre de lampes ?"

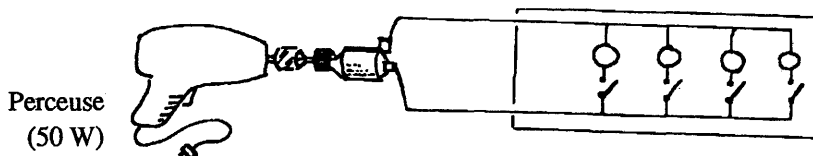


figure 4

les exigences
d'une mesure

Le maître a construit le petit montage de la figure 4, les quatre lampes identiques sont montées en parallèle. Tous les élèves suivent le même dispositif expérimental, mais a priori, fort des premiers résultats obtenus, ils se doutent que l'effort fourni par le cycliste sera plus fort avec plusieurs lampes et les résultats ne les surprendront pas.

Ils ont décidé de charger la pédale et de suivre le déplacement de la roue (figure 3). Ils réalisent que cela exige de prendre des **repères précis** et de donner des **valeurs exactes** de la rotation de la roue.

- Prendre un repère sur la roue, la valve par exemple, et l'amener, à chaque essai, devant un repère fixe du cadre.
- Placer la pédale chargée, à la même position de départ. Dans ce cas, ils avaient placé la pédale verticalement en position haute. Ils auraient pu la placer parallèle à un élément du cadre, cela aurait évité l'obligation de donner au départ une légère impulsion.
- Repérer la position de la valve en fin du déplacement de la pédale ; la mesure de la rotation de la roue est un obstacle facile à surmonter pour des élèves du cours moyen. Ils se rendirent compte qu'il était difficile de communiquer les résultats : *"Ça tourne un peu plus que l'autre fois !"* Ils adoptèrent l'intervalle entre deux rayons comme unité complémentaire.

Voici le tableau de résultats :

Conditions de l'expérience (les lampes sont en parallèle)	Rotation de la roue (en tours de roue et intervalles de rayon)
génératrice en contact : 0 lampe	1 t et 16 i
génératrice en contact : 1 lampe	1 t et 9 i
génératrice en contact : 2 lampes	1 t et 5,5 i
génératrice en contact : 3 lampes	1 t et 4 i
génératrice en contact : 4 lampes	1 t et 3 i

Autre dispositif en classe de troisième

Un groupe d'une classe de troisième a adopté une autre disposition expérimentale : il fixa avec du ruban adhésif deux masses de 500 grammes directement sur la jante :

- à chaque essai, le rayon 1 est ramené devant le repère appartenant au cadre de la bicyclette,
- la position finale de la roue est repérée d'un trait de couleur sur le pneumatique devant le repère du cadre,
- pour avoir la mesure de la rotation, il suffit de compter le nombre d'intervalles.

Conditions de l'expérience (les lampes sont en parallèle)	Rotation de la roue (en intervalles de rayon)
génératrice non en contact	$20 < < 21$
génératrice en contact : 0 lampe	$13 < < 14$
génératrice en contact : 1 lampe	$12 < < 13$
génératrice en contact : 2 lampes	$11 < < 12$
génératrice en contact : 3 lampes	$10 < < 11$
génératrice en contact : 4 lampes	$10 < < 11$
génératrice en contact, 4 lampes en série	$12 < < 13$

On peut remarquer

- Dans les 2 types d'expérimentation, l'éclat des ampoules diminue avec leur nombre.
- Les résultats n'ont pas été obtenus avec la même bicyclette.
- Pour des conditions identiques d'expérimentation, la dispersion des résultats est faible, ce qui ne manque pas de surprendre les élèves.

2.3. Analyse des résultats et traces

• Avec la classe du cours moyen

Avec de jeunes élèves, il n'est pas possible d'utiliser les expressions "énergie potentielle", "énergie cinétique", "travail des forces électriques" etc... En fait, à leur niveau, l'interprétation de ces résultats ne pose pas de problème : c'est toujours la même charge qui chute d'une même différence de hauteur. Elle produit donc ce qu'ils appellent, par analogie avec leur propre action sur les pédales, un même effort, c'est-à-dire en terme scientifique, un même travail (terme non utilisé mais qui aurait été plus approprié que celui d'"effort"). Plus on met de lampes électriques en parallèle, plus le système ralentit et l'énergie fournie initialement se retrouve d'autant moins sur l'avancement du système. "Une partie de l'effort fourni s'est transformée en électricité". Si aucune lampe n'est dans le circuit, il n'y aura aucune "dépense électrique" et donc l'effort à fournir sera plus faible. Nous avons décidé de ne pas utiliser le mot "énergie". A la réflexion nous pensons avoir eu tort : cette étude aurait pu nous permettre de l'introduire d'une manière plus précise en conclusion à la place des expressions "effort" et "dépense électrique".

La trace écrite fut traitée d'une manière classique et construite collectivement :

- la situation-problème servit de titre,
- l'ouverture du circuit fut présentée comme une solution éventuelle,

- y figurèrent les schémas des dispositifs expérimentaux avec les résultats,
- en conclusion furent notés les objectifs avancés dans le paragraphe 1.2.

- Avec les élèves de troisième (ancien programme)

Les deux dispositifs furent effectués par les divers groupes de travail. L'analyse fut faite pour le dispositif de la figure 2.

- **Génératrice non en contact**

Les masses remontent pratiquement à la même hauteur de l'autre côté de l'axe de rotation :

énergie potentielle → énergie cinétique → énergie potentielle

Les frottements sont faibles. La petite diminution de hauteur correspond au travail de ces forces de frottement.

- **Génératrice en contact, 0 lampe**

Une partie de l'énergie potentielle est utilisée pour :

- . vaincre les forces de frottement au niveau de la molette,
- . vaincre les forces de déformation du pneu au niveau de la molette,
- . fournir l'énergie cinétique au rotor de la génératrice.

Compte tenu de ces nouvelles utilisations de l'énergie, il est normal que la roue ait une rotation moindre.

- **Génératrice avec 1 lampe**

Visiblement, le système est ralenti. En plus des conversions précédentes, une nouvelle partie de l'énergie potentielle initiale sera utilisée pour le travail des forces électriques : la roue tourne moins.

- **Génératrice avec 2, 3, 4 lampes en parallèle**

Les lampes étant en parallèle, l'énergie nécessaire augmente avec chacune d'elles. Les débutants en physique se contentent du constat. Ceux qui disposent du modèle mathématique, $W = U^2/R$, pourront justifier le résultat expérimental : la résistance équivalente diminuant au fur et à mesure que le nombre de lampes en parallèle augmente, l'énergie électrique nécessaire augmente, mais l'énergie potentielle de gravitation fournie au système au départ étant limitée, la part restant pour l'avancement du système mécanique diminue, la rotation de la roue sera de plus en plus faible.

- **Génératrice avec 4 lampes en série**

Cette configuration n'a pas été proposée aux élèves du primaire. Les autres constatent que l'arrêt de la roue se situe entre la position "0 lampe" et "1 lampe". La part de l'énergie initiale transformée en électricité est inférieure au cas du circuit avec une lampe : l'intensité diminuant du fait de l'augmentation de la résistance équivalente, l'énergie électrique produite, $W=U.I.t$, diminue et la part d'énergie restant à l'entraînement de la roue sera plus grande.

des résultats
prévisibles si
l'étude de
l'électricité est
introduite par
l'énergie

- Génératrice en court-circuit

Où devrait se situer la position d'arrêt ?

La trace écrite fut réalisée conformément à la consigne initiale : devaient figurer le problème posé, les diverses étapes de la recherche avec en particulier les dispositifs expérimentaux, les résultats des mesures et les conclusions. Chaque groupe a rempli son contrat alors que ce travail collectif réalisé en dehors de la classe, était demandé pour le dernier jour de l'année scolaire !

3. COMMENTAIRE SUR L'APPRENTISSAGE PAR SITUATION-PROBLÈME

Dans le déroulement classique d'un apprentissage, l'enseignant commence par écrire au tableau le titre du concept visé : "L'énergie est conservative". L'information n'est pas significative pour l'élève et a priori ne stimule ni son intelligence ni sa curiosité : c'est une donnée inquiétante car inconnue. Il sait, si sa conscience professionnelle d'élève est déjà solidement établie, cas du bon élève, qu'il aura l'obligation d'apprendre ce qui suit. Il s'installe dans une attitude passive d'attention respectueuse, prêt à noter tout ce qui sera dit par le maître et à exécuter toutes les actions qui lui seront proposées. Il est le spectateur d'une pièce de théâtre, parfois figurant, pour l'exécution d'une tâche dont il ne comprend pas le sens. Il est impliqué seulement par l'obligation de devoir la raconter, un jour.

Avec la résolution d'une situation-problème, son rôle est autre. L'élève se doit d'effectuer une tâche dont il comprend la problématique. S'il faut, il a déjà des idées, des représentations qu'il pourra mettre à l'épreuve. Il est l'acteur de son apprentissage. Si le maître voit sa fonction changée, son rôle reste primordial. En particulier pour la recherche et le choix de la situation de départ : pose-t-elle vraiment problème ? Y a-t-il un obstacle ? Cet obstacle est-il accessible ? Les élèves auront-ils les éléments nécessaires pour le franchir ? Quelles seront les consignes ? Quelle organisation ?

Il nous a semblé que la situation simple qui est proposée ici posait problème et présentait réellement un obstacle. Les apprenants sont obligés de modifier la représentation qu'ils se faisaient initialement de la situation ; mais en progressant dans la résolution, en franchissant finalement l'obstacle qui barrait leur chemin, ils construisent le concept d'une énergie qui ne naît pas du néant mais qui se transforme. Cette situation pourra leur servir de référence, de modèle, d'ancrage.

Ne soyons pas naïfs, avec cette seule situation, si leur conviction initiale est ébranlée, ces notions de non création d'énergie et de transformation d'énergie d'un type dans un autre ne sont pas encore acquises. Elles sont très difficiles à

dans un
apprentissage
par situation-
problème,
l'élève travaille,
le maître aussi

des difficultés
demeurent

concevoir et à maîtriser : conférer la réponse faite par les adultes placés devant la même situation, "il n'y a aucune modification de l'effort à fournir; on perd notre temps...". Il est donc important de mettre les élèves dans des situations nouvelles qui les impliqueront et qu'ils devront interpréter. En principe, ces situations ne devraient plus présenter d'obstacles fondamentaux puisqu'ils disposent dans leur "bagage" des connaissances et des outils nécessaires. Ces situations de prolongement seront en fait des renforcements de l'acquis.

4. PROLONGEMENTS

Voici de multiples situations qui ont toutes été proposées aux élèves du cours moyen et de la classe de troisième. Initialement les questions étaient plus ouvertes et n'étaient pas présentées sous forme de questions à choix multiples (Q.C.M.). Cela alourdissait leur exploitation. Par exemple, la question 4.3. était la suivante : *"Ton père veut transporter deux pneus cloutés pour le verglas. Où lui conseillerais-tu de les placer, sur la galerie, dans le coffre ?"* Les enfants intégraient d'autres paramètres que ceux que nous souhaitions du genre : sur le toit, les clous vont rouiller, les roues risquent de tomber et de provoquer un accident ; dans le coffre, c'est plus prudent, il ferme à clé et personne ne pourra les voler. Ou bien dans le coffre, les roues vont se déplacer d'un côté et de l'autre, les quatre roues ne rentreront pas. Sur la galerie, c'est plus simple pour les enlever; deux enfants firent remarquer que sur le toit ce serait moins aérodynamique, que la résistance de l'air augmenterait et cela entraînerait une plus grande consommation... D'où cette nouvelle présentation.

d'autres
situations pour un
meilleur ancrage
des
connaissances

4.1. Allumer une ampoule

J'appuie sur l'interrupteur d'une lampe branchée sur le réseau : que se passe-t-il dans la centrale hydraulique qui l'alimente ?

• L'alternateur produit autant d'électricité	VRAI-FAUX
• L'alternateur produit plus d'électricité	VRAI-FAUX
• L'alternateur produit moins d'électricité	VRAI-FAUX
• On envoie autant d'eau sur la turbine	VRAI-FAUX
• On envoie moins d'eau sur la turbine	VRAI-FAUX
• On envoie plus d'eau sur la turbine	VRAI-FAUX

Commentaires

Il n'est pas évident de penser que le débit reçu par la turbine dépend de la demande de courant. Seule une bonne intégration des résultats expérimentaux précédents permet de comprendre cet ajustement. Si la demande augmente sans cesse il advient que le "robinet" d'alimentation de la turbine est grand ouvert : la centrale est au maximum de ses possibilités.

Les enfants qui n'avaient encore aucune information sur le principe d'une centrale hydraulique n'ont pas répondu. Pour les autres, collégiens et adultes, les réponses furent bonnes mais certains ont précisé que leur réponse était guidée par le travail qui précédait.

4.2. Incidents sur la ligne à la sortie d'une centrale

Un arbre tombe sur la ligne électrique à la sortie d'une centrale en pleine production. La ligne est rompue, que se passe-t-il dans la centrale ?

La turbine qui entraîne l'alternateur s'emballe	VRAI-FAUX
et se met à tourner à toute vitesse	VRAI-FAUX
La turbine continue à tourner à la même vitesse	VRAI-FAUX
La turbine ralentit son allure et s'arrête	VRAI-FAUX

Commentaires

Il n'y a plus production d'énergie électrique. Si aucune précaution n'était prise, toute l'énergie mécanique fournie à la turbine se retrouverait en énergie cinétique de l'ensemble turbine-rotor qui pourrait même éclater par centrifugation. Un dispositif automatique de sécurité ferme la vanne d'alimentation de la turbine.

élargissement à des situations extérieures à la classe appartenant à l'environnement des élèves

Cet exercice n'a pas été posé à l'école élémentaire. Au collège, il fut évoqué sous forme de discussion collective. Il a permis d'aborder de nombreux problèmes qui se posent à la société EDF : la nécessité d'ajuster sa production à la demande, les difficultés liées à l'irrégularité de la demande, l'interconnexion et ses limites en cas d'incident (cf l'annexe 2). Pour préparer son plan de production, EDF fait des prévisions en intégrant de nombreux paramètres : la consommation de l'année précédente à la même époque, les prévisions climatiques fournies par la météorologie nationale, le rang du jour dans la semaine (début ou fin de semaine ? jour de repos ?), le programme de la télévision (un match international télévisé crée une pointe de consommation), etc... Ces implications de connaissances théoriques nouvellement acquises dans la vie de tous les jours stimulent l'intérêt des élèves.

4.3. Transport de pneus cloutés

On veut transporter deux pneus cloutés pour pouvoir les utiliser en cas de verglas. On peut les placer sur une galerie fixée sur le toit de la voiture ou dans le coffre. On choisit de les placer sur le toit, à vitesse égale :

La voiture consommera moins d'essence	VRAI-FAUX
La voiture consommera plus d'essence	VRAI-FAUX
La voiture consommera autant d'essence	VRAI-FAUX

Commentaires

Après les remarques qui ont été données précédemment, les enfants ont donné d'autres observations sur la résistance de l'air à l'avancement : mettre la main à l'extérieur d'une voiture, courir avec un parapluie ouvert tenu à l'arrière.

4.4. Trajet entre deux villes

Le même trajet entre deux villes et dans le même sens est effectué par un même véhicule dans les mêmes conditions, une fois de jour et une fois de nuit.

La voiture consomme moins d'essence le jour que la nuit	VRAI-FAUX
La voiture consomme plus d'essence le jour que la nuit	VRAI-FAUX
La voiture consomme autant d'essence le jour que la nuit	VRAI-FAUX

Commentaires

Au CM, quelques élèves ont oublié que la nuit, les phares sont allumés et affirment donc que la consommation d'essence n'est pas modifiée. Si la moitié des élèves donne une réponse, un tiers seulement justifie ses réponses.

4.5. Air chaud dans l'habitacle d'une voiture

Pour se réchauffer, un conducteur laisse entrer l'air chaud provenant du moteur en ouvrant un petit volet (sans mettre en route le ventilateur).

La voiture va consommer moins d'essence	VRAI-FAUX
La voiture va consommer plus d'essence	VRAI-FAUX
La voiture va consommer autant d'essence	VRAI-FAUX

Commentaires

Des élèves de l'école élémentaire compliquent l'énoncé en précisant que l'aérodynamique de la voiture est modifiée avec la circulation d'air. D'autres ignorent d'où vient la chaleur...

4.6. Soulever une voiture

Un pneu est crevé. Pour changer la roue, le conducteur veut soulever la voiture. Ce n'est pas facile ! Mais avec un cric, il va y parvenir.

C'est le cric qui fournit l'énergie nécessaire pour soulever la voiture	VRAI-FAUX
Ce sont les muscles de l'automobiliste qui fournissent l'énergie nécessaire pour soulever la voiture	VRAI-FAUX
Ce sont les muscles de l'automobiliste et le cric qui fournissent l'énergie nécessaire pour soulever la voiture..	VRAI-FAUX

Commentaires

Pour les élèves du primaire, cette question pose problème: "il y a notre énergie et celle des engrenages on en obtient beaucoup, et puis aussi, le cric il relâche pas et nous, on relâcherait !" ; une dizaine d'élèves précisent cependant que l'énergie vient uniquement de l'automobiliste : "les engrenages, ça sert qu'avec dix tours de manivelle on fait monter simplement de 1cm". Pour cette question, il aurait été préférable de présenter un cric en action. Qu'il y ait des difficultés, c'est évident car se pose le problème de travail et de puissance. Les mêmes difficultés sont apparues avec les élèves de troisième et des adultes.

4.7. Un thermomètre et un chiffon de laine

Tu enroules un gros chiffon de laine qui était posé sur une table, autour d'un thermomètre qui donnait la température de la pièce, 19° C.

La température donnée par le thermomètre augmente.	VRAI-FAUX
La température donnée par le thermomètre diminue	VRAI-FAUX
La température donnée par le thermomètre ne change pas	VRAI-FAUX

Commentaires

La situation est totalement différente et les deux tiers des enfants du cours moyen affirment que le thermomètre va indiquer une augmentation de température...

4.8. Le moulin de Fludd

Un physicien anglais, Robert Fludd, avait proposé en 1618 un moulin conçu pour fonctionner avec la même réserve d'eau. L'eau est remontée par la machine elle-même pour assurer un niveau constant.

- Peux-tu décrire le principe de fonctionnement envisagé par Fludd ?
- Une telle machine est-elle concevable ?

une proposition
ancienne de
moteur perpétuel

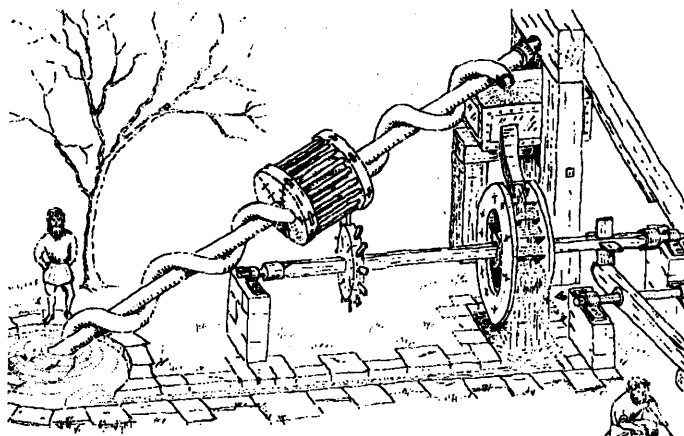


Illustration de l'auteur*

Informations sur le "martinet"

La roue à aubes entraîne, par l'intermédiaire de l'arbre à cames, un martinet qui est un marteau à bascule utilisé autrefois pour battre le métal. Sur un véritable moulin à aubes, le fer du marteau qui pouvait peser cent cinquante kilogrammes retombait jusqu'à cent vingt fois par minute. Le martineur versait le métal en fusion dans un moule de terre réfractaire.

La pastille (le métal démoulé) était placée sous le marteau, sur l'enclume. Peu à peu, elle s'incurvait et prenait la forme d'une coupe. Régulièrement, elle était portée au feu pour retrouver sa malléabilité. Quand la coupe était suffisamment mince, elle était ensuite traitée par le chaudronnier qui lui donnait sa forme définitive.**

Commentaires

Nous aurions dû présenter une vis d'Archimède que les enfants ne connaissent pas. Au cours moyen, ils s'enthousiasmaient pour le dispositif: "elle est économique", "elle va pouvoir faire gagner de l'énergie", "elle empêche d'utiliser beaucoup d'eau", "cette machine est très utile, elle fait des économies", "je trouve ce moulin ingénieux et économique car il produit lui-même son énergie". Deux élèves seulement sont sceptiques "je pense que ce mécanisme est drôle mais si nous ne faisons pas tourner la roue cela ne fonctionnera pas", "je pense que quelque chose ne peut pas fonctionner". Avec des plus grands, élèves de troisième ou adultes, nous avons retrouvé un enthousiasme équivalent. Nous avons dû reprendre les résultats de l'étude sur la bicyclette pour essayer de conclure.

le mouvement
perpétuel
fascine toujours :
non intégration
de la
conservation de
l'énergie

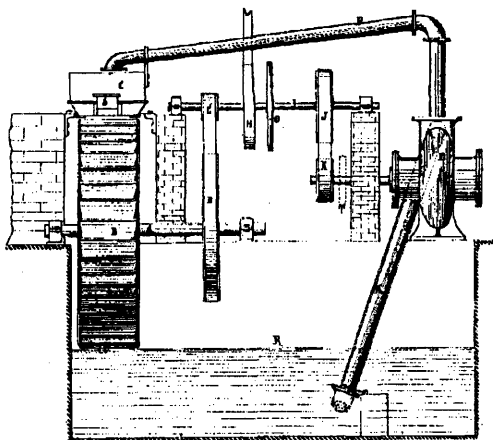
(*) À partir de la reproduction d'une gravure allemande du XVII^e siècle publiée dans «Les infatigables du mouvement perpétuel», par John TURNEY, in *Science et Avenir* n° 438, août 1983.

(**) Cf "Musée du Rouergue", numéro spécial de *Vivre en Rouergue*, 1979, par J. DELMAS.

Un successeur au moulin de Fludd (non proposé)

Le moteur perpétuel fascine : fin XIX^{ème} siècle, soit deux siècles et demi après celui de Fludd, fut déposé, en France un projet d'une filature dont la source d'énergie était due à la chute d'eau sur les aubes d'un moulin (cf la coupe ci-jointe*).

Moteur hydraulique à retour d'eau continu.
Système VINCENT (Victor-Auguste)



Le plan fut présenté aux élèves. Il fut décrit collectivement. Les élèves constatèrent que leurs difficultés étaient celles de leurs prédécesseurs : la roue à aubes B entraîne par l'intermédiaire d'axes, de poulies et de courroies, à la fois la pompe E et un dispositif mécanique quelconque placé au delà de la courroie H. Le dispositif était absolument semblable à celui de Fludd !

4.9. Le moulin d'Escher **

Commente et critique le moulin d'Escher, peintre-graveur hollandais du XX^{ème} siècle.

Commentaire

Les sept-huitièmes de la classe du CM affirment avec plus ou moins de conviction que ce dispositif est irréalisable : "c'est l'image qui donne l'impression que l'eau monte", "je ne comprends pas la perspective", "le moulin ne doit pas fonctionner : on dirait que le chemin est plat alors qu'il devrait monter, et si le chemin montait l'eau ne pourrait pas suivre", "ça ne marchera jamais car l'eau part de la roue qui est en bas et l'eau qui tombe est 5 mètres plus haut ; donc l'eau ne peut pas monter".

(*) Document extrait d'un brevet d'invention déposé en 1886. Archive familiale Hans-Drouin.

(**) Cf. J.-L. LOCHER (dir.), *Le Monde de M. C. Escher*, Paris, Ed. du Chêne, 1972, p. 258

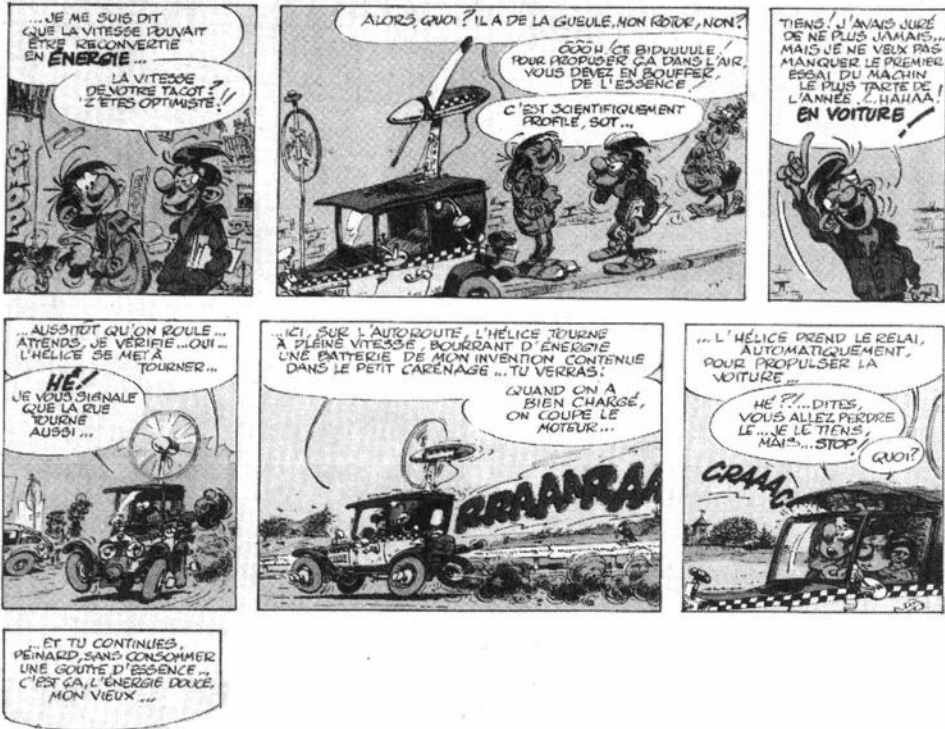
4.10. La voiture de Gaston Lagaffe*

Commente et donne ton point de vue sur la nouvelle invention de Gaston. (Voir extrait de la B.D. ci dessous).

Commentaire

La voiture de Lagaffe est l'objet d'un enthousiasme certain : "c'est économique", "ça permet d'aller plus loin". A la discussion, la voiture de Gaston est rapprochée du moulin de Fludd : accepter le résultat de l'un, c'est accepter l'autre. Mais nombreux, enfants ou adultes, voudraient bien que des essais soient faits pour plus de certitude !

dans chacun d'entre nous sommeille l'idée du moteur perpétuel



Extraits de l'album Gaston LAGAFFE n° 14 (La saga des gaffes)
© 1992 Franquin S.A./DUPUIS

5. DE NOUVELLES TECHNIQUES POUR PRODUIRE DE L'ÉLECTRICITÉ SUR UNE BICYCLETTE

Nous proposons ce qui suit comme suggestion et prolongement à cette étude sur l'énergie. Cela permettrait de conforter l'acquis précédent et d'introduire d'une façon plus systématique les transformations successives d'énergie, le principe de dégradation de l'énergie (augmentation de l'entropie).

des propositions à essayer

On pourrait demander aux élèves, sous forme de question ouverte, d'imaginer d'autres chaînes de transformations énergétiques que celle utilisée communément sur une bicyclette pour éclairer les lampes. S'ils ne sont pas "inspirés", on pourrait leur demander d'analyser et de commenter les divers procédés proposés sur les dessins joints en annexe.

La discussion devrait conduire à de **multiples constats**.

- Ces dispositifs ne sont pas les seuls, il est possible d'en envisager d'autres : avec une machine électrostatique par exemple.
- Différents critères de classement peuvent être adoptés, dispositifs statiques ou dynamiques, dispositifs où l'homme est à l'origine de l'énergie initiale, ceux qui stockent l'énergie, ceux qui sont autonomes, ceux qui sont utilisés sur le plan industriel..
- Dans chaque situation, il y a quelque chose qui a dû être fourni au départ du dispositif et qui s'est transformé en électricité. Ce quelque chose qui se transforme et qui nous coûte, soit en effort physique, soit en argent, est l'énergie.
- Dans un cas, le coût est nul : c'est celui de la pile solaire. Mais "quelqu'un" paye : le Soleil. La remontée de la chaîne énergétique des autres situations permettrait d'aboutir au même "payeur"! Parmi les situations proposées, seule, la microcentrale nucléaire, ferait exception.
- L'énergie initiale ne produit-elle que l'énergie électrique ? Chaque fois qu'il y aura du mouvement, des forces de frottements produiront de la chaleur à l'air ambiant au détriment de la production d'électricité. Ce sont des pertes.
- Une partie de l'énergie électrique est convertie en chaleur dans chacun des éléments du circuit, c'est l'effet Joule. Cette chaleur se dissipe dans l'air ambiant ; ainsi, dans la lampe, une partie de l'énergie est perdue, l'autre, l'énergie utile, sera convertie en lumière. Mais cette lumière, en interaction avec la matière, sera finalement convertie en chaleur.
- Globalement, il semble que toute l'énergie initiale nécessaire à la production de lumière soit transférée, à un moment ou à un autre, à la Terre sous forme d'un échauffement. L'étude d'une nouvelle chaîne énergétique, celle d'un déplacement d'une voiture à essence par exemple, permettra de généraliser ce résultat.

6. CONCLUSION

Une bonne appréhension du principe de conservation de l'énergie passe préférentiellement par une suite de confrontations avec des situations vécues. Ces situations doivent permettre aux élèves de développer leur esprit critique, leur curiosité, leur ingéniosité. Les élèves vont suivre un enseignement de découvertes avec un apprentissage de connaissances par remise en cause de leur propre représentation du phénomène étudié.

Avec de très jeunes élèves (CP), il est intéressant de les confronter avec des dispositifs transformant l'énergie d'un type à un autre. Par exemple, à cet âge, ils sont convaincus de réaliser une voiture électrique avec une simple voiture et une pile en mettant en contact les languettes de la pile avec les roues (*).

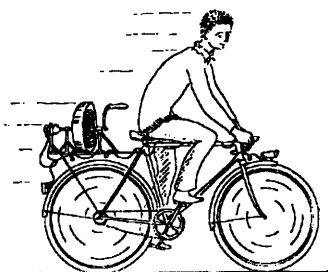
Nous venons de voir que certaines notions plus complexes sont envisageables et peuvent se prêter à une approche expérimentale : la manipulation est simple mais significative, le matériel, connu des élèves, est facile à se procurer. En outre, la situation se prête très bien à une pratique de résolution de problème. A partir de cette exploitation, chacun prend conscience du prix de l'énergie. Si par extraordinaire, les résultats expérimentaux avaient montré qu'il n'existait aucune variation de l'effort à fournir, la grande quête de l'énergie serait terminée : une petite chute d'eau pourrait produire l'électricité à tout un village et pourquoi pas à toute une ville ! L'étonnement et la prise de conscience de cette impossibilité sont bénéfiques ; ils conduisent à une meilleure perception d'une des caractéristiques de l'énergie : l'énergie ne se crée pas, elle se transforme.

Il n'en reste pas moins que beaucoup d'humilité est indispensable aux enseignants : les commentaires des enfants sur les situations qui leur furent proposées le montrent : ces notions ne sont pas encore solidement acquises. L'objet d'étude repose sur un concept difficile à maîtriser et à construire : l'exploitation d'une seule situation ne saurait suffire. Mais les nouvelles situations doivent être étudiées en faisant appel, plus systématiquement que nous ne l'avons fait, aux résultats de la première situation : *"sans modifier le moteur et donc son rendement, avec une même énergie au départ, Gaston Lagaffe aurait doublé son trajet ; c'est faux car nous avons montré que pour avoir plus il faut donner plus !"*

Jean-Loup CANAL
IUFM de Toulouse
Centre départemental de Rodez

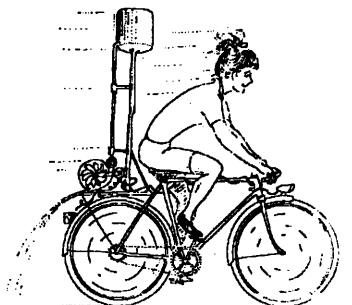
(*) *Jouets, mobiles, mouvement, énergie*, J-L CANAL, rapport interne, mars 1978.

Annexe : exemples de situations*...



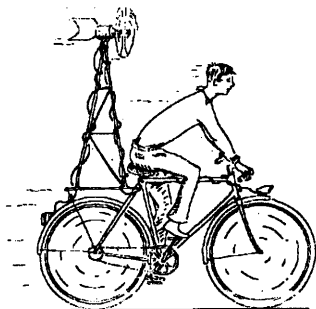
“Des lampes qui ne manquent pas de ressort !”

Dessin A



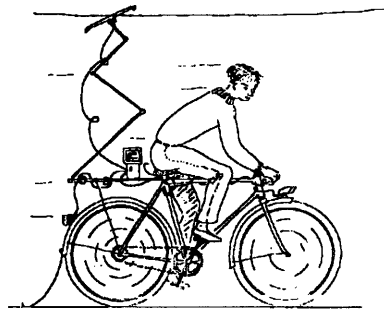
“Vive l'eau !
vive l'eau, qui...”

Dessin B



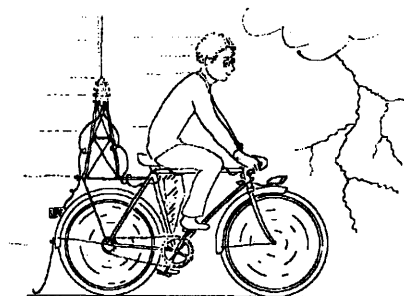
“C'est l'air qui travaille pour moi !”

Dessin C



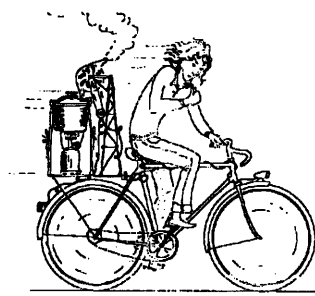
“J'ai quelques contraintes...”
Réponse d'EDF : “Oui, peut-être, mais au
tarif-nuit, c'est moins cher”

Dessin D



“Première tentative de récupération de
l'énergie céleste...”
...et sûrement la dernière !

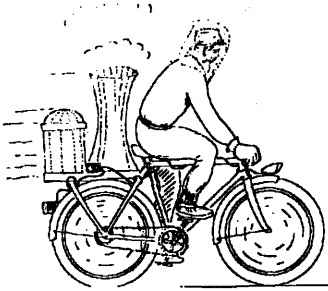
Dessin E



“Ma soupe ne manque pas de panache !”
... ou comment faire des économies
d'énergie...”

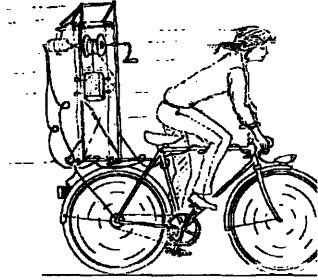
Dessin F

(*) Dessins de l'auteur.



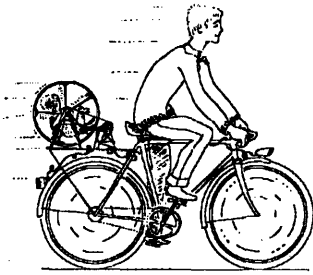
“Bien sûr, il y a quelques précautions
à prendre...”
mais la technologie suit-elle ?

Dessin G



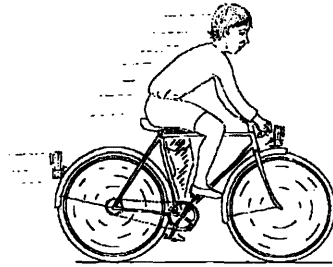
Une énergie de poids !

Dessin H



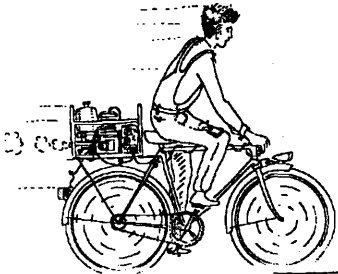
“Je roule pour lui...”
Une nouvelle énergie primaire : la noisette

Dessin I



“Pour moi, la lumière est reposante”
...et c'est gratuit ?

Dessin J



“ Il faudra que j'utilise mon groupe
pour autre chose...”

Dessin K



“C'est de tout repos”

Dessin L

OUVRAGES POUR LES ENSEIGNANTS

Eclairage sur l'énergie, Aster n° 2, INRP, Paris, 1986.

Sciences physiques, 3ème, collection Libre Parcours, livre élève et livre du professeur, Hachette, Paris, 1979.

Collection Tavernier, Bordas, Paris :

- *Sciences et technologie, livre du maître CM*, p. 98.
- *Sciences et technologie CM, livre de l'élève*.
- *Matrices CM physique et technologie*.
- *Le feu, la lumière, le temps qui passe, guide du maître*.
- *Piles, ampoules, boussoles, guide du maître*.
- *Moteurs de jouets, mouvements, énergie, guide du maître*.

Série HPP : *Le triomphe de la mécanique T3*, et *La lumière et l'électromagnétisme T4*, Québec, diffusion Vuibert, Paris, 1972.

Histoire des machines, bibliothèque "Pour la science", Belin, Paris, 1985.

Moteurs, recherche de la puissance, E.P.A., Paris, 1985.

La technologie, des origines à l'an 2000, Solar, Paris, 1977.

La conquête de l'énergie, VASSILIEV, Editions de Moscou.

Chaleur et désordre, ATKINS, "Pour la Science", Belin, Paris, 1988.

La nature de la physique, R. P. FEYNMANN, "Point Science", Seuil, Paris, 1978.

Carnot et la machine à vapeur, J.-P. MAURY, Puf, Paris, 1986.

OUVRAGES POUR LES ÉLÈVES

L'histoire des grandes inventions, B. GILLE, Nathan, Paris, 1968.

Une voiture, comment ça marche ? BRADLEY, MARSHALL, Nathan, Paris, 1975.

Le train, comment ça marche ? BRADLEY, MARSHALL, Nathan, Paris, 1975.

Un avion, comment ça marche ? BRADLEY, MARSHALL, Nathan, Paris, 1975.

Vive le nucléaire ! Petite histoire de l'énergie, KONK, Albin-Michel, Paris, 1978.

Petites histoires des inventions qui ont changé le monde, BESSON, Gallimard, Paris, 1975.

Petites histoires des inventions de la vie de tous les jours, BESSON, Gallimard, Paris, 1975.

Les aventures de l'électricité, BESSON, SODEL, Paris, 1975.

L'électricité en questions, A. GRÉE, Casterman, Paris, 1973.

Moteurs à faire soi-même, KINKAJOU, Gallimard, Paris, 1978.

Jouets à construire pour comprendre les énergies, Spécial Jeunes Années, Paris, 1983.

Solaire, Spécial Jeunes Années, Paris, 1985.

IMAGICIELS, APPROCHE EXPÉRIMENTALE EN MATHÉMATIQUES

Françoise Monnet
Yves Paquellier

Elaborant et utilisant des logiciels producteurs d'images ("imagiciels") pour l'enseignement des mathématiques, nous proposons ici une analyse des représentations produites et une explicitation des différentes utilisations que l'on peut en faire. Nous expliquerons dans quelle mesure les activités mathématiques conduites en classe avec ces logiciels peuvent faire appel à une démarche expérimentale. De nombreux exemples seront donnés pour illustrer notre propos.

Depuis quelques années, la littérature pédagogique (de l'article de recherche jusqu'aux commentaires de manuels en passant par les propos de salle des professeurs) se risque à réclamer une place (plus ou moins grande) pour une **démarche expérimentale** dans l'acquisition des connaissances mathématiques. On parle alors "d'essais-erreurs", "de problèmes concrets", "de manipulations", "d'observations", "d'activités", préférant, le plus souvent, décrire le moyen envisagé plutôt que de s'interroger sur sa nature et son fonctionnement. Ainsi, les questions essentielles demeurent : **quelle expérience fait-on, qui la fait et de quoi fait-on l'expérience** à travers telle ou telle pratique d'enseignement qui reconnaît, peu ou prou, le rapprochement des termes "expérimentations" et "mathématiques" ?

Une équipe du CREEM (Centre de Recherche et d'Expérimentation pour l'Enseignement des Mathématiques dépendant du CNAM) travaille depuis longtemps à l'élaboration et l'expérimentation d'imagiciels (voir définition infra) pour l'enseignement des mathématiques(1). Dans ce cadre nous avons été amenés à prendre en compte l'interrogation ci-dessus, tant il est vrai que l'image mathématique (figure, schéma, représentation graphique ... tout ceci reste à préciser) est un des lieux où la question du rapport entre expérience et mathématique se cristallise.

Nous nous proposons donc, après avoir défini précisément ce que nous entendons par imagiciel, d'analyser les caractéristiques des images intervenant dans un imagiciel. Puis en décrivant les différents rôles que l'on peut assigner à un imagiciel, nous tenterons d'explicitier dans quelle mesure son utilisation relève d'une démarche expérimentale.

(1) Depuis plusieurs années ce travail s'accomplit en collaboration avec la Direction des Lycées et Collèges (programme national d'innovation pédagogique).

Pour illustrer notre propos, nous donnerons un grand nombre d'exemples d'imagiciels en essayant, à l'aide de figures, de rendre l'aspect dynamique et interactif de ceux-ci. Ces exemples seront encadrés dans le texte afin qu'il soit facile de s'y reporter.

1. QU'EST-CE QU'UN IMAGICIEL ?

donner une
définition
préalable est
risqué

Définir, dès les premières lignes de cet article, ce que nous appelons un **imagiciel** (parfois une "image logicielle") est à la fois une nécessité et un risque.

La nécessité est celle de permettre au lecteur n'ayant pas eu connaissance de nos recherches ou des publications précédentes sur le sujet (cf quelques titres en bibliographie) de "se faire une idée" de l'objet autour duquel vont s'organiser les réflexions qui vont suivre.

Le risque est double :

- d'abord celui de figer la notion d'imagiciel dans une définition préalable et réductrice alors que l'un des objectifs de ces quelques pages est précisément d'en montrer la complexité,
- mais aussi celui de laisser penser que, dans notre travail, nous avons défini a priori ce qu'était un imagiciel pour s'attacher, par la suite, exclusivement à en produire. Or l'un des points essentiels sur lequel nous voudrions insister est, au contraire, l'ajustement incessant entre d'une part un travail de production et d'expérimentation, d'autre part une réflexion plus théorique visant à définir un outil pédagogique à travers ses multiples réalisations. Enseigner des mathématiques à l'aide d'imagiciels n'est pas une méthode que nous avons mise en oeuvre mais une démarche que nous explorons et qui ne cesse de se modifier, de se préciser, au cours de cette exploration même.

Pour répondre à cette nécessité et éviter ce double risque, nous commencerons par donner une idée générale et un exemple de ce qu'est un imagiciel, puis nous prendrons le temps de préciser notre manière d'envisager l'**objet imagiciel** dans l'état actuel de nos réflexions.

1.1. Idée générale et premier exemple

un exemple
d'image
dynamique et
interactive

En première approximation nous dirons :

un imagiciel est un logiciel permettant de produire à l'écran des images animées et interactives, généralement à base de dessin, dans un but d'enseignement, et ceci, le plus souvent dans le cadre d'une utilisation collective.

Donnons un premier exemple

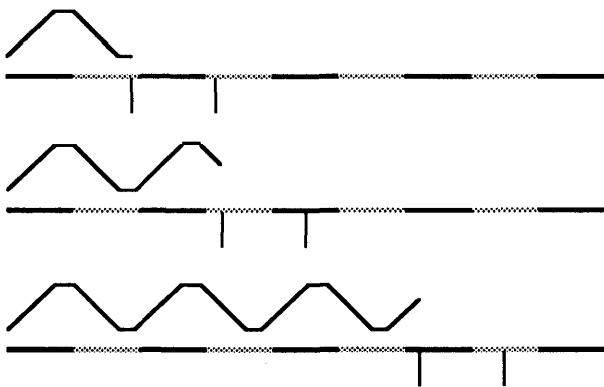
FONCOL est un imagiciel proposant une famille de fonctions numériques périodiques.

La situation mathématique : on colorie régulièrement une droite graduée avec deux couleurs (noir et gris sur la figure ci-dessous). On choisit un réel strictement positif a , à tout réel x , on associe la longueur de la deuxième couleur (gris sur la figure) contenue dans le segment $[x, x+a]$. Que peut-on dire de la fonction f ainsi construite ?



L'image écran

- L'image est interactive : l'utilisateur choisit le réel a , ce qui permettra d'étudier une famille de fonctions.
- L'image est dynamique : après le choix de a , on lance le tracé en appuyant sur une touche du clavier, la courbe de la fonction f se construit au fur et à mesure que se déplace le segment comme l'indique la figure ci-dessous. Pendant le tracé, l'appui d'une touche provoque l'arrêt momentané, et on peut agir sur la vitesse de déplacement.



1.2. Les trois niveaux de relation avec l'imagiciel

Comme tout logiciel, un imagiciel comporte un **auteur** (en l'occurrence l'équipe du CREEM) et des **utilisateurs**. Mais par sa finalité d'outil pédagogique, le pôle utilisateur se subdivise lui-même en deux catégories : les **enseignants** (nous-mêmes ou d'autres enseignants ne faisant pas partie de l'équipe), leurs **élèves** (essentiellement de second cycle).

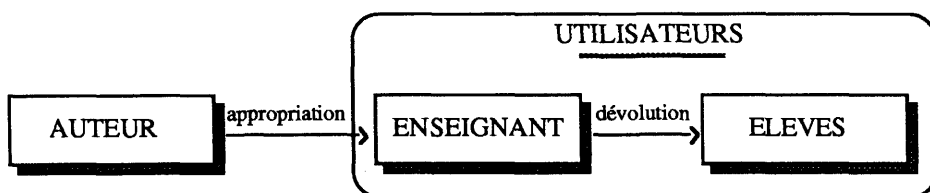
Chacun de ces trois pôles, du fait de son rôle et de ses objectifs, pose un regard différent sur l'objet imagiciel (cf infra, 1.3.). Mais ces trois "acteurs" de l'élaboration et l'utili-

l'auteur,
l'enseignant,
l'élève en
relation avec
l'imagiciel

sation d'un imagiciel entretiennent également entre eux des relations complexes et fondamentales pour notre travail :

- ainsi il convient que l'enseignant s'**approprie** l'imagiciel afin de l'intégrer dans sa pratique quotidienne, il attend donc de l'auteur que celui-ci lui fournisse les moyens de cette appropriation (ou au moins la favorise) notamment à travers les documents accompagnant le logiciel ;
- de plus, cet enseignant doit être en mesure de transmettre, de **dévoluer** selon l'expression de G.Brousseau (1986), aux élèves l'imagiciel et la situation qu'il porte ; à travers l'imagiciel et à propos de lui se noue alors un échange complexe entre la classe et l'enseignant.

Nous résumons cela dans le schéma suivant :



Ce schéma illustre les relations concernant un imagiciel dont l'écriture est achevée. Mais si l'on considère la phase d'élaboration de l'imagiciel il faudrait, pour rendre la dynamique des relations, tracer des "flèches en retour" dont la dénomination serait plus délicate, afin d'illustrer les "échos" (le "feed-back") que les utilisateurs renvoient aux auteurs pendant le travail d'écriture d'un imagiciel. De la version première (le prototype) à la version jugée définitive, tout un ensemble de modifications est discuté et parfois effectué.

Par exemple, dans la première version de l'imagiciel FONCOL décrit plus haut, il était impossible de faire fonctionner l'imagiciel sans tracer à l'écran la courbe de la fonction (ce qui donne la solution du problème). On ne pouvait donc pas utiliser l'image pour seulement faire comprendre aux élèves la nature de la situation. Le professeur était alors souvent obligé de faire au tableau une figure qu'il accompagnait parfois de gestes, simulant ainsi le fonctionnement de l'imagiciel !

Certes toutes les demandes du "terrain" ne sont pas compatibles et il revient à l'auteur de faire les choix nécessaires. De même, c'est lui qui prend la responsabilité de clore la phase d'élaboration en décidant de la version définitive de l'imagiciel.

Il n'empêche que ce serait réduire le travail de conception d'un imagiciel que de n'indiquer, au cours du travail d'élaboration, que des relations en sens unique.

1.3. Les trois composantes d'un imagiciel

- La notion de conception d'un objet informatique

Du fait des relations entre les différents acteurs ayant affaire à un imagiciel, le regard que chacun d'entre eux porte sur cet imagiciel doit être pris en compte par les deux autres intervenants. Ainsi, par exemple, l'auteur ne peut ignorer l'utilisation pédagogique que sera amené à élaborer l'enseignant ainsi que le rôle que jouera alors l'imagiciel auprès des élèves ; l'enseignant ne peut s'approprier le produit informatique sans chercher à expliciter et prendre plus ou moins à son compte les idées que l'auteur a voulu illustrer à travers le logiciel proposé. Mais il ne peut faire ce travail d'assimilation sans tenir compte de l'usage qu'il lui semble possible d'en faire dans sa classe.

un imagiciel est la conjonction d'une idée, d'un produit et d'un usage

Pour envisager ces aspects multiples d'un imagiciel nous utiliserons la notion de **conception**(2) d'un objet informatique qui peut se définir ici comme la rencontre de trois composantes : **une idée, un produit** (le logiciel d'images) et **un usage**. Détacher un de ces aspects des deux autres (en particulier concevoir l'imagiciel comme un simple produit) c'est refuser de reconnaître qu'un logiciel est toujours au service de "quelque chose" qui ne peut être réalisé ou manqué qu'à travers les utilisations que l'on en fera.

Nous allons reprendre ces trois composantes (l'idée-l'image(3)-l'usage) du point de vue de l'auteur qui est celui que nous adopterons, plus particulièrement, dans cet article puis, plus rapidement, du point de vue de l'enseignant et de l'élève.

- Du point de vue de l'auteur

L'imagiciel est **outil de représentation et outil pédagogique**. L'auteur devra donc faire des choix dans deux directions :

- . adéquation de l'image avec le concept mathématique visé,
- . adaptation de l'image avec les activités envisagées.

prise en considération de l'usage par l'auteur

Cela l'oblige donc à entreprendre une double réflexion épistémologique et didactique, lui fournissant des pistes pour la constitution de l'image mais aussi des critères pour choisir entre plusieurs d'entre elles qui peuvent parfois s'être imposées à lui a priori. Car le chemin n'est pas, là non plus, en sens unique de l'idée à l'image vers l'usage. Il s'agit plutôt de

-
- (2) Nous employons le mot *conception* dans le sens, plus riche, où certains auteurs anglo-saxons parlent de *design* d'un système informatique désignant par là l'invention, l'idée générale, la conception, le projet, la construction, l'adaptation aux besoins des utilisateurs, etc... (Winograd, Flores 1989).
 - (3) Nous utiliserons le singulier générique *l'image* pour désigner l'ensemble des images potentielles que le logiciel permet de produire. Le choix entre ces différentes possibilités relève déjà de l'usage. Pour plus de précisions sur ce mot image voir la partie 2.1.

saisir ensemble les trois aspects avec leurs exigences propres et leurs rapports complexes. L'usage, par exemple, est pris en considération à travers la constitution de documents techniques et pédagogiques d'accompagnement, de scénario d'utilisation, la prise en compte de problèmes d'ergonomie (Hocquenghem 1987). Mais, là aussi, l'activité peut être première et imposer la recherche d'images la favorisant, celles-ci entraînant une réflexion sur les notions mathématiques mises en jeu. Chacune des trois composantes d'un imagiciel est dépendante des choix qui seront opérés sur les deux autres. Cela exige, de la part de l'auteur, des "aller et retours" permanents entre ces trois aspects, au cours du travail d'élaboration.

• Du point de vue des utilisateurs

Du point de vue de l'enseignant, après s'être approprié le travail de l'auteur sous ces trois aspects, celui-ci devra à son tour faire acte de conception à travers les objectifs pédagogiques qu'il retiendra et les pratiques qu'il mettra en place.

Du point de vue de l'élève, celui-ci aura à interpréter une image et à utiliser un outil de représentation. Il lui faudra donc retrouver ou manquer la conception de l'auteur dans ce jeu de l'utilisation et de l'interprétation. Il lui faudra, à son tour, se faire une idée et vivre une pratique(4).

1.4. Définition de synthèse

Tout ce préambule a pu sembler un peu long au lecteur soucieux de "voir concrètement ce que ça donne". Mais il serait illusoire de prétendre comprendre ce qui peut se jouer à travers l'emploi d'un imagiciel dans une classe sans avoir pris le temps de cerner le réseau de préoccupations auquel il renvoie et qui conditionne son écriture.

Usant de la polysémie du mot représentation, nous pourrions résumer tout ceci de la manière suivante :

un imagiciel est la rencontre de trois représentations :

- celle qu'on se fait (l'idée) d'une notion mathématique à enseigner, des manières de l'enseigner,
- celle qu'on se donne (l'image) dans sa capacité de visualisation,
- celle qu'on se joue (l'usage) à travers les échanges collectifs autour de l'imagiciel.

l'imagiciel est
représentation
en trois sens
différents

(4) Il y a là une différence essentielle entre les imagiciels et les logiciels d'EAD de type plus ou moins tutoriel. Un imagiciel n'impose pas de scénario préétabli. Par les choix qu'il fera entre les différentes possibilités qui lui sont offertes, l'enseignant (et dans une certaine mesure l'élève) réalisera à chaque fois un "nouvel" imagiciel. Le logiciel d'EAD est un labyrinthe, l'imagiciel est un moyen de locomotion.

Ainsi reprenons le logiciel FONCOL déjà évoqué : il répond à la recherche

- d'une situation simple de fonction périodique (l'idée),
- dont l'illustration mettrait clairement en évidence un phénomène répétitif (l'image) sans que pour autant ce soit trop évident,
- et telle que les élèves pourraient facilement faire des prévisions indépendamment du logiciel (l'usage) permettant ainsi une séquence où les élèves seraient les acteurs essentiels.

L'imagiciel est destiné à des élèves de seconde qui ont tous les outils nécessaires pour faire de bonnes prévisions et pour justifier les résultats. Un document d'accompagnement (voir ci-dessous) précise ce que l'auteur a prévu comme déroulement dans la classe, mais chaque professeur peut à travers les possibilités du logiciel (re)trouver un scénario : comme l'utilisateur doit proposer une valeur de la longueur de l'intervalle, il est naturel de regarder comment agit ce paramètre sur la situation. L'ergonomie du logiciel facilite son utilisation pour vérifier de nombreuses propositions d'élèves lorsqu'ils cherchent des valeurs de a qui donnent des fonctions particulières.

Ce document est un raccourci, il offre à l'utilisateur un accès **plus rapide** à "l'usage".

Activité utilisant le logiciel FONCOL (prévue pour des élèves de seconde)

Chaque segment colorié a pour longueur 32.

Faire fonctionner le logiciel avec $a = 20$ sans faire tracer la fonction. Essayer de prévoir le tracé ; vérifier avec le logiciel. Comprendre dans ce cas la périodicité et trouver la période.

Essayer de prédire ce qui se passe pour une autre valeur de a (par exemple 40). Utiliser le logiciel pour vérification. Recommencer avec différentes valeurs de a .

Pour quelles valeurs de a la fonction est-elle une fonction qui s'annule ?

Etudier les extremums.

Pour quelle(s) valeur(s) de a la fonction est-elle constante ?

2. L'IMAGE DANS UN IMAGICIEL

Rappelons que nous désignons par «l'image», l'ensemble des images que peut produire le logiciel constituant la partie informatique de l'imagiciel. Nous avons vu, dans la partie précédente, qu'ainsi définie l'image, loin d'être un tout autonome construite pour elle-même, est, à la fois, au service d'une idée et au centre d'une activité.

Quels sont donc les aspects spécifiques de cette image, notamment par rapport aux images habituellement utilisées dans l'enseignement des mathématiques ? Telle est la question à laquelle il nous faut répondre avant que de chercher à caractériser ce qui se joue à travers l'utilisation d'un imagiciel.

Pour cela nous commencerons par nous interroger sur la nature des images en mathématiques dans leur ensemble au regard des images utilisées en sciences expérimentales.

2.1. Images mathématiques et imageries scientifiques

Quelques précisions tout d'abord.

- En ce qui concerne le rôle de l'image en sciences expérimentales, nous ne prétendons pas posséder d'autres compétences que celles que certaines lectures ou conversations nous ont apportées. Notre travail de recherche se limite, en effet, aux mathématiques. Néanmoins, puisque nous nous demanderons, dans la troisième partie de cet article, en quoi l'activité mathématique autour d'un imagiciel peut être qualifiée d'expérimentale, il nous paraît difficile d'ignorer tout à fait cette question.
- Le contexte de production et d'utilisation d'une image est, à coup sûr, un aspect essentiel de son analyse. Nous nous limitons ici aux images utilisées dans un but de transmission d'un savoir déjà constitué ; c'est-à-dire que nous ne considérerons pas les images intervenant dans le travail de recherche, ce que l'on a coutume d'appeler, en sciences, les "inscriptions scientifiques" (Jacobi 1987). De même, nous ne prendrons pas en compte les images mathématiques intervenant comme outils de représentation de phénomènes extra-mathématiques, dans des contextes professionnels par exemple, (graphiques divers d'un rapport économique, courbes obtenues par mesure ou simulation d'un phénomènes physique..).
- Nous avons jusqu'à présent usé (et abusé) du terme "image" dans des sens très différents. Mais, outre que le vocabulaire est fort fluctuant en la matière (Drouin 1987), nous préférons employer ce terme vague qui a l'avantage d'insister sur l'essentiel - il s'agit de quelque chose qui s'oppose au texte - sans préjuger de sa fonction (5).

la situation que nous étudions

Ceci étant posé, comment caractériser images dans l'enseignement des sciences et images dans l'enseignement des mathématiques ?

Toute image se veut représentation de quelque chose, c'est-à-dire **traduction** dans un certain registre sémiotique d'un "objet" donné autrement (dans tel ou tel langage, dans une autre image, dans la réalité). A l'origine de la production d'une image il y a donc un **travail d'interprétation qui conjugue deux mouvements** (Drouin 1987).

l'image est une traduction résultant d'abstraction et de concrétisation

- **Un mouvement d'abstraction** élimine, simplifie, réduit selon certains critères, adapte aux contraintes du type d'image visé. C'est ainsi que l'on peut être amené à distin-

(5) On pourra objecter que le mot "image" sous-entend "la reproduction exacte ou analogique d'un être ou d'une chose" (Petit Robert). Telle est d'ailleurs la raison pour laquelle Michèle Artigue (1987) préfère le terme de "visualisation". Il nous semble cependant possible de parler d'images mathématiques sans que le lecteur y voit obligatoirement la reproduction de quelque chose (on se demande d'ailleurs bien de quoi !).

guer différents niveaux d'abstraction de la photo au tableau en passant par le schéma, le graphique, etc...

- **Un mouvement de concrétisation** donne à voir ce qui ne se voyait pas dans ce qui était donné précédemment. Cet effet de *mise en évidence* peut être une conséquence du type d'image produit. Ainsi la représentation graphique d'une fonction "fait voir" le nombre de solutions de l'équation $f(x) = 0$. On parle alors des caractères producteurs de l'image par opposition aux caractères réducteurs dus aux contraintes de la représentation (Rogalski 1982). Mais cet effet peut également être l'expression d'une connaissance préalable que l'on a de l'objet représenté. C'est ainsi que l'on peut dire, par exemple, que *le schéma fait voir le réel non pas tel qu'on le voit mais tel qu'on le sait être* (Drouin 1987). L'image n'est plus seulement représentation d'un objet mais expression d'un savoir. Ainsi le signifiant qu'est l'image est signifiant d'un double signifié, celui du référent mais aussi celui du sujet qui l'a produite (Rogalski 1984).

l'image
mathématique
et l'image
scientifique ne
s'opposent pas
comme
concrétisation et
abstraction...

A considérer les choses ainsi, on pourrait être tenté d'opposer images mathématiques et images scientifiques en privilégiant la fonction de concrétisation des premières et celle d'abstraction des secondes. Mais, outre le fait que l'on pourrait trouver dans chacun des domaines des exemples contredisant ce point de vue, ce serait ignorer que les deux aspects (abstraction/concrétisation) sont inséparables et que c'est la volonté de "faire voir" qui conduit à réduire, à abstraire comme c'est l'exigence de simplifier qui produit la mise en évidence de certains caractères de l'objet.

Plus fondamentalement, cette première impression qui voudrait attacher l'abstraction aux images scientifiques et la concrétisation aux images mathématiques, si elle ne se justifie pas par la considération des images elles-mêmes, nous paraît révéler une différence qui concerne davantage ce "quelque chose" qui est représenté. En effet, l'image scientifique se présente toujours comme représentation d'une certaine réalité, même si cette réalité est parfois difficilement appréhendable directement (considérons, par exemple, le système nerveux ou une molécule de méthane). A l'opposé, l'image mathématique est représentation d'un objet mathématique qui, même si on lui confère un certain type de "réalité", est avant tout donné à celui qui veut le représenter, à travers une expression linguistique (formule mathématique, texte d'un problème de géométrie ...) (6).

Cette différence entraîne plusieurs conséquences en ce qui concerne les images.

la différence est
dans la nature
de l'objet
représenté

(6) Là aussi, il existe probablement des "cas limite" et la géométrie dans l'espace possède sans doute un rapport plus complexe à la réalité ordinaire que les fonctions polynomiales du second degré. Signalons à ce propos que nous n'aborderons pas dans cet article le domaine de la géométrie dans l'espace. Travaillant actuellement à l'élaboration d'imagiciels sur ce sujet, cela fera l'objet de publications ultérieures.

l'image
mathématique
tend à être
autonome dans
une
transparence
illusoire à la
réalité

- **La première** est que l'image mathématique rencontre, plus que toute autre image scientifique, le problème de l'**hétérogénéité du langage et de l'image**. Le dessin d'un triangle ne pourra jamais exprimer complètement le concept de triangle. Des expressions comme "pour tout", "quel que soit", fréquentes dans les textes mathématiques, ne sont pas traduisibles directement, lorsqu'elles portent sur un ensemble infini d'objets, dans le registre de l'image (7).
- **La deuxième** est ce que Janine Rogalski (1984) appelle l'**illusion de la transparence**, à propos des représentations graphiques de fonctions. Il s'agit de l'identification entre l'objet mathématique (par exemple le graphe d'une fonction) et sa représentation (la courbe, tracé matériel). Cette identification du signifiant et du signifié, parfois encouragée par la situation d'enseignement elle-même, a souvent été analysée en didactique des mathématiques (cf, par exemple, Adda 1976). Elle nous semble être un aspect spécifique de la représentation mathématique.
- **La troisième** conséquence découle immédiatement de la précédente et consiste en ce que l'on pourrait appeler l'**autonomie de l'image** par rapport à l'objet qu'elle représente. Puisque le triangle ABC "est" le triangle dessiné, puisque le graphe de f "est" la courbe tracée, alors, travailler sur la courbe ou sur la figure, c'est travailler sur la fonction ou sur le triangle. L'image est alors étudiée pour elle-même et passe du statut d'outil de recherche à celui d'objet d'expérimentation (8). N'étant rattachée à aucune réalité matérielle dont elle serait la représentation, l'image mathématique devient la réalité.

Rencontre constante de son rapport hétérogène au langage, risque permanent de l'illusion de la transparence, tentation fréquente de devenir autonome, telles sont les différences essentielles de l'image mathématique par rapport à l'image scientifique et ceci moins en raison du travail de représentation qu'à cause de la nature des objets représentés.

2.2. L'image dans un imagiciel

Dans de nombreux articles ou exposés sur le sujet, l'utilisation de l'imagiciel a souvent été décrite comme celle d'un **super tableau noir** (cf colloque CNAM 1986). Même si nous verrons, par la suite, que l'imagiciel ne se limite pas à une modification du support graphique utilisé en classe, il importe cependant de préciser, dans un premier temps, quels sont les aspects spécifiques de cette image, de dire en quoi ce tableau mérite le qualificatif de "super".

-
- (7) Même si, la paramétrisation de l'image dans un imagiciel permet d'aborder cette question de la quantification universelle (cf infra).
- (8) Ceci d'autant plus facilement que, dans certain contexte, la représentation peut être elle-même objet d'enseignement, en mathématiques comme en sciences expérimentales.

- Une image calculée

- **Image fidèle et image qualitative**

Lorsque l'enseignant (ou l'élève) dessine un triangle rectangle, dans la cadre d'une figure de géométrie, il ne prend que rarement une équerre et se contente de la réalisation d'un triangle rectangle "en gros". Il lui suffit de savoir que le triangle est rectangle ; ce savoir, il le fera figurer en plaçant le signe iconique de l'angle droit. Il n'est pas nécessaire qu'il le voie. La rapidité du croquis est préférée à l'exactitude de l'image(9).

habituellement
l'image
mathématique,
en classe,
exprime plus
qu'elle ne
représente

De même, lorsqu'il s'agit de tracer la courbe représentative d'une fonction, l'enseignant (ou l'élève) calcule certes les coordonnées de quelques points, mais se limite finalement à l'allure de la courbe, mettant en lumière, quitte à "tricher" avec les valeurs exactes, tel ou tel aspect sur lequel il veut insister (existence d'un extremum, tangente ou asymptote particulière ..). C'est ici l'intention d'éclairer qui est privilégiée aux dépens de la précision des calculs.

Dans les deux cas, et dans tous les autres du même type que l'on peut imaginer, nous parlerons d'**images qualitatives** pour indiquer que l'image est au moins autant expression d'un savoir sur l'objet mathématique que représentation "mécanique" de cet objet. De plus, et c'est là le point fondamental, l'interlocuteur (maître ou élève), celui qui devra interpréter l'image, est conscient de cet aspect qualitatif de l'image faite à la main (ne serait-ce qu'en raison du temps mis pour la produire par rapport aux capacités de calcul de l'être humain). Ce caractère approximatif et expressif de l'image fait partie de la coutume scolaire et, sauf contexte particulier où l'objectif serait la précision du tracé, l'enseignant ne reprochera pas à l'élève et l'élève ne considérera pas comme significatif le fait que l'angle ne soit pas tout à fait droit ou que tel point de la courbe soit situé à 0,5mm de l'asymptote alors qu'en fonction de l'échelle il devrait se situer à 0,1mm de celle-ci.

l'imagiciel, en
revanche,
propose une
image que
l'utilisateur
suppose fidèle

Or, lorsque l'image est produite par l'imagiciel, la situation nous semble singulièrement différente. Il est certes possible de simuler avec l'ordinateur ce comportement du "traceur humain" qui conjugue un **principe de précision suffisante** avec d'autres exigences (commodité de production, expression de ce que l'on sait, par ailleurs, de l'objet ...). Nous en donnons quelques exemples plus loin. Mais il y a alors comme une transgression, comme une "tricherie" par rapport à ce que l'interlocuteur imagine de l'image produite par ordinateur. L'image dans un imagiciel est le résultat d'un calcul dont l'algorithme est programmé dans l'imagiciel. Elle est donc, avant tout, **fidèle** à un procédé de calcul, procédé

(9) On connaît l'adage qui veut que la géométrie soit "l'art de raisonner juste sur des figures fausses". Déclaration excessive, comme toutes celles de ce type, mais qui exprime cependant une certaine réalité de la pratique.

que l'utilisateur de l'imagiciel imagine comme le plus exact possible et donc le plus fidèle possible à l'objet représenté (Delcourt 1987).

Pour reprendre les exemples précédents, si le triangle n'apparaît pas comme triangle rectangle à l'écran c'est qu'il ne l'est pas (sinon il n'était pas plus difficile pour l'ordinateur de faire un "vrai" triangle rectangle) ; si ce point de la courbe est de coordonnées (1 ; 0,5) c'est que l'on n'a pas $f(1) = 0,1(10)$ (car sinon le logiciel aurait tracé le point de coordonnées (1 ; 0,1)).

Au principe de précision suffisante se substitue, pour celui qui interprète une image informatique, un **principe de précision optimale** (compatible avec l'outil technologique) qui interdit, a priori, que l'on ait affaire à ce que nous avons appelé une image qualitative. Nous parlerons alors d'**image fidèle** pour exprimer cette relation d'exactitude que postule l'interlocuteur (et sur laquelle il compte) entre l'objet représenté et l'image informatique via le procédé de calcul.

Cette différence, image qualitative/ image fidèle qu'instaure le regard de celui qui interprète les images, suivant leur mode de production, conduit l'auteur d'un imagiciel à opérer un certain nombre de choix lorsqu'il décide de l'algorithme de calcul déterminant l'image. Face à une image (fidèle) obtenue à l'aide d'un premier algorithme (celui que la situation mathématique fournit "naturellement"), l'auteur peut, en effet, être amené, soit à ajuster l'algorithme pour obtenir une autre image, soit à conserver cette image mais en faisant alors de son caractère trompeur un des thèmes de l'usage qu'il préconise. Nous allons illustrer ces deux types de décision dans les deux points suivants.

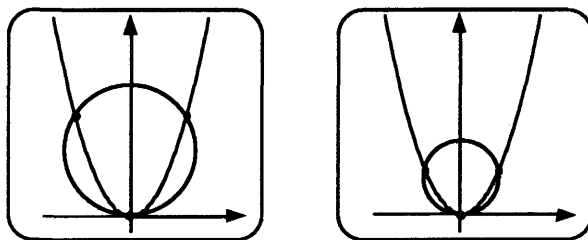
- Ajustements : voir et savoir de l'auteur

l'auteur peut
ajuster le
procédé de
calcul de
l'image
informatique

Un premier type d'ajustement peut tendre à transformer l'image fidèle en image qualitative pour accentuer le phénomène que l'on cherche à faire voir, contournant pour cela l'exactitude de l'algorithme "naturel". Nous parlerons alors d'**ajustement pour l'expressivité**.

Le logiciel CERCLIM, propose une situation d'étude de limite qui se "voit" sur un objet géométrique : on trace le graphe d'une fonction f , symétrique par rapport à l'axe des ordonnées ; pour tout réel $x \neq 0$ tel que $f(x)$ existe, on considère le cercle défini par le point A de coordonnées $(0, f(0))$, le point M de coordonnées $(x, f(x))$ et son symétrique par rapport à l'axe des ordonnées. On s'intéresse à ce que devient ce cercle lorsque x tend vers zéro. Dans le logiciel, l'utilisateur pilote le réel x et le cercle se modifie en conséquence.

(10) Dans la cas où l'échelle choisie permet de distinguer les ordonnées 0,5 et 0,1.



Lorsque la fonction est telle que le rayon du cercle n'a pas de limite (ce qui n'est pas le cas pour la fonction de la figure), l'auteur a choisi de faire tirer au hasard la valeur de ce rayon lorsque les trois points sont confondus sur l'écran. Ce qui permet d'être sûr que l'image produite renforcera ce que les élèves doivent percevoir : lorsque x varie en étant proche de zéro, le rayon prend toutes les valeurs positives.

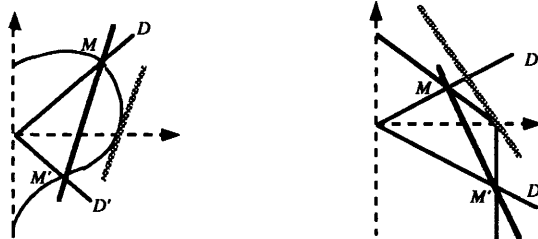
l'utilisateur peut être trompé par l'image informatique

Par ailleurs, il se peut que l'algorithme prévu produise, pour des raisons de limitation technologique, une image mathématiquement incorrecte (mais toujours informatiquement fidèle). L'ajustement est alors un ajustement pour l'exactitude du tracé, quitte à obtenir l'image par des procédés complexes très différents de ceux qu'imaginera l'utilisateur de l'image.

Le logiciel **LIMSYM** propose l'étude de la position limite d'une droite définie par deux points lorsque ces deux points tendent à être confondus : soient les droites D et D' de pentes opposées non nulles et une courbe C telle que D et D' coupent C en M et M' respectivement, on cherche la position limite Δ de la droite (MM') lorsque les pentes des droites D et D' tendent vers zéro. Le logiciel permet de modifier la pente qui est affichée et la droite (MM') est tracée.

Si on veut rendre la pente très petite et garder une image juste, les possibilités de calcul de la machine ne permettent plus de faire tracer la droite (MM') en calculant les coordonnées des points M et M' . Il faut tracer la position limite en utilisant soit la tangente au point limite lorsque la courbe en possède une (figure de gauche), soit les valeurs calculées lorsque la pente est proche de zéro sans l'être trop (figure de droite). Evidemment il est nécessaire que l'auteur ait vérifié qu'une telle position limite existait bien.

L'image produite est alors **fidèle à ce que sait l'auteur** de la situation et non plus à ce que la machine calcule.



Mais on peut parfois, dans des cas analogues au précédent, préférer conserver l'image mathématiquement inexacte et jouer ainsi de sa force d'illusion.

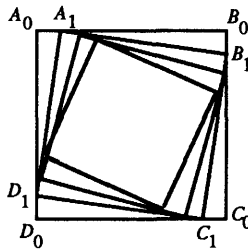
- Illusion : voir et savoir de l'utilisateur

Cette fidélité postulée de l'image informatique conduit souvent l'élève à faire preuve d'une confiance totale envers l'ordinateur et l'image qu'il produit, confiance analogue à celle qu'il manifeste pour sa calculatrice.

Considérons l'exemple suivant illustré dans le logiciel SUIFIG.

On choisit deux nombres c et p et on considère la suite de carrés construits selon le principe suivant : c est la longueur du côté du premier carré $A_0B_0C_0D_0$; le deuxième carré $A_1B_1C_1D_1$ est tel que ses sommets sont sur les côtés du carré précédent et vérifient $A_0A_1=B_0B_1=C_0C_1=D_0D_1=p$. On itère le procédé pour construire les carrés suivants, c_n est la longueur du côté du $n^{\text{ième}}$ carré.

Une fois choisis les nombres c et p , le logiciel trace la suite des carrés et affiche les valeurs de c_n .



Dans le cas où $c=8$ et $p=1$, la suite (c_n) convergeant très rapidement, elle apparaît très vite stationnaire (à partir de $n=13$) aussi bien graphiquement (plus aucun carré ne semble se dessiner) que numériquement (valeur affichée égale à 1). La résolution de l'écran graphique et le nombre de décimales utilisées conduit l'algorithme "naturel" à produire cette image. Mais, là aussi, il aurait été possible à l'auteur de procéder à un ajustement de son programme et d'utiliser ce qu'il savait de la suite (c_n) pour faire une image exacte (zoom sur les carrés, affichage du signe " \approx " entre c_n et la valeur 1, etc...). Or nous avons, dans le cas de cet imagiciel, préféré ne rien faire et laisser l'imagiciel produire cette image "dangereuse". Ceci, précisément, pour que puisse être posée la question des limites de cette exactitude de l'image informatique. L'expérience prouve qu'en utilisant cet imagiciel, le plus souvent, la classe est convaincue du caractère stationnaire de la suite. On peut alors suggérer de prouver (sans l'aide de l'imagiciel) que, pour tout n , $c_n > 1$ (ce qui n'est pas très difficile). Il reste alors à expliquer la contradiction apparente entre ce que donne le raisonnement et ce que donne l'outil informatique. Or l'image étant calculée, son procédé de calcul est explicitable. Elle n'est pas le résultat d'un "tour de main", d'un savoir-faire implicite qui aurait simplement été malhabile en la circonstance. Il est possible de comprendre très précisément pourquoi l'image produite fut celle-ci en réfléchissant sur son mode de production.

Cette possibilité de réflexion qu'offre l'imagiciel n'a pas seulement pour vertu de montrer les limites de l'outil technologique (ce qui n'est déjà pas d'un moindre intérêt), elle permet également de mettre en évidence, à travers l'expérience d'une contradiction réellement vécue, la différence ineffaçable entre l'objet mathématique et sa représentation. L'explicitation du procédé de calcul, à l'occasion d'un de ces "ratés", est un des moyens de combattre l'illusion de la transparence évoquée plus haut.

- Une image dynamique

l'image d'un
imagiciel est
dynamique

L'image d'un imagiciel n'est pas figée, à l'inverse de l'image du livre, elle est susceptible d'évoluer dans le temps. Nous dirons alors qu'elle est **dynamique** et cela mérite moins de commentaires que son caractère d'image calculée évoqué précédemment. Nous nous contenterons simplement de distinguer les deux types de dynamisme qui peuvent intervenir.

- **Le tracé dynamique**

Il s'agit du cas où l'image se construit peu à peu, sous les yeux de l'utilisateur. Il en est ainsi, par exemple, de la courbe d'une fonction se traçant point par point ou du tracé du transformé d'une figure par une transformation géométrique. L'image s'apparente alors à un film, un dessin animé, les possibilités d'intervention de l'utilisateur se limitant alors à l'interruption, le ralentissement et l'accélération, le recul, le retour au début.

Ce déroulement de l'image peut d'ailleurs être mis à profit par l'enseignant de deux manières.

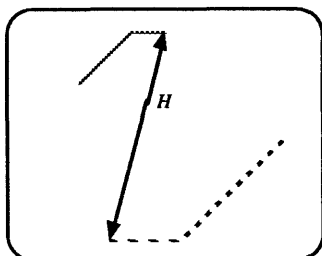
- Mise en évidence du procédé de construction, l'image illustrant, pas à pas, ce qui pourrait être fait sur papier. Elle pourra alors comporter un certain nombre de tracés auxiliaires de construction qui disparaîtront au fur et à mesure. Avant d'être outil d'exploration, la représentation est objet à construire et objet à interpréter, donc objet d'enseignement. Cette production "en direct" que permet l'image informatique est un des moyens d'atteindre cet objectif(11). Signalons toutefois qu'il est des cas où l'apparition globale de l'image peut être préférée.

image point par
point et image
globale

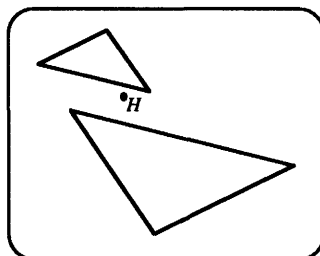
(11) Cet aspect des choses est parfois pris en compte par certains manuels sous forme de plusieurs dessins juxtaposés, sous forme de bande dessinée, appelés précisément "*film de la figure*" ou "*film de construction*".

Ainsi dans le "traceur d'homothétie", deux possibilités sont offertes d'obtenir à l'écran un triangle et son image dans une homothétie de centre donné et de rapport donné : soit en pilotant un point qui engendrera le triangle et en construisant à l'aide de deux vecteurs l'image de chaque point (figure de gauche), soit en faisant apparaître globalement un triangle (que l'on peut déformer en pilotant ses sommets) et son image (figure de droite).

Dans le premier cas, on s'intéresse à la construction de l'image d'un point, et dans le second cas, on s'intéresse plus aux propriétés de l'homothétie.



Construction point par point



Apparition globale

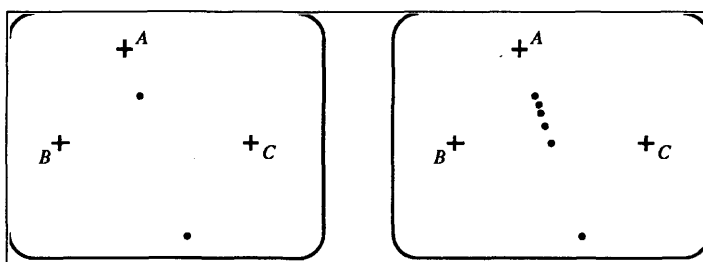
- Passage d'une attitude d'observation à une problématique de prévision, en interrompant l'image et en demandant aux élèves d'anticiper sur la suite. Si les moments d' interruptions sont bien choisis cela peut "dramatiser" le déroulement de l'image et favoriser la discussion en classe.

- L'image modifiable

Dans un imagiciel, l'utilisateur peut non seulement intervenir sur le déroulement de la construction de l'image mais aussi modifier celle-ci. Ses possibilités d'action sur l'image sont très variées suivant l'imagiciel : "zoom" sur une partie de la courbe, déplacement d'un point d'une figure géométrique, changement des valeurs numériques de certains paramètres (rapport d'une homothétie, coefficient directeur d'une droite) ..

Quel que soit le mode d'intervention, on peut pratiquer deux types de déformation de la figure : celles qui se font **en continu** (on déplace un point à l'aide des flèches et "le reste suit") et celles qui se produisent **d'un seul coup** (on change un point en entrant ses coordonnées au clavier et la nouvelle image apparaît). Une même situation pouvant donner lieu aux deux types d'action, il est certain que, dans les deux cas, le contexte d'exploration de la situation n'est pas le même.

Le logiciel BARY3 est un "traceur" du barycentre de trois points A , B et C respectivement affectés des coefficients a , b et c . L'utilisateur peut faire varier les coefficients soit de manière continue : par exemple en appuyant sur la touche "A", il augmente ou diminue le réel a d'un pas constant. Il peut aussi proposer directement une nouvelle valeur de a en utilisant les chiffres du clavier. Les figures obtenues sont très différentes, les remarques des élèves le seront aussi. Sur la figure de gauche, on passe directement de la situation $a=2, b=1, c=1$ à la situation $a=-1, b=1, c=1$, alors que sur la figure de droite on le fait continûment en diminuant a de 0,5 à chaque fois.



Si nous avons rapproché le dynamisme du tracé de celui du film de dessin animé, ce caractère modifiable de l'image est assurément plus riche et peut être davantage comparé au conte à votre façon de Raymond Queneau ou aux "livres dont vous êtes le héros" qui fleurissent depuis quelques années. Il s'agit, en fait, d'une des composantes de l'aspect fondamental de l'image au sein d'un imagiciel : son interactivité.

- Une image interactive

A de rares exceptions près où il s'agit d'illustrer un point très particulier (tracé de la cycloïde comme exemple de courbe périodique), l'image d'un imagiciel est en fait constituée d'une infinité potentielle d'images qui apparaîtront à la demande de l'utilisateur. Telle est la définition de l'**interactivité** de l'image qui permet à l'utilisateur de l'interroger et qui fait de chaque utilisation de l'imagiciel une histoire unique. C'est, à coup sûr, la spécificité essentielle de l'image d'un imagiciel. Nous nous contenterons ici de l'évoquer puisque cette interaction imagiciel-utilisateur sera au centre de la troisième partie.

Signalons simplement que les possibilités d'interrogation de l'utilisateur peuvent être plus ou moins limitées depuis la simple demande de l'affichage des coordonnées d'un point ou des valeurs d'une suite jusqu'à l'entrée d'une fonction quelconque dont on obtiendra la représentation graphique. La question se pose alors à l'auteur de savoir quel degré de liberté il doit laisser à l'utilisateur. Permettre de faire varier tous les paramètres de l'image peut, dans un premier temps, paralyser le travail d'exploration. Limiter excessivement le choix peut appauvrir irrévocablement la situa-

l'image dans un
imagiciel est
interactive

tion(12). Entre ces deux extrêmes l'équilibre n'est pas toujours facile à trouver.

• Une image motivante

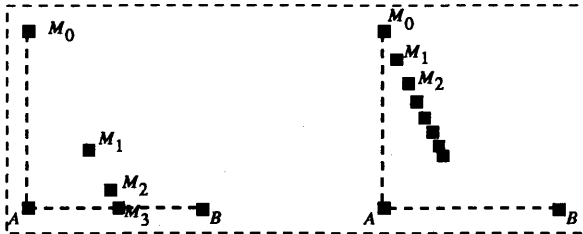
Nous voudrions évoquer, sous cette rubrique au titre vague, les différents aspects de l'image d'un imagiciel qui contribuent à ce que les élèves "entrent" dans la situation que l'imagiciel veut mettre en place. L'image n'est, bien entendu, qu'une composante de ce dispositif favorisant l'appropriation par les élèves du problème mathématique sous-jacent. Le choix de la situation elle-même, le moment de son introduction, sa présentation et sa gestion par l'enseignant sont, bien évidemment, également à prendre en compte. Il n'en demeure pas moins que l'image, partie visible, "accrocheuse", de l'imagiciel a son rôle à jouer dans ce registre de la motivation. Nous distinguerons rapidement trois aspects.

- Le caractère lisible de l'image

Après avoir reconnu l'utilité d'une illustration sur ordinateur d'une situation, il se peut que l'image informatique correspondant à des valeurs "naturelles" des paramètres de cette situation, soit peu lisible. On risque ainsi de manquer ce que l'utilisation de l'imagiciel pouvait apporter à l'étude du problème. L'auteur doit donc ajuster les données numériques de la situation dans le but de créer une image lisible, exploitable.

l'image dans un
imagiciel est
lisible...

SUITBARY est un logiciel proposant un travail sur des suites numériques définies à partir d'une suite de points. On se donne deux points A et B et à partir d'un point M_0 , on construit la suite de points M_n telle que pour tout entier n , M_{n+1} est le barycentre du système pondéré $\{(A,1), (B,1), (M_n,10)\}$. L'objectif est d'utiliser ce que l'on peut voir sur cette suite de points pour prévoir les propriétés des suites des coordonnées x_n et y_n du point M_n . Dans la situation de départ, les trois points étaient pondérés par le même coefficient, la symétrie par rapport aux trois points "cachait" le rôle prépondérant du milieu de $[AB]$, mais l'image produite était peu lisible (voir ci-dessous, figure de gauche), et la convergence trop rapide de la suite de points rendait les conjectures difficiles : à partir de $n=3$, tous les points de la suite étaient confondus. En choisissant de pondérer le point M_n par 10, nous avons permis qu'un plus grand nombre de points soient visibles sur l'écran, les points sont confondus seulement à partir de $n=20$ (figure de droite).



(12) Ceci nous a parfois amenés à distinguer les variables et les paramètres d'une image informatique (CREEM 1991b).

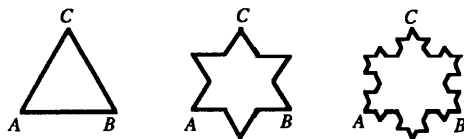
- Le caractère esthétique de l'image

esthétique...

De même qu'il y a de "beaux problèmes" il peut y avoir de "belles images" en mathématiques et il n'est pas inutile de chercher dans le choix de la représentation une certaine émotion ou, au moins, curiosité esthétique qui peut être le premier pas vers l'exploration de la situation. Il est alors essentiel de veiller à ne pas parasiter la représentation par une surcharge décorative de traits non-pertinents risquant de détourner l'attention ou de pervertir l'interprétation.

Ainsi l'imagiciel **FLOCONS** propose une étude de suites à partir d'une situation fractale. Outre le caractère "culturel" de cette situation, (on parle beaucoup d'objets fractals aujourd'hui, il y a même une collection de manuels qui porte ce nom), on peut dire que l'aspect des images peut être un facteur de l'intérêt des élèves.

A partir d'un triangle équilatéral, on construit une suite de polygones de la façon suivante : pour passer d'un polygone au suivant, on remplace chaque segment par une ligne brisée comportant quatre segments de longueur égale au tiers de la longueur du segment initial comme sur la figure ci-dessous. Le logiciel permet d'obtenir à l'écran, les premiers polygones de la suite.

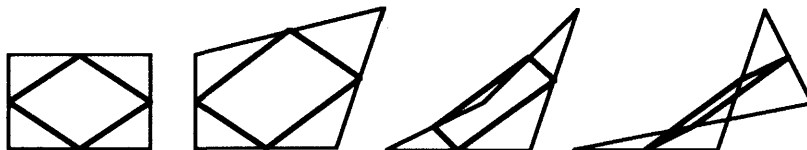


- Le caractère dramaturgique de l'image

dramatiquement
bien construite

Par son dynamisme, par sa disponibilité aux propositions de l'utilisateur, l'image d'un imagiciel est une histoire à écrire et à suivre. Entre l'imagiciel et la classe se joue une pièce dans laquelle, tour à tour spectateurs et acteurs, les élèves doivent "entrer". L'auteur doit donc faire en sorte que l'image soit intrigante, étonnante, frappante, en un mot dramatiquement bien construite, pour favoriser cet investissement de l'élève dans ce qui est en train de se jouer. Dans certain cas cet aspect peut être tout à fait central.

Considérons l'imagiciel VARIGNON qui illustre la propriété classique suivante : les milieux des côtés d'un quadrilatère quelconque forment un parallélogramme. L'imagiciel permet de déformer le quadrilatère dessiné à l'écran (en pilotant ses sommets) et de faire apparaître ce parallélogramme des milieux.



exemples de quadrilatères obtenus par déformations successives.

Nous aurions pu dessiner à l'écran dès le début un quadrilatère dit "quelconque", et illustrer ainsi immédiatement la généralité du phénomène. Nous avons choisi au contraire de partir d'une situation particulière : au départ le quadrilatère est un rectangle, le parallélogramme des milieux est alors un losange. Ce choix permet de ménager quelques effets dramatiques dans la classe. L'imagiciel sert d'abord pour présenter le problème et poser la question : "le résultat obtenu à l'écran est-il encore vrai pour d'autres quadrilatères ?".

Les élèves peuvent croire que si le quadrilatère de départ n'a rien de particulier, celui obtenu en joignant les milieux n'aura rien de particulier non plus ; ils seront souvent surpris par la première figure qu'ils réaliseront, et donc s'impliqueront davantage dans cette recherche individuelle. Nous avons ainsi observé des élèves faisant de très nombreux essais sur le papier avant d'être convaincus qu'ils n'arriveraient pas à trouver un quadrilatère pour lequel le quadrilatère des milieux ne serait pas un parallélogramme.

L'imagiciel peut naturellement être utilisé pour vérifier la propriété découverte, il peut encore contribuer à la dramaturgie de la séquence : en effet dans leur recherche sur papier, peu d'élèves essaient spontanément un quadrilatère non convexe ; quand on commence à déformer l'image en bougeant un sommet, on est conduit naturellement à un quadrilatère croisé. Ce qui crée encore souvent une réaction dans la classe : "c'est encore vrai si le quadrilatère est croisé !".

Cette "dramatisation" de la situation favorise l'implication d'un maximum d'élèves dans l'activité proposée, et met en lumière la quantification de l'énoncé.

Au fur et à mesure de cette description des caractères spécifiques de l'image dans un imagiciel, nous avons vu apparaître la question de l'usage comme tout à fait déterminante pour l'analyse du rôle de l'imagiciel dans la situation d'enseignement. C'est cette question qu'il nous faut aborder maintenant à la lumière de ce qui vient d'être dit sur la nature de l'image et dans le but de répondre partiellement à notre question initiale.

3. UTILISATION DE L'IMAGICIEL

3.1. Remarques méthodologiques

Tout discours sur l'utilisation d'un outil ou d'une démarche pédagogique oscille, le plus souvent, entre deux extrêmes :

- le premier consiste à collectionner les observations d'utilisations effectives et à les rapporter, sous forme plus ou moins anecdotique, parfois typologique, en concluant sur l'inévitable diversité et hétérogénéité des pratiques réelles et sur le danger de toute généralisation et théorisation par nature abusive ;
- le second considère et évalue les utilisations réelles comme des réalisations plus ou moins réussies, plus ou moins déviantes, d'une pratique définie a priori et qui constitue la norme dans l'optique d'une pédagogie "science dure", le credo dans le cadre d'une pédagogie militante.

concevoir
l'utilisation des
imagiciels plutôt
que la décrire ou
l'évaluer

Descriptif ou normatif, le discours sur les pratiques pédagogiques abolit la tension entre la multiplicité du réel et la nécessaire abstraction de tout discours.

L'issue que nous proposons, ici, à cette fausse alternative est la suivante : poser sur la question de l'utilisation de l'imagiciel le regard de l'auteur ; c'est-à-dire envisager les pratiques potentielles et fournir aux utilisateurs, non pas un recueil d'exemples ou un schéma d'action mais un cadre de réflexion qui permette, à eux comme à nous, de **donner du sens** à ce qui va effectivement se passer. Schématiquement nous pourrions dire que nous ne cherchons ni à décrire ce qui se passe, ni à transmettre ce qui doit se passer, mais à **explicitier ce qui pourrait se passer**, ou plutôt **ce qui permettra de mettre en place et de comprendre ce qui va se passer**.

Pour que cela soit possible, la première condition est de tenir compte de la réalité des pratiques. Nous remplissons cette condition de deux manières : d'abord en étant nous-mêmes utilisateurs des imagiciels dans nos propres classes, ensuite grâce à une équipe d'une dizaine d'expérimentateurs qui, outre les informations nécessaires à l'amélioration d'un imagiciel lors de la phase d'élaboration (cf 1.), nous fournissent un ensemble de remarques, d'expériences personnelles que devra intégrer notre analyse de la pratique. C'est d'ailleurs en constatant la difficulté qu'il y avait à transmettre, à cette équipe d'expérimentateurs (extérieure au travail d'écriture des imagiciels), les moyens d'envisager l'utilisation des imagiciels que nous avons été amenés à développer notre recherche dans ce sens.

Il s'agit donc de **concevoir la pratique** et non pas de la décrire ou de l'évaluer, et, si nous parlons de la pratique, au singulier, il ne faut y voir ni la naïveté qui consisterait à croire que le seul fait d'utiliser un imagiciel détermine, dans

l'outil
pédagogique est
à la fois le fruit et
la source d'une
réflexion
didactique

les faits, une seule pratique possible(13), ni le dogmatisme qui souhaiterait imposer, à travers l'outil pédagogique, une unique "bonne" manière d'agir. La pratique des imagiciels est l'outil théorique mais réaliste que nous essayons d'élaborer pour pouvoir penser les pratiques.

Signalons enfin que si, parfois, nous donnons l'impression de ne concevoir la pratique de l'enseignement qu'à travers l'emploi d'imagiciels, il faut y voir l'effet local de la problématique choisie pour cet article et non une prise de position dogmatique pour l'imagiciel "panacée universelle". L'imagiciel n'est qu'un outil pédagogique parmi d'autres et, si nous estimons que ce qu'il rend possible dans la pratique est susceptible d'améliorer l'enseignement des mathématiques, nous pensons également que la réflexion didactique nécessaire pour concevoir cet usage est digne d'intérêt parce que susceptible d'éclairer certains aspects de l'enseignement des mathématiques (et parfois d'autres disciplines) avec ou sans imagiciel.

Il est temps maintenant de regarder cette pratique sous l'angle du caractère expérimental de l'activité mathématique qui peut y être menée.

3.2. Les différents rôles d'un imagiciel

Utiliser un imagiciel c'est lui assigner un certain rôle dans l'activité proposée aux élèves. Ce rôle n'est pas une propriété intrinsèque de l'image (une même image peut jouer différents rôles) mais bien le signe de l'importance de l'usage dans la description d'un imagiciel. Il est donc essentiel de se faire une idée aussi précise que possible du rôle que peut tenir un imagiciel dans le déroulement de l'activité. Nous proposons d'en distinguer un certain nombre que nous regroupons autour de trois registres de l'activité mathématique en classe(14).

- Appréhender la situation

l'imagiciel peut
servir, dans un
premier temps, à
appréhender la
situation

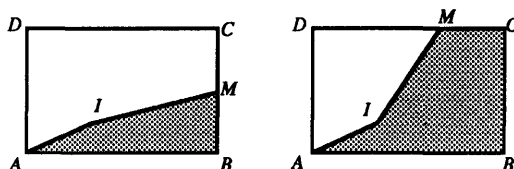
L'imagiciel peut intervenir soit comme **présentation** soit comme **illustration** d'une situation.

Dans le premier cas, il s'agit de permettre aux élèves d'entrer dans un problème souvent déroutant par une description de celui-ci plus intelligible, plus "sensible" que celle qui pourrait en être faite par un texte écrit ou une consigne orale.

(13) Nous partageons d'ailleurs sur ce point l'avis de Chantal D'Halluin et Daniel Poisson (1987) : *Les outils techniques eux-mêmes n'engendrent pas de nouvelles pratiques pédagogiques mais sont amplificateurs des pratiques existantes.*

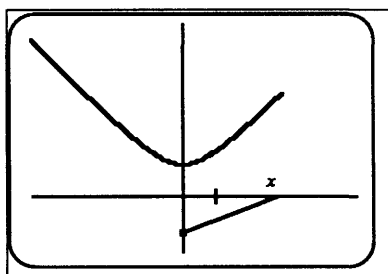
(14) Nous reprenons, sous une forme légèrement différente, l'analyse proposée dans CREEM 1991.

L'imagiciel **AIRECT** propose une famille de fonctions affines par intervalles : étant donné un rectangle $ABCD$ et un point I intérieur au rectangle, un mobile M fait le tour du rectangle dans le sens $ABCD$. On s'intéresse à la fonction qui, à la distance parcourue par M , associe l'aire balayée par le segment IM . Une option permet de déplacer le mobile et de voir l'aire se colorier sans tracer la courbe de la fonction. Cette option permet d'utiliser le logiciel pour faire comprendre à chaque élève ce que signifie "l'aire balayée par IM ".



Dans le second cas, l'imagiciel permet de réaliser à l'écran un travail (qui pourrait être fait sur papier) en utilisant les caractéristiques de l'image d'ordinateur (dynamisme, rapidité, souplesse, ...) pour rendre la représentation plus "frappante" et plus agréable dans un but, par exemple, de mémorisation.

L'imagiciel **DIST1** représente la fonction qui à un réel x associe la distance du point de coordonnées $(x,0)$ au point de coordonnées $(0,-1)$. Si on choisit cette situation pour introduire la notion de minimum d'une fonction, on peut faire fonctionner le logiciel immédiatement après la description de la situation ; le travail des élèves consiste alors à expliquer les particularités de la courbe obtenue. Si la séquence était faite sans imagiciel, par exemple en distribuant aux élèves une courbe dessinée sur papier, nous perdrons le dynamisme de la construction point par point qui nous semble essentiel.



- Rechercher des énoncés vrais

Une fois compris (à l'aide de l'imagiciel et/ou d'une activité papier) le problème posé, il faut répondre aux questions qu'il pose explicitement ou implicitement, c'est-à-dire, finalement, produire des énoncés vrais portant sur la situation en mobilisant des connaissances déjà acquises. Dans cette recherche d'énoncés vrais, l'imagiciel peut intervenir soit pour aider à produire les énoncés soit pour les confirmer ou les réfuter.

- **Aide à la production de conjectures**

l'imagiciel
permet quatre
modes
d'exploration...

L'imagiciel permet de faire rapidement (c'est-à-dire détaché de l'exécution des tâches techniques répétitives) l'exploration des différents cas d'une situation une fois celle-ci comprise (en étudiant, par exemple, les premiers cas sur papier).

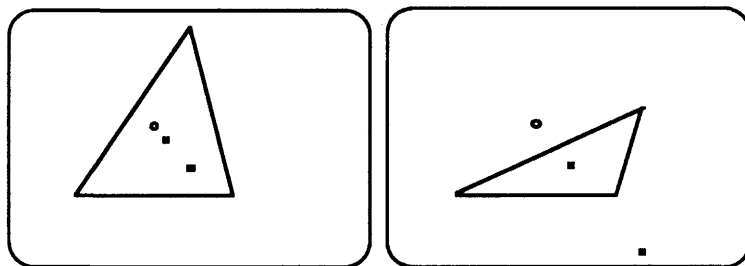
Par cette fonction d'**outil d'exploration**, par le statut d'image collective (c'est-à-dire commune) de l'image qu'il délivre, l'imagiciel favorise la production de conjectures qui sans lui auraient pu être très difficiles à obtenir. Mais si le but est le même (produire des conjectures), le type et le statut des énoncés recherchés délimitent plusieurs modes d'exploration.

l'exploration
systématique...

. L'exploration systématique consiste à faire varier l'élément caractéristique (la variable) de la situation afin de rechercher si toutes les images obtenues ont une ou plusieurs propriétés communes permettant de fournir une ou plusieurs conjectures. L'imagiciel permet ici d'approcher, d'illustrer la quantification universelle, plus ou moins implicite, dans la plupart des problèmes mathématiques. Ce que l'image unique et statique ne peut exprimer (cf plus supra 2.1.) l'image dynamique d'un imagiciel permet d'en faire sentir le sens et l'exigence.

L'imagiciel **DROITE d'EULER** dessine à l'écran un triangle, son centre de gravité G , son orthocentre H et le centre de son cercle circonscrit O . Le triangle est déformable en pilotant chacun de ses sommets. Ce logiciel est une illustration de la propriété suivante : pour tout triangle, H est l'image de O dans l'homothétie de centre G et de rapport (-2) .

La construction sur le papier d'une telle figure demande beaucoup de soin si on veut qu'elle soit suffisamment exacte et donc il faut y consacrer du temps. On peut éventuellement proposer aux élèves de la faire pour un triangle, mais ce serait absurde qu'ils la fassent pour plusieurs. Dans ces conditions, il est difficile de leur demander de faire une conjecture qui commence par "pour tout triangle...". Souvent même ils ne remarquent rien sur une figure construite sur papier d'une part parce qu'elle est encombrée par de nombreux traits de construction, d'autre part parce que cette propriété ne peut apparaître que comme un "invariant" par rapport à la variable "triangle" de la situation, ce qui nécessite de voir un grand nombre de triangles.



l'exploration
organisée...

. L'exploration organisée ressemble à la précédente dans la mesure où il s'agit de faire varier plusieurs caractéristiques de la figure à la recherche d'énoncés généraux, mais elle s'en distingue par le caractère structuré, planifié du travail exploratoire qui cherche à isoler les valeurs des paramètres permettant de dégager différents cas correspondant à différentes conclusions. Si l'exploration systématique était une exploration **pour voir**, l'exploration organisée est davantage une exploration **pour prouver** (15).

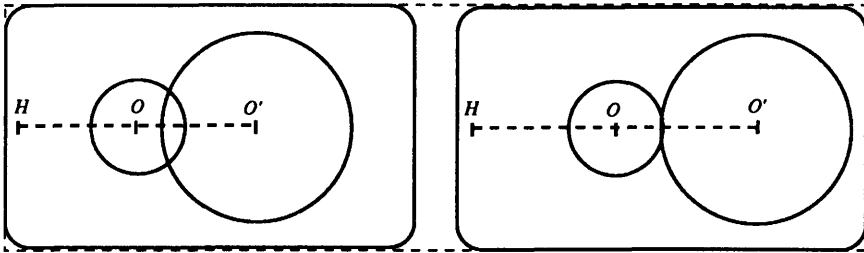
(15) Cette distinction se rapproche de celle faite par Astolfi et Develay (1989) à propos de l'expérimentation. On peut aussi évoquer à ce sujet les déclarations de Claude Bernard invitant les physiologistes à faire des "expériences pour voir" et déclarant par ailleurs : "quand on ne sait pas ce que l'on cherche on ne voit pas ce que l'on trouve."

L'imagiciel **DEUX CERCLES HOMOTHÉTIQUES** représente à l'écran un cercle de centre O et de rayon R et son image dans une homothétie de centre H et de rapport k . L'utilisateur choisit le rapport puis les deux cercles étant dessinés à l'écran, il peut déplacer le point O et changer le rayon R . Le problème proposé aux élèves est de rechercher les conditions pour que les deux cercles soient tangents.

La situation est ici assez complexe dans la mesure où il y a beaucoup de variables : la position du point O par rapport à H , le rayon R et le rapport k .

Les élèves peuvent proposer de nombreuses conjectures chacune d'elles étant valable pour certaines valeurs des variables et pas pour d'autres. La production d'une conjecture générale peut demander du temps et des efforts d'organisation des recherches.

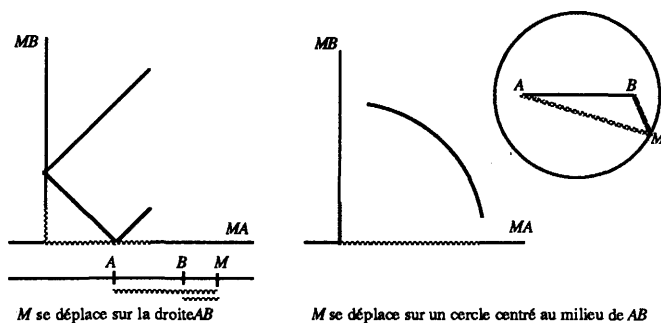
Dans une première étape, on pourra utiliser le logiciel en agissant uniquement sur la position de O , ce qui permettra de dégager une première conjecture. Mais cette conjecture devra être confrontée aux autres variables. Pour être sûrs de ne pas oublier de cas, ou de ne pas traiter plusieurs fois le même, les élèves vont être amenés à organiser leurs expériences et à préciser et/ou à réajuster petit à petit leur conjecture.



l'exploration qualitative...

. L'exploration qualitative consiste à parcourir les différents cas d'une situation dont les premiers ont été étudiés en détail. On peut alors, suivant les situations, se contenter de constater le résultat que l'image illustre ou indiquer rapidement la preuve des énoncés issus de l'observation lorsque ces preuves sont simples parce qu'analogues à celles utilisées dans les premiers cas étudiés. Quoiqu'il en soit, l'imagiciel, par sa rapidité de production des images, permet d'envisager, même succinctement, un plus grand nombre d'aspects de la situation, un plus grand nombre d'images que le travail sur papier et cette possibilité d'exploration qualitative qu'offre l'imagiciel nous semble d'un grand intérêt. Étudier un problème mathématique ce n'est pas seulement en produire la résolution achevée, c'est aussi en saisir les différents aspects, la complexité, les points cruciaux et les prolongements possibles, dans une vue plus synthétique qu'analytique.

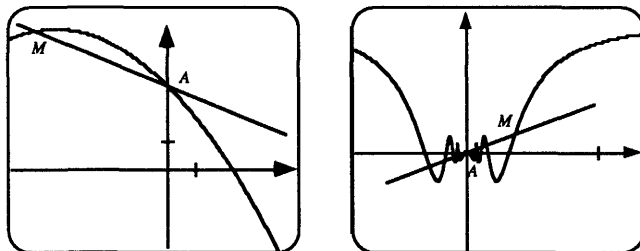
L'imagiciel **MAMB** représente dans un repère orthonormal le point de coordonnées (MA, MB) où A et B sont deux points fixes et M un point variable d'une droite ou d'un cercle. Dans le logiciel, dix options sont prévues (selon la position des points A et B par rapport à la droite ou au cercle) qu'il est impossible d'étudier toutes en détail. Pour chacune d'elle, il faut répondre à la question : la longueur MB est-elle une fonction de la longueur MA ?



On étudiera avec soin une ou deux options, (en demandant à chaque élève de faire une figure sur papier, de tracer les points de coordonnées (MA, MB) pour quelques points M , etc...). Ensuite, par exemple, on pourra envisager de classer les autres situations selon qu'il s'agit ou non d'une fonction. L'utilisation de l'imagiciel évite de passer trop de temps à exécuter des tâches techniques (il n'est plus nécessaire de faire une figure et de construire des points de la courbe) ; on pourra au contraire se consacrer aux justifications des conjectures.

L'imagiciel **PENTLIMO** illustre une situation de limite en zéro de fonction non définie en zéro. Sur l'écran est dessinée une courbe d'équation $y=f(x)$ où f est une fonction définie en zéro. A et M étant les points de cette courbe d'abscisses respectives 0 et $x \neq 0$, on s'intéresse à la position limite de la droite AM quand x tend vers zéro. On sera donc amené à étudier la limite de la pente de cette droite AM en fonction de x .

Dans le logiciel nous avons proposé la courbe représentative de la fonction f définie par $f(0)=0$ et $f(x)=x \sin 1/x$ pour $x \neq 0$. Dans ce cas la droite AM n'a pas de position limite. Si on utilise le logiciel dans une classe de première, les élèves n'ont aucun outil pour justifier ce résultat (ils peuvent seulement prouver qu'une fonction a une limite), il nous semble cependant important qu'ils voient de tels images et qu'ils essaient de les interpréter.



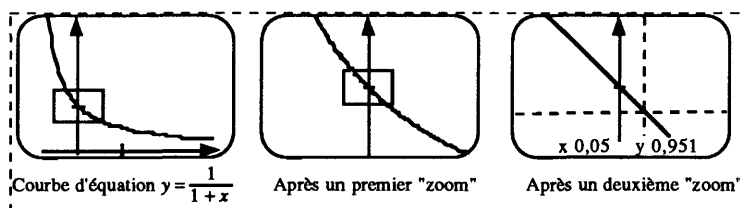
l'exploration
d'une image

L'exploration d'une image est assez différente des trois précédentes en ce qu'elle ne s'attache pas à dégager les régularités d'un ensemble d'images mais qu'elle cherche à préciser la nature et l'expression d'un objet représenté (objet intervenant dans une conjecture) en évaluant qualitativement et quantitativement sa représentation. L'exemple suivant fera mieux comprendre cette situation particulière.

Pour présenter la notion d'approximation affine d'une fonction au voisinage d'un point, on peut utiliser les possibilités de "zoom" du traceur de courbes **CARTESII**.

Sur les figures ci-dessous, on a reproduit le tracé de la courbe de la fonction f définie par $f(x) = 1/(1+x)$, puis on a effectué des "zooms" successifs au voisinage du point de la courbe d'abscisse zéro.

L'image obtenue permet de faire facilement la conjecture suivante : dans l'intervalle correspondant au cadrage, la courbe vue à l'écran est un morceau de droite. Le premier travail est alors de préciser quelle est cette droite. Diverses stratégies peuvent être mises en œuvre pour la déterminer : on peut en particulier utiliser une des options du logiciel qui permet de lire sur l'écran les coordonnées d'un point. Comme la droite passe par le point de coordonnées $(0,1)$, il sera facile de calculer alors une équation de la droite. Le traceur est ensuite utilisé pour vérifier les propositions des élèves : en particulier si plusieurs propositions sont faites le logiciel peut aider à conjecturer celle qui convient le mieux. En explorant l'image obtenue, les élèves peuvent ainsi découvrir eux-mêmes que $f(x) \approx -x+1$ au voisinage de zéro. Bien sûr, il reste à interpréter tout ce travail et à le justifier.



le travail
d'exploration
doit être
accompagné
d'un travail de
formulation

Cette exploration donne à la représentation un statut d'objet quasi réel et le risque est grand, alors, de succomber aux tentations évoquées plus haut (illusion de la transparence, autonomie de l'image...). A des degrés divers, le risque est d'ailleurs présent dans toutes ces démarches d'exploration et pour que la commodité d'exploration qu'offre l'imagiciel ne favorise pas chez les élèves une attitude de stricte observation, il est nécessaire que l'enseignant accompagne l'utilisation de l'imagiciel d'un travail sur papier et d'une synthèse collective. Au cours de cette synthèse, la formulation explicite de ce qui a été observé et la mise en évidence des énoncés mathématiques que cela illustre permet de faire passer de la simple manipulation à l'activité mathéma-

tique proprement dite, à savoir : décrire et expliquer les particularités de l'image et justifier les résultats obtenus. Ce travail de formulation qui part de la représentation et, en s'en détachant, produit un énoncé mathématique indépendant de celle-ci, est tout à fait fondamental.

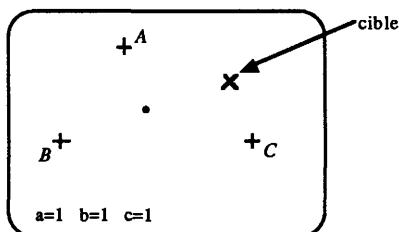
- Confirmation et réfutation

Ce rôle peut être tenu en trois occasions.

l'imagiciel intervient également pour tester une conjecture, une réponse ou corriger un exercice

- Soit que, la classe ayant produit, à la suite d'un travail d'exploration avec l'imagiciel, une ou plusieurs conjectures, il soit décidé d'utiliser l'imagiciel pour **tester ces conjectures** en étudiant d'autres cas. L'imagiciel sur les cercles homothétiques évoqué ci-dessus illustre ce rôle.
- Soit que, le but étant d'obtenir une certaine image-résultat, l'imagiciel fournisse l'illustration de la solution proposée par la classe et permette donc de voir si elle correspond à la réponse attendue. Il s'agit alors de **tester une réponse**.

L'imagiciel **BARY3J** est un jeu de cible qui accompagne le logiciel BARY3 décrit plus haut. Trois points A , B et C sont dessinés sur l'écran ainsi que le barycentre du système $\{(A,a) (B,b) (C,c)\}$ et un point "cible" tiré au hasard par la machine. L'utilisateur doit trouver les valeurs de a , b et c pour faire coïncider le barycentre avec la cible.



- Soit enfin que, le travail ayant été fait sur papier, l'imagiciel constitue un outil de validation de ce travail par l'illustration qu'il propose du résultat correct. L'imagiciel est alors un outil de **correction d'exercice**.

On peut utiliser l'imagiciel **DIST1** décrit plus haut dans ce sens : pour vérifier que les élèves savent trouver le minimum d'une fonction, on leur demandera de prouver que la fonction qui à un réel x associe la distance AM admet un minimum, le logiciel sera utilisé pour confirmer les réponses des élèves.

Dans ce dernier cas, il est bien entendu essentiel que l'imagiciel n'intervienne qu'après le travail sur papier, sous peine que, la réponse s'imposant trop nettement aux élèves, ils ne jugent plus utile de mobiliser leurs connaissances pour résoudre le problème posé.

• Donner du sens

l'image, nécessitant une interprétation, peut être problématique...

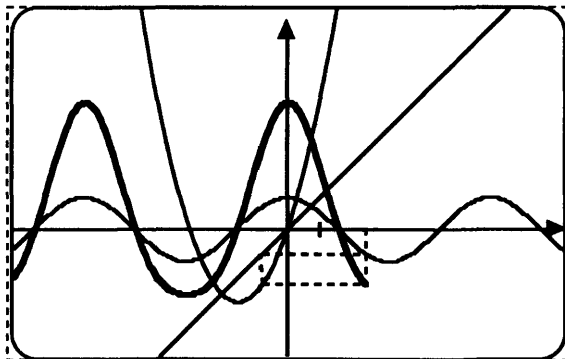
Dans certains cas, la situation mathématique peut être claire et les questions de vérité non encore posées ou résolues par d'autres moyens que l'imagiciel, mais c'est alors l'interprétation de l'image produite qui fait problème. Nous parlerons alors d'**image problématique** et nous distinguerons trois situations dans lesquelles elles peuvent intervenir.

parce que complexe...

- Soit en phase préliminaire lorsqu'on ne comprend pas ce que représente l'image et qu'on ne voit pas quel est le lien entre elle et le problème posé. C'est l'**image complexe**. Il est donc nécessaire, afin de pouvoir utiliser l'image pour explorer la situation, de préciser le statut et les règles de construction des représentations apparaissant à l'écran.

L'utilisation de l'option "composition" du traceur de courbe CARTESII conduit à la production d'une telle image. Avant de pouvoir se servir de cette option pour examiner les particularités de l'opération composition des fonctions, il faut d'abord décrypter l'image écran. L'option permet de construire la courbe C de la fonction gof à partir des courbes représentatives des fonctions f et g .

Sur la figure ci-dessous nous avons reproduit l'état de l'écran en cours de construction lorsque f et g sont respectivement définies par $f(x)=\cos(x)$ et $g(x)=x(x+3)$ [la courbe de la fonction gof en cours de construction est en gras sur la figure]. Les élèves devront utiliser la définition de la fonction gof pour expliquer comment est obtenu le point d'abscisse x sur la courbe C (pour cela il faut trouver le rôle de la droite d'équation $y=x$ et des différentes lignes en pointillés sur la figure).



parce que
déroutante...

- Soit au cours de l'exploration, lorsque l'image apparaît différente de celle à laquelle on s'attendait intuitivement. Avant même de chercher à prouver le résultat que l'image semble illustrer et réfuter notre intuition première, il faut chercher à comprendre l'image, à l'accepter malgré son opposition à ce qui nous semblait une évidence. Nous parlerons alors d'**image déroutante**.

Par exemple dans le cas de la situation proposée par CERCLIM (cf supra), l'intuition conduit rarement à la prévision correcte pour la position limite : la prévision parfois argumentée est soit celle d'un cercle réduit à un point ("les trois points étant confondus en un seul, le cercle est lui-même un point"), soit celle d'une droite en tant que cercle de rayon infini ("pour trouver le centre on prend l'intersection de la médiatrice du segment AM , or la droite AM se rapproche de l'axe des abscisses donc le centre s'éloigne de plus en plus"). Or par exemple dans le cas de la parabole illustrée plus haut, le cercle a pour limite un cercle de rayon 0,5. Cette image peut être suffisamment déroutante pour essayer d'en comprendre la raison.

parce qu'illusoire

- Soit, également au cours de l'exploration, lorsque l'image nous trompe, confirmant une idée fautive ou jetant le doute sur un résultat obtenu par ailleurs. L'image est alors **image illusoire** et il est alors utile de revenir sur le mode de production de l'image, sur les limites et les dangers de toute représentation informatique et sur la vigilance nécessaire dans toute interprétation d'une représentation d'un objet mathématique. L'exemple **SUITFIG**, donné plus haut, de la suite des carrés (cf supra) est une parfaite illustration de cette situation.

3.3. Imagiciel outil d'expérimentation

A partir des différents rôles des imagiciels que nous venons de dégager, est-il possible de qualifier de "démarche expérimentale" une partie de l'activité mathématique effectuée à l'aide d'imagiciels ?

l'imagiciel peut être
vu comme un outil
d'expérimentation...

Assurément l'analogie est grande avec le travail d'expérimentation tel qu'il nous apparaît dans l'enseignement des sciences expérimentales (Astolfi, Develay 1989). La place accordée par l'emploi d'imagiciels aux tâtonnements, aux constatations, aux explorations, la légitimité reconnue de la démarche d'essais-erreurs dans la recherche de conjectures, la possibilité d'explorer une image comme si on analysait un phénomène physique ou disséquait un être vivant, tout ceci va dans le sens de cette analogie et concourt à faire de l'imagiciel un **outil d'expérimentation**.

Mais l'analogie peut aussi être trompeuse.

Certes, l'utilisation d'imagiciels est une des pratiques pédagogiques qui remet en cause la conception dogmatique de l'enseignement des mathématiques égrenant son chapelet

de définitions-théorèmes-démonstrations. Elle le fait en profondeur : non pas en masquant sous la fiction d'une participation illusoire des élèves le déroulement d'un contenu magistral mais en offrant la possibilité de pratiques et de problématiques réellement collectives donnant aux questions abordées un véritable enjeu et modifiant les modes d'appropriation des connaissances. La perturbation apportée par l'emploi d'imagiciels n'est pas seulement de l'ordre des moyens, elle touche également l'idée que l'on se fait de la finalité de l'enseignement des mathématiques. En cela, le terme d'expérimentation accolé à celui de mathématique, par le caractère a priori paradoxal de l'expression marque la rupture.

mais l'activité mathématique autour de l'imagiciel n'est pas, à proprement parler, expérimentale

Cependant, si utiliser des imagiciels peut instaurer une approche nouvelle des mathématiques qu'il faut définir, cela ne fait pas forcément de l'activité mathématique une activité expérimentale au sens habituel (s'il existe) et des mathématiques une science expérimentale.

L'usage de l'imagiciel, à travers ses différents rôles, indique des ressemblances entre l'activité mathématique et l'expérimentation en sciences expérimentales. C'est ce que ces pages ont tenté de préciser. Il resterait à pointer les différences. La place manque ici pour le faire rigoureusement. Nous voudrions cependant en donner une idée en guise de conclusion.

CONCLUSION : L'IMAGICIEL "LIEU D'EXPÉRIENCE"

Intervenant dans la classe, l'imagiciel n'est pas seulement un outil nouveau, il est également un élément supplémentaire du dispositif de communication mis en place. Dès lors que nous utilisons un imagiciel en classe de mathématiques, celui-ci crée *"des changements dans l'espace des interactions"* (Flores, Winograd 1989). C'est l'étude de ces changements qui permettra d'envisager, à partir de l'imagiciel outil d'expérimentation, l'imagiciel **"lieu d'expérience"** : c'est-à-dire moyen et occasion, espace de représentations et événement de paroles, au sein duquel l'élève construit, collectivement et individuellement, ses connaissances mathématiques et la représentation qu'il s'en fait.

l'expérience mathématique faite à partir de l'imagiciel est d'une autre nature

L'analyse des échanges verbaux dans la classe de mathématiques où intervient l'imagiciel est actuellement un de nos sujets d'étude et donnera lieu à des publications ultérieures prolongeant celle-ci. C'est à travers l'analyse de ce **"dialogue triangulaire"**, maître-élèves-imagiciel, que pourra apparaître le caractère spécifique de cette expérience mathématique que l'imagiciel rend possible. C'est dans ce dialogue que sera pris en compte la relation particulière, que nous avons évoquée, entre l'objet mathématique et ses représen-

tations. C'est également là que se jouera la question de la preuve (critères, statut, fonction) et la notion de la vérité mathématique, à travers la problématique de l'adhésion inter-individuelle (16).

Comme souvent en didactique, la réflexion ouvre des territoires à explorer plutôt qu'elle ne clôt des jardins où se reposer. Au moins, à l'issue de ces quelques pages, avons-nous les moyens de rendre l'exploration plus fructueuse, l'aventure moins aventureuse.

Françoise MONNET
Yves PAQUELIER
Équipe "Imagiciels" du CREEM,
CNAM, Paris

BIBLIOGRAPHIE

ADDA J. *Travaux sur les difficultés inhérentes aux mathématiques et sur les phénomènes d'incompréhension, causes et manifestations*. Thèse de doctorat d'état. Université Paris VII. 1976.

ARTIGUE M. "L'évolution du rôle de l'image en mathématiques liée à l'utilisation de l'outil informatique" in *Place et rôle de l'image dans l'enseignement. Coordinations des ressources informatiques pour la classe*. Paris. CNAM. 1987. Publication interne.

BROUSSEAU G. *Théorisation des phénomènes d'enseignements des mathématiques*. Thèse d'état. Université de Bordeaux I. 1985.

CHASTENET DE GERY J, HOCQUENGHEM S. "Les micro-ordinateurs à possibilités graphiques dans l'enseignement des mathématiques" in *Communications au VIIème colloque franco-soviétique sur l'enseignement programmé de Tbilissi* (publié en russe à Moscou) 1980.

CHASTENET DE GERY J, HOCQUENGHEM S. "Collective uses of micro computer with graphics to illustrate the mathematics lesson" in *Communications au WCCE 1981 de Lausanne* publié in *Computers in education*. North-Holland. 1981.

CREEM. "Imagiciels pour la classe de seconde". *Bulletin de l'APMEP n°371*. 1989.

CREEM. *Mathématiques avec images logicielles en classe de seconde*. Paris. Hachette. 1991a.

CREEM. *Utiliser des imagiciels en classe de seconde*. CRDP Poitiers. 1991b.

D'HALLUIN C, POISSON D. "Le choc des nouvelles images : des modifications spécifiques induites par les nouvelles images dans l'enseignement des mathématiques" in *Place et rôle de l'image dans l'enseignement. Coordinations des ressources informatiques pour la classe*. Paris. CNAM. 1987. Publication interne.

(16) Sur cette question de l'adhésion, et notamment sur le triple registre d'adhésion (rituel, vérité, signification) qui fait écho à la classification des rôles des imagiciels, on pourra consulter Paquelier 1991.

DELCOURT J. "Réflexions sur les choix et les techniques de reproduction d'images mathématiques par ordinateur" in *Place et rôle de l'image dans l'enseignement. Coordinations des ressources informatiques pour la classe*. Paris. CNAM. 1987. Publication interne.

DROUIN A.M. "Des images et des sciences" in *Communiquer les sciences ASTER n°4*. INRP. 1987.

FLORES F, WINOGRAD T. *L'intelligence artificielle en question*. Paris. PUF.1989.

HOCQUENGHEM S. "Enseignement des mathématiques illustré par ordinateur : quelques exemples". *Education et informatique n°14*. 1983.

HOCQUENGHEM S. "Imagiciels". *Dossier de la revue de l'EPI n°4*. 1984.

HOCQUENGHEM S. "L'ergonomie des logiciels d'enseignement" in *Problèmes posés par l'introduction de l'ordinateur dans la classe. Coordinations des ressources informatiques pour la classe*. Paris. CNAM. 1987. Publication interne.

JACOBI D. "Des images pour apprendre la science" in "*La formation scientifique des adultes*" *Education permanente n°90*. Centre National des Lettres. 1987.

PAQUELIER Y. *Interaction et rationalité : une étude du rôle de l'argumentation dans l'enseignement des mathématiques*. Thèse de doctorat. Université Paris VII.1991 (à paraître).

ROGALSKI J. "Les représentations graphiques dans l'enseignement" in *Contributions à la seconde école d'été de didactique des mathématiques*. Irem d'Orléans. 1982.

ROGALSKI J. "Représentations graphiques dans l'enseignement : concepts et méthodes d'analyse appliqués au graphe de fonctions". in Giordan A et Martinand JL (Ed). *Signes et discours dans l'éducation et la vulgarisation scientifique. Sixièmes journées internationales sur l'éducation scientifique*. Paris. UER de didactique des disciplines de Paris VII. 1984.

OUVRAGES COLLECTIFS TRAITANT DES IMAGICIELS :

- "*Imagiciels : enseignement des mathématiques illustré par ordinateur*". *Rencontres pédagogiques n°1* . INRP. 1983.
- *Colloque inter-Irem de géométrie* . Irem de Lille. 1986.
- *Du tableau noir vers l'ordinateur graphique*. CNAM 1987.

TOUS LES IMAGICIELS cités dans cet article sont :

- soit publiés dans CREEM 1991a et 1991b (pour la classe de seconde),
- soit en cours d'écriture et d'expérimentation (pour les classes de première et terminale).