



Une étude de conceptions en liaison avec les savoirs complexes : le cas du développement durable

Studying the links between conceptions and complex behaviors : the case of the sustainable development

Francine PELLAUD, André GIORDAN

Laboratoire de didactique et épistémologie des sciences (LDES)
Faculté de psychologie et des sciences de l'éducation
42 boulevard du Pont-d'Arve, 1211 Genève, Suisse.

Résumé

L'appréhension d'une pensée dite « complexe » favorise-t-elle « l'implication » de l'individu dans le processus de développement durable ? Telle est la question sous-jacente à l'ensemble de cette recherche didactique. Le projet est donc d'approcher les conceptions relatives à la complexité et à sa gestion, en faisant émerger les modes de raisonnements qui leur sont liés ainsi que les paradigmes en tant que « modes de raisonnement intimes » qui président aux décisions et aux actions individuelles. Un début de catégorisation de celles-ci est proposé en lien avec les principaux obstacles que l'éducation ou la médiation risquent de rencontrer.

Mots clés : conceptions, complexité, développement durable, paradigmes, approche systémique.

Abstract

Does the grasp of complex thinking assist individual 'engagement' in the process of sustainable development ? This is the underlying question of this whole area of research. It allows us to address conceptions of complexity and of the management of complexity, by enabling modes of reasoning to emerge as "intimate reasoning modes", which guide individual actions and decisions. An attempt to categorize such actions is put forward, linked to the main obstacles which are likely to be encountered when teaching or popularizing science.

Key words : *conceptions, complexity, sustainable development, paradigms, implication.*

INTRODUCTION

Depuis la conférence des Nations unies de Rio en 1992, le développement durable est devenu un sujet « à la mode » qui se conjugue tant dans la publicité de produits, de services ou de manifestations, que dans les préoccupations d'organismes d'aide aux pays en voie de développement ou de protection de l'environnement. Une telle diversification et une telle médiatisation en font-elles automatiquement un sujet connu du « grand public » ? Si tel est le cas, comment un concept aussi polyvalent, voire « fourre-tout », est-il perçu par ce dernier ? La complexité qui se cache derrière la juxtaposition de ces deux termes est-elle, sinon comprise, du moins appréhendée ?

La mise en place du processus de développement durable nécessite la participation active de l'ensemble des acteurs sociaux, ceux-ci s'étendant des instances supranationales aux citoyens. Dans la perspective de proposer une présentation muséologique destinée à faciliter cette entrée en action de la part des individus, nous avons cherché à mieux connaître les conceptions de ceux-ci.

Cette recherche se situe dans le prolongement des travaux sur la prise en compte des conceptions dans la réalisation d'outils didactiques que mène depuis 20 ans le laboratoire de didactique et épistémologie des sciences (LDES) de l'université de Genève. Dans cette optique, elle cherche avant tout à mettre en évidence les modes de raisonnement mis en œuvre dans l'approche de problèmes complexes, en offrant une analyse de ces derniers afin de mieux cibler les obstacles spécifiques aux mécanismes de changement. Mettant en relation ces derniers paramètres avec l'attribution du pouvoir d'influence, elle vise également à définir les facteurs qui interviennent sur la manière dont l'individu est prêt ou non à s'impliquer dans le processus de développement durable.

1. LE DÉVELOPPEMENT DURABLE EN TANT QUE CONCEPT COMPLEXE

« *Le développement durable satisfait les besoins des générations présentes sans compromettre la possibilité pour les générations à venir de satisfaire leurs propres besoins* » (commission mondiale sur l'environnement et le développement, cité par B. Esembert, 1996, p. 132). Il faut donc voir le développement durable comme un processus planétaire, adaptable aux différentes cultures, tout en gardant un objectif universel de protection de l'homme et de son environnement dans des buts qualitatifs plutôt que quantitatifs. Il s'agit de tenir compte des implications écologiques, sociales et économiques qui sont indissociables de toute action ou activité humaines, quelles qu'elles soient (Pellaud, 2000).

Bien que l'alarme sur les dangers qui menacent, si ce n'est la survie de notre planète du moins celle de notre espèce, soit donnée, en 1987, avec les conclusions de la Commission mondiale pour l'environnement et le développement, plus connue sous la dénomination de « Rapport Brundtland », du nom de sa présidente, il faut attendre la Conférence des Nations unies sur l'environnement et le développement qui eut lieu à Rio de Janeiro en juin 1992 pour donner le coup d'envoi d'une action pratique en faveur du développement durable.

Connu sous le nom d'*Agenda 21*, un « *Plan d'action pour le XXI^e siècle (Action 21)* » édité par le CNUED en 1993 est mis en place ; il définit les objectifs que doivent se fixer les différentes nations, objectifs qui s'adressent autant aux autorités politiques, aux puissances économiques et à l'industrie qu'au citoyen consommateur. « *Il est essentiel que les individus adoptent des comportements responsables et durables en matière de consommation de biens et de services* » rappelle Keating (1993, p. 7). Cette citation ne fait nullement appel à une quelconque compréhension de la complexité inhérente au processus de développement durable. Elle se limite au « geste écologique » que l'on peut observer dans les pays qui, par exemple, pratiquent le tri et le recyclage des déchets ou bénéficient d'un certain choix de produits labellisés (commerce équitable, produits issus de l'agriculture biologique, etc.) et dont la Suisse fait partie. Pour mémoire, rappelons que cette étude s'est déroulée auprès d'un public vivant depuis 20 ans au moins en Suisse et possédant donc une culture essentiellement helvétique. Or, le nombre d'interactions qui président au processus, que celles-ci se passent aux niveaux des différents acteurs ou à ceux des trois domaines que sont l'économie, l'écologie et le développement social, rend ce concept extrêmement complexe (voir figure 1). Notre étude vise à mieux comprendre en quoi la compréhension de cette complexité favorise ou non l'implication de l'individu dans ce projet, ainsi que la conscience qu'il a ou non de l'importance de son « geste écologique » dans le cours du processus, tout en restant attentif

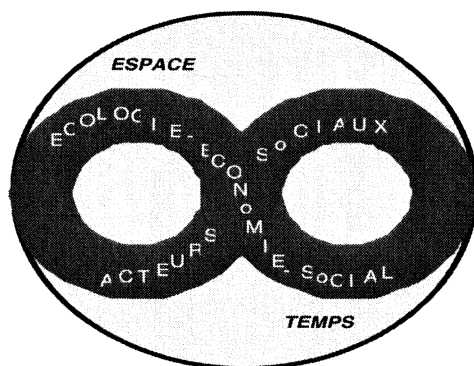


Figure 1. Dynamique du développement durable

au fait que la connaissance en termes de « compréhension cognitive » ne conduit pas forcément à une attitude pragmatique (Posch, 1993). Cet objectif s'approche des recherches menées par Smyth (1999) concernant les paramètres nécessaires pour mener les élèves à envisager la complexité dans le cadre d'une éducation à l'environnement.

« Est complexe ce qui ne peut se résumer en un maître mot, ce qui ne peut se ramener à une loi, ce qui ne peut se réduire à une idée simple » nous dit Morin (1990, p. 10). La complexité est donc antinomique à la pensée cartésienne qui sévit encore dans l'enseignement scolaire (Morin, 1998a, 1998b ; Giordan, 1998) et régit nos sociétés de consommation (Ewens, 1977 ; Lendrevie, 1983). D'une façon très schématique, nous pouvons résumer la méthode analytique de Descartes par la façon qu'il avait « d'éclater les pensées et les problèmes en parcelles, [et de] les réagencer en ordre logique. [...] L'importance excessive de la méthode cartésienne a conduit à la fragmentation, caractéristique de notre mode de pensée général, de nos disciplines académiques et du réductionnisme largement répandu dans la science » (Capra, 1983/1990, p. 52). Cette manière d'appréhender la réalité correspondait à une volonté de contrôler et de maîtriser le réel. Or, il s'agit aujourd'hui de s'exercer à une pensée capable de traiter avec un réel multiple, aléatoire, incertain et paradoxal, de dialoguer et de négocier avec lui. Parce qu'elle prend naissance dans la notion de système, la complexité nous oblige à repenser les fondements paradigmatiques de notre société. Par exemple, la recherche de solutions simples n'est plus envisageable. Elle doit faire place à la recherche « d'optimums » (Giordan, 1998) ou du moins de « solutions évolutives » (Pellaud, 2000).

Pour mieux cerner la complexité, Morin (1990, 1996, 1998) propose trois principes : dialogique, récursif et hologrammatique (ou hologrammique). Le premier permet de maintenir la dualité au sein de l'unité, comme le fait l'association de deux termes à la fois complémentaires et antagonistes, tels

que ceux de « développement durable ». Le second fait appel aux boucles de rétroaction. « *Les produits et effets générés par un processus récursif sont en même temps co-générateurs et co-causateurs de ce processus* » (Morin, 1991, p. 80). Il se retrouve dans toutes les boucles de régulation qui interviennent dès lors que l'on admet l'interdépendance qui existe entre les trois domaines de l'économie, de l'écologie et du développement social. Enfin, le troisième veut que la partie soit dans le tout et le tout dans la partie. Il devient donc percutant dès lors que l'on tient compte du principe éthique de responsabilité, principe fondé en réponse à un impératif de survie (Jonas, 1984), et sur lequel s'appuie le concept de développement durable (Hunyadi, 1998). Ce principe de responsabilité fait que le développement durable dépend d'une société qui produit des individus qui, eux-mêmes, produisent cette société.

Les défis socio-économiques et environnementaux auxquels le développement durable tente de répondre tissent autour d'eux un réseau de questions touchant principalement aux domaines scientifiques et techniques, tout en gardant en toile de fond un perpétuel questionnement éthique. Pour approcher cette réalité, « *les termes binaires de vrai ou de faux doivent être abandonnés, ainsi que l'association simple d'une cause à un effet. Nous devons savoir gérer plusieurs paramètres ainsi que leur rétroaction* » (Giordan, 1998). Cette approche de la complexité est nécessaire tant pour des raisons professionnelles, personnelles que de citoyenneté. Toujours dans une optique citoyenne de responsabilité, Lehmann (1996) rappelle que la décision, qui incombe au citoyen, touche des problèmes qui ne sont pas toujours bien définis et dont la solution n'est généralement pas unique et souvent imparfaite.

2. PROBLÉMATIQUE ET MÉTHODOLOGIE DE TRAVAIL

Si plusieurs auteurs se sont penchés sur les enjeux de la complexité (De Rosnay, 1975 ; Morin, 1977, 1990, 1999 ; Saaty, 1981 ; Capra, 1983 ; St-Geours, 1987) et sur ce qu'elle signifie au niveau des changements sociétaux, nous ne trouvons que peu de références en ce qui concerne les difficultés qu'elle engendre au niveau de l'apprentissage. La question essentielle reste donc celle du « comment », en tant que pédagogues, muséologues, didacticiens, formateurs, médiateurs, etc. nous pouvons favoriser l'entrée dans ce type de réflexion, dans cette nouvelle manière de raisonner.

S'il est vrai que, pour réellement comprendre ce qui se passe dans une manipulation génétique, les concepts de cellule, d'ADN, de gène, etc., doivent être connus, ou que pour comprendre les risques inhérents aux déchets radioactifs, des notions touchant aux modifications moléculaires et atomiques aident à cerner les problèmes, ces éléments ne sont pas forcé-

ment nécessaires à la compréhension des tenants et des aboutissants de ces pratiques, au niveau de leur impact et de leurs répercussions dans les champs de l'économie, du développement social et des retombées écologiques. Néanmoins, le fait est que tout citoyen, quel que soit son degré « d'alphabétisation scientifique », doit pouvoir participer, non seulement aux décisions de la vie publique, mais également, de manière très pragmatique, au processus de développement durable par l'intermédiaire de ses choix de vie et de consommation.

Prenant comme acquis le fait qu'apprendre consiste en la transformation des conceptions (Giordan, 1987), l'objectif de notre recherche est de mieux connaître celles liées au développement durable et à la complexité qu'il sous-tend, en vue d'offrir au « grand public » des moyens appropriés pour prendre activement part au processus de développement durable.

S'inscrivant dans le prolongement des recherches sur l'acte d'apprendre, nous avons formulé les questions de recherche qui suivent.

Quelles sont les conceptions (en particulier au niveau des modes de raisonnements afférents) que le grand public véhicule sur le concept de développement durable ?

Quels sont les obstacles spécifiques à l'approche de la complexité et aux mécanismes de changement ?

L'approche complexe favorise-t-elle l'implication de l'individu dans le processus de développement durable ?

Dans une optique visant la pragmatique et partant du constat que la mise en place du processus de développement durable dans une société démocratique requiert l'investissement de chaque individu afin de parvenir à un changement sociétal (commission mondiale sur le développement, 1988), nous nous penchons également sur la manière dont les individus appréhendent la mise en place de ce processus en tentant de répondre aux questions qui suivent.

Quelle est la place accordée par l'individu à l'action personnelle dans le processus du développement durable ?

La mise en place du processus de développement durable est-elle perçue comme dépendante d'une prise de décision venant d'une instance « supérieure » (économique, politique, etc.) ?

Au delà de la seule connaissance du concept, nous avons donc cherché à savoir comment l'action citoyenne, et plus exactement son impact au sein de ce processus, était envisagée et perçue. Pour y parvenir, nous avons mené une enquête de type qualitatif, par entretiens semi-directifs individuels, auprès de 140 personnes non impliquées dans des activités relatives au développement durable, et âgées entre 16 et 80 ans.

Un échantillonnage de 140 personnes nous expose à des limites immédiates. Si, selon Guichard (1990), une quinzaine d'entretiens suffisent pour donner une représentation d'une exposition, nous avons conscience que, sans support matériel, et en abordant un sujet aussi vaste que le nôtre, un nombre aussi restreint d'opinions ne peut refléter la diversité des approches, des réactions et des comportements vis-à-vis d'un tel sujet. Nous ne considérons donc les résultats que comme des tendances.

D'autre part, en procédant à ces entretiens hors de tout contexte directif, nous nous sommes exposés à un certain nombre de refus de participation (environ 20 % des personnes abordées ont refusé de participer à cet entretien). Nous sommes conscients que les réponses de ces dernières reflèteraient certainement des positions très différentes de celles que nous relevons auprès d'individus qui, spontanément, acceptent de se soumettre à un tel questionnaire.

Nous référant à l'analyse qualitative de « *cas multiples (intersites) à grande échelle* » (Hubermann & Miles, 1991), nous avons opté pour la mise en place d'entretiens dirigés (Maisonneuve & Margot-Duclot, 1963 ; Giordan & Martinand, 1988 ; Huberman & Miles, 1991), selon la procédure de « *l'entretien didactique* » proposée par Giordan & Martinand (1988). Le choix du contenu des questions est directement dépendant du type d'indicateurs que nous voulons mettre au jour. Nous basant sur les propositions de catégorisations itératives des items muséologiques définis par Giordan et al. (1997), nous avons voulu connaître :

- l'intérêt pour le sujet,
- les connaissances préalables que les gens ont de ce sujet,
- le questionnement et les réactions que ce sujet suscite,
- le degré d'implication qu'ont déjà ou que souhaitent avoir les personnes face à ce sujet,
- les difficultés inhérentes à la manière de raisonner dans l'appréhension de ce sujet.

Ces différents points nous ont permis de définir le contenu des questions que nous avons posées.

Dans le cas de notre recherche, notre grille d'entretien (encadré 1) s'appuie sur un ensemble de questions allant du plus général au particulier en permettant des « *questions à tiroir* » (Maisonneuve & Margot-Duclot, 1963).

Nous avons soumis cette récolte d'entretiens à deux types d'analyse (tableau 1). La première est une analyse que nous appelons « horizontale », et qui s'intéresse à l'ensemble des réponses données pour une même question. Si cette manière de faire décontextualise les propos tenus de l'ensemble de l'entretien, elle permet de comparer les différentes réponses obtenues, de manière à les regrouper, les catégoriser, et ainsi mettre en évidence les manières de penser et les obstacles qui leur sont sous-jacents.

- a. Avez-vous déjà entendu parler de développement durable ?
 - si oui, pouvez-vous en donner une définition ?
 - si non, qu'est-ce que ces termes évoquent pour vous ?
Lecture de la définition du développement durable (donnée dans l'introduction de cet article).
- b. Pensez-vous que ce soit un thème important ?
 - pourquoi ?
- c. D'après vous, qui peut influencer la société à entrer dans un processus de développement durable ?
- d. Pensez-vous que vous, personnellement, dans votre vie quotidienne, puissiez influencer d'une façon ou d'une autre l'entrée dans ce processus ?
 - si oui, comment ?
 - si non, pourquoi ?
- e. Par vos choix, en tant que consommateur/trice, pensez-vous avoir une influence sur ce processus ?
 - si oui, comment ?
 - si non, pourquoi ?

Encadré 1. Grille d'entretien.

Mise au jour du/des Conceptions	Analyse des entretiens portant sur Développement durable	Principaux indicateurs recherchés
	Valeurs inhérentes au concept	Interactions entre les trois domaines Aspect qualitatif lié au thème Portée mondiale de l'action Notion de long terme Place accordée à l'action individuelle Autre
	Pouvoir	Solidarité Respect Responsabilité Autre
	Consommateur	Accordé aux autorités définies compétentes Accordé aux instances définies "supérieures" (économiques, religieuses, etc.) Accordé à l'individu Synergie des pouvoirs envisagée Autre
Modes de raisonnement	Appréhension du principe récuratif Appréhension du principe hologrammatique Appréhension du principe dialogique Appréhension du principe démocratique Appréhension des interactions Appréhension de l'approche systémique Apparition ou non de mises en relation Apparition de synthèses Mobilisation de connaissances Abstraction/extrapolation Autre	Mise en place d'indicateurs de pensée complexe/non complexe
Degré d'implication déclaré	Place accordée à la responsabilité individuelle dans le processus de dév. durable Place accordée à l'action individuelle Actions déjà entreprises Actions envisagées Types d'action Autre	En relation avec les modes de raisonnement En relation avec les conceptions Autre

Tableau 1. Grille d'analyse des entretiens

La seconde est une analyse que nous nommons « transversale ». Contrairement à l'analyse « horizontale », elle conserve les réponses dans le contexte et la continuité de l'entretien. Elle permet de mettre au jour la manière dont les personnes raisonnent à travers l'ensemble de l'entretien, ainsi que la cohérence de leur argumentation et l'éventuelle évolution de celle-ci.

Les résultats qui font l'objet de cet article sont une synthèse des deux types d'analyse que nous avons faits pour répondre de manière la plus complète possible aux questions que nous nous sommes posées. Ils font également apparaître les conceptions les plus importantes que nous avons rencontrées.

3. CONCEPTIONS, MODES DE RAISONNEMENT ET CHANGEMENT DE PARADIGMES

Les difficultés qu'éprouvent les individus à entrer dans la complexité du concept se situent principalement autour des changements de paradigmes que ce dernier nécessite. La première difficulté vient de l'obligation de penser en termes d'interactions. Tout notre système scolaire et notre société occidentale fonctionnent sur un mode cartésien de découpage des savoirs. Dès lors, la mise en relation des trois domaines que sont l'économie, l'écologie et le développement social pose de grands problèmes. Très souvent les personnes interrogées, dont nous reportons ci-après quelques réponses choisies, retiennent un seul pôle de ce concept ou tentent de raccrocher celui-ci à une réalité tangible, touchant à des réalisations concrètes, telles que l'aide dans les pays en voie de développement ou certaines actions écologistes.

« C'est un thème tellement compliqué que je ne sais pas si vraiment j'ai bien compris. J'ai de la peine à imaginer comment ces trois domaines peuvent s'influencer et surtout comment on peut imaginer quelque chose qui soit autant pour notre pays que pour les pays du tiers-monde... »

« En choisissant d'acheter l'un ou l'autre produit, je peux dans une certaine mesure influencer le développement écologique. Pour les autres domaines, je ne vois pas comment je pourrais influencer. »

« Ça rejoint la question de la solidarité [...], en rapport avec les pays du tiers-monde. Je pense qu'il faut bien réfléchir à ce qu'on leur amène pour qu'ils puissent sortir de leur statut sans polluer trop. »

La deuxième difficulté observée tient également à cette nouvelle manière de raisonner sur des interactions. En effet, cette dernière est également à la base des liens tissés entre l'action locale et le développement global, ainsi qu'entre les différents acteurs dont dépend la mise en place de ce processus. Ainsi, tout ne procède pas de l'individu, mais tout ne dépend pas non plus de l'État ! Et l'investissement financier de chaque consommateur,

aussi minime qu'il puisse paraître, est un moteur non négligeable dans l'économie de marché, surtout s'il parvient à influencer sur des organismes plus grands, privés ou publics. Ces interactions clés du développement durable nécessitent de dépasser le paradigme de « binarité » qui veut que ce soit « A ou B » mais qui accepte difficilement que A et B coexistent et interfèrent. Cet état de fait se résume souvent par l'impossibilité de concevoir l'individu comme moteur d'un changement sociétal. Voici quelques exemples tirés de nos entretiens.

« Il faudrait des politiciens, mais des bons, pas ceux que l'on a actuellement en place. Pour changer la société, il faut changer la politique. »

« Les politiques plus les gens d'influence en grand nombre, le petit homme ne peut rien faire. »

« On ne peut rien y changer tant que ceux qui gouvernent ne changent pas. On ne peut rien faire. »

Une troisième difficulté est liée aux paradigmes de vérité et d'unicité qui gouvernent nos manières de penser les solutions. Le développement durable est un processus et ne peut donc être conçu que dans l'optique d'une situation évolutive. Ceci implique qu'aucune solution ne peut être donnée comme définitive. Au contraire, elle doit systématiquement être adaptée à un contexte qui fait référence à un lieu (espace) à une époque (temps), et à un environnement, tant culturel qu'écologique. Cet aspect est renforcé par le fait que le développement durable fait appel à des notions telles que le flou, le paradoxal, voire le contradictoire et que l'incertitude, notamment scientifique, mais également sociale et économique y règne en maître. Dès lors, il s'agit de penser en termes de « moins mauvais », de « au mieux », tout en se rappelant qu'il ne peut s'agir que « d'optimums » liés à une situation évolutive et transitoire. Dans les exemples suivants, tirés de nos entretiens, nous constatons que, lorsque les individus perçoivent ces difficultés inhérentes à la complexité, beaucoup ne peuvent alors concevoir la mise sur pied d'un tel processus.

« Ça ne peut pas venir des politiques, ni de l'économie, il y en a trop qui vivent au dépens des autres. Tant qu'il y aura des riches et des pauvres, personne n'arrivera jamais à influencer quoi que ce soit. Personne ne peut avoir une influence à un tel niveau global. Je pense que ça restera une utopie. »

« Tout le monde à le pouvoir, mais personne ne fait rien, il y a trop d'intérêts en jeux. Tant que le fric gouvernera la société, personne ne fera rien. »

« Ne soyons pas utopistes. Une telle démarche ne peut fonctionner. Premièrement parce que nous sommes manipulés par la publicité, donc par les lobbies et les multinationales et deuxièmement parce que les gens n'en ont rien à foutre, tant qu'on ne touche pas à leur salaire, à leur TV et à leurs vacances. »

Les changements de paradigmes ne sont pas les seules difficultés

que nous pouvons observer en analysant les conceptions des individus. Très fortement liée aux « habitudes de vie » engendrées par une économie libérale et une interprétation du système démocratique, la notion de liberté individuelle, prise au sens du « *libre arbitre* » tel que le définit Guichet (1998) intervient de façon récurrente sur la déresponsabilisation de l'individu et son refus d'entrer dans une réflexion qui lui apparaît comme une entrave à ce qu'il estime faire partie de ses droits. Voici quelques exemples caractéristiques issus de nos entretiens.

« Personnellement je ne pense pas que je changerais mon mode de vie. On a trop besoin de certaines choses dont on ne peut plus se passer. »

« Cela nécessite des sacrifices que je ne suis pas forcément prêt à faire... »

« Je me fous du développement des autres. Ce qui m'intéresse, c'est mon confort personnel. »

« Oui, mais je pense que ça ne sert à rien d'en parler, parce que tout le monde est déjà sensible à ces problèmes mais personne ne fait rien, les gens ont trop peur de perdre leurs acquis, leur confort, leur fric. »

Les meilleurs exemples que nous pouvons donner à ce sujet sont ceux du « syndrome de la goutte d'eau », que nous développons ci-après, lorsque celui-ci reflète un certain pessimisme et le refus d'assumer une responsabilité dans le processus de développement durable.

3. 1. « Syndrome de la goutte d'eau » et déresponsabilisation

Ce que nous avons appelé « syndrome de la goutte d'eau », en référence à l'expression la plus répandue pour exprimer l'impuissance que ressent l'individu face à la collectivité, correspond à la vision que l'individu a de l'impact de sa propre action face à la masse que représente l'ensemble de la société. Ce « syndrome », que nous pouvons considérer, dans certains cas, comme un indicateur de pensée complexe, dans le sens où il exprime une mise en relation de l'action locale et du développement global, est vécu de manière fondamentalement différente par les individus qui y font référence. Considéré comme une limite insurmontable par certains, il n'est pris en considération par d'autres que comme un paramètre à ne pas négliger lorsque l'on parle de « pouvoir d'influence ». Par « pouvoir d'influence » il faut comprendre le pouvoir potentiel attribué à chacun des acteurs sociaux pour influencer l'ensemble de la société à entrer dans des actions et attitudes favorables au développement durable. Comme nous pouvons le constater dans les extraits d'entretiens qui suivent, les personnes qui considèrent ce dernier comme un facteur rendant le processus de développement durable impossible s'appuient sur lui pour montrer l'inefficacité de leur action personnelle, ou se déresponsabiliser en déléguant cette responsabilité à une autre instance, en général politique.

« Chaque achat est un vote. Néanmoins, j'ai peu d'espoir que l'on puisse développer le concept de développement durable dans le cadre d'une démocratie. »

« Évidemment, en choisissant (ses produits de consommation), faut-il encore savoir quoi choisir. J'aimerais que ce soit plus clair, qu'on me dise ce qu'il faut faire. C'est une faible contribution. Pour moi, [...] ça doit venir de plus haut, d'une volonté des gouvernements. Nous, on n'influence que très localement et seulement dans le domaine de l'écologie. »

Les conceptions que les personnes ont de la démocratie en général et de l'action citoyenne en particulier jouent un rôle considérable sur l'appréhension de ce « syndrome ». Si ce dernier participe à la déresponsabilisation de l'individu, il est un exemple typique d'attitude paradoxale que nous pouvons observer. Tout d'abord, il peut tout aussi bien être en lien avec une vision globale, qui permet de comprendre l'interaction qui régit la loi de l'offre et de la demande sur laquelle l'action individuelle peut avoir un impact, qu'avec une pensée n'appréhendant pas du tout les lois du marché et renvoyant l'individu à sa seule entité, isolé au milieu du monde. Mais là encore un autre paradoxe intervient. Quel que soit le niveau de complexité de la pensée, l'attitude vis-à-vis de l'impact de l'action individuelle, et donc du processus de développement durable, peut être diamétralement opposée. Elle donne lieu à deux cas de figure :

- « je ne suis qu'une goutte d'eau dans l'océan et ne peut donc rien faire » ou,
- « je ne suis qu'une goutte d'eau dans l'océan, mais chaque goutte est nécessaire ».

Ces deux approches sont, non seulement l'expression des conceptions de ces personnes, mais relèvent surtout d'une attitude générale dans la vie, d'une façon d'être. Les arguments donnés, dans un cas de figure comme dans l'autre, peuvent être amenés par des personnes possédant ou ne possédant pas une vision systémique de la problématique.

Les deux exemples que nous donnons ci-dessous sont tirés de l'analyse transversale que nous avons effectuée sur ces entretiens. Il s'agit donc de retranscriptions de certaines réponses données par une seule personne au cours de l'entretien. Dans le premier exemple nous pouvons constater que la personne a une vision très restreinte du développement durable. Elle ne l'envisage qu'en relation avec le développement économique et industriel. Pourtant, elle a une attitude très favorable dès que l'on parle du « pouvoir du consommateur ». Il ne s'agit bien sûr que de déclarations d'intention et non de faits mesurables. Notre étude s'arrête donc à la manière dont les personnes envisagent l'impact de leur propre action et les possibilités qu'ils ont ou non d'exercer ce « pouvoir d'influence personnel ».

- Avez-vous déjà entendu parler de développement durable ? Pouvez-vous en donner une définition ? *« Je pense qu'il s'agit de développement à long terme dans l'économie, l'industrie. »*

- Après la lecture de la définition du développement durable : pensez-vous que ce soit un thème important ? « *Oui absolument, mais ça remet en cause tout ce qui a été fait jusqu'à maintenant. Parce que jusqu'à maintenant, quand on développait quelque chose, une machine ou autre on ne pensait pas si cela allait faire du tort à l'environnement ou aux hommes. On ne pensait qu'à faire un bon coup de commerce.* »
- Pensez-vous que vous, personnellement, dans votre vie quotidienne, puissiez influencer d'une façon ou d'une autre l'entrée dans ce processus ? « *Oui, en réfléchissant à ce que l'on fait. Pour nous, paysans, en produisant en respectant l'environnement et les lois imposées par rapport à cela. Mais tout le monde, même s'il n'est pas paysan peut y participer en réfléchissant aux conséquences de ses actes.* »
- Par vos choix, en tant que consommateur/trice, pensez-vous avoir une influence sur ce processus ? « *Oui et même un sacré pouvoir ! Il n'y a qu'à voir les associations des consommatrices qui sont plus écoutées que le conseil fédéral ou le vétérinaire cantonal en matière d'alimentation. En choisissant ses produits, on peut influencer toute la chaîne.* »

Dans le deuxième exemple, la personne affiche une approche très complète de ce que représente le développement durable. Elle juxtapose les « pouvoirs d'influence » et relève le fait que tout le monde peut intervenir dans le processus, mais chacun à son échelle. Pourtant, en raison d'une liberté personnelle, elle ne peut percevoir son geste comme efficace. Le « syndrome de la goutte d'eau » prend donc une dimension négative.

- Pensez-vous que le développement durable soit un thème important ? « *Oui, je pense qu'une reprise de conscience des valeurs essentielles telles qu'accepter les opinions différentes, arrêter de revendiquer sans arrêt, savoir donner de sa personne, etc., est à faire. Il me semble important de commencer par voir ce que l'on peut faire dans notre petit cadre de vie, à notre échelle avant de commencer de penser planétaire.* »
- D'après vous, qui peut influencer la société à entrer dans un processus de développement durable ? « *Tout le monde, chacun à son échelle. Dans un autre sens, personne, car personne ne veut prendre quelque chose en charge. En tout cas pas les politiques, mais par contre, je pense que le pouvoir de changer réellement quelque chose au niveau planétaire peut se faire par les puissances économiques omniprésentes, telles que les multinationales, microsoft, etc.* »
- Pensez-vous que vous, personnellement, dans votre vie quotidienne, puissiez influencer d'une façon ou d'une autre l'entrée dans ce processus ? « *Par mon travail puisque je touche la construction et peut influencer sur l'utilisation et la mise en place d'énergies renouvelables, par exemple, par les milieux associatifs dont je fais partie également, par des actions ponctuelles, un investissement personnel, tout en ayant conscience qu'il faut rester chacun à son échelle, en amenant des idées, en les débattant, en regroupant des personnes intéressées, etc.* »

- Par vos choix, en tant que consommateur/trice, pensez-vous avoir une influence sur ce processus ? « *Peut-être, mais je ne veux pas changer mes habitudes, parce que j'aime me faire plaisir et que je ne veux pas renoncer à cela. Le choix de certains produits peut influencer, mais personnellement, je m'estime trop comme une goutte d'eau dans l'océan.* »

En plus de l'importance de ce « syndrome », et de la difficulté qui réside dans la compréhension du système démocratique, la déresponsabilisation tient à de multiples facteurs. Par exemple, en « accusant » l'emprise de la société de consommation dans laquelle nous vivons, le manque d'infrastructures (notamment celles liées au tri des déchets, à l'aide financière, etc.) et surtout le manque d'informations et la difficulté de se les procurer, le consommateur se donne une « bonne excuse » pour ne pas changer sa manière de consommer. Il en va de même avec l'évocation de la situation financière. Ces faits se retrouvent dans les extraits d'entretiens qui suivent.

« *Oui, je n'avais pas pensé à mon impact en tant que consommateur. Mais ça reste très dur et je ne crois pas que l'on puisse vraiment lutter. La publicité va tellement à l'encontre du développement durable.* »

« *On achète ce qu'il y a. On pourrait boycotter ce qui ne nous plaît pas mais c'est très difficile. Il manque une information.* »

De même, les conceptions « tiers-mondistes », qui n'envisagent le développement durable qu'en relation avec les problèmes des pays en voie de développement, ainsi que toutes celles qui envisagent le développement durable dépendant d'une instance extérieure (économique, politique, religieuse ou autre) contribuent également à cette déresponsabilisation de l'individu. La première éloigne le problème de ses préoccupations quotidiennes et les secondes lui permettent de se rassurer en se disant que « ce n'est pas sa faute » (voir figure 2).

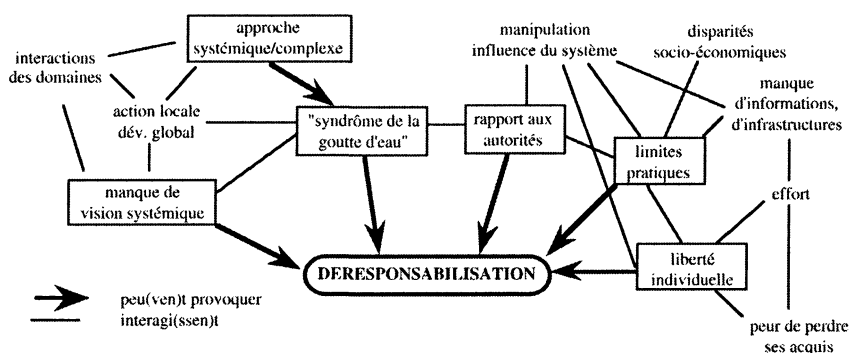
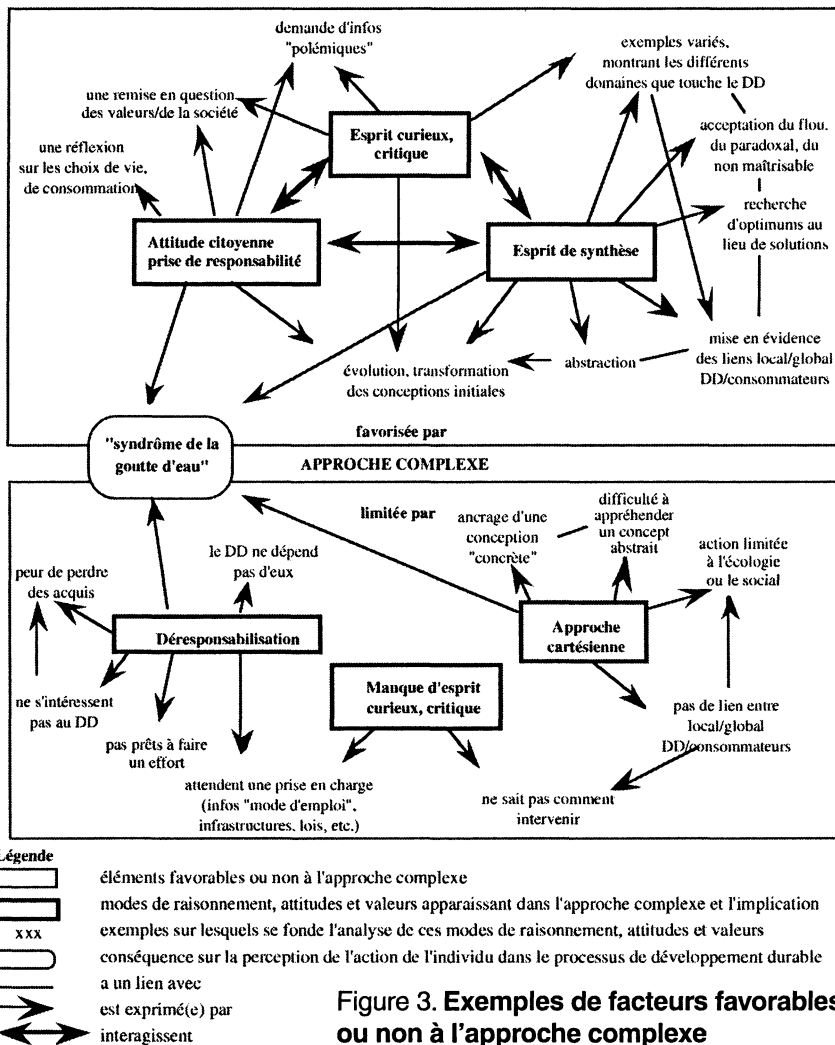


Figure 2. Paramètres intervenant sur la déresponsabilisation de l'individu

3. 2. Pensée complexe et implication de l'individu

À travers notre recherche, nous avons cherché à mettre en corrélation le fait d'accéder ou non à une pensée complexe et celui d'afficher une volonté de la part de l'individu de s'impliquer de manière concrète dans le processus de développement durable.

Dans un premier temps, nous avons tenté de dégager des indicateurs de pensée complexe. À travers les exemples donnés, mais également en croisant les réponses faites par la même personne tout au long de l'entretien, nous avons réussi à en relever un certain nombre que nous présentons dans la figure 3.



Dans le rectangle supérieur de ce schéma, nous avons regroupé les indicateurs qui apparaissent comme favorables à une manière complexe de raisonner. Dans le rectangle inférieur nous avons regroupé ceux qui, au contraire, apparaissent comme une entrave à ce type de réflexion.

Dans les deux rectangles nous voyons des modes de raisonnement, résumés à travers l'expression ou non d'un esprit de synthèse, l'approche catésienne étant une limite forte à ce dernier. Apparaissent également des attitudes, qui se traduisent par la curiosité et l'esprit critique d'une part et leur manque d'autre part, et des valeurs que nous avons regroupées sous l'égide d'une « attitude citoyenne responsable » lorsqu'elle apparaît favorable à la pensée complexe et sous celle de la « déresponsabilisation » lorsqu'elle limite cette dernière.

Si ces exemples peuvent être assez facilement catégorisés de manière binaire, nous pouvons voir, chevauchant allègrement les frontières dichotomiques de ces deux ensembles, le « syndrome de la goutte d'eau ». Sa position paradoxale montre clairement le problème de la pensée complexe. Cette dernière est, d'une part, soumise à une attitude générale dans la vie à être plus ou moins optimiste, et qui n'a de ce fait pas grand chose à voir avec la maîtrise ou non de la complexité. D'autre part nous pouvons constater que la seule capacité à mettre en relation divers facteurs n'est pas suffisante pour accéder à la véritable dimension de la pensée complexe.

Afin de pouvoir mettre en relation l'influence de la pensée complexe sur l'implication de l'individu dans le processus de développement durable, nous avons compilé tous les facteurs mentionnés au long de ces entretiens et qui interviennent, d'une manière favorable ou non, dans cette « envie d'agir » (voir figure 4).

Pour faciliter la lecture, nous avons encadré en gras dans la figure 4 les modes de raisonnement, les valeurs et les attitudes que nous avons relevés (voir figure 3) comme favorables ou non à l'approche complexe. Nous pouvons ainsi constater que certains éléments, considérés comme défavorables à l'approche complexe, peuvent être tout à fait favorables pour l'implication de l'individu. C'est le cas du manque de curiosité, qui se traduit dans la volonté de s'impliquer dans le processus de développement durable par la demande d'informations « mode d'emploi ».

D'autres facteurs sont beaucoup plus ambigus. Ainsi, l'approche catésienne, qui se manifeste dans la compréhension du développement durable par la fragmentation, et qui apparaît clairement comme un facteur défavorable à l'approche complexe (voir figure 3), ne marque qu'une certaine « tendance » à être défavorable à l'implication de l'individu. Il en va de même avec l'esprit de synthèse qui apparaissait comme clairement favorable à l'approche complexe et qui ne marque, elle aussi, qu'une « tendance » à être favorable à l'implication de l'individu.

Par contre, l'esprit critique, la déresponsabilisation et l'approche citoyenne, qui se traduit ici par la compréhension ou du moins l'acceptation des principes démocratiques, restent dans les mêmes catégories que la pensée complexe en ce qui concerne l'implication de l'individu.

Enfin, le « syndrome de la goutte d'eau », s'il conserve l'ambivalence que nous pouvons observer dans la figure 3, sa « tendance » est, cette fois, plus proche des facteurs défavorables à l'implication de l'individu, le nombre de personnes ayant une vision plutôt pessimiste de ce dernier étant plus élevé que celui de celles qui l'envisagent simplement comme un facteur dont il faut tenir compte.

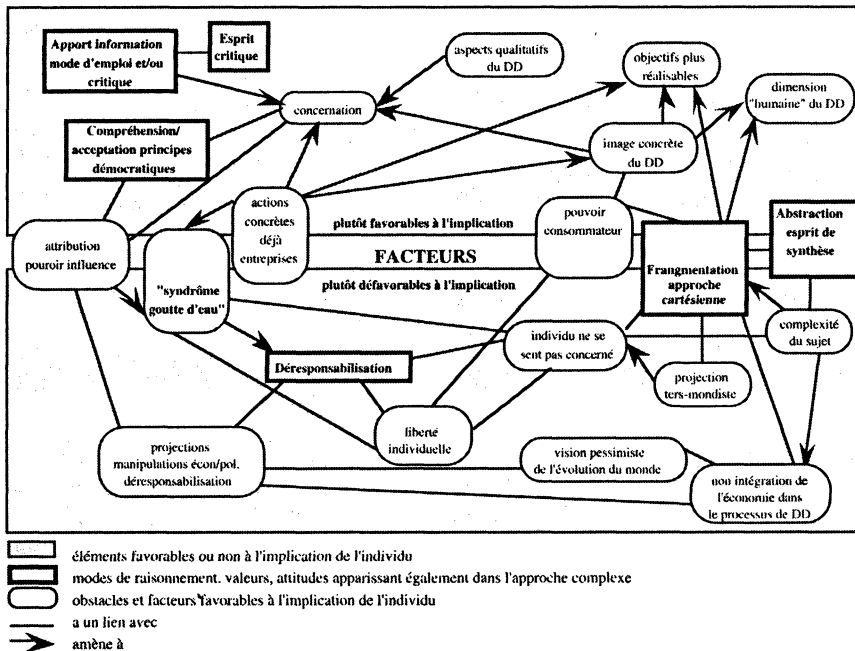


Figure 4. Facteurs favorables ou non à l'implication de l'individu dans le processus de développement durable

4. CONCLUSION

L'ensemble des résultats de ce travail a servi de point de départ à l'élaboration d'un projet muséologique visant à favoriser l'implication de l'individu dans le processus de développement durable (Pellaud, 2000). Nous appuyant non seulement sur les connaissances mais également sur les modes de raisonnement, les attitudes, les *a priori* et les valeurs révélés par ces entretiens, nous avons conçu une scénographie et des éléments muséologiques devant permettre aux visiteurs de dépasser les obstacles ainsi mis

en évidence, pour les conduire vers une plus grande compréhension du développement durable et de ses enjeux, ainsi que du rôle primordial qu'ils peuvent, en tant que consommateurs, jouer dans la mise en place de ce processus.

Mais, au delà de cette utilisation très pragmatique, ces résultats ont des retombées révélatrices dans le champ de la didactique ; ils mettent notamment en évidence plusieurs éléments essentiels des mécanismes liés à l'apprendre, appliqués à des apprentissages complexes.

Tout d'abord, il est confirmé que les paradigmes, en tant que fondements sociaux de la pensée caractérisant un groupe humain, agissent comme des modes de raisonnement intimes, totalement intrinsèques aux conceptions. Dès lors, ils influencent de façon conséquente la compréhension de la complexité et la manière dont l'action individuelle est envisagée.

Dans un processus d'éducation et de médiation, il s'agit de les faire émerger de façon prioritaire, tant ils constituent des obstacles incontournables. Pour les transformer, des environnements didactiques spécifiques et complexes sont par ailleurs à initier.

En relation avec ce premier état de fait, nous constatons que l'approche systémique, dont il est de plus en plus souvent question dans l'enseignement, nécessite des changements radicaux dans les modes de raisonnement, et, par là, dans les processus éducatifs habituels. En l'occurrence, il apparaît que la gestion d'un tel apprentissage nécessite une vision globale capable de mettre en interaction différents éléments et facteurs, tout en tenant compte de leur régulation ainsi que de la relativité et de l'incertitude de la situation. L'approche analytique, favorisée par l'enseignement actuel des sciences apparaît comme un obstacle insurmontable pour une approche du développement durable. Notre nouvelle hypothèse est d'introduire un « embryon » d'approche systémique à un âge très jeune, dès l'école maternelle.

Toutefois, une telle stratégie éducative demande à être savamment affinée. Car, paradoxalement, nous observons les limites de cette vision globale face à l'envie d'implication de l'individu dans un processus aussi complexe. Si certaine compréhension de ce qu'est un système complexe semble favorable, nous ne pouvons nier qu'elle peut également être un facteur de découragement important, relativisant la place et l'impact de l'individu dans le processus.

BIBLIOGRAPHIE

- CAPRA F. (1983/1990). *Le temps du changement*. Paris, Éditions du Rocher.
- COMMISSION MONDIALE SUR L'ENVIRONNEMENT ET LE DÉVELOPPEMENT (1988). *Notre avenir à tous*. Montréal, Éditions du Fleuve.
- CONFÉRENCE DES NATIONS UNIES SUR L'ENVIRONNEMENT ET LE DÉVELOPPEMENT (1993). *Action 21, Plan d'action pour le XXI^e siècle*. New York, Éditions CNUED.
- DE ROSNEY J. (1975). *Le macroscopie*. Paris, Seuil.
- ESEMBERT B. (1996). Le développement durable : une clé pour le XXI^e siècle. In A. Giordan & J. Denis-Lempereur (coords), *12 Questions d'actualité sur l'environnement*. Nice, Z'édicions, pp. 131-136.
- EWEN S. (1977). *Conscience sous influence : publicité et genèse de la société de consommation*. Paris, Aubier Montaigne.
- GIORDAN A. & DE VECCHI G. (1987). *Les origines du savoir*. Neuchâtel, Delachaux et Niestlé.
- GIORDAN A. & MARTINAND J.-L. (1988). État des recherches sur les conceptions des élèves en biologie. In A. Giordan & J.-L. Martinand (éds), *Annales de Didactiques des sciences*. Rouen, Publications de l'université de Rouen, pp. 13-68.
- GIORDAN A., GUICHARD J. & GUICHARD F. (1997). *Des idées pour apprendre*. Nice, Z'édicions.
- GIORDAN A. (1998). *Apprendre !* Paris, Belin.
- GUICHARD J. (1990). *Diagnostic didactique pour la production d'un objet muséologique*. Thèse, université de Genève.
- GUICHET J.-L. (1998). *La liberté*. Paris, Éditions Quintette.
- HUBERMANN A. M. & MILES M. B. (1991). *Analyse de données qualitatives*. Bruxelles, de Boeck université.
- HUNYADI M. (1998). Conférence du 25.2.98 à Uni Dufour dans le cadre du cours *Éducation pour l'environnement* sous la responsabilité d'A. Giordan, FPSE, université de Genève.
- JONAS H. (1984). *Das prinzip verantwortung. Versuch einer ethik für die technologische zivilisation*. Frankfurt am Main, Suhrkamp.
- KEATING F. (1993). *Un programme d'action, version pour le grand public de l'Agenda 21 et des autres accords de Rio*. Genève, centre pour notre Avenir à Tous.
- LEHMANN J.-C. (1996). De la gestion de la complexité à un corpus de « sciences de l'action ». In J.-M. Barbier (dir.), *Savoirs théoriques et savoirs d'action*. Paris, PUF, pp. 147-159.
- LENDREVIE J. (1983). Publicité et raisons d'État. In S. Piquet (dir.), *La publicité, nerf de la communication*. Paris, Les éditions d'organisation, pp. 75-90.
- MAISONNEUVE J. & MARGOT-DUCLOT J. (1963). Les techniques de la psychologie sociale. *Bulletin de psychologie*, vol. 15, n° 220, pp. 900-912.
- MORIN E. (1977). *La Méthode 1 : la nature de la nature*. Paris, Seuil.
- MORIN E. (1990). *Introduction à la pensée complexe*. Paris, ESF.
- MORIN E. (1991). *La Méthode 4 : les idées. Leur habitat, leur vie, leurs mœurs, leur organisation*. Paris, Seuil.
- MORIN E. (1998a). Pour une réforme de la pensée. In E. Morin & Y. Bonnefoy (éds), *Quels savoirs enseigner dans les lycées ?* Paris, centre national de documentation pédagogique, pp. 35-48.
- MORIN E. (1998b). La démocratie cognitive et la réforme de la pensée. In E. Morin & Y. Bonnefoy (éds), *Quels savoirs enseigner dans les lycées ?* Paris, centre national de documentation pédagogique, pp.49-54.

MORIN E. (1999). *La tête bien faite*. Paris, Seuil.

PELLAUD F. (2000). *L'utilisation des conceptions du public lors de la diffusion d'un concept complexe, celui de développement durable, dans le cadre d'un projet en muséologie*. Thèse, université de Genève.


POSCH P. (1993). Research issues in environmental education. *Studies in Science Education*, vol. 21.

SAATY T.-L. (1981-1984). *Décider face à la complexité, une approche analytique multicritère d'aide à la décision*. Paris, Entreprise Moderne d'Édition.

SAINT-GEOURS J. (1987). *Éloge de la complexité*. Paris, Éditions Economica.

SMYTH J. (1999). Is t here a future for education consistent with Agenda 21 ? *Canadian Journal of Environmental Education*, vol. 4.

Cet article a été reçu le 02/05/2002 et accepté le 06/05/2003.



L'évaluation de l'efficacité du guidage dans les travaux pratiques de DEUG : un problème méthodologique complexe

The measurement of the efficiency of the guidance in physic labwork at the university : a complex methodological problem

Michel BENEY

UFR sciences et techniques – UBO - Brest
6 avenue Le Gorgeu, 29200 Brest
et DidaScO, université Paris XI, bâtiment 333
91405 Orsay cedex, France.

Jean-Yves GUINARD

UFR sport et éducation physique
Laboratoire des sciences du sport et des activités nautiques – UBO - Brest
20 avenue Le Gorgeu
29285 Brest cedex, France.

Résumé

Comparer l'efficacité du guidage des activités lors des TP en milieu universitaire est un exercice périlleux. Souvent les arguments sont subjectifs et associés à une conception personnelle de ce qu'est un apprentissage réussi.

Nous proposons de discuter des problèmes méthodologiques et théoriques liés à la comparaison de différentes méthodes d'enseignement. Nous concrétiserons notre démarche sur l'exemple des travaux pratiques de physique en première année universitaire. Nous mettons en évidence qu'un guidage serré, en suivant des consignes opératoires, n'est pas inefficace. Un guidage favorisant l'abstraction réfléchissante améliore la compréhension du problème à résoudre. Nous faisons des propositions pour rendre les guidages plus efficaces.

Mots-clés : *apprentissage, guidage, mémoire, mesure, verbalisation.*

Abstract

There is a lot of quaral between teachers concerning the evaluation of the effeciency of the guidance of labwork's activities at the university level. Often people's argument comes from personal conception of what is a successfull learning, and more the factors which are to take in account in learning processes are numerous more the personal conception is important. Instead of trying to discuss of what should be the critères of a good judgment, we propose here to discuss about methodological and theoretical problems when we try to compare methods of teaching. We will give the example of physics labworks at the university. We will show that an apprenticeship through strict written instructions is not inefficient. We will give propositions to make guidance more efficient.

Key words : *learning, efficiency, guidance, memory, measurement.*

1. INTRODUCTION

Dans l'institution universitaire, les débats concernant les pratiques pédagogiques des enseignants deviennent fréquents, passionnés et parfois violents. Pour certains, l'efficacité d'un enseignement passe par la résolution de problèmes ouverts avec peu de consignes, pour d'autres, un enseignement efficace consiste à faire mémoriser, par un guidage très serré, des méthodes de résolution de problèmes typiques. Or les évaluations rigoureuses des méthodes pédagogiques sont peu fréquentes et, lorsqu'elles sont publiées, elles font souvent l'objet de critiques mettant en cause la pertinence méthodologique du dispositif utilisé. Évaluer l'efficacité d'une pratique pédagogique n'est pas une opération aussi banale qu'elle le paraît si l'on constate le peu de travaux existants sur cette question et la persistance des controverses.

En psychologie, il est usuel de modéliser les apprentissages en utilisant des expériences très circonscrites autour de la mise en évidence de modalités d'apprentissage très ciblées (comme avec la tour de Hanoi). Les

variables individuelles peuvent être maîtrisées facilement et le cadre théorique est prédéfini.

Cependant la démarche expérimentale classique, consistant à isoler des variables indépendantes qui pourraient, toutes choses étant égales par ailleurs, expliquer les performances obtenues à un test d'évaluation n'est pas chose facile dans un dispositif d'enseignement qui relève d'une analyse écologique (Chevallard, 1992) : les facteurs qui interviennent étant multiples. On pourra également citer les travaux des psychologues de la cognition qui valorisent le rôle du contexte dans la formation des connaissances (Lave, 1988 ; Roth, 1996). La comparaison de pratiques d'enseignement inscrites dans des contextes différents reste donc problématique.

Ce même débat existe actuellement à propos du guidage par instructions dans les travaux pratiques (TP) à l'université. Ce type de guidage consiste à donner aux étudiants des consignes précises pour qu'ils effectuent des tâches supposées produire un apprentissage. Il conduit l'étudiant sur le chemin de la réussite de la tâche, en lui montrant comment faire. L'enseignant espère que l'étudiant pourra reproduire la démarche apprise et la réutiliser dans des contextes analogues. Cette pratique pédagogique est très critiquée. On lui reproche notamment d'enfermer les apprenants dans une activité de simple exécution qui ne permet pas de construire des connaissances stables et transférables. Les critiques portent sur le fait que le guidage concerne l'aspect exécutable et procédural des tâches, les anglo-saxons parlent de « *cookbook* » (livre de cuisine) à propos de ces TP (Clough & Clarks, 1994 ; Gangoli & Gurumurthy, 1995). Des auteurs ont déjà décrit les difficultés et les obstacles associés à un apprentissage réalisé en suivant des consignes opératoires (Beney, 1998, 2001 ; Pateyron, 1997).

D'autres auteurs (Darley, 1996 ; Guillon, 1996) critiquent le fait que le guidage ne porte que sur l'aspect procédural de la résolution du problème, ils proposent des tâches prenant la forme de problèmes ouverts ou de conduite de projets plus proches d'une démarche scientifique de laboratoire. Ces dispositifs font intervenir le moins possible l'enseignant et laissent à l'étudiant une plus grande autonomie.

Un travail récent (Psillos et al., 1998) a cependant montré qu'en Europe le guidage par instruction est la forme la plus répandue. Cette étude conclut à la nécessité de se pencher sur l'efficacité de cette démarche, économique, facile à mettre en œuvre (enseignement standardisé, peu coûteux en temps demandé aux étudiants et aux enseignants) et qui a permis de former des générations de chercheurs en sciences.

La comparaison de l'efficacité de différentes formes de guidage est donc un sujet intéressant, peu de travaux ayant été faits dans ce domaine : un non-guidage est-il plus efficace qu'un guidage par instructions ? Existe-t-il des modes de guidage plus efficaces que d'autres ? Les TP de sciences, qui

correspondent à des situations complexes mais relativement cadrées, nous ont donc semblé un exemple pertinent pour cette étude. La question est de savoir s'il est possible de construire des dispositifs scientifiques (objectivables et réfutables) qui permettent de comparer l'efficacité de pratiques d'enseignement faisant appel à des conceptions différentes de l'apprentissage. Ces pratiques devraient être caractérisées par des modes de guidage différents.

Le plus souvent, on sépare deux évaluations dans les apprentissages :

- soit on mesure la performance à partir d'une évaluation normalisée (test de réussite). Cette démarche privilégie la description de la réussite plutôt que sa compréhension. Cette méthode nécessite un grand échantillon et ne permet pas de savoir quelles compétences les sujets ont réellement mobilisées pour réaliser leur performance,
- soit on recueille des comportements cliniques pertinents (les données n'ayant de sens qu'à partir d'un modèle théorique prédéfini). Cette méthode se rapproche le plus souvent des études de cas et ne nécessite pas un grand échantillon. Elle permet de repérer si les compétences attendues par le modèle théorique sont mobilisées mais laisse de côté d'autres compétences (repérables à partir d'autres théories) qui permettraient d'atteindre la même performance. Peu d'études mettent en relation performance et comportements cliniques pour évaluer des compétences.

Nous pensons pouvoir comparer l'efficacité de modes de guidage différents issus de modèles théoriques différents en reliant la mesure objective des performances réalisées par les étudiants au cours d'une épreuve de contrôle et l'évolution de leurs représentations par rapport au problème à résoudre. Notre démarche nécessite :

- la mise au point d'une mesure de performance objective et contrôlée dans une situation d'évaluation acceptable pour plusieurs théories de l'apprentissage (étude quantitative),
- le contrôle de variables objectivables (comportements cliniques) qui, indépendamment des protocoles d'enseignement, sont susceptibles d'expliquer l'évolution des représentations des étudiants,
- la mise en relation des performances obtenues et des comportements observés et catégorisés pour évaluer l'apprentissage réalisé ou l'acquisition de compétences.

Nous présenterons une tentative de mise au point d'une démarche de comparaison, en termes d'efficacité, de pratiques de guidage en TP de physique issues de conceptions différentes de l'apprentissage en explicitant :

- les problèmes méthodologiques que soulève la comparaison de pratiques d'enseignement différentes,
- les critères que nous avons retenus pour en évaluer l'efficacité,
- l'essai de validation de la pertinence de ces critères.

2. APPRENTISSAGES, ÉVALUATION ET TRANSFERT : QUELQUES REPÈRES THÉORIQUES

Les différentes théories de l'apprentissage se différencient fondamentalement sur la question du « comment un sujet apprend ? » En revanche, on peut constater un certain accord sur la question de savoir comment on peut mettre en évidence qu'un individu a appris.

En effet des auteurs faisant appel à des théories différentes de l'apprentissage, en particulier, les modèles béhavioristes, cognitivistes et connexionnistes, considèrent qu'il y a apprentissage lorsque le sujet fournit, avec une certaine stabilité dans le temps, une réponse nouvelle ou un comportement nouveau dans une classe de situations analogues. Les exemples sont multiples (Reuchlin, 1977 ; Richard, 1990 ; Dore & Mercier, 1992 ; Edelman, 1992).

Schmidt (1993) rappelle la nécessité de séparer les performances temporaires pendant les séquences d'apprentissage et les résultats relativement permanents. En effet, si seules les performances sont observables, l'amélioration de la performance n'est pas en soi le signe d'un progrès dans l'apprentissage c'est-à-dire l'acquisition de compétences (Tolman, 1948 ; Tarpi, 1982). Celle-ci peut être le résultat, par exemple, de la motivation ou du guidage pendant l'entraînement. Mesurer l'apprentissage (l'acquisition de compétences) exige donc une procédure de transfert. Cette procédure demande au minimum que cette évaluation soit faite à partir d'un test de rétention qui neutralise partiellement les effets temporaires. La permanence de la modification de la conduite ne doit pas apparaître uniquement lorsque le sujet retrouve la situation d'apprentissage mais aussi lorsqu'il rencontre des situations proches de la situation d'apprentissage. Fondamentalement le transfert est donc une caractéristique de l'apprentissage et son évaluation dépend du modèle que l'on a de l'apprentissage. Aussi, pour comparer des guidages différents, nous devons construire des protocoles d'apprentissage représentatifs de modèles d'apprentissage différents.

Pour les behavioristes, le transfert est le résultat du renforcement d'un comportement et de sa généralisation à la suite d'une interférence entre une tâche nouvelle et une tâche d'apprentissage lorsque les caractéristiques des deux tâches possèdent un nombre d'éléments identiques suffisant (Thorndike, 1913 ; Le Ny, 1972).

Un guidage efficace peut donc consister à proposer plusieurs situations analogues très guidées sur le plan opératoire (pour obtenir la réussite du sujet et donc un renforcement) suivie d'une situation non guidée pour favoriser la généralisation.

Pour les cognitivistes, et en particulier les structuralistes comme Piaget, le transfert est un processus de généralisation d'un fonctionnement à

toute une classe de situations relevant de la même classe de problèmes. (Une classe est caractérisée par la similitude des opérations nécessaires à la réalisation de ces tâches-problèmes). Cette généralisation constructive est le résultat de la création de nouveaux schèmes à partir de ceux pré-existants à la suite d'une prise de conscience. La prise de conscience peut être facilitée par la verbalisation guidée - la médiation de l'autre (Vigotsky, 1997).

Pour les cognitivistes centrés sur l'étude de la résolution de problèmes (Newel & Simon, 1972), la reconnaissance d'une similarité entre la situation d'apprentissage et la situation nouvelle se fait à partir d'indicateurs différents selon que le sujet est expert ou novice. L'expert identifiera un isomorphisme entre les structures profondes des problèmes, le novice utilisant des traits de surface.

Un guidage efficace peut consister à proposer une situation-problème, laisser le sujet rechercher seul des solutions, solliciter la verbalisation de ses représentations puis lui fournir une règle générale qui peut lui permettre d'apprendre un schéma d'action.

Pour les connexionnistes (Laks, 1996) et en particulier le courant contextualiste, tout apprentissage est associé à un contexte. Le transfert, qui reste une exception, n'est pas le résultat de l'effet des structures du sujet mais d'affordances, à savoir d'éléments significatifs dans l'environnement qui déclenchent une réaction du sujet (Gibson, 1979).

Ces caractéristiques de l'environnement qui permettent la discrimination des situations peuvent être le résultat de l'interférence entre des situations analogues.

Un protocole représentatif pourrait passer par la résolution de plusieurs situations-problèmes analogues très guidées sur le plan opératoire (permettant au sujet de réussir) puis poursuivre cette phase d'une activité verbale de comparaison ayant pour objectif de faire ressortir les caractéristiques communes aux différentes situations.

Suite aux expériences de guidage visant à faciliter la reconnaissance d'analogies entre des situations, on distingue le transfert informé et le transfert spontané (Gick & Holyoak, 1983). Dans le transfert informé le sujet est guidé dans la recherche d'indices pertinents pour appliquer une analogie ; il est, par exemple, averti qu'il devra effectuer une tâche analogue à celle qui a servi aux apprentissages, alors qu'il n'est pas guidé pour le transfert spontané (le sujet n'est pas informé qu'il aura à résoudre une tâche analogue).

À l'université il existe un contrat didactique implicite : l'étudiant est censé transférer son savoir dans des situations différentes de celles qui ont servi aux apprentissages (en particulier lors de l'évaluation). On espère qu'il sera capable d'identifier seul les indices nécessaires pour retrouver la situation d'apprentissage pertinente. Tout se passe comme si on attendait de l'étudiant un transfert spontané.

Des études en psychologie différentielle (Brown & Campione, 1990) amènent à différencier des sujets « transféreurs » et des « non-transfereurs ». Les « transféreurs » ayant un développement des aptitudes qui relèvent de la métacognition (comme l'auto-évaluation de leurs résultats, l'application consciente d'une méthode, le contrôle de l'activité, etc.) supérieur aux « non-transfereurs ».

Nous tenterons d'évaluer l'aptitude générale des sujets à transférer à partir de tests psychologiques susceptibles de mesurer une compétence transversale à la métacognition.

3. MÉTHODOLOGIE

3.1. Le TP de physique et le problème à résoudre

Il s'agit de faire apprendre à des étudiants une méthode de mesurage quand les appareils de mesure ne permettent pas de connaître le zéro des mesures.

Les étudiants doivent mesurer la vitesse de la lumière dans différents milieux transparents. Ils disposent de l'appareillage schématisé en figure 1 (on trouvera en annexe 1 un schéma de cette expérience).

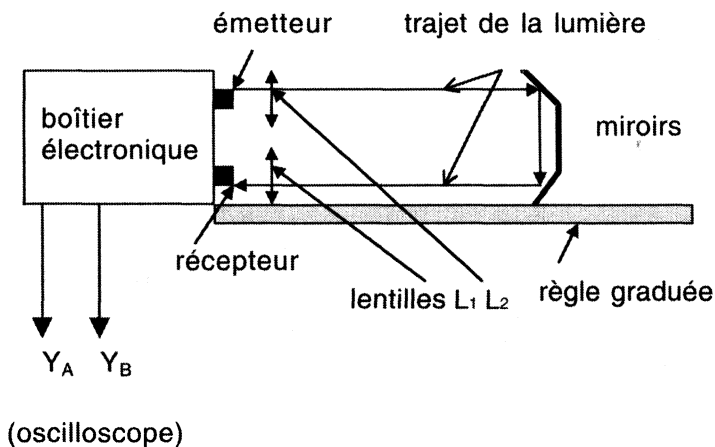


Figure 1. Schéma du montage pour mesurer la vitesse de la lumière

Un émetteur envoie de la lumière visible qui se réfléchit sur des miroirs pour revenir vers un récepteur. En mesurant le temps que la lumière met pour aller de l'émetteur au récepteur et en mesurant la distance parcourue par la lumière, on peut en déduire sa vitesse.

La mesure des distances est faite sur un banc gradué en centimètres et celle du temps à partir d'un oscilloscope qui permet de connaître le décalage en temps entre le signal émis et le signal reçu.

Le problème est que :

- l'on ne connaît pas avec précision les positions de l'émetteur et du récepteur ;
- la lumière parcourt une distance inconnue entre les miroirs ;
- on ne connaît pas le zéro des temps.

La solution consiste à placer les miroirs sur une position quelconque du banc, à lire le temps t_1 affiché et la position L_1 des miroirs (cela constitue une situation de référence), puis à déplacer les miroirs d'une distance choisie, à noter le temps affiché t_2 et la position L_2 des miroirs. La vitesse de la lumière est alors donnée par $C = \frac{L_2 - L_1}{t_2 - t_1}$. Cette solution peut être trouvée en utilisant une méthode par différence.

Le dispositif peut alors être schématisé selon la figure 2 avec le tracé en pointillés représentant les trajets de la lumière.

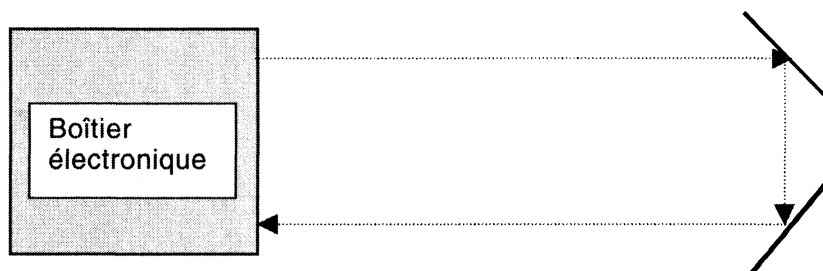


Figure 2. Schéma de principe du chemin suivi par la lumière dans l'air

Le problème se complique quand, pour mesurer la vitesse de la lumière dans un milieu transparent autre que l'air, les étudiants doivent disposer ce milieu (de forme géométrique imposée) sur le trajet de la lumière. En effet dans un milieu transparent différent de l'air, le problème est de mesurer le temps que met la lumière à parcourir ce milieu sachant que la mesure du temps est donnée par le décalage entre le signal émis (dans l'air) et reçu (dans l'air). Le temps qui est mesuré est donc le temps global mis par la lumière pour traverser le milieu et l'air.

La solution consiste à placer les miroirs sur une position quelconque du banc, à noter le temps affiché et la position des miroirs (cela constitue une situation de référence), à placer le milieu sur le trajet de la lumière et à faire alors une mesure par différence en déplaçant les miroirs d'une longueur égale à la longueur d'air qui a été remplacée par le milieu. Il faut avoir compris ce qu'est une situation de référence et que, quand on place un milieu sur le

trajet de la lumière, on enlève autant d'air et pour retrouver la situation de référence il faut déplacer les miroirs d'une longueur égale à celle du milieu.

Le dispositif peut alors être schématisé selon les figures 2 et 3, avec le tracé en pointillés représentant les trajets de la lumière (figures 3 et 4) :

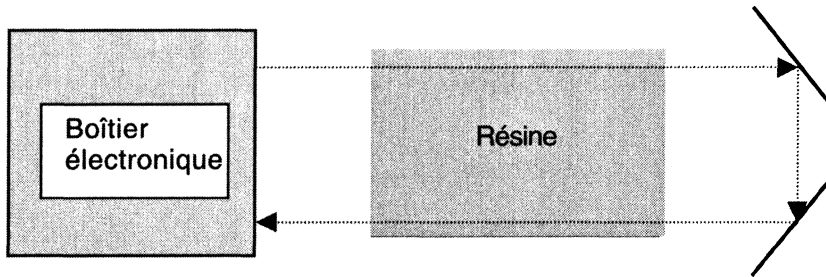


Figure 3. Schéma de principe du chemin suivi par la lumière dans un bloc de résine (grisé sur le dessin) et dans l'air.

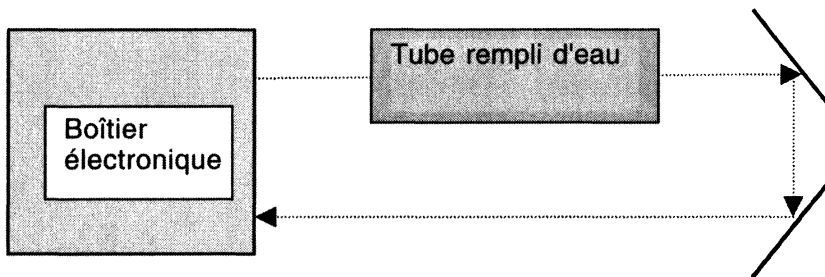


Figure 4. Schéma de principe du chemin suivi par la lumière dans un tube d'eau placé sur un seul trajet de la lumière (grisé sur le dessin) et dans l'air

3.2. Le choix des modes de guidage

Il s'agit de confronter des protocoles de guidage qui vont du guidage serré (du type : « démarche classique en TP ») au non guidage (du type : démarche centrée sur la prise de conscience du problème à traiter). Nous avons construit un ensemble de 5 modes de guidage représentatifs de différentes conceptions de l'apprentissage (voir §2).

Pour toutes ces démarches, les trois mêmes problèmes à résoudre ont été posés : mesurer la vitesse de la lumière dans l'air, dans un milieu qui occupe le trajet aller et retour de la lumière, dans un milieu qui occupe un seul trajet (aller). Pendant la phase d'apprentissage, les étudiants sont guidés par un protocole écrit et ils doivent calculer la vitesse de la lumière dans 3 milieux transparents différents.

La durée de cette phase d'apprentissage a été fixée à 45 minutes, quels que soient le protocole et le niveau de performance atteints par les étudiants. À la fin de la séance, le chercheur indiquait à l'étudiant s'il avait réussi ou bien s'il avait presque réussi ou enfin s'il avait échoué. Les sujets ont été filmés et le chercheur les invitait à réfléchir à voix haute ; les seules interventions qu'il s'autorisait étaient de demander à l'étudiant de dire ce qu'il pensait.

3.2.1. Une situation problème : protocole 0

Nous avons construit une situation d'apprentissage dans laquelle le problème général est à résoudre à travers trois exemples sans guidage écrit ou verbal. Cela correspond à l'idée qu'un guidage est un obstacle à la construction personnelle de connaissances et qu'il serait donc préférable de sélectionner des situations-problèmes qui puissent permettre à l'apprenant de trouver des solutions personnelles. Le sujet progressant seul par une série de conflits cognitifs entre les résultats attendus à partir de ses représentations initiales et les résultats perçus (Piaget, 1975). Ce protocole permet en outre de comparer le guidage et le non-guidage.

3.2.2. Un guidage procédural serré suivi d'une activité de généralisation : protocole 1

Nous avons construit un guidage serré pour deux exemples (on dit comment faire pour résoudre le problème) puis on demande à l'étudiant de résoudre le problème sur un troisième exemple sans lui donner la solution (on favorise alors la généralisation). C'est le type de situation d'apprentissage que l'on retrouve le plus fréquemment dans l'enseignement, nous l'avons qualifiée de « classique ».

3.2.3. Un guidage centré sur la construction d'une représentation pertinente : protocole 2

Le guidage est centré sur la prise de conscience (et sa verbalisation) par l'apprenant des contraintes du problème à résoudre pendant une phase de tâtonnement – apprentissage par la découverte (Richard, 1990). La solution générale au problème est ensuite donnée verbalement sous forme de règles d'action – apprentissage par le texte (Richard, 1990). Les étudiants doivent appliquer cette règle générale aux trois exemples demandés sans autre aide que l'énoncé de la règle qu'ils gardent écrite sous leurs yeux. Cette forme d'apprentissage s'appuie sur la construction d'une bonne représentation de la situation avec l'idée qu'il faut amener l'apprenant à changer de représentation à partir de situations-problèmes. Cette forme d'apprentissage semble avoir la préférence des enseignants bien que difficile à mettre en œuvre (coûteuse en temps).

3.2.4. Un guidage procédural serré suivi d'un questionnement : protocole 3

Dans un premier temps les étudiants sont guidés (on dit comment faire pour trouver la solution) pour les trois exemples (contrairement au protocole 1 pour lequel la solution est donnée pour deux exemples). Dans un deuxième temps, les étudiants ont à répondre (à la fin de l'activité) à des questions concernant :

- les méthodes qu'on leur a fait utiliser pour réussir,
- la conscience qu'ils ont du problème.

L'idée est d'amener les étudiants à construire une représentation du problème à partir de la construction d'une représentation des solutions qui sont données aux différents problèmes. Cette approche met l'accent sur la prise en compte du contexte à travers l'action et se rapproche de la cognition située.

Cette méthode est très proche d'une méthode dite « classique » tout au moins en ce qui concerne l'activité procédurale ; elle en diffère en ce qui concerne l'activité de verbalisation qui est demandée à la fin de l'activité. C'est un guidage basé sur une démarche d'abstraction en comparant des situations analogues (Piaget et *al.*, 1990).

3.2.5. Un guidage procédural serré accompagné d'une représentation imagée : protocole 4

Il s'appuie sur l'idée que, pour résoudre le problème, les étudiants peuvent utiliser des représentations imagées préférentiellement aux représentations verbales.

Les étudiants sont guidés (on dit comment faire pour trouver la solution) pour les trois exemples (comme pour le protocole 3), mais au lieu de verbaliser à la fin de l'activité, ils doivent dessiner leur représentation des trajets et des distances parcourues par la lumière pendant l'activité. Le but est de leur faire construire une représentation imagée qui leur permette d'extraire les invariants des différentes situations sans passer par une verbalisation.

3.3. Le dispositif d'évaluation

3.3.1. Les principes de sa construction

Nous avons élaboré un dispositif d'évaluation permettant d'établir trois types de mesure. Une mesure des performances obtenues, une mesure du niveau de conceptualisation atteint et une mesure des compétences transversales en métacognition.

Nous avons construit un test d'évaluation proposant une tâche de même nature que celle d'apprentissage, mais dans une situation différente et espacée dans le temps. Nous avons filmé les étudiants pendant l'épreuve pour enregistrer leurs comportements et leurs verbalisations éventuelles. Nous avons traité ensuite les résultats de façon statistique.

3.3.2. Le test d'évaluation

Pour construire le test d'évaluation nous avons tenté de supprimer les indices qui pouvaient favoriser le rappel à partir de proximités autres que la proximité conceptuelle. Nous avons ainsi supprimé :

- les indices spatio-temporels (une semaine après la phase d'apprentissage, l'expérience a lieu dans une salle différente de celle qui a servi pour les apprentissages),
- les indices favorisant le rappel à partir de traits de surface : ainsi, le banc de mesure des distances est supprimé, il est remplacé par un mètre à ruban (les étudiants ne disposent plus ainsi d'un zéro physique des mesures des distances), la forme du milieu transparent a été modifiée (figure 5).

On peut ainsi espérer que la performance à ce test dépende de la compréhension conceptuelle de l'étudiant.

Dans cette partie les étudiants ne disposent pas de documents et le chercheur ne leur apporte aucune aide. La séance est fixée à 45 minutes, les étudiants sont filmés et sont invités à réfléchir à voix haute (les volontaires ont été informés depuis le début qu'ils participent à une expérience qui consiste à comprendre l'influence d'un guidage sur les apprentissages et qu'il est nécessaire de suivre leur raisonnement à partir de leur verbalisation). Les seules interventions du chercheur consistent à inciter l'étudiant à dire ce à quoi il pense.

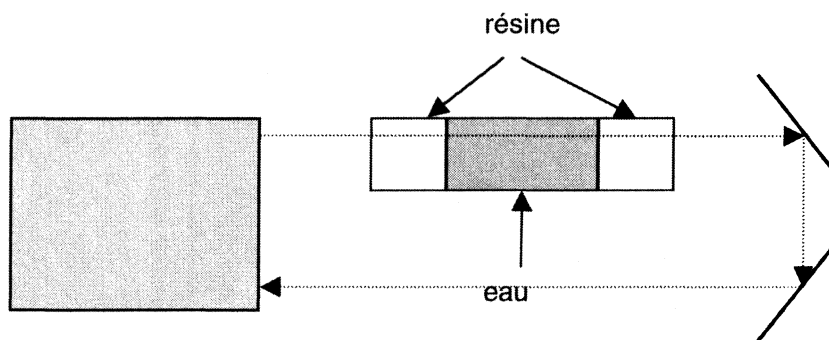


Figure 5. Schéma de principe du test qui est donné aux étudiants

3.3.3. La définition des niveaux de performance

Une première évaluation des compétences acquises peut se faire à partir des mesures de performance des sujets. Il s'agit de déterminer de manière objective si l'on peut distinguer des niveaux hiérarchisés chez les apprenants pendant la situation d'évaluation. Ils vont d'une réussite totale à un échec complet en passant par des réussites intermédiaires.

Nous avons regroupé les étudiants dans trois niveaux de performance :

- niveau 1, pour ceux qui font des mesures directes sans méthode et qui échouent ;
- niveau 2, pour ceux qui appliquent une méthode de mesure analogue à celle trouvée pour l'air seul mais qui échouent à l'épreuve ;
- niveau 3, pour ceux qui réussissent.

Ces niveaux correspondent à une hiérarchisation du niveau de compréhension de la tâche : le niveau 3 étant le plus élevé dans la hiérarchie.

3.3.4. La catégorisation des comportements observés

Une autre approche consiste à évaluer la compétence acquise à partir de l'évolution des conceptions de la tâche ou de la représentation du problème. Pour cela, on notera les initiatives du sujet, ses verbalisations, ses errements, le rappel de ses souvenirs associés à l'apprentissage, etc. En effet, si un comportement isolé peut être compris de différentes manières, les regroupements de comportements et leur hiérarchisation dans un cadre théorique peuvent donner des indications sur les compétences mobilisées par le sujet.

Il existe peu de travaux sur les connaissances sur les actions. Toutefois, Richard (1990) a proposé un schéma de l'apprentissage dans ce domaine.

Face à une situation nouvelle, la première étape d'apprentissage consiste à identifier le but à atteindre ou le problème à résoudre. La seconde étape consiste à apprendre des procédures pour atteindre le but. La troisième vise à caractériser la situation de départ afin de choisir la ou les procédures les plus pertinentes. Cela constitue une échelle de progrès qui comporte quatre niveaux :

- 1/ Ignorance du but à atteindre et des procédures ;
- 2/ Identification du but sans connaissance des procédures ;
- 3/ Maîtrise d'au moins une procédure typique ;
- 4/ Catégorisation de la situation de départ.

Nous avons adapté ces catégories à notre problème à partir d'une analyse didactique et épistémologique des savoirs et savoir-faire nécessaires à la réalisation de la tâche :

- **niveau 1, mesure absolue.** Les étudiants mesurent la distance et le temps sans tenir compte du problème posé : **il n'y a pas de conceptualisation de la situation ni de prise de conscience du problème posé ;**

- **niveau 2, mesure relative.** Pour cette catégorie, les étudiants **ont conscience du problème** mais ils se contentent de mesurer les changements introduits relativement à la situation antérieure sans appliquer une procédure de manière systématique ;

- **niveau 3, mesure par différence.** Les étudiants **ont conscience du problème** et ils ont une maîtrise des différents paramètres. Ils réussissent dans une situation particulière : la mesure dans l'air. Cependant ils généralisent la procédure apprise sans tenir compte des nouveaux contextes ;

- **niveau 4, mesure par référence.** Les étudiants **ont conscience du problème**, ils **conceptualisent une situation de référence** en identifiant ses caractéristiques. Ils font les mesures pour les différentes expérimentations (avec les différents milieux) en recherchant à évaluer ce qu'il faut faire pour reconstruire la situation antérieure qui leur sert alors de référence.

Ces quatre catégories correspondent à une **hiérarchisation** des conceptions des étudiants liées à la mesure : la conception qui est de niveau conceptuel le plus bas étant celle de la mesure en termes de mesure absolue. Nous parlerons par la suite de **niveaux de conceptualisation** quand nous nous référerons à ces quatre catégories.

3.4. La caractérisation de la population testée

Afin de pouvoir contrôler la variable individuelle nous devons :

- choisir des sujets dont les connaissances antérieures sont le plus possible équivalentes ;
- contrôler le niveau d'études, la nature du diplôme obtenu, la familiarité avec la situation proposée ;
- choisir des tests permettant d'évaluer les capacités intellectuelles mises en jeu dans la tâche proposée.

3.4.1. *Choix des sujets testés*

Nous avons choisi des étudiants d'université qui ont le même niveau scientifique de base (bac S) et la même expérience en ce qui concerne les TP de physique (étudiants débutants à l'université).

Nous avons fait appel à des volontaires et nous avons reçu une réponse positive des étudiants dont la répartition par filière universitaire est la suivante :

- 4 étudiants en première année de DEUG à dominante mathématique et physique,
- 4 étudiants de première année de DEUG à dominante sciences de la vie,
- 8 étudiants en DEUG activités physiques et sportives.

Ces étudiants ont été répartis de façon aléatoire pour suivre les différents protocoles que nous avons construits.

3.4.2. Contrôle des différences individuelles

Afin de prendre en compte les différences individuelles, les étudiants ont été soumis à trois tests psychologiques (annexe 2) :

- le Passalong d'Alexander (1969) est une épreuve qui évalue la capacité à résoudre des problèmes pratiques en prenant conscience des démarches utilisées afin de les appliquer à de nouveaux problèmes ;
- le test de formation de concepts de Hanfmann-Kasanin évalue la capacité à former un nouveau concept par abstraction tout en résistant à des automatismes perceptifs ;
- le test des similitudes de la WAIS (Wechsler Adult Intelligence Scale) évalue la capacité de verbalisation des concepts et une aptitude à la généralisation verbale.

Le premier objectif de ces tests est de préciser le niveau de départ des sujets dans des aptitudes liées à la métacognition. Le second est d'éventuellement faire apparaître des efficacités différentes des pratiques pédagogiques selon le fonctionnement cognitif des sujets. Le troisième est de préciser la nature cognitive réelle de la tâche proposée. On peut, par exemple, estimer qu'une tâche qui est mieux réalisée par les sujets qui possèdent le plus de vocabulaire est une tâche mettant en jeu des compétences verbales.

4. RÉSULTATS

4.1. Les profils cognitifs

Afin d'évaluer la part des différences individuelles dans l'analyse de l'efficacité des différents protocoles, nous avons regroupé les scores obtenus aux différents tests psychologiques dans le tableau 1.

PO1 signifie l'étudiant n° 1 des étudiants ayant eu le protocole 0 ; P13 l'étudiant n° 3 des étudiants ayant eu le protocole 1, etc.

Étudiant	P01	P02	P03	P11	P12	P13	P21	P22	P23	P24	P31	P32	P33	P41	P42	P43
Passalong	26	32	41	11	23	23	27	28	54	25	22	49	17	22	22	22
Moyenne	33			19			33.5			29.3			22			
Concepts	0	4	14	7	9	10	9	14	13	12	13	7	18	16	11	1
Moyenne	6			8.67			12			12.67			9.3			
Similitudes	21	20	20	22	21	19	22	21	20	21	19	22	16	19	18	22
Moyenne	20.33			20.66			2.1			19			19.66			

Tableau 1. Notes obtenues par les étudiants aux différents tests psychologiques

Remarque : une analyse de la variance montre qu'il n'y a aucune différence significative entre les profils cognitifs d'un protocole à l'autre.

4.2. Identification des niveaux de performance

Rappel des trois niveaux de performance :

- niveau 1 pour ceux qui font des mesures directes sans méthode et qui échouent ;
- niveau 2 pour ceux qui appliquent une méthode de mesure analogue à celle trouvée pour l'air seul mais qui échouent à l'épreuve ;
- niveau 3 pour ceux qui réussissent.

Nous avons regroupé les résultats des étudiants dans le tableau ci-dessous.

Étudiant	P01	P02	P03	P11	P12	P13	P21	P22	P23	P24	P31	P32	P33	P41	P42	P43
Niveau de performance	1	1	1	2	1	1	1	1	3	1	3	1	2	2	1	1
Niveau moyen par protocole	1			1.33			1.5			2			1.33			

Tableau 2. Niveaux de performance atteints par les étudiants aux tests d'évaluation finale

Une analyse de la variance montre qu'il n'y a aucune différence significative entre les niveaux de performance d'un protocole à l'autre.

Bilan global du classement :

- niveau 1 : 11 étudiants soit 69 % de l'effectif,
- niveau 2 : 3 étudiants soit 19 %,
- niveau 3 : 2 étudiants soit 12 %.

4.3. Catégorisation des comportements observés

Nous avons recueilli un ensemble de données qui permet de caractériser l'ensemble des comportements et qui ne privilégie pas tel ou tel comportement qui aurait pu être favorisé par tel ou tel mode de guidage.

Nous avons distingué :

- les évocations de souvenirs d'actions rencontrées lors de l'apprentissage ;
- les comportements d'action (comme : bouge les miroirs, calcule un temps, etc.)

4.3.1. Étude des souvenirs évoqués

Lorsqu'un enseignant guide fortement l'étudiant, il a le présupposé qu'un bon guidage favorise la mémorisation des actions pertinentes. Cette attitude est à rapprocher de l'idée que l'apprentissage passe par la mémorisation de la situation d'apprentissage. Dans cette conception, on peut penser que, plus un étudiant mémorise d'actions, plus il est capable de réussir au

test. Pour chaque étudiant nous avons comptabilisé le nombre total de souvenirs d'actions évoqués (tableau 3).

Étudiant	P01	P02	P03	P11	P12	P13	P21	P22	P23	P24	P31	P32	P33	P41	P42	P43
Nombre de souvenirs	0	0	0	5	1	5	2	2	1	3	4	3	4	5	1	1
Nombre moyen par protocole	0			3.67			2			3.67			2.33			

Tableau 3. Nombre de souvenirs (de la phase d'apprentissage) évoqués par les étudiants lors du test d'évaluation

4.3.2 Regroupement des comportements d'action

Rappel des quatre niveaux de conceptualisation que nous avons définis (§ 3.3.4) :

- niveau 1, mesure absolue,
- niveau 2, mesure relative,
- niveau 3, mesure par différence,
- niveau 4, mesure par référence.

Nous avons listé l'ensemble des comportements que nous avons observés (total de 44) et chacun des chercheurs a attribué une catégorie (niveau de conceptualisation) à chacun de ces comportements. Nous avons ensuite retenu les comportements pour lesquels les deux chercheurs étaient d'accord quant à leur catégorisation *a priori* (total de 23). Le regroupement de ces comportements dans nos catégories a été validé par une analyse discriminante¹. Les étudiants ont ensuite été classés en leur affectant comme niveau celui correspondant à leur comportement de niveau de conception le plus élevé. Nous avons regroupé ces résultats dans le tableau 4.

Étudiant	P01	P02	P03	P11	P12	P13	P21	P22	P23	P24	P31	P32	P33	P41	P42	P43
Niveau de conceptualisation	2	1	1	3	1	1	1	2	4	3	4	1	4	3	1	1
Moyenne par protocole	1.33			1.67			2.5			3			1.67			

Tableau 4. Niveau de conceptualisation atteint par les étudiants au test d'évaluation

(1) Remarque sur l'analyse factorielle discriminante.

L'analyse factorielle discriminante permet de trouver les critères qui séparent le mieux un certain nombre de groupes d'individus ou de variables. La méthode consiste à vérifier si les catégories choisies *a priori* discriminent effectivement les comportements observés.

Dans le cas présent l'analyse discriminante, en mettant en relation les catégories (niveau 1, niveau 2, etc.) et les comportements (voir annexe 3), a classé 100 % des comportements dans la catégorie prévue.

4.4. Caractérisation du test d'évaluation finale

4.4.1. Mise en relation de l'ensemble des variables individuelles

Pour identifier les compétences mobilisées par le test d'évaluation nous avons effectué un calcul de corrélation entre l'ensemble des variables individuelles que nous avons regroupées dans le tableau 5.

	Niveau de performance	Nombre de souvenirs	Niveau de conceptualisation	Passalong	Concept	Similitudes
Niveau de performance	1	0.39	0.86	0.06	0.43	-0.34
Nombre de souvenirs	0.39	1	0.46	-0.44	0.43	-0.23
Niveau de conceptualisation	0.86	0.46	1	-0.11	0.52	-0.39
Passalong	0.06	-0.44	-0.11	1	0.02	0.20
Concept	0.43	0.43	0.52	0.02	1	-0.62
Similitudes	-0.34	-0.23	-0.39	0.2	-0.62	1

Tableau 5. **Corrélations entre les variables et les performances**

Remarque : les chiffres en gras indiquent une corrélation significative au seuil de 0.05 entre les données.

4.4.2. C'est une tâche de transfert

À la fin de la tâche d'évaluation aucun étudiant n'a pu rappeler complètement ce qu'il avait fait lors de l'activité d'apprentissage. Nous avons même remarqué que les étudiants rappelaient des souvenirs partiels liés à des actions particulières, mais jamais sans décrire un ensemble cohérent d'actions ayant conduit à une mesure.

Ceci nous amène à dire que la tâche d'évaluation n'est pas une tâche qui fait appel uniquement à des capacités de mémorisation épisodique, ce n'est donc pas une tâche de reconnaissance de situations mais une tâche de transfert de compétences. En cela elle répond bien à notre premier critère concernant la construction d'une situation d'évaluation (§3).

4.4.3. C'est une tâche de conceptualisation

Nous avons corrélé les résultats aux tests psychologiques et les niveaux de performance atteints par les étudiants, nous avons obtenu les résultats suivants :

- corrélation Passalong et niveau de performance, $r = 0.06$;
- corrélation similitude et niveau de performance, $r = -0.34$;
- corrélation conceptualisation et niveau de performance, $r = 0.43$.

Il y a une corrélation positive de $r = 0.86$ ($p < 0.05$) entre le niveau de performance et le niveau de conceptualisation. La tâche d'évaluation pourrait

donc mettre en œuvre des capacités de conceptualisation. Cette hypothèse est renforcée par le fait que l'on trouve une corrélation faible ($r=0.43$), mais significative au seuil de 0.10, entre le test sur les capacités de conceptualisation et le niveau de performance atteint par les étudiants. La réussite à la tâche d'évaluation ne s'explique donc pas par une simple mémorisation, elle passe par la construction d'une représentation de la situation et donc par une évolution des concepts liés à la mesure.

4.5. Mise en relation entre niveau de conceptualisation, nombre de souvenirs et performance

Par une analyse discriminante, nous avons vérifié que l'on pouvait retrouver le niveau de performance au test d'évaluation à partir des comportements d'action observés et des souvenirs évoqués. Les résultats de l'analyse montrent qu'avec ces indicateurs le niveau de performance au test d'évaluation est prévisible correctement (voir annexe 4).

Cependant la simple description en termes de performance ne permet pas, à elle seule, de comparer les modes de guidage car nous ne savons pas ce qui des modes de guidage et ce qui des capacités intellectuelles rend compte de ces performances.

5. EFFET DES DIFFÉRENTS MODES DE GUIDAGE

Nous avons vu dans le paragraphe précédent que l'on pouvait prédire le niveau de performance à partir des comportements d'action et des souvenirs évoqués. Il nous a semblé intéressant de vérifier si ces indicateurs étaient dépendants des protocoles proposés.

5.1. Relation entre les différents modes de guidage et les souvenirs évoqués

Dans le paragraphe 4.2.1., nous avons fait l'hypothèse qu'un guidage serré permettait de mémoriser les actions pertinentes. Afin de vérifier cette hypothèse, nous avons regroupé :

- les protocoles qui proposent un guidage serré c'est-à-dire un guidage sur les actions ; ce sont les protocoles 1, 3 et 4 ;
- les protocoles qui ne guident pas les actions (0 et 2).

Nous avons compté pour chacun de ces groupes la moyenne du nombre de souvenirs évoqués ($m=3.22$ pour les protocoles à guidage serré et $m=1.14$ pour les protocoles à guidage non serré). À partir d'un t de

Student², nous avons trouvé une différence significative (**t=2.63 à p=0.02**) : les protocoles à guidage serré favorisant la rétention des actions.

Mais nous avons vu que les souvenirs seuls ne permettent pas d'interpréter la progression des étudiants (corrélation non significative), ce qui signifie qu'un guidage sur les seules actions ne suffit pas à faire progresser les étudiants ou autrement dit : un guidage pour la réussite n'est pas suffisant.

5.2. Relation entre les différents modes de guidage et les niveaux de conceptualisation

Dans le paragraphe 4.2.1., nous avons fait l'hypothèse que les protocoles 2 et 3 devaient favoriser la prise de conscience du problème à résoudre en invitant les étudiants à verbaliser leurs démarches, faisant ainsi l'hypothèse que cette prise de conscience fait évoluer leur niveau de conception.

Un test de Student laisse penser que les protocoles qui font verbaliser (moyenne du niveau de conception : m=2.7) permettent aux étudiants d'atteindre un niveau de conceptualisation plus élevé que les protocoles qui ne font pas verbaliser (0,1 et 4) (m=1.6). La différence n'est toutefois significative qu'à **0.06 (t=2.05)**.

5.3. Relation entre les différents modes de guidage, les différences individuelles et les niveaux de conceptualisation

Nous avons vu (§5) qu'il existe une corrélation significative entre la réussite au test de conceptualisation et le niveau de conception atteint par l'étudiant (**r=0.51**). De plus nous venons de montrer que les protocoles qui font verbaliser ont un effet sur le niveau de conception atteint par les étudiants. Il nous a alors paru intéressant de voir quelle est la part des capacités de conceptualisation des étudiants et celle du protocole sur le niveau de conception atteint. Nous avons séparé les étudiants en deux groupes : ceux qui ont des capacités de conceptualisation inférieures à la valeur médiane (notés **concept -**) et ceux qui ont une note supérieure à la valeur médiane (notés **concept +**). Nous avons regroupé les résultats dans le tableau 6, dans lequel nous avons indiqué les niveaux de conception atteints.

	Protocoles qui ne font pas verbaliser (0,1,4)	Protocoles qui font verbaliser (2,3)
Étudiants de niveau concept -	1,1,1,1,2,3	1,1
Étudiants de niveau concept +	1,1,3	2,3,4,4,4

Tableau 6. Niveau de conception (de la mesure) atteint par les étudiants en fonction du type de protocole suivi et de leur niveau de conceptualisation

(2) Chaque test de Student a été doublé par un test de Mann-Whitney qui a donné les mêmes résultats.

Une analyse de la variance montre que :

- les différences liées aux capacités de conceptualisation sont significatives ($F=9.7$, $p<0.01$) ;
- les différences liées aux protocoles sont également significatives ($F=6.8$, $p<0.01$) ;
- l'interaction entre les protocoles et les niveaux de conceptualisation est également significative ($F=7.5$, $p<0.01$).

Pour les étudiants ayant des capacités de conceptualisation inférieures à la médiane, un test de Student montre qu'il n'y a pas de différence (en ce qui concerne le niveau de conception) entre les protocoles.

En revanche, il existe une différence significative à $p= 0.05$ ($t=2.4$) entre les protocoles en ce qui concerne la population d'étudiants ayant des capacités de conceptualisation supérieures à la médiane.

Les protocoles qui font verbaliser ont un effet positif plus grand sur les étudiants de niveau conceptuel supérieur que sur les étudiants de niveau conceptuel moins élevé ($p=0.02$ pour $t=3.58$). Ce qui n'est pas le cas pour les protocoles qui ne font pas verbaliser.

Les protocoles qui font verbaliser n'ont donc un effet positif sur le niveau de conception atteint que pour les étudiants dont les capacités de conceptualisation sont les plus élevées.

5.4. Relation entre les différents modes de guidage, les différences individuelles et les niveaux de performance

Onze étudiants sur 16 ayant échoué au test d'évaluation, il n'est pas possible de mettre en évidence des différences significatives de performance à partir des effets des protocoles ou des différences individuelles.

Cependant nous pouvons remarquer que les étudiants qui ont réussi sont ceux qui ont eu un protocole de verbalisation et qui avaient un bon niveau de conceptualisation.

6. ANALYSE ET DISCUSSION

Nous voulions comparer l'efficacité de modes de guidage différents issus de modèles théoriques différents en reliant la mesure objective des performances réalisées par les étudiants au cours d'une épreuve de contrôle et l'évolution de leurs représentations par rapport au problème à résoudre. Cela s'est traduit par :

- la mise au point d'une mesure de performance objective et contrôlée dans une situation d'évaluation acceptable pour plusieurs conceptions de l'apprentissage (étude quantitative) ;

- le contrôle de variables objectivables (étude clinique) qui sont susceptibles d'expliquer la progression des étudiants pour tous les protocoles ;
- la mise en relation des performances obtenues et des comportements observés et catégorisés à partir de chaque modèle d'apprentissage.

6.1. L'apport d'une activité de transfert pour une mesure objective des apprentissages

Les protocoles 3 et 4 ont permis à tous les étudiants de réussir à mesurer la vitesse de la lumière dans les trois différentes situations d'apprentissage. Par contre, pour les protocoles 0 et 2, aucun étudiant n'a réussi à résoudre les trois problèmes proposés. À ce niveau on peut en déduire que les protocoles 3 et 4 ont été les plus efficaces en termes de performance des étudiants. On serait alors tenté d'en conclure que c'est le signe de l'acquisition de compétences. Or, quand on propose aux étudiants une activité qui nécessite un transfert des compétences acquises, on ne retrouve pas les différences de performance apparues lors de l'apprentissage (11 étudiants sur 16 échouent totalement à l'épreuve).

Est-ce parce que :

- les compétences acquises lors des différents apprentissages ne sont pas celles requises pour le test,
- la situation de test ne permet pas de réactiver les compétences acquises,
- le guidage proposé dans les protocoles (et en particulier les protocoles 3 et 4) n'a pas permis de faire acquérir des compétences aux étudiants ?

Une analyse clinique du comportement des étudiants pendant l'évaluation permet de mieux évaluer les compétences acquises.

6.2. L'apport d'une description du comportement des étudiants pendant l'évaluation

Pour savoir si des compétences ont été acquises lors des différentes situations d'apprentissage, nous avons recherché des comportements caractéristiques de ce qui était attendu des protocoles. Nous avons pu ainsi définir deux types de descripteurs permettant de caractériser le comportement des étudiants pendant l'évaluation :

- des souvenirs associés à la situation d'apprentissage,
- des comportements significatifs de leur niveau de conceptualisation de la tâche ou du problème à résoudre.

Ces descripteurs semblent pertinents pour comprendre les résultats obtenus à l'évaluation puisqu'ils nous ont permis de retrouver les performances à partir d'une analyse discriminante.

Il nous a paru intéressant d'utiliser l'analyse discriminante de comportements cliniques pour garder l'aspect qualitatif de cette démarche compréhensive tout en vérifiant quantitativement leur lien avec la performance à l'évaluation. Elle montre par exemple que la quantité de souvenirs évoqués ou le niveau de conception de la mesure ne peuvent, pris séparément, prédire la performance au test alors que, s'ils sont associés, la prédiction est possible.

Ces descripteurs permettent de caractériser le rôle joué par les protocoles : les protocoles proposant un guidage serré (protocoles 1, 3, 4) semblent favoriser la rétention des actions, les protocoles faisant verbaliser (2, 3) pourraient agir sur le niveau de conception de la mesure et favoriser ainsi la construction d'une représentation pertinente de la situation. Toutefois la rétention des actions n'est pas significativement corrélée à la performance tandis que le niveau de conception l'est. Un guidage semble donc nécessaire mais lorsqu'il porte sur les seules actions, il est alors inefficace. Pour qu'un guidage serré sur les actions soit efficace, il serait nécessaire de le faire suivre par une réflexion guidée. Ce résultat est à rapprocher du rôle primordial du « *debriefing* » que Pastré (1999) souligne dans la conceptualisation.

La simple mesure de l'efficacité en termes de performance s'est montrée insuffisante pour pouvoir mettre en évidence des différences entre les protocoles, cependant elle est nécessaire pour déterminer quels sont les descripteurs pertinents pour évaluer l'apprentissage.

La confrontation d'indicateurs cliniques s'inscrivant dans des modèles d'apprentissage identifiés et de performances à une épreuve de transfert peuvent permettre d'objectiver les compétences réutilisées par les étudiants.

6.3. L'apport d'une prise en compte des différences individuelles

Nous avons cherché à caractériser les capacités cognitives mobilisées pour résoudre les problèmes que nous avons posés, en particulier nous avons cherché des indicateurs pour différencier les « transféreurs » et les « non-transféreurs ». Nous n'avons trouvé aucune corrélation significative entre les performances observées et ces capacités. Seul le test de formation de concept (Hanfmann-Kasanin) est en corrélation positive avec le niveau de conception des étudiants. Ce dernier ayant une corrélation significative avec les performances au test d'évaluation qui fait sans doute appel à des capacités de conceptualisation.

Nous avons retenu des capacités de généralisation verbale (test des similitudes de la WAIS) : on pouvait s'attendre à ce que cette capacité soit sollicitée par les situations de verbalisation et que l'on retrouve une corrélation

positive avec les performances finales. Or nous n'avons pas trouvé de corrélation significative entre ce test et la mesure des performances, il existe même une corrélation négative significative avec le test de formation de concepts. Nous avons également évalué la capacité à résoudre des problèmes pratiques en prenant conscience des démarches utilisées (le Passalong d'Alexander) : nous pensions que ce test était un bon moyen d'évaluer les capacités de métacognition des étudiants (Brown & Campione, 1990). On pouvait s'attendre à ce que cette capacité soit mise en œuvre pour réaliser les protocoles qui guident sur les procédures. Nous n'avons trouvé aucune corrélation significative avec les performances ou les descripteurs utilisés.

Toutefois, il reste que l'analyse des compétences et des aptitudes des étudiants avant enseignement facilite la compréhension des mécanismes qui expliquent l'efficacité plus ou moins grande d'un dispositif d'enseignement.

En effet, seuls les étudiants dont le niveau conceptuel était le plus élevé ont profité des protocoles qui font verbaliser. Aucun protocole n'a permis de faire réussir les étudiants de faible niveau conceptuel. Tous les protocoles ne profitent donc pas de la même façon à tous les étudiants. L'efficacité des protocoles 2 et 3 pour développer le niveau de conceptualisation de la mesure dépend du niveau de conceptualisation des étudiants. Ce constat nous amène à nous poser des questions sur notre dispositif expérimental :

- est-ce que la tâche de transfert était trop éloignée de la situation d'apprentissage ?
- dans quelle mesure faudrait-il améliorer les protocoles proposés ? En particulier, comme un certain nombre d'études en psychologie cognitive l'ont montré (Gick & Holyoak, 1987), un guidage portant sur le transfert (transfert informé) peut améliorer le transfert des performances.

6.4. Discussion

6.4.1. Le choix du test d'évaluation

Ce choix a pu introduire un biais dans les résultats obtenus. Nous avons supprimé les repères physiques (comme le support gradué avec son zéro des distances), nous avons multiplié les difficultés (deux milieux au lieu d'un, forme différente de l'objet, etc.) Situation telle que si l'étudiant n'avait pas construit le concept de situation de référence, il ne pouvait pas réussir. Cela pose le problème de la distance entre la situation d'évaluation et la situation d'apprentissage et par là même la nature de l'apprentissage visé. Par exemple une plus grande proximité de formes d'objets aurait pu favoriser des raisonnements par analogie et valoriser ainsi les protocoles procéduraux. Cette proximité nous aurait peut-être permis de trouver des différences

significatives entre les protocoles 2 et 3. En effet, le protocole 3 qui provoque une verbalisation après un guidage procédural aurait pu être plus efficace.

Nous avons informé les étudiants que nous allions leur demander, lors de la deuxième séance, de résoudre un problème nouveau mais analogue à ceux rencontrés au cours de la phase d'apprentissage. Cependant cette information n'a été rappelée ni au cours du guidage ni au cours de la verbalisation (pour les protocoles 2 et 3) ; nous avons ainsi choisi d'évaluer les apprentissages en misant davantage sur un transfert spontané (Gick & Holyoak, 1987) que sur un transfert informé, estimant que ce type de transfert correspond au contrat didactique à l'université et qu'il est connu des étudiants. Toutefois, en supprimant un certain nombre de repères, nous nous sommes éloignés de la situation ordinaire de l'évaluation universitaire. En effet, l'évaluation des TP se fait souvent en demandant à l'étudiant de reproduire un exercice tiré au sort parmi un lot d'exercices réalisés. Les étudiants ont généralement révisé leurs TP et ont eu l'occasion de prendre conscience qu'ils vont devoir utiliser ce qu'ils ont appris, ce qui est une manière d'informer sur le transfert. Si nous avons augmenté le délai entre la séquence d'apprentissage et le test d'évaluation (15 jours par exemple), une réactivation intermédiaire aurait facilité la réorganisation des informations, leur généralisation, et la mémorisation des points essentiels. Cette réactivation aurait pris la forme d'un questionnement du type « *que faut-il retenir d'essentiel concernant l'expérience que vous avez faite ?* ». Cette réactivation aurait pu simuler l'activité cognitive de l'étudiant qui prépare un partiel.

Le transfert important qui a été exigé a donc favorisé l'activité de conceptualisation aux dépens de la réussite, l'activité d'abstraction aux dépens de la généralisation. Une plus grande proximité, une révision aurait permis de solliciter les capacités de mémorisation et donc la réussite et la généralisation. La situation d'évaluation n'est donc pas complètement neutre. Elle est à juger à l'aune des objectifs universitaires. Un tel transfert doit-il être exigé, est-il excessif ? La réponse à cette question détermine la valeur que l'on attribue à la mémorisation ou à la conceptualisation.

6.4.2. La qualité des protocoles proposés

Afin que tous les étudiants disposent des mêmes informations sur leur progression, nous nous sommes interdits de leur donner des indications sur leurs résultats. Cette absence de feed-back a sans doute diminué l'efficacité des protocoles, elle n'a pas permis aux étudiants de renforcer les conduites adaptées, de repérer les critères pertinents, de hiérarchiser les informations.

Les deux protocoles qui font verbaliser ne permettent pas d'améliorer la performance des étudiants, même s'ils contribuent à améliorer leur niveau de conception. La qualité du questionnement, la formulation de la règle géné-

rale auraient pu être améliorées. Nous avons remarqué que toutes les questions n'étaient pas claires et que des étudiants avaient des difficultés à traduire la règle en actions. On peut donc penser que le type de questionnement n'était pas le plus efficace en ce sens qu'il n'a pas permis de faire passer les étudiants à une prise de conscience de la situation suffisamment abstraite pour leur permettre un transfert conduisant à la réussite. Comment peut-on faire pour que les protocoles faisant appel à la verbalisation soient plus efficaces ? L'énoncé de la règle n'a pas été pertinent pour le protocole 2 et les questions posées n'ont pas suffisamment aidé les étudiants à construire une représentation abstraite de la situation.

7. CONCLUSION

À partir de l'exemple des travaux pratiques de physique en première année de DEUG, nous avons montré que la comparaison des pratiques d'enseignement nécessite la prise en compte de la mesure objective des performances, d'une étude clinique des comportements des sujets pendant le test et d'une mesure de capacités intellectuelles. Nous avons ainsi pu mettre en évidence qu'un non guidage ne permettait pas de réaliser des apprentissages et qu'un guidage serré en suivant des consignes opératoires n'est pas inefficace contrairement à un avis largement répandu. Cependant ce guidage procédural doit être accompagné d'une activité de verbalisation concernant les problèmes à résoudre et les démarches utilisées. Cette démarche semble favoriser les étudiants qui conceptualisent le mieux.

Nous avons construit deux protocoles qui proposent une activité de verbalisation. Un des protocoles demande à l'étudiant d'explicitier la compréhension qu'il a de la tâche à réaliser, et de la solution à appliquer. Il fait l'hypothèse implicite que la compréhension doit précéder l'action et que c'est elle qui guide le sujet vers la réussite (démarche descendante). L'autre protocole guide l'action pour obtenir une réussite et propose une activité de verbalisation sur les procédures utilisées pour réussir (conditions de la réussite). Il fait en cela l'hypothèse que la construction d'une représentation pertinente s'appuie sur le contexte de l'action et qu'elle s'en abstrait par une activité de comparaison entre des contextes analogues.

L'efficacité du guidage reprend la question soulevée par Piaget (1974) sur les relations entre réussir et comprendre : s'il y a des réussites sans compréhension, la réussite n'est pas le signe d'une compréhension. Comprendre c'est réorganiser le réel à un autre niveau : celui de la représentation. Dans notre étude, on peut se demander si l'apprentissage est la généralisation d'actions ponctuelles ou bien l'abstraction d'invariants à partir de contextes multiples.

La question est alors : pour augmenter l'efficacité des guidages, faut-il favoriser les activités qui au départ privilégient la compréhension des règles

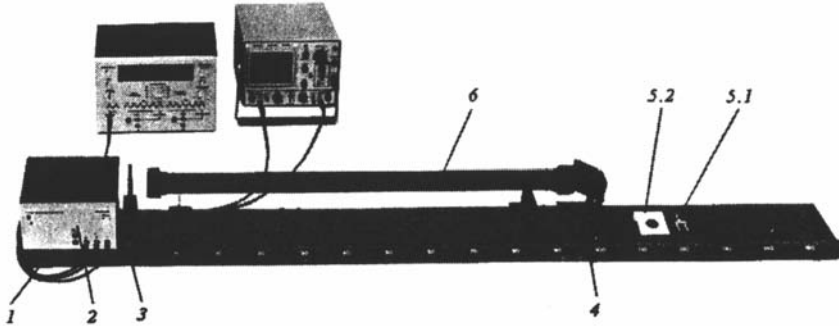
d'action à utiliser, (qui serviront de guide pour la réussite dans des contextes variés), ou bien faut-il guider l'action dans un premier temps puis faire analyser à l'apprenant les causes de ses réussites et de ses échecs pour l'aider à élaborer des règles d'action ? Il sera donc intéressant de comparer ces deux protocoles en modifiant le contenu des activités de verbalisation et en faisant varier la distance entre les situations d'apprentissages et d'évaluation. C'est dans cette direction que nous poursuivons cette recherche.

BIBLIOGRAPHIE

- ALEXANDER W.-P. (1969). *Une échelle de performance pour la mesure de l'intelligence pratique*. Paris, Centre de Psychologie Appliquée.
- BENEY M. (1998). *Contribution à l'analyse des phases manipulatoires des travaux pratiques de physique en premier cycle universitaire. Les apprentissages possibles à travers l'action*. Thèse de doctorat, université de Paris-Sud, Orsay.
- BENEY M. (2001). Entre réussir et comprendre ou de l'effet des consignes opératoires sur la compréhension des procédures de mesurage en TP de physique de premier cycle universitaire. *Didaskalia*, n° 19, pp. 9-37.
- BRY X. (1996). *Analyses factorielles multiples*. Paris, Economica.
- BROWN J.S. (1989). Toward a new epistemology for learning. In C. Frasson & J. Gauthier (éds), *Intelligent tutoring system system : at the crossroads of IA and Education*. Norwood, NJ, Ablex Publishing corporation, pp. 266-281.
- BROWN A.-L. & CAMPIONE J.-C. (1990). Communities of learning and thinking, or a context by any other name. *Contributions to Human Development*. n° 21, pp. 108-126.
- CAUDILL M. & BUTLER C. (1993). *Understanding Neural Networks*. Cambridge, M.I.T. Press.
- CLAUGH M.-P. & CLARK R. (1994). Cookbooks and constructivism – a better approach to laboratory activities. *The science Teacher*, vol. 61, n° 2, pp 34-37.
- CHEVALLARD Y. (1992). Concepts fondamentaux de la didactique : perspectives apportées par une approche anthropologique. *Recherches en didactique des mathématiques*, vol. 12.
- DARLEY B. (1996). Exemple d'une transposition didactique de la démarche scientifique dans un TP de biologie en DEUG deuxième année. *Didaskalia*, n° 9, pp 31-56.
- DORE F.-Y. & MERCIER P. (1992). *Les fondements de l'apprentissage*. Lille, Presses Universitaires de Lille.
- EDELMAN G.-M. (1992). *Biologie de la conscience*. Paris, Odile Jacob.
- GANGOLI S.-G. & GURUMURTHY C. (1995). A study of the effectiveness of a guided open-ended approach to students experiments. *International Journal of Science Education*, vol. 17, n° 22, pp. 233-241.
- GIBSON J.-J. (1979). *The Ecological Approach to Visual Perception*. London, Lawrence Erlbaum Associates.
- GICK M.-L. & HOLYOAK K.J. (1983). Schema induction and analogical transfer. *Cognitive Psychology*, n° 15, pp.1-38.
- GUILLON A. (1996). *Étude épistémologique et didactique de l'activité expérimentale en vue d'un enseignement et de l'apprentissage des démarches du physicien, dans le cadre des travaux pratiques de première année et deuxième année d'université*. Thèse de doctorat, université de Paris-Sud, Orsay.

- GUINARD J.-Y. (1995). *De la mémoire épisodique à la construction des connaissances scolaires*. Thèse de doctorat, université de Rennes.
- HANFMANN-KASANIN (1952). *Test de formation de concepts*. Paris, Centre de Psychologie appliquée.
- LAKS B. (1996). *Langage et cognition*. Paris, Hermes.
- LAVE J. (1988). *Cognition in practice*. Cambridge, Cambridge University Press.
- LE NY J.-F. (1972). *Le conditionnement et l'apprentissage*. Paris, PUF.
- NEWEL A. & SIMON H.A. (1972). *Human Problem Solving*. New York, Prentice Hall.
- PASTRÉ P. (1999). La conceptualisation dans l'action : bilan et nouvelles perspectives. *Education permanente*, n° 139, pp.13-35.
- PATEYRON B. (1997). *Mobilisation des savoirs dans la formation professionnelle, cas du brevet de technicien supérieur en contrôle industriel et régulation automatique*. Thèse de doctorat, université Claude Bernard, Lyon I.
- PIAGET J. (1974). *Réussir et comprendre*. Paris, PUF.
- PIAGET J. (1975). *L'équilibration problème central du développement*. Paris, PUF.
- PIAGET J., HENRIQUES G. & ASCHER E. (1990). *Morphismes et catégories : comparer et transformer*. Neuchatel, Dalachaux et Niestlé.
- PSILLOS D., NIEDERRER H. & SÉRÉ M.-G. (1998). *The mains results of case studies : about the effectiveness of different types of labwork*. Document de travail du projet européen : Labwork in Science Education (DGXII). Orsay, université Paris-Sud.
- REUHLIN M. (1977). *Psychologie*. Paris, PUF.
- ROTH W.-M. (1996). Where is the context in contextual ? : mathematical practices and products in grade 8 students' answers to story problems. *Cognition and instruction*, n° 14, pp. 487-527.
- RICHARD J.-F. (1990). *Les activités mentales*. Paris, Armand Colin.
- SCHMIDT R.A. (1993). *Apprentissage moteur et performance*. Paris, Vigot.
- TARPY R.-M. (1982). *Basic principles of learning*. Glenview (USA), Scott Foresman and company.
- TOLMAN E.-C. (1948). *Cognitive map in rats and men*. New York, Appleton-Century Crofts.
- THORNDIKE E.-L. (1913). *The Psychology of Learning*. New York, Teachers College.
- VYGOTSKY L.S. (1997). *Pensée et langage*. Paris, La Dispute.
- WESCHLER D. (1955). *Échelle d'intelligence de Weschler pour adultes*. Paris, C.P.A.
- WONNACOTT T.H. & WONNACOTT R.J. (1995). *Statistiques*. Paris, Economica.
- Pour le traitement statistique des données nous nous sommes servis du logiciel statbox. Grimmer Logiciels, rue de Clignancourt 75018 Paris.

ANNEXE 1



L'appareil complet de mesure de la vitesse de la lumière comprend les éléments suivants :

- 1 - le banc d'optique (pour les mesures de distances),
- 3 - des lentilles sur leurs pieds magnétiques (2 pièces),
- 4 - des miroirs de renvoi,
- 5 - une cuvette tubulaire,
- 6 - un prisme en verre acrylique.

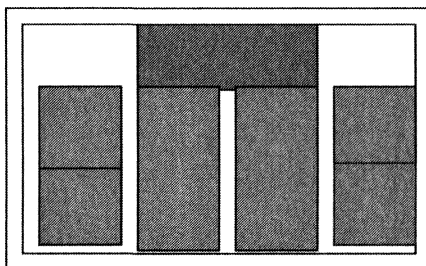
ANNEXE 2

Les tests psychologiques

Descriptif des tests psychologiques :

Le « Passalong » est une épreuve de l'échelle de performance pour la mesure de l'intelligence pratique de W.P. Alexander (1969). Cette échelle construite en 1946 avait pour but de repérer les élèves de l'école primaire qui auraient les aptitudes pour suivre un enseignement secondaire technique.

Le « Passalong » est une épreuve de résolution de problèmes dans une conduite de détour. Le sujet rencontre des difficultés progressives qui sont autant de marches pour résoudre les problèmes suivants. Pour réussir, le sujet doit élaborer des sous-buts en ramenant le problème nouveau à un problème connu, c'est-à-dire, résolu précédemment. Pour reconnaître l'ancien problème, le sujet doit avoir pris conscience des méthodes qu'il a utilisées pour réussir. Il s'agit donc d'une connaissance sur l'action. Étant donné le niveau des premiers exercices, nous avons réduit l'épreuve aux quatre derniers problèmes.



Le test de formation de concepts de Hanfmann-Kasanin est une épreuve de catégorisation de petites pièces de bois de formes et de couleurs variées. Il s'agit de construire 4 catégories logiques pour regrouper l'ensemble des morceaux de bois. La difficulté tient au fait que les indices les plus prégnants, la couleur et la forme ne sont pas pertinents dans ce cas. Il s'agit donc de lutter contre des automatismes perceptifs pour construire de nouvelles catégories à partir de deux éléments moins prégnants : la surface de la pièce de bois et son épaisseur. Cette capacité à résister à ses automatismes perceptifs, semble mettre en évidence l'importance des mécanismes d'abstraction et de créativité.

Le test des similitudes de la WAIS est une épreuve de conceptualisation verbale. Il s'agit de retrouver la catégorie commune aux deux notions proposées, par exemple foule et tas. Le support est différent du test précédent et les catégories sont moins à construire qu'à rechercher en mémoire.

ANNEXE 3

Comportements d'action	Niveau de conception attribué aux différents comportements d'action
mesure absolue dans l'air	1
mesure absolue dans la résine	1
mesure absolue dans l'eau	1
calcule le temps dans la partie air	2
colle l'ensemble : bloc, lentilles, miroir	2
évalue le trajet de départ à 10 cm	2
déplace les miroirs de la longueur totale	1
déplace les miroirs de la longueur de la résine	3
déplace le bloc de la longueur de l'eau	1
déplace le miroir d'une distance égale à la moitié de la longueur du bloc de résine	3
pour l'eau il met en phase en gardant le bloc de résine.....	4
calcule le temps mis par la lumière pour la longueur du bloc	4
mettre le bloc c'est enlever de l'air	4

ANNEXE 4

Analyse discriminante mettant en relation comportements et souvenirs pour expliquer le niveau de performance des étudiants

Individu	Groupe initial	Facteur 1	Facteur 2	Groupe estimé
P01	1	- 0,02	- 1,7	1
P02	1	0	0	1
P03	1	- 0,02	0,9	1
P11	2	0,03	13,8	2
P12	1	- 0,02	0,0	1
P13	1	- 0,012	- 0,8	1
P21	1	- 0,02	0,04	1
P22	1	- 0,017	0,05	1
P23	3	- 5640	2,5	3
P24	1	- 0,02	- 0,75	1
P31	3	- 5640	2,4	3
P32	1	- 0,017	- 0,82	1
P33	2	0,035	14,6	2
P41	2	0,03	14,6	2
P42	1	- 0,026082	- 2,576662	1
P43	1	- 0,025748	- 2,540794	1

Comportements

Niveau

mesure directe dans la résine.....	1
mesure directe dans l'air.....	1
mesure directe dans l'eau.....	1
calcule temps dans partie air.....	2
colle bloc, lentilles, miroir.....	2
déplace les miroirs d'une longueur quelconque.....	2
évalue le trajet de départ à 10cm.....	2
déplace les miroirs de la longueur du bloc.....	3
déplace le bloc d'une distance égale à la longueur de l'eau.....	3
déplace les miroirs de la longueur de la résine.....	3
réussite dans l'air.....	3
déphasage nul pour longueur totale du bloc.....	4
déplace le miroir de la moitié de la longueur du bloc de résine.....	4
pour eau, met en phase avec résine.....	4
prend en compte l'air.....	4

ANNEXE 5

Protocoles de guidage

Protocole 1

D'une façon générale, la vitesse de la lumière dans un milieu transparent (notée c) se calcule par la formule $c = \frac{L}{\Delta t_1}$, où L représente la distance parcourue par la lumière dans ce milieu et Δt_1 le temps de parcours mesuré à l'oscilloscope.

Mais ici le problème est que les positions de l'émetteur et du récepteur ne sont pas connues avec précision, d'autre part la forme particulière des miroirs ajoute une distance supplémentaire pour le trajet de la lumière.

Pour mesurer le temps que met la lumière à parcourir une distance donnée dans un milieu transparent, on vous propose la manipulation suivante :

I - Mesure de la vitesse de la lumière dans l'air

- 1 - Vous placez les miroirs sur la position zéro de la règle graduée.
- 2 - Vous tournez le bouton appelé « déphaseur » qui est sur le boîtier et ce jusqu'à ce que les deux courbes soient en phase.
- 3 - Vous placez les miroirs à 0.5 mètre.
- 4 - Vous relevez la valeur du décalage en temps entre les deux courbes qui sont visualisées sur l'écran de l'oscilloscope. On notera Δt_1 ce décalage. Le temps effectivement mis par la lumière pour parcourir 2*0.5 mètre dans l'air est Δt_1 .

On peut alors calculer la vitesse de la lumière notée c par la formule $c = \frac{2 \cdot 0.5}{\Delta t_1}$.

II - Mesure de la vitesse de la lumière dans la résine

- 1 - Refaites les consignes 1 et 2 de l'expérience précédente.
- 2 - Placez les miroirs à une distance de 0.29 mètre.
- 3 - Placez le bloc de résine dont la longueur est de 0.29 mètre sur le trajet de la lumière.
- 4 - Mesurez la valeur du décalage en temps. On notera Δt_1 ce décalage.

La vitesse v de la lumière dans la résine est donnée par la formule $c = \frac{2 \cdot 0.9}{\Delta t_1}$.

III - Mesure de la vitesse de la lumière dans l'eau

Mesurez le temps que met la lumière à traverser le tube rempli d'eau dont la longueur est de 1 mètre. En déduire la vitesse de la lumière dans l'eau.

Protocole 2

Partie 1

D'une façon générale, la vitesse de la lumière dans un milieu transparent (notée c) se calcule par la formule $c = \frac{L}{\Delta t_1}$, où L représente la distance parcourue par la lumière dans ce milieu et Δt_1 le temps de parcours mesuré à l'oscilloscope.

Mais ici le problème est que les positions de l'émetteur et du récepteur ne sont pas connues avec précision, d'autre part la forme particulière des miroirs ajoute une distance supplémentaire pour le trajet de la lumière.

Essayer de mesurer cette vitesse dans l'air par une méthode de votre choix **et** essayez de formuler alors une méthode générale qui permette d'avoir une mesure précise du temps mis par la lumière pour parcourir une distance donnée dans un milieu transparent.

Partie 2

Enoncé de la règle : ici pour mesurer le temps mis par la lumière pour parcourir une **longueur donnée** il faut faire une mesure par **différence** entre 2 positions des miroirs distantes de cette longueur.

D'une façon générale, on peut dire que quand on ne connaît pas avec précision le zéro d'une mesure on peut malgré tout faire une mesure précise par une méthode de différence.

Appliquer ici cette méthode à la mesure du temps de parcours de la lumière :

1 - Dans un mètre d'air.

En déduire la vitesse de la lumière dans l'air.

2 - Dans un bloc de résine d'une longueur de 0.29 m.

En déduire la vitesse v de la lumière dans la résine.

3 - Dans un tube d'eau d'une longueur de 1 mètre.

En déduire la vitesse v de la lumière dans l'eau.

Protocole 3

D'une façon générale, la vitesse de la lumière dans un milieu transparent (notée c) se calcule par la formule $c = \frac{L}{\Delta t_1}$ où L représente la distance parcourue par la lumière dans ce milieu et Δt_1 le temps de parcours mesuré à l'oscilloscope.

Mais ici le problème est que les positions de l'émetteur et du récepteur ne sont pas connues avec précision, d'autre part la forme particulière des miroirs ajoute une distance supplémentaire pour le trajet de la lumière.

Pour mesurer le temps que met la lumière à parcourir une distance donnée dans un milieu transparent, on vous propose trois manipulations ; pour les deux premières vous aurez le détail de ce qu'il faut faire sous forme de consignes et vous aurez à réaliser sans aide une troisième expérience.

I - Mesure de la vitesse de la lumière dans l'air

1 - Vous placez les miroirs sur la position zéro de la règle graduée.

2 - Vous tournez le bouton appelé « déphaseur » qui est sur le boîtier et ce jusqu'à ce que les deux courbes soient en phase

3 - Vous placez les miroirs à 0.5 mètre.

4 - Vous relevez la valeur du décalage en temps entre les deux courbes qui sont visualisées sur l'écran de l'oscilloscope. On notera Δt_1 ce décalage. Le temps effectivement mis par la lumière pour parcourir 2*0.5 mètre dans l'air est Δt_1 .

On peut alors calculer la vitesse de la lumière notée c par la formule $c = \frac{2*0.5}{\Delta t_1}$

II - Mesure de la vitesse de la lumière dans la résine

1 - Refaites les consignes **1** et **2** de la première expérience.

2 - Placez les miroirs à une distance de 0.29 mètre.

3 - Placez le bloc de résine dont la longueur est de 0.29 mètre sur le trajet de la lumière.

4 - Mesurez la valeur du décalage en temps. On notera Δt_1 ce décalage.

La vitesse c de la lumière dans la résine est donnée par la formule $c = \frac{2*0.29}{\Delta t_1}$

III - Mesure de la vitesse de la lumière dans l'eau

- 1 - Refaites les consignes 1 et 2 de la première expérience.
- 2 - Placez les miroirs à une distance de 1 mètre.
- 3 - Notez la valeur du décalage en temps Δt_1 .
- 4 - Placez le tube d'eau dont la longueur est de 1 mètre sur le trajet de la lumière
- 5 - Mesurez la valeur du décalage en temps Δt_2 .
- 6 - Le temps de parcours de la lumière dans l'eau est $\Delta t = (\Delta t_2 - \frac{\Delta t_1}{2})$
- 7 - La vitesse c de la lumière dans l'eau est donnée par la formule $c = \frac{1}{\Delta t}$

Répondez aux questions suivantes :

Les mesures de distances et de temps, telle que vous les avez faites en suivant les protocoles expérimentaux, sont des mesures exactes (il n'y a pas de système particulier dans le boîtier ou l'oscilloscope) pourtant quand vous avez fait les mesures :

- la lumière parcourt une distance entre les deux miroirs,
- il y avait une distance entre le zéro de la règle et l'émetteur de la lumière (ou le récepteur),
- il y avait une distance entre les miroirs et l'extrémité du bloc de résine ou du tube d'eau,
- le bloc de résine ou le tube d'eau dépassaient le zéro de la règle.

Dites en quoi tous ces facteurs n'ont pas eu d'effet sur les mesures (telles que vous les avez faites en suivant les protocoles) des distances et des temps.

Maintenant à partir des trois protocoles et des questions précédentes, essayez d'en tirer **une méthode générale** qui permette d'avoir une mesure précise du temps mis par la lumière pour parcourir une distance donnée dans un milieu transparent.

Protocole 4

D'une façon générale, la vitesse de la lumière dans un milieu transparent (notée c) se calcule par la formule $c = \frac{L}{\Delta t_1}$ où L représente la distance parcourue par la lumière dans ce milieu et Δt_1 le temps de parcours mesuré à l'oscilloscope.

Mais ici le problème est que les positions de l'émetteur et du récepteur ne sont pas connues avec précision, d'autre part la forme particulière des miroirs ajoute une distance supplémentaire pour le trajet de la lumière.

Pour mesurer le temps que met la lumière à parcourir une distance donnée dans un milieu transparent, on vous propose trois manipulations ; *à partir des trois expériences que vous allez réaliser, vous aurez à essayer de formuler une **méthode générale** qui permet de mesurer **précisément** le temps mis par la lumière pour parcourir une distance donnée dans un milieu transparent.*

I - Mesure de la vitesse de la lumière dans l'air

- 1 - Vous placez les miroirs sur la position zéro de la règle graduée.
- 2 - Vous tournez le bouton appelé « déphaseur » qui est sur le boîtier et ce jusqu'à ce que les deux courbes soient en phase.

Faites un schéma en rouge du trajet parcouru par la lumière correspondant à cette mise à zéro.

- 3 - Vous placez les miroirs à 0.5 mètre.
- 4 - Vous relevez la valeur du décalage en temps entre les deux courbes qui sont visualisées sur l'écran de l'oscilloscope.

Sur un même schéma tracez en vert le trajet parcouru par la lumière correspondant au décalage en temps que vous avez mesuré.

On notera Δt_1 ce décalage. Le temps effectivement mis par la lumière pour parcourir 2*0.5 mètre dans l'air est $\Delta t_a = \Delta t_1 / 1000$.

On peut alors calculer la vitesse de la lumière notée c par la formule $c = \frac{2*0.5}{\Delta t_a}$

II - Mesure de la vitesse de la lumière dans la résine

- 1 - Refaites les consignes 1 et 2 de la première expérience.
 - 3 - Placez les miroirs à une distance de 0.29 mètre.
 - 4 - Placez le bloc de résine dont la longueur est de 0.29 mètre sur le trajet de la lumière.
- Sur un même schéma, tracer en vert** le trajet parcouru par la lumière correspondant au décalage en temps que vous avez mesuré.
- 5 - Mesurez la valeur du décalage en temps. On notera Δt_1 ce décalage.
- La vitesse c de la lumière dans la résine est donnée par la formule $c = \frac{2 \cdot 0.29}{\Delta t_1}$

III Mesure de la vitesse de la lumière dans l'eau

- 1 - Refaites les consignes 1 et 2 de la première expérience.
 - 3 - Placez les miroirs à une distance de 1 mètre.
 - 4 - Notez la valeur du décalage en temps Δt_1 .
 - 5 - Placez le tube d'eau dont la longueur est de 1 mètre sur le trajet de la lumière
 - 6 - Mesurez la valeur du décalage en temps Δt_2 .
- Sur un même schéma tracez en vert** le trajet parcouru par la lumière correspondant au décalage en temps que vous avez mesuré.
- 7 - Le temps de parcours de la lumière dans l'eau est $\Delta t = (\Delta t_2 - \frac{\Delta t_1}{2})$
 - 8 - La vitesse c de la lumière dans l'eau est donnée par la formule $c = \frac{1}{\Delta t}$

*À partir des trois expériences, essayez de formuler une méthode générale qui permet de mesurer **précisément** le temps mis par la lumière pour parcourir une distance donnée dans un milieu transparent.*

Cet article a été reçu le 21/05/2002 et accepté le 30/10/2003.

De la pluridisciplinarité pour des ingénieurs généralistes vers une interdisciplinarité à la mesure d'ingénieurs éco-citoyens

From pluridisciplinarity for general engineers towards interdisciplinarity as for ecocitizen engineers

Natacha GONDRAN

Centre sciences, information et technologies pour l'environnement
ENS des mines de Saint-Étienne
158 cours Fauriel, 42023 Saint-Étienne cedex 2, France.
gondran@emse.fr

Daniel M. KAMMEN

Renewable and Appropriate Energy Laboratory
University of California
Energy and Resources Group (ERG)
310 Barrows Hall
Berkeley, CA 94720-3050, USA.

Résumé

Si de nombreuses déclarations plaident pour l'introduction de l'interdisciplinarité dans les programmes de formation et recherche, rares sont ceux qui la

mettent réellement en place. Nous montrons l'intérêt de l'interdisciplinarité et de l'apprentissage de ses méthodes dans les écoles d'ingénieurs si l'on veut que ceux-ci soient des « citoyens responsables assurant le lien entre les sciences, les technologies et la communauté humaine » (CNISF, 2001). En nous appuyant sur l'expérience de l'« Energy and Resources Group » de l'université de Berkeley, nous proposons quelques pistes pour aider les responsables et enseignants d'écoles d'ingénieurs à intégrer l'interdisciplinarité dans leurs programmes pédagogiques.

Mots clés : *interdisciplinarité, école d'ingénieur, éducation, citoyen, université américaine.*

Abstract

Numerous declarations speak in favor of interdisciplinary educational and research programs to help the future decision makers to improve the quality of their decision within complex environment and improve their capacity to integrate economic, environmental and social components among their decisional criteria. However, educational and research programs for engineers are still rare in France and are in search of methods to transform this will of interdisciplinarity into effective practices. The 30 years of experience of the interdisciplinary « Energy and Resources Group » of UC Berkeley can be used to formalize the « tricks of the trade » of such interdisciplinary programs.

Key Words : *interdisciplinarity, graduate engineering school, training program, American university.*

Apprendre aux ingénieurs de demain à prendre en compte, dans leurs décisions, des enjeux, non seulement techniques et économiques, mais aussi sociaux et environnementaux est (ou devrait être) une préoccupation de toutes les écoles d'ingénieurs. Depuis le début des années 70, des ouvrages appellent à l'interdisciplinarité dans les programmes éducatifs et travaux de recherche (Schumacher, 1973 ; De Rosnay, 1975, par exemple) pour aider les (futurs) décideurs à affronter des situations caractérisées par leur niveau élevé de complexité, d'incertitude et d'asymétrie d'information entre les différentes parties prenantes, ainsi que par des situations d'information paradoxalement caractérisées simultanément par un surplus d'informations si l'on considère le volume d'information disponible, et une insuffisance d'informations si on considère leur qualité et pertinence. Une telle orientation vers l'interdisciplinarité a été officiellement encouragée par la conférence de Rio des Nations unies sur l'environnement et le développement (1992). Cependant, près de quatre siècles de cartésianisme ont ancré dans les habitudes et schèmes de pensée le cloisonnement entre les disciplines.

L'interdisciplinarité est souvent utilisée comme un terme générique qui s'applique à des démarches visant à aborder des problèmes et des projets en mobilisant plusieurs disciplines. Son premier niveau de concrétisation est l'approche pluridisciplinaire, c'est-à-dire « *l'association de disciplines qui concourent à une réalisation commune, mais sans que chaque discipline ait à modifier sensiblement sa propre vision des choses et ses propres méthodes* » (Delattre, 2003, p. 1). Cette approche, mise en œuvre depuis longtemps au sein des écoles d'ingénieurs françaises, consiste à juxtaposer des enseignements scientifiques dispensés par plusieurs spécialistes, compétents dans des disciplines différentes. Les élèves ingénieurs reçoivent ainsi une formation « généraliste ». Cependant, pour générer de nouvelles connaissances, l'interdisciplinarité requiert échange et coopération entre les différentes sciences (Morin, 1990). Ainsi, nous développons l'hypothèse que l'apport d'une réflexion méthodologique sur l'interdisciplinarité est nécessaire pour aider les élèves ingénieurs à mettre en cohérence les différentes disciplines qu'on leur a enseignées. Si l'on compare les connaissances disciplinaires à des pièces de puzzle et leur projet professionnel à l'image constituée par le puzzle, il s'agit de proposer aux étudiants des méthodes pour les aider à fabriquer leur propre puzzle à partir des pièces récoltées au long de leur scolarité.

Certains scientifiques associatifs et industriels font appel à la notion de « transdisciplinarité » qui renvoie à des « *pratiques dites nouvelles de production de savoirs* » qui visent à « *organiser le débat démocratique en reliant savoirs scientifiques et savoirs populaires* » autour de problèmes contemporains (portant sur l'environnement, la santé, le développement, etc.) qui mettent en évidence certaines limites de la science disciplinaire (Pivot, 2001, p. 66). Cet article ne prétend pas proposer de telles pratiques, ni un apport théorique sur les définitions de l'inter-, pluri- ou trans-disciplinarité. Plus modestement, nous présentons quelques pistes concrètes avec lesquelles enseignants et responsables d'écoles d'ingénieurs françaises peuvent aider leurs élèves à assembler les diverses pièces de connaissances disciplinaires acquises au long de leur scolarité afin de construire le puzzle de leur projet professionnel. Nous utiliserons alors le terme « interdisciplinarité » qui nous semble le plus représentatif de l'approche décrite. Cette liste de « trucs » n'a pas pour prétention d'être exhaustive ni prescriptive, mais d'envisager l'utilisation, dans le contexte des écoles d'ingénieurs françaises, de réflexions développées, depuis une trentaine d'années, au sein du département « Energy and Resources Group » (ERG) de l'université de Berkeley.

1. UNE APPROCHE INTERDISCIPLINAIRE EST NÉCESSAIRE...

Suite à la demande de l'Unesco pour son programme international sur l'éducation, la sensibilisation du public et la formation à la viabilité, le phi-

losophe E. Morin (1999) a énoncé sept défis que devrait traiter « *l'éducation du futur* ». La relecture de ces défis à travers diverses références d'auteurs prônant l'interdisciplinarité nous amène à poser l'hypothèse que, pour répondre à ces défis, il est nécessaire (mais pas forcément suffisant) que les programmes d'enseignement supérieur donnent l'occasion aux étudiants d'expérimenter une approche interdisciplinaire, c'est-à-dire mobilisant sur un même sujet plusieurs disciplines, voire plusieurs types de « sciences » (sciences humaines et sciences pour l'ingénieur, par exemple).

1.1. ... pour enseigner les « cécités de la connaissance » : l'erreur et l'illusion

E. Morin (1999) regrette que l'éducation n'enseigne pas les mécanismes de la connaissance afin d'aider l'apprenant à prendre conscience que chaque connaissance est entachée d'erreur et d'illusion. Nous utilisons tous des modèles pour simplifier et clarifier la réalité. Une discipline émerge lorsqu'un groupe partage les mêmes modèles, hypothèses et valeurs. Si ces hypothèses et valeurs permettent de faire le lien entre la connaissance et la réalité, elles éludent une partie de la complexité du réel (Norgaard, 2002). Chacun passe la plupart de son temps avec des personnes qui possèdent le même profil (mêmes formations, lectures et sources d'information) et partagent les mêmes hypothèses implicites. Cela réduit les occasions où les spécialistes de différentes disciplines peuvent confronter leurs hypothèses et résultats de recherche. De plus, la spécialisation croissante de chacun augmente le nombre sous-jacent d'hypothèses et rétrécit son champ de vision (Norgaard, 2002). Les « spécialistes » finissent donc souvent par oublier l'existence de ces hypothèses et valeurs ainsi que le décalage entre modèles utilisés et réalité. Cet oubli explique les difficultés rencontrées par les équipes « pluridisciplinaires » qui essaient de réunir autour d'un même projet des spécialistes qui ne partagent pas de langage, hypothèses et valeurs communs. Chacun ne pourra donc enrichir sa vision de la réalité qu'en connaissant les hypothèses d'autres disciplines à travers une pratique réelle de ces disciplines.

1.2. ... pour assurer la pertinence de la connaissance

Les réalités et problèmes liés à l'évolution de la société et aux menaces écologiques qui pèsent sur elle deviennent de « *plus en plus polydisciplinaires, transversaux, multidimensionnels, transnationaux, globaux, planétaires* » (Morin, 1999, p. 21). L'éducation doit aider à faire le lien entre l'objet étudié et son contexte global. Il faut pour cela mettre en évidence les relations entre les différentes dimensions d'un problème et sa complexité, c'est-à-dire expliciter les interdépendances entre les différentes parties. Le

découpage actuel en « disciplines » et l'hyperspécialisation sont des freins à cette mise en relation. Pour aider à comprendre les liens entre les parties et le tout, « *il est nécessaire d'enseigner les méthodes qui permettent de saisir les relations mutuelles et influences réciproques entre parties et tout dans un monde complexe* » (Morin, 1999, p. 9). J.P. Dupuy (2003) montre la nécessité d'accroître la connaissance de la science, par les scientifiques, afin de faire prendre conscience aux scientifiques de leur responsabilité sur la société, et d'améliorer l'articulation des responsabilités entre la science et la société. J.P. Dupuy déplore que « *la plupart des scientifiques ne soient pas plus cultivés que l'homme de la rue. La raison en est la spécialisation du métier de scientifique* » (Dupuy, 2003, p. 12).

Il semble donc nécessaire d'aider l'apprenant à prendre du recul sur les différentes sciences qui lui sont enseignées en intégrant, aux programmes d'enseignements supérieurs scientifiques, une réflexion sur l'histoire, les idées et les méthodes à la base des sciences mobilisées.

1.3. ... pour enseigner la condition humaine

« *L'être humain est à la fois physique, biologique, psychique, culturel, social, historique* » (Morin, 1999, p. 28). Selon E. Morin (1999), l'éducation doit enseigner ces différentes dimensions pour aider chacun à s'interroger et trouver des éléments de réponses à ce questionnement sur la condition humaine en lui permettant de reconnaître et accepter l'identité commune des différents êtres humains tout en identifiant leur diversité culturelle. Pour l'ingénieur, cette interrogation est liée à la prise de conscience de son rôle dans la société et des impacts de ses décisions sur les individus et sur l'environnement. S. Florman (1976) et M. Cini (1991) soulignent la difficulté de certains ingénieurs à reconnaître la complexité de la vie : « *la culture de l'ingénierie est linéaire* » (Cini, 1991, p. 105). À l'heure où l'on demande de plus en plus aux décideurs d'assumer la responsabilité des impacts que peuvent avoir leurs décisions sur la société et l'environnement, il semble crucial de donner aux futurs ingénieurs les moyens de comprendre leur environnement (naturel et socio-économique) et d'aborder la complexité représentée par les interrelations entre les différentes composantes de cet environnement.

1.4. ... pour enseigner l'identité terrienne

M. Callon et *al.* (2001) soulignent le cloisonnement entre le monde réel et celui de la recherche. Les sujets de recherche les plus prisés excluent généralement les questions qui touchent le plus grand nombre de personnes et qui ont l'impact le plus important sur l'environnement (Kammen & Dove, 1997). Par exemple, la pollution atmosphérique intérieure des foyers, qui utilisent la biomasse comme combustible de cuisine, touche trois milliards de

personnes et a des conséquences sanitaires et environnementales supérieures à la pollution urbaine des villes des pays développés. Pourtant, c'est ce dernier thème qui fait l'objet de la majorité des recherches sur la pollution atmosphérique car il permet d'élaborer des modèles mathématiques séduisants tandis que la « *science du quotidien* » (traduction de « *mundane science* »), mobilisée par le premier, impose la prise en compte de composantes physico-chimiques, culturelles et sociales qui limitent les perspectives de modélisation mathématique (Kammen & Dove, 1997).

1.5. ... pour aider à affronter les incertitudes

L'éducation doit apprendre aux (futurs) décideurs à évaluer et prendre en compte les incertitudes liées aux résultats scientifiques. L'acteur en situation d'incertitude ne possède pas toutes les informations qu'il souhaiterait pour résoudre les problèmes auxquels il est confronté. Faire appel à plusieurs disciplines permet d'augmenter la quantité d'informations pertinentes disponibles, prendre en compte le caractère multidimensionnel des problématiques environnementales et gérer le manque d'information afin d'optimiser la décision pour l'ensemble des acteurs qu'elle concerne (Roche, 2000).

1.6. ... pour enseigner la compréhension

L'éducation doit aider chacun à comprendre les autres pour permettre aux relations humaines de « *sortir de leur état barbare d'incompréhension* » (Morin, 1999, p. 10). En donnant à chacun l'occasion d'utiliser les modèles de pensées de différentes disciplines, l'interdisciplinarité concourt à cet objectif. Il est cependant nécessaire de développer de nouvelles méthodes permettant d'avoir une analyse interdisciplinaire des questions et cas étudiés.

1.7. ... pour enseigner l'éthique du genre humain

Selon E. Schumacher (1973), le problème de l'éducation n'est pas seulement sa spécialisation mais l'absence de sensibilisation métaphysique et le fait que les sujets soient présentés de façon superficielle. Chacun est guidé par des convictions et idées de base. Selon E. Morin (1999) et E. Schumacher (1973), l'éducation, à travers la métaphysique et l'éthique, devrait aider chaque élève à identifier et connaître ses convictions sur la signification et le but de sa vie.

Notre propos n'est pas de remettre en cause la nécessité d'une approche disciplinaire qui apporte, à l'apprenant, les bases (les pièces du

puzzle) de sa formation : « *la fécondité de la discipline dans l'histoire de la science n'a pas à être démontrée ; d'une part, elle opère la circonscription d'un domaine de compétence sans laquelle la connaissance se fluidifierait et deviendrait vague ; d'autre part, elle dévoile, extrait ou construit un objet non trivial pour l'étude scientifique.* » (Morin, 1990, p. 1). Cependant, les arguments que nous venons de présenter nous amènent à poser l'hypothèse que l'éducation doit maintenant encourager les étudiants à expérimenter une approche réellement interdisciplinaire pour les inciter à prendre du recul sur l'ensemble des connaissances (les morceaux de puzzle) qu'ils ont récoltées tout au long de leur formation et en avoir une vision plus globale. Cette interdisciplinarité peut, par exemple, donner lieu à des projets où ils doivent mobiliser, sur un sujet donné, plusieurs disciplines. La deuxième hypothèse, que nous développons dans la partie qui suit, est qu'il est également nécessaire de formaliser une réflexion méthodologique sur l'interdisciplinarité, ou, du moins, de transmettre aux étudiants certains « trucs » (« *tricks of the trade* » dans le jargon de certains chercheurs américains) afin de les aider à éviter certains écueils de l'interdisciplinarité : approche trop superficielle, difficulté à trouver des références bibliographiques également interdisciplinaires, dilemme « *profondeur contre étendue* » des recherches (comment savoir où s'arrêter dans chaque discipline et éviter une dispersion trop importante dans la recherche d'information ?), oubli de l'objectif initial de l'étude et non-respect des délais, démarche pas assez rigoureuse ne correspondant pas aux standards académiques, par exemple.

2. DE LA THÉORIE À LA MISE EN ŒUVRE DE L'INTERDISCIPLINARITÉ DANS LES PROGRAMMES D'ENSEIGNEMENT

Le rapport de la conférence des Nations unies sur l'environnement et le développement (1992) de Rio insiste sur la nécessité, pour chaque gouvernement, de favoriser les programmes et activités de recherche interdisciplinaires (chapitre 35 sur les sciences) et les formations multidisciplinaires (chapitre 36 sur l'éducation). Pourtant, aux USA comme en France, il est encore difficile, pour un enseignant-chercheur et un laboratoire de recherche de se faire reconnaître par la communauté scientifique si ses travaux ne s'inscrivent pas vraiment dans une catégorie pré-existante. Il est donc difficile, pour un enseignant-chercheur, de mener et revendiquer une approche croisant réellement plusieurs disciplines. Ainsi, si de nombreux programmes et établissements affichent une certaine interdisciplinarité, au niveau de leurs programmes pédagogiques et de recherche, il s'agit plus souvent d'approches pluridisciplinaires que d'une réelle intégration et d'échanges entre les diverses disciplines. Un des pionniers ayant mis en œuvre de réelles interactions entre les disciplines et menant une réflexion sur ces interactions est le département

« ERG » (Energy and Resources Group) de l'université de Californie de Berkeley. Créé en 1973, sa mission est de « *développer et transmettre les connaissances critiques nécessaires à la construction d'un futur possible dans lequel les besoins matériels humains et les exigences d'un environnement sain soient mutuellement et durablement satisfaits* » (ERG, 2002, p. 1). Il a formé plus de 300 élèves, de maîtrise et doctorat, souvent employés ensuite dans diverses structures (gouvernementales, académiques, associatives ou commerciales) travaillant dans le domaine de l'énergie et de l'environnement. Actuellement, 55 étudiants sont encadrés par 6 professeurs en relation avec près de 100 professeurs d'autres départements de l'université de Californie.

Cette expérience, associée à un effort permanent de définition collective des objectifs et méthodes, a permis à ce département de formaliser quelques règles concrètes à respecter par tout étudiant et chercheur interdisciplinaire. Nous en présentons quelques-unes ci-dessous en montrant comment elles peuvent apporter un début de réponse aux sept principes énoncés par E. Morin et comment elles pourraient s'adapter aux programmes pédagogiques des écoles d'ingénieurs françaises.

2.1. Faire prendre conscience des « cécités de la connaissance » en aiguisant le sens critique

Toute connaissance n'est valable que dans un cadre donné. Les étudiants doivent donc apprendre à définir les hypothèses de travail, valeurs et idéologies (au sens anglais du terme, c'est-à-dire le corps d'idées et de valeurs qui forme la façon de pensée de chacun) qui orientent implicitement chaque étude. Cette formalisation est particulièrement importante pour le chercheur interdisciplinaire. En effet, celui-ci ne pouvant revendiquer une appartenance à une discipline préexistante doit fréquemment justifier son approche en expliquant ce qu'il fait, comment et pourquoi il le fait. D'autre part, les études liées à la protection de l'environnement sont souvent menées par des « *chercheurs militants* » (traduction de « *activist scholar* ») passionnés par leur sujet d'étude. Certains mettent en place des protocoles de recherche-action. Le postulat positiviste d'un observateur neutre, objectif et détaché de son sujet, ne peut donc s'appliquer. Le chercheur doit alors s'interroger sur les interactions et frontières entre l'observateur et son sujet d'observation. Afin de faciliter la prise de recul des étudiants sur ces questions, ces derniers sont encouragés à communiquer sur leur sujet de recherche afin de bénéficier d'un regard extérieur et de faciliter cette explicitation de leurs hypothèses de travail, idéologie et valeurs pour mieux cerner les limites (inévitables) de leur étude. Ainsi, en ERG, par exemple, une demi-journée par semaine (facultative pour les étudiants, mais obligatoire pour les professeurs) est réservée aux échanges entre étudiants et enseignants au cours de séminaires et colloques. Opérationnellement, ce regard critique sur les connaissances générées et utilisées passe également par l'enseignement de

méthodes permettant une critique systématique des données et hypothèses sous-jacentes aux études utilisées (Kooimey, 2001).

Dans leur vie professionnelle, les ingénieurs devront traiter des données incomplètes, voire fausses (erreurs de mesures, enquêtes biaisées, etc.) Aiguiser leur sens critique permet de les habituer à estimer la fiabilité des données qu'ils utilisent ainsi que leurs résultats. Par exemple, lorsqu'on leur demande de faire des recherches d'informations, il est souvent nécessaire de rappeler aux étudiants la nécessité de bien identifier leurs sources d'information, d'évaluer la fiabilité de ces sources et de les citer. D'autre part, lorsqu'on leur propose des exercices mobilisant des modèles, on peut les entraîner à identifier les hypothèses sur lesquelles reposent ces modèles et estimer l'incertitude et la cohérence de leurs résultats.

2.2. Assurer la pertinence de la connaissance en incitant à « connaître son héritage »

« L'interdisciplinarité ne consiste pas seulement à juxtaposer quelques morceaux de savoir : elle implique d'élaborer des concepts nouveaux pour articuler entre elles les connaissances issues des différents champs » (Lefeuve, 1991, p. 40). Pour aider les étudiants à faire ce lien, J.-P. Dupuy (2003) propose d'introduire l'histoire et la philosophie des sciences dans les cursus d'enseignement scientifiques. L'approche choisie en ERG est d'inciter les étudiants à « connaître leur héritage » en les obligeant à lire et analyser les ouvrages des divers auteurs ayant influencé la pensée écologique. Afin de créer une « *histoire commune* » entre les membres d'une même formation et rattacher cette histoire aux travaux préalables ayant été écrits sur la protection de l'environnement, les enseignants peuvent collectivement sélectionner une liste des « *classiques de la littérature sur l'environnement* » qui les ont influencés.

<p>Vannevar BUSH (1945) - <i>Science, The Endless Frontier</i> Aldo LEOPOLD (1949) - <i>A sand county almanach</i> Harrison BROWN (1954) - <i>The challenge of man's future</i> Rachel CARSON (1962) - <i>Silent spring</i> Richard FEYNMAN (1963) - <i>The meaning of it all: Thoughts of a Citizen Scientist</i> Ernst F. SCHUMACHER (1973) - <i>Small is beautiful</i> Joel PRIMACK, Frank VON HIPPLE (1974) - <i>Advice and Dissent: Scientists in the Political Arena</i> Amory B. LOVINS (1976) - <i>Energy Strategy: The Road Not Taken</i> Samuel C. FLORMAN (1976) - <i>The existential pleasure of engineering</i> Amartya SEN (1981) - <i>Poverty & famines. An essay on entitlement deprivation</i> F. E. TRAINER (1985) - <i>Abandon Affluence and Growth: Ecology and Capitalism in the World Today</i> Donella MEADOWS, Dennis MEADOWS, Jørgen RANDERS (1972) - <i>The Limits to Growth</i> Donella MEADOWS, Dennis MEADOWS, Jørgen RANDERS (1992) - <i>Beyond the Limits: Confronting Global Collapse; Envisioning a Sustainable Future</i> Wolfgang SACHS, Editor (1992) - <i>The Development Dictionary: A Guide to Knowledge as Power</i> Richard WHITE (1995) - <i>The organic machine: the remaking of the Columbia river</i> Jeremy STONE (1999) - <i>Every Man Should Try: Adventures of a Public Interest Activist</i></p>

Tableau 1. « Classiques » de la littérature sur l'écologie et le développement sélectionnés par ERG

À titre d'exemple, le tableau 1 présente certains ouvrages sélectionnés en ERG. On peut constater que cette liste ne comporte que des ouvrages anglophones. Auteurs des pays du Sud (pays sur lesquels portent pourtant bon nombre d'études de ce département) ainsi que francophones semblent peu lus outre-Atlantique alors qu'ils ont influencé la vision francophone des questions liées à l'environnement et que certains proposent une vision systémique globale intégrant écologie et économie (I. Sachs, J. De Rosnay, R. Passet, R. Dumont, E. Morin, etc.).

L'élève ingénieur français peut souvent valider ses modules sans chercher d'information en dehors de celles qui lui ont été transmises par ses enseignants et sans consulter de références bibliographiques pour approfondir et contextualiser ses connaissances. Cette absence de mise en contexte de la connaissance était déjà dénoncée, en 1975, par J. de Rosnay qui définissait les « bases » de l'enseignement, de manière volontairement caricaturale, comme « *les connaissances qu'il faut maîtriser avant de savoir à quoi elles vont nous servir* » (De Rosnay, 1975, p. 260). Encourager la lecture de références bibliographiques implique un travail personnel plus important de la part de l'apprenant, mais aussi la nécessité, pour l'enseignant, d'accepter de ne plus être considéré par ses élèves comme détenteur unique de la connaissance, mais seulement comme un relais, voire d'une vision partielle, de cette connaissance. Une telle approche semble toutefois nécessaire pour mettre en contexte les informations transmises aux apprenants afin que ces derniers construisent leurs propres connaissances à partir des différents éléments qu'ils auront collectés.

2.3. Enseigner la condition humaine par une ouverture sur les autres

Confronter les étudiants avec des individus *a priori* différents d'eux peut les aider à assimiler le fait que, malgré les diversités culturelles, certains aspects soient intrinsèques à l'identité humaine et communs à tous les individus, au-delà de leurs différences.

En France, la plupart des écoles d'ingénieurs françaises encouragent l'ouverture internationale et culturelle de leurs étudiants en les aidant à effectuer une partie de leur scolarité à l'étranger. On peut citer les programmes d'échange ERASMUS qui peuvent concerner tout élève de deuxième cycle. De telles expériences accroissent la connaissance des cultures des autres pays, l'autonomie et les capacités d'adaptation des étudiants. L'ouverture peut également passer par la mise en présence et en relation d'individus ayant des profils et des cultures différents au sein même de l'établissement de formation. C'est un choix qui a été fait par ERG, par exemple, qui, pour sélectionner ses membres (enseignants et étudiants), s'assure de la variété de leurs formations, cursus professionnels et universitaires, et provenances géographiques.

Une telle diversité de profils, en interne, associée à une organisation du département qui incite aux échanges, et à l'expression des controverses (séminaires communs, par exemple), permet de mettre en confrontation les arguments, hypothèses, positions et idéologies propres à chacun et aux différentes disciplines représentées afin de faire apparaître caractères communs et spécificités respectives. Cette diversité et ouverture se traduisent également au niveau des champs scientifiques : pour aider chaque étudiant à devenir « *intelligent* » dans les matières qu'il aborde (c'est-à-dire en connaître les bases et être capable de comprendre et critiquer de nouveaux travaux), des accords sont établis avec d'autres centres pour permettre aux étudiants d'être co-encadrés ou de suivre des cours dispensés par des spécialistes. Ce programme interdisciplinaire se positionne donc en complémentarité, et non en concurrence, avec les programmes d'enseignement et recherche disciplinaires « classiques ».

2.4. Enseigner l'identité terrienne par la confrontation au quotidien

La « *science du quotidien* » offre de nombreuses opportunités de recherche aux étudiants et chercheurs désirant étudier de façon interdisciplinaire les conditions d'un développement qui satisfasse les besoins véritables des êtres humains tout en préservant les ressources naturelles (Kammen & Dove, 1997). Cette confrontation à la vie quotidienne encourage les approches empiriques fondées sur des problèmes concrets. Cette confrontation au quotidien permet également de montrer que chacun peut être acteur de changements concrets allant dans le sens d'un meilleur respect de l'environnement.

Un exemple de l'application de ce principe au sein d'une formation d'ingénieur (École des mines de Saint-Étienne / Institut supérieur des techniques productiques) est la réalisation, par des élèves en formation continue ou par alternance, du pré-diagnostic environnemental de leur propre entreprise. Cela leur permet d'observer, dans leur entreprise, des comportements qu'ils ignoraient, de prendre conscience de la complexité liée à l'intégration de l'environnement mais aussi de réaliser que cette dernière n'est pas seulement une préoccupation d'écologistes en les amenant à se rendre compte que certains changements stratégiques de leur entreprise avaient pour cause des motivations liés aux enjeux environnementaux. Un tel exercice illustre donc l'intérêt d'aider l'apprenant à observer son quotidien (l'entreprise) sous un angle nouveau (à travers les questions liées à l'environnement).

2.5. Aider à gérer l'incertitude par des méthodes de résolution des problèmes

Les travaux de recherche peuvent aider les décideurs à réduire l'incertitude en les aidant à conceptualiser et quantifier coûts, bénéfices et

impacts des problèmes rencontrés et solutions envisageables (Kammen, 1996). J. Harte (1985) et Kammen & Hassenzahl (1999) proposent à cette fin la technique du « calcul au dos d'une enveloppe » qui consiste à :

- 1. Faire un tour d'horizon du problème pour en comprendre les mécanismes de façon qualitative, estimer l'ordre de grandeur et identifier les informations manquantes ;
- 2. Concevoir un modèle mathématique du problème, y intégrer les données connues et faire des hypothèses (éventuellement grossières mais explicites) sur les autres ;
- 3. Étudier la robustesse du modèle en modifiant des hypothèses et des données. Cela permet d'ouvrir de nouvelles pistes de recherche pour mieux comprendre le problème et évaluer l'impact, sur le résultat, de l'incertitude sur les données.

La résolution de l'incertitude peut également se faire par la mise en place de procédures décisionnelles plutôt que par une évaluation quantitative systématique. C. Brodhag (2000) montre la nécessité, pour gérer l'incertitude, de mettre en place le principe de précaution et de s'appuyer sur des démarches d'amélioration continue qui permettent de réajuster constamment les actions prises à leurs conséquences et à l'évolution de leur contexte. Ainsi, les programmes d'enseignement de deuxième cycle permettent d'accroître la rationalité procédurale des élèves (par l'enseignement de méthodes de résolution de problèmes, de management, de conduite de projets, etc.) plutôt que leur rationalité substantive, considérée comme acquise au cours des années précédentes. Les démarches d'amélioration continue impliquent une évaluation, et donc une quantification systématique des actions menées. Les deux approches : procédurale (outils de management) et substantive (« *calcul au dos des enveloppes* ») semblent donc complémentaires.

2.6. Enseigner les mécanismes de la compréhension en stimulant la créativité

Chaque étudiant peut apprendre à apprendre si on le laisse construire sa propre approche et si on l'autorise à dévier de celle qu'il avait prévue initialement lorsqu'il se rend compte que ce n'est pas la plus pertinente. Cette approche est choisie par certains enseignants de ERG qui déclarent à leurs étudiants « *qu'il n'y a pas de règle unique à suivre et que le chemin pour aller d'un point A à un point B n'est ni unique ni clairement défini à l'avance* ». Laisser aux étudiants une large marge d'autonomie pour choisir leur sujet de recherche et leur méthodologie stimule la créativité et facilite l'appropriation des concepts sur lesquels ils travaillent. Cependant, cela implique aussi de baser les rapports professeurs/élèves sur un échange mutuel, d'accepter que les travaux des étudiants prennent plus de temps qu'avec une approche plus directive et que l'étudiant n'obtienne pas toujours

le résultat escompté. Dans certains cas il peut même arriver qu'il n'obtienne aucun résultat si, par exemple, il ne possède pas un sens de l'initiative suffisamment développé et ne comprend pas les objectifs que l'on peut attendre de lui.

2.7. Enseigner l'éthique du genre humain en encourageant à « se concentrer sur ce qui importe vraiment »

Comment accompagner les étudiants dans leur questionnement éthique, voire métaphysique, tel que le prônent Schumacher (1973) ou Morin (1999), est un sujet plus difficile à aborder car on touche alors à des questions de hiérarchisation des valeurs personnelles. Le modèle éducatif français s'appuie sur le système de légitimité rationnel-légal, décrit en 1919 par M. Weber (1980) qui préconise une distinction nette entre le rôle de « savant » et celui de « politique » : « *La politique n'a pas sa place dans la salle de cours d'une université* ». Selon ce modèle, l'enseignement scientifique est supposé être totalement dénué de considérations sur les valeurs. Une des justifications de ce principe est la relation asymétrique de pouvoir qui existe entre l'enseignant, qui est dans une position de domination, et les étudiants. Cependant, outre la mise en cause apportée par certains auteurs du fait qu'il serait possible d'enseigner en ne laissant transparaître aucun jugement de valeur, le rôle de l'expert, à l'intersection entre savants et politiques, vient questionner ce modèle. En effet, en situation d'incertitude et de controverses scientifiques telles que celles que l'on rencontre autour des questions environnementales, l'expert définit souvent un éventail de choix acceptables parmi un nombre plus grand de possibilités. Ce choix, qui influence la décision du politique, peut implicitement faire appel aux jugements de valeurs propres à l'expert sous couvert de ses compétences scientifiques (Roqueplo, 1991). P. Roqueplo (1991), sans remettre en cause la nécessité de recherche d'objectivité de la part de la communauté scientifique, souligne la nécessité d'apprendre à articuler « *connaissances molles* » et prises de décisions politiques grâce à la pratique d'une certaine « *éthique de l'objectivation* ». Il semble pour cela intéressant d'aider les futurs ingénieurs à prendre du recul par rapport aux valeurs et idéologies sous-jacentes aux différentes connaissances. Mais comment permettre aux étudiants d'acquérir cette capacité de prise de recul philosophique et éthique ? Certaines écoles d'ingénieurs françaises, telles que l'université de technologie de Troyes, introduisent des enseignements de philosophie dans leurs programmes. Le choix des enseignants de ERG est de faire émerger un débat sur ces questions en rappelant aux étudiants qu'il « *ne leur reste plus que 16 000 à 18 000 jours à vivre, et qu'il faut qu'ils en tirent le meilleur en se concentrant sur ce qui importe vraiment* ». Les séminaires de travail donnent souvent lieu à des discussions et confrontations de points de vue. De plus, l'engagement dans la vie politique et associative est accepté voire encouragé, à tous les

niveaux : des étudiants participent à la commission énergie de la municipalité de Berkeley et des professeurs tels que J. Holdren et D. Kammen ont participé au comité scientifique et technologique du président Clinton.

Les élèves ingénieurs sont généralement des jeunes de 20 à 25 ans arrivés à ce niveau d'études grâce à une bonne adaptation au système scolaire, des capacités dans les matières scientifiques et l'influence d'un entourage parental et professoral. C'est souvent dans sa dernière année d'études que l'élève ingénieur va commencer à se poser des questions sur ce qu'il veut vraiment faire de sa vie. À la fin de cette année charnière, il sera ingénieur et on lui demandera d'être « *un citoyen responsable assurant le lien entre les sciences, les technologies et la communauté humaine* » (CNISF, 2001, p. 1). Mais les programmes pédagogiques actuels des écoles d'ingénieurs lui permettent-ils de réfléchir à « *ce qui importe vraiment* » pour lui et la société dans laquelle il va dorénavant jouer un rôle actif ? Lui donnent-ils les moyens de prendre conscience de l'impact de ses décisions futures sur la société et l'environnement ? Lui laissent-ils toujours le temps et l'occasion de réfléchir aux valeurs qui guident sa vie pour faire des choix qui seront déterminants pour sa carrière professionnelle et son positionnement au sein de la société ?

3. CONCLUSION

Les écoles d'ingénieurs françaises pratiquent depuis longtemps la pluridisciplinarité pour former des ingénieurs généralistes. Une réflexion sur les défis posés à « *l'éducation du futur* » (Morin, 1999), du fait de l'évolution de la société et des risques écologiques, nous conduit à avancer l'hypothèse qu'un des éléments de réponse à ces défis est de stimuler les échanges entre les diverses disciplines afin d'aider les étudiants à acquérir une meilleure vision globale de l'ensemble des disciplines abordées au cours de leur cursus. Nous posons ensuite l'hypothèse qu'il est nécessaire d'apporter aux étudiants une réflexion sur les méthodes de l'interdisciplinarité afin de les aider à éviter certains écueils. Nous présentons alors quelques « trucs » formalisés au sein du département Energy and Resources Group de l'université de Californie, à Berkeley, afin d'aider ces membres à étudier, de façon interdisciplinaire, des questions liées au développement et à la préservation des ressources naturelles. Cette liste de conseils ne se veut pas exhaustive ni prescriptive, mais espère seulement être un élément d'un vaste débat sur la façon dont les programmes d'enseignement peuvent contribuer à former, non seulement des ingénieurs, mais des ingénieurs humains et citoyens de la planète Terre.

BIBLIOGRAPHIE

- BRODHAG C. (2000). Évaluation, rationalité et développement durable. *Colloque de la société française d'évaluation*. Rennes, Société Française d'Évaluation.
<http://www.agora21.org/articles/brodhag00a.htm>
- CALLON M., LASCOUMES P. & BARTHES Y. (2001). *Agir dans un monde incertain - Essai sur la démocratie technique*. Paris, Seuil.
- CINI M. (1991). Normes et valeurs dans la construction de la science. In J. Theys (dir.), *Environnement, science et politique, les experts sont formels*. Paris, GERMES, pp. 95-108.
- CONSEIL NATIONAL DES INGÉNIEURS ET DES SCIENTIFIQUES DE FRANCE (2001). *Charte d'éthique de l'ingénieur*.
<http://www.cnisf.org/fr/telecharge/charte-ethique.pdf>
- CONFÉRENCE DES NATIONS UNIES SUR L'ENVIRONNEMENT ET LE DÉVELOPPEMENT (1992). *Rapport de la conférence des Nations-Unies sur l'environnement et le développement*. Rio de Janeiro.
<http://www.agora21.org/institutions.html>
- DELATTRE P. (2003). Recherches interdisciplinaires. In *Encyclopedia Universalis*, Encyclopedia Universalis France SA (éds).
- DE ROSNAY J. (1975). *Le macroscopie - Vers une vision globale*. Paris, Seuil.
- DUPUY J.-P. (2003). Le problème théologico-scientifique et la responsabilité de la science. In *Premières Rencontres Science et Décideurs - Prévenir et gérer les risques*. Poitiers, Ministère de la Recherche et des Nouvelles technologies.
<http://ensmp.net/pdf/2003/PbTheologicoScientifique.pdf>
- ENERGY AND RESOURCES GROUP (2002). *All about ERG*.
<http://socrates.berkeley.edu/~erg/Pages/abouterg.html>
- FLORMAN S.C. (1976). *The existential pleasure of engineering*. New York, St Martin's Press.
- HARTE J. (1985). *Consider a spherical cow: a course in Environmental problem solving*. Los Altos, William Kaufmann Inc.
- KAMMEN D.M. (1996). *A personal introduction to opportunities and resources for research and activism in energy and environmental science and policy*.
<http://socrates.berkeley.edu/~kammen/EnergyJobs.htm>
- KAMMEN D.M. & DOVE M.R. (1997). The Virtues of Mundane Science. *Environment*, vol. 39, n° 6, pp. 10-15, 38-41.
- KAMMEN D.M. & HASSENZAHN D.M. (1999). *Should we risk it? Exploring environmental, health, and technological problem solving*. Princeton, Princeton University Press.
- KOOMEY J. (2001). *Turning numbers into knowledge*. Oakland, Analytic Press.
- LEFEUVRE J.-C. (1991). Des certitudes de l'expert aux doutes du scientifique. In J. Theys (dir.), *Environnement, science et politique, les experts sont formels*. Paris, GERMES, pp. 15-16.
- MORIN E. (1990). Sur l'interdisciplinarité. In *Carrefour des sciences, Actes du colloque du comité national de la recherche scientifique interdisciplinarité*. Paris, éditions du CNRS.
<http://perso.club-internet.fr/nicol/ciret/bulletin/b2c2.htm>
- MORIN E. (1999). *Les sept savoirs nécessaires à l'éducation du futur*. Paris, Unesco.
<http://www.agora21.org/unesco/7savoirs/7savoirs02.html>
- NORGAARD R.B. (2002). Optimist, Pessimists and Science. *Bioscience*, vol. 52, n° 3, pp. 287-292.
- PIVOT A. & LEROY P. (2001). La transdisciplinarité : un mythe ou une réalité ? Compte rendu de symposium. *Natures sciences sociétés*, vol. 9, n° 1, pp. 66-70.
- ROCHE V. (2000). *Impacts de l'incertitude et de l'ambiguïté sur la pratique des systèmes d'information à références spatiales*. Thèse de doctorat en Sciences et Techniques du Déchet, ENS des mines de Saint-Étienne.

ROQUEPLO P. (1991). L'expertise scientifique : convergence ou conflit de rationalités. In J. Theys (dir.), *Environnement, science et politique, les experts sont formels*. Paris, GERMES, pp. 43-80.

SCHUMACHER E.F. (1999). *Small is beautiful – Economics as if people mattered – 25 years later with commentaries*. Vancouver, Hartley & Marks publisher.

WEBER M. (1980). *Le savant et le politique*. Paris, 10/18.

REMERCIEMENTS

Nous remercions la Région Rhône-Alpes qui a financé le séjour de trois mois de Natacha Gondran au sein de ERG.

Cet article a été reçu le 16/06/2003 et accepté le 15/12/2003.

Reports of innovation

Devenir ingénieur par apprentissage actif : compte rendu d'innovation

How to become an engineer through active learning : report of innovation

**Benoît RAUCENT, Jean-Marc BRAIBANT,
Marie Noëlle DE THEUX, Christine JACQMOT,
Elie MILGROM, Cécile VANDER BORGHT,
Pascale WOUTERS**

Faculté des sciences appliquées, université catholique de Louvain
2 place du Levant, 1438 Louvain-la-Neuve, Belgique.
e-mail : raucent@prm.ucl.ac.be

Résumé

En septembre 2000, la faculté des sciences appliquées (FSA) de l'université catholique de Louvain (UCL - Belgique) a inauguré un environnement de formation centré à la fois sur l'apprentissage par problèmes et par projets (APP²) pour les quelques 350 étudiants de 1^{re} année du programme de cinq années d'études menant au diplôme d'ingénieur universitaire. Étudiants et enseignants ont été amenés à passer d'une culture de transmission du savoir centrée sur l'enseignant à une culture d'appropriation centrée sur l'étudiant. Cet article décrit et motive les caractéristiques principales de la nouvelle démarche pédagogique mise en place.

Mots clés : *apprentissage par problèmes, apprentissage par projets, APP, apprentissage actif, formation d'ingénieurs.*

Abstract

In September 2000, the School of Engineering of the Université catholique de Louvain (UCL - Belgium) has officially started a new curriculum based on both Problem- and Project-Based Learning. This innovation concerns the 350-odd first year students of a five-year programme leading to one of the nine engineering degrees granted by the School. Students and staff have switched from a culture of knowledge transmission to a student-centered culture of knowledge acquisition. The paper describes and motivates the major characteristics of the new pedagogical approach which has been adopted.

Key words : *problem-based learning, project-based learning, PBL, active learning, engineering education.*

1. CONSTATS

Depuis 1972, la faculté des sciences appliquées (FSA) – école d'ingénieurs de l'université catholique de Louvain (UCL) – a instauré un système d'évaluation des enseignements des deux premières années de ses programmes d'études. Cette évaluation, effectuée tous les cinq ans par les enseignants, a permis, au fil des années, de formuler un certain nombre de constats :

- la quantité de matière à maîtriser est telle qu'il est devenu impossible de traiter cette matière en profondeur. Les enseignants sont ainsi placés face à un dilemme : survoler une grande quantité de matière ou aborder en profondeur un nombre réduit de concepts ;
- les étudiants semblent rechercher les moyens permettant de réussir les examens plutôt que de s'intéresser à la formation elle-même ;
- les étudiants semblent peu motivés par leur formation, l'absentéisme et le nombre élevé d'échecs en témoignent ;
- enfin, la demande du monde industriel a changé. Les entreprises plaident pour l'acquisition de compétences non techniques telles que la communication, le travail en équipe, ainsi que la préparation aux opportunités de carrières diverses et émergentes plutôt qu'à une carrière unique bien définie (The European round table of industrialists, 1995).

Ces constats récurrents ont conduit un groupe d'enseignants de la FSA à repenser fondamentalement l'approche pédagogique utilisée en vue de mettre en place un dispositif de formation favorisant le passage d'une culture de la transmission du savoir centrée sur l'enseignant à une culture d'appropriation centrée sur l'étudiant. L'article décrit les objectifs généraux de la réforme mise en place ainsi que la démarche d'enseignement/apprentissage qui y est associée.

2. OBJECTIFS ET PRIORITÉS DE LA RÉFORME

À partir de leur volonté de changer la nature du dispositif de formation, des enseignants représentant toutes les disciplines enseignées en candidatures FSA (bac+1 et bac+2, selon la terminologie française) ont défini leurs priorités pour les deux premières années du cursus universitaire.

Mis à part les enjeux tels que « l'augmentation du nombre d'étudiants, l'amélioration de la qualité de leur réussite ou l'accroissement de l'intérêt pour la recherche »¹ et les objectifs formulés en relation avec des contenus disciplinaires (calculer et mesurer les caractéristiques de propagation d'ondes mécaniques à une dimension, construire et utiliser un modèle prédictif pour étudier l'évolution d'un système constitué de plusieurs corps rigides, etc.), ces priorités peuvent être regroupées en fonction de la dimension de la formation qu'elles privilégient, du climat d'enseignement/apprentissage et de la stratégie d'enseignement/apprentissage à mettre en place. Le tableau 1 reprend ces priorités telles qu'elles ont été formulées par les enseignants.

Développement de capacités ²	Les étudiants <ul style="list-style-type: none"> - communiquent efficacement oralement et par écrit, - sont capables de s'auto-évaluer, - font preuve d'autonomie et d'initiative, - construisent et utilisent des modèles, - mettent en œuvre des stratégies de résolution de problèmes, - font preuve d'esprit critique, - conçoivent des dispositifs, outils, procédés nouveaux.
Acquisition de connaissances	Des connaissances provenant de plusieurs disciplines sont intégrées entre elles.
Développement de valeurs	Les problèmes éthiques sont identifiés et pris en compte par les étudiants.
Développement de capacités socio-relationnelles	Les relations enseignants-étudiants sont modifiées, les étudiants travaillent en groupe.
Climat d'enseignement/apprentissage	La nature de la relation entre étudiants et enseignants est changée, les enseignants sont heureux d'enseigner, les étudiants sont heureux d'apprendre.
Stratégies d'enseignement/apprentissage	<ul style="list-style-type: none"> - les étudiants et les enseignants sont passés d'une culture de transmission à une culture d'appropriation, - les enseignants préparent les dispositifs de formation par un travail en équipe, - les étudiants prennent une part active dans leur formation, - les étudiants donnent un sens à leur activité d'apprentissage.

Tableau 1. Priorités définies par les enseignants

Le tableau 1 montre que les priorités formulées par les enseignants font référence à un modèle socio-constructiviste de l'apprentissage au cours duquel l'étudiant construit ses propres connaissances en interaction avec ses pairs (apprendre en s'aidant du groupe) et avec son environnement (apprendre en traitant des situations problèmes faisant appel à diverses ressources) (Jonnaert et al., 1999). Dans le paragraphe suivant, nous décrivons ce que sont les implications de telles options dans la pratique de l'enseignement.

3. STRATÉGIE D'ENSEIGNEMENT ET D'APPRENTISSAGE : LE PROGRAMME MIS AU POINT EN FSA

Après plus de deux années de préparation, d'étude, de visites, de comparaisons et de débats souvent animés, la FSA a opté pour une approche basée sur l'**apprentissage actif en petits groupes**. En septembre 2000, le nouveau dispositif est implanté avec les 350 étudiants de première année, puis en septembre 2001 pour les deux premières années. L'ambition est de confronter les étudiants dès leur entrée à l'université à un mode nouveau de travail et d'apprentissage.

Les choix opérés pour l'élaboration du programme se fondent sur l'articulation de trois principes clés :

- 1. La **contextualisation** des apprentissages ; les étudiants apprennent à partir de situations problèmes³ issues de contextes professionnels ;
- 2. L'apprentissage **coopératif** ; les étudiants abordent la plupart des activités auxquelles ils sont confrontés en groupes stables ;
- 3. Le **tutorat** ; la démarche active d'apprentissage et le recours aux petits groupes induisent une modification des rôles des différents acteurs. L'encadrement des étudiants a été revu en conséquence.

3.1. Un dispositif construit autour de trois axes

3.1.1. *Apprendre en traitant des situations problèmes variées*

Le premier axe de cette approche consiste à placer les étudiants face à des situations problèmes qui « *proposent une tâche à l'élève pour laquelle il ne dispose pas pour le moment de tout ce qui lui est nécessaire pour l'accomplir. Il lui manque ce qui est prévu comme apprentissage, de telle sorte que sa réalisation passe par la maîtrise d'un objectif sous-jacent* » (Poirier-Proulx, 1999, p. 103).

Les situations problèmes doivent être suffisamment complexes pour nécessiter un travail de groupe. Pour stimuler la motivation, elles sont inspirées de la réalité professionnelle et proposent un défi : elles interpellent les étudiants.

« Les étudiants font un plus grand effort pour apprendre et retenir ce qu'ils apprennent lorsqu'ils perçoivent des relations entre la matière et leur propre existence. Ils demandent constamment à savoir pourquoi il leur faut étudier un sujet ou à quoi servira l'information qu'ils apprennent » (Delisle, 1997, p. 8).

Dans l'approche FSA (APP²), deux types de situations problèmes coexistent et se complètent : le **problème** (disciplinaire et de courte durée) et le **projet** (pluridisciplinaire et se déroulant sur une période de 11 semaines).

3.1.1.1. L'apprentissage par problèmes

Celui-ci s'étend sur une période limitée dans le temps (environ 10 heures de travail des étudiants, réparties sur une ou deux semaines). Il vise l'acquisition d'objectifs explicites dans une **discipline** (l'appropriation de nouveaux concepts dans une « matière » donnée) ainsi que le développement d'**habiletés méthodologiques transversales** telles que l'organisation du travail en groupe, la capacité à résoudre des conflits ou à surmonter des différends, la gestion du temps et le respect des échéances, la communication efficace (sous toutes ses formes), la capacité à faire des choix et évaluer des risques, la capacité à mettre en doute et à critiquer les idées d'autrui, l'organisation du travail individuel, etc. Ces habiletés se développent grâce à l'exercice répété de ces démarches, le recours à des outils spécifiques (des questionnaires-guides, par exemple) et l'alternance de séances tutorées en groupes et de périodes de travail individuel.

Avant de résoudre un problème, les étudiants sont invités à comprendre – par un travail en groupe – la tâche qui leur est demandée, à faire le point sur les connaissances dont ils disposent et à préparer la phase suivante en formulant des pistes de travail. Vient ensuite une phase de travail individuel au cours de laquelle les étudiants s'approprient les connaissances qu'ils ont jugé nécessaires. À l'issue de cette phase, l'étudiant rapportera au groupe le produit de son apprentissage individuel. La phase de clôture consiste également à construire une ou plusieurs solutions argumentées au problème de départ. L'objectif n'est donc pas de se débarrasser le plus vite possible du problème en produisant une solution mais bien de formuler une réponse qui atteste une bonne compréhension des connaissances acquises. (Milgrom et al., 2002).

Dans les dispositifs mis au point dans des universités telles que Sherbrooke, Lausanne, Maastricht, etc., les étudiants exploitent le problème en suivant un canevas précis de phases successives, identique pour tout le programme. La progression envisagée en FSA présente également des invariants (phase de démarrage, travail individuel, phase de clôture). Toutefois, le concepteur du problème a une marge de manœuvre pour inscrire d'autres phases dans son dispositif (par exemple : une phase de mise en commun intermédiaire où le groupe fait le point avec le tuteur sur le travail réalisé entre deux phases de travail individuel ou encore une séance de laboratoire).

Signalons aussi que, dans certaines approches d'apprentissage par problèmes (notamment en médecine), les problèmes sont intrinsèquement pluridisciplinaires. Dans l'approche mise en oeuvre par la FSA dans les deux premières années du cursus – consacrées aux disciplines de base – les problèmes sont, à de rares exceptions près, mono-disciplinaires.

Prenons comme exemple le premier problème soumis aux étudiants : « Avec votre patrouille de scouts (éclaireurs), vous souhaitez réaliser une passerelle en bois sur la Lesse⁴ à l'aide de rondins de 3 mètres de long. Pour obtenir l'autorisation, vous devez présenter un projet à un ingénieur des Eaux et Forêts. L'ingénieur a des doutes sur la solidité des appuis aux berges et sur celle d'une pile éventuelle dans la rivière. Votre problème est donc de proposer un agencement de ces rondins pour réaliser la passerelle et de déterminer des bornes supérieures pour les réactions aux appuis permettant d'évaluer quelle doit être la solidité de ceux-ci. Votre problème n'est pas isolé. L'ingénieur souhaite profiter de votre travail pour concevoir d'autres passerelles à d'autres endroits. Vous devez donc présenter une réponse générale au problème ».

Ce problème poursuit des buts de sensibilisation (de Theux et al., 2002) à des aspects :

- disciplinaires ; initier aux concepts de force, moment et équilibre d'une poutre dans des conditions isostatiques (placé en début de curriculum, cet exemple n'a pas pour objectif d'initier les étudiants aux notions de flexion de poutre ou de dimensionnement des rondins) ;
- méthodologiques ; familiariser les étudiants avec la démarche d'apprentissage par problèmes (procédure, phases de travail, responsabilités de chacun, rôle du tuteur).

3.1.1.2. L'apprentissage par projets

Celui-ci combine plusieurs disciplines et est de plus grande ampleur : environ une centaine d'heures étalées sur une période de dix à quatorze semaines. Il a pour but d'amener les étudiants à se former aux principes de la conception et à la gestion d'activités de longue durée en construisant ensemble une véritable démarche interdisciplinaire. L'interdisciplinarité telle qu'elle est conçue ici consiste à placer le groupe d'apprenants dans une situation complexe qui exige qu'ils mobilisent et intègrent, de manière cohérente, des savoirs et savoir-faire multiples (techniques, scientifiques, méthodologiques, manuels) relevant de plusieurs disciplines différentes ainsi que des habiletés transversales non disciplinaires (voir le point 1 ci-dessus) et cela en une seule et même activité d'apprentissage (« leur projet »).

Les projets mis en place à la FSA dans le nouveau curriculum se distinguent des projets « classiques » qui ont généralement comme objectif

d'appliquer des connaissances acquises précédemment et qui visent donc principalement leur synthèse et leur application dans un contexte donné.

L'exemple suivant (premier projet proposé aux étudiants de première année) illustre notre propos. Il est demandé aux étudiants de « *concevoir un système autonome capable de dessiner, sur un terrain, les lignes correspondant aux principaux sports collectifs* ».

En début de projet, les étudiants proposent une structure mécanique de leur engin et réalisent une maquette (étape A de la figure 1). Une fois la solution acceptée par un jury, les étudiants sont amenés à modéliser l'engin afin de déterminer les consignes à imposer au moteur pour parcourir une trajectoire désirée. C'est au cours d'une activité de physique (étape B de la figure 1) qu'ils vont apprendre à modéliser l'engin et ensuite (étape C) à générer les consignes pour les solutions. Enfin, avec les connaissances acquises en informatique, ils réaliseront la programmation du système de commande dans le langage Java. Ils seront enfin amenés à vérifier la faisabilité technique de la solution sur un prototype pilote en LEGO® (module RCX de Lego Mindstorms™) (Aguirre & Raucent, 2002 ; Raucent, à paraître).

À travers ce projet, les étudiants sont particulièrement sensibilisés à trois aspects méthodologiques : l'équilibre entre le travail de groupe et le travail individuel, le processus de travail en groupe, l'auto-évaluation et le suivi des apprentissages. Ils mobilisent des connaissances scientifiques et techniques propres à la physique (la modélisation de la cinématique du robot) et d'autres qui relèvent de l'informatique (la programmation du robot). La figure 1 illustre le rôle intégrateur du projet.

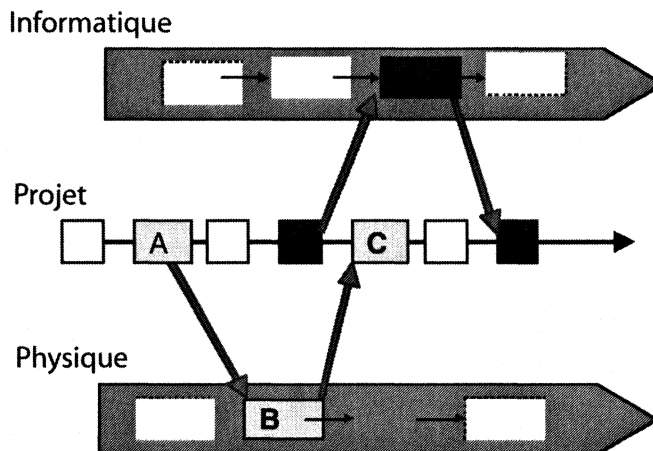


Figure 1. Intégration de l'apprentissage dans le cadre d'un projet (Aguirre & Raucent, 2002)

Les concepteurs du programme argumentent leur volonté **d'emboîter la gestion de problèmes ciblés sur des objectifs disciplinaires dans la démarche intégratrice du projet** par un souci de sortir de manière radicale de la culture transmissive et de maintenir l'étudiant actif dans le plus grand nombre de situations possibles. Nous pensons que cette option renforce la cohérence d'ensemble du dispositif.

En effet, le recours à la contextualisation par le biais de deux dispositifs différents permet d'exercer des habiletés transversales dans des situations variées, augmente les possibilités de transfert des apprentissages et stimule l'engagement des étudiants dans des tâches qui se veulent significatives.

De plus, la combinaison, dans un même programme, de projets et de problèmes pousse les étudiants à exercer des habiletés nécessaires à une démarche active de construction des apprentissages. En aucun cas, ils ne peuvent se limiter à accumuler et à appliquer des connaissances désincarnées. Dans l'apprentissage par problèmes comme dans l'apprentissage par projets, une dynamique est mise en œuvre pour qu'ils soient amenés à :

- identifier et mobiliser les savoirs existants qui seront pertinents pour traiter la situation problème,
- découvrir que certaines connaissances leur font défaut,
- identifier des connaissances à acquérir,
- acquérir ces connaissances par l'étude individuelle,
- confronter les points de vue en groupe et vérifier la compréhension de chacun,
- intégrer et appliquer l'ensemble de leurs connaissances (anciennes et nouvelles) à la situation problème posée.

Ces démarches orientées vers l'appropriation des connaissances exigent de l'étudiant qu'il consacre le temps nécessaire pour progresser dans les notions à travailler. Il ne s'agit plus, comme dans une démarche transmissive, d'inviter les étudiants à étudier des notes de cours. Les concepteurs du programme doivent veiller à réserver dans l'horaire le temps à consacrer au travail d'objectifs d'apprentissage ciblés ; ceci est d'autant plus important qu'une grande partie du programme est réservée à une démarche active des étudiants. Les équipes enseignantes ont été obligées de choisir les concepts essentiels à travailler, se donnant les moyens de lutter contre l'inflation des matières enseignées.

La cohérence interne du dispositif se retrouve également dans la mise en place des mêmes (petits) groupes, tant pour l'apprentissage par problèmes que par le projet.

3.1.2. Apprendre en s'aidant du groupe

Une deuxième caractéristique essentielle de l'approche FSA est le fait que l'apprentissage, nécessairement individuel, est favorisé, stimulé,

encouragé et soutenu par le **travail en groupes**. Si la FSA met l'accent sur le travail en groupes, ce n'est donc pas uniquement parce qu'aujourd'hui la plupart des ingénieurs travaillent en équipes et qu'il faut donc avoir appris à travailler efficacement avec d'autres pour entrer dans la vie professionnelle. Le travail en groupes, quand il est efficace, poursuit de nombreux objectifs qui favorisent l'apprentissage individuel.

Enfin, dans une société des savoirs de plus en plus médiatisée par les nouvelles technologies, le travail en groupes replace les relations humaines au cœur de l'apprentissage.

Sur le plan organisationnel, l'accent mis sur le travail en groupes se matérialise par le fait que les six cents étudiants de 1^{er} et 2^e années abordent la plupart des activités d'enseignement par groupes de six ou huit. Ces groupes restent stables pour l'ensemble des 11 semaines d'un trimestre. Cette option du groupe stable a de nombreux avantages :

- chaque groupe dispose d'ouvrages de référence et d'un ordinateur offrant la possibilité d'utiliser les moyens de communication (courriels, forums, groupes de discussion), de recherches d'informations (Internet et Web), de calcul (MatLab, etc.), de dessin (AutoCAD, etc.) ;
- les locaux, pouvant accueillir chacun trois ou quatre groupes, ont été aménagés en conséquence ;
- enfin, le groupe doit gérer un panel d'activités et est donc dans de bonnes conditions pour apprendre à gérer le temps, habileté transdisciplinaire visée explicitement dans le programme.

Évidemment, pour que le travail en groupes soit réellement efficace, il faut l'organiser et le gérer correctement. Les étudiants sont donc amenés régulièrement à se partager les tâches et les responsabilités au sein de leur groupe (par exemple : l'animation, le secrétariat, l'intendance, etc.) Il ne s'agit pas ici de se répartir des éléments de production tels que la rédaction d'un rapport ou l'écriture d'un programme informatique, mais bien d'établir la contribution de chacun à la réalisation des objectifs d'apprentissage.

Tous les étudiants doivent effectuer une étude personnelle dans les ouvrages de référence et dans les autres ressources mises à disposition (ou découvertes). Le groupe est une aide pour chacun de ses membres à identifier ce qui doit être appris. Il est également l'endroit où, après une phase d'étude individuelle, les étudiants font le bilan de leur apprentissage et confrontent ce qu'ils ont compris.

L'idée sous-jacente à ce choix didactique est la suivante : en expliquant aux autres étudiants du groupe, en les écoutant et en argumentant l'élaboration de solutions, chaque étudiant est confronté naturellement à des « conflits » divers tels que :

- des contradictions entre sa réponse et les réponses des autres étudiants,
- des contradictions et imprécisions dans ses propres réponses,

- des éléments neufs, présents dans le discours des autres étudiants et absents de ses propres explications.

Combinées à ces diverses sources de conflits, des situations particulières rencontrées lors des séances de travail en groupes pourront favoriser la qualité et la profondeur de l'apprentissage (Bourgeois & Nizet, 1997) menant ainsi à l'appropriation des connaissances.

3.1.3. Apprendre avec l'aide de tuteurs

Une thèse centrale de la pédagogie active en groupes est que, s'il est vrai qu'il ne suffit pas, pour un étudiant, d'assister à une présentation de la matière faite par un professeur pour apprendre réellement ce qu'il est supposé apprendre, il ne suffit pas non plus de lancer une question, un exercice ou un problème sur la table d'un groupe d'étudiants pour qu'ils apprennent. C'est à ce niveau qu'intervient le rôle central joué par le tuteur, troisième axe de la réforme.

Au cours d'un trimestre, les groupes d'étudiants travaillent avec un tuteur différent pour chacune des disciplines (mathématique, physique, informatique, etc.) ainsi qu'avec un tuteur qui encadre spécifiquement le projet trimestriel.

Vu le grand nombre d'étudiants (48 groupes de 8 étudiants en 2002-2003) et les ressources limitées en personnel, chaque tuteur encadre simultanément trois ou quatre groupes d'étudiants rassemblés dans une salle (mode « tuteur volant »). Dans un certain nombre de disciplines, des étudiants plus avancés dans le curriculum (étudiants à partir de la troisième année) exercent la fonction de tuteur (Braibant et al., 2002a).

Dans une démarche telle que celle adoptée par la FSA, le statut de l'enseignant est différent de celui qu'il occupe traditionnellement. Le rôle de l'enseignant dans sa fonction de « tuteur » ne consiste plus à transmettre des savoirs de manière magistrale (même si, comme nous le verrons au paragraphe 3.2., l'exposé de savoirs n'est pas supprimé) ou à contrôler l'exactitude de la résolution d'un exercice/problème. L'enseignant/tuteur accompagne l'étudiant dans sa démarche d'apprentissage tant du point de vue du contenu disciplinaire que de la méthode d'apprentissage.

En fonction de la complexité des tâches prévues par la situation problème, du dispositif en lui-même et de l'expérience de l'équipe enseignante, cet accompagnement peut revêtir de multiples fonctions. Barrows (cité par Kaufman, 1995), à partir d'un inventaire des pratiques observées dans les séances tutorées de différentes universités, a établi une catégorisation qui permet de dégager les quatre fonctions principales du tuteur. En FSA, elles sont regroupées sous le sigle générique **C.Q.F.D.**

C comme conduire (« navigating »). L'exploitation de la situation problème suppose que le groupe passe par différentes étapes. Le tuteur

intervient pour guider le groupe au fil de ces étapes, décidées au sein de l'équipe enseignante. Il insiste pour que chaque étape soit réalisée avec un degré d'exigence adéquat, il invite le groupe à approfondir la réflexion si ce n'est le cas, voire à revenir à une étape antérieure si nécessaire. Le tuteur pilote la progression des trois groupes de la salle. Il peut choisir de confronter la production des trois groupes ou, au contraire, de travailler indépendamment avec chaque groupe.

Q comme questionner (« *questionning* »). Traditionnellement, face à une exigence de production, les étudiants sont habitués à demander/recevoir des directives guidant la démarche, la procédure à adopter, les éléments de matière à exploiter ainsi que l'évaluation de l'enseignant en termes de qualité de la réponse. (« *Cette réponse est-elle bien la bonne ?* »).

Dans une démarche APP, le rôle du tuteur consiste principalement à susciter le raisonnement chez les étudiants, à stimuler la mobilisation des savoirs et à relancer au groupe ses propres questions de manière à ce que les étudiants puissent déterminer, par eux-mêmes, l'état de leurs connaissances, leur degré de maîtrise des concepts pour en arriver à déterminer la qualité de leurs réponses (« *Tous les membres du groupe sont-ils d'accord avec la réponse ? Y a-t-il un élément à propos duquel vous doutez ? Comment montrer que votre réponse est correcte ? D'autres réponses sont-elles possibles ?* »).

Un rôle important du tuteur consiste donc à être un « révélateur » du niveau de compétence des étudiants par une démarche non pas prescriptive, mais questionnante, interpellante (« *Dans votre démarche, quelles sont les hypothèses utilisées ? Quelles sont les limites d'utilisation de votre modèle* », etc.)

Ainsi, à travers les questions qu'il pose et les ressources auxquelles il fait référence, le tuteur contribue à la création d'un environnement propice à l'apprentissage actif.

F comme faciliter (« *facilitating* »). Le tuteur réalise des interventions verbales et non verbales susceptibles de créer un climat positif pour le travail dans le groupe. Par exemple, il sollicite différents points de vue pour stimuler un débat, il relance les questions individuelles au sein du groupe, il encourage l'animateur à exercer son rôle, donne une rétroaction positive quand le groupe fonctionne bien. Le « tuteur volant » doit être attentif à bien calibrer son intervention car, entre ses passages dans le groupe, celui-ci doit trouver ses propres pistes de travail et... de motivation.

D comme diagnostiquer (« *diagnosing* »). Cette fonction est particulièrement importante dans la situation du « tuteur volant ». En effet, avant d'intervenir, le tuteur observe, questionne, engrange de l'information pour se faire une idée de l'état d'avancement de chacun et de la dynamique du groupe. Ce temps de diagnostic lui permet d'ajuster au mieux son interven-

tion (faut-il remotiver le groupe ? le réorienter vers un but commun ? clarifier des notions et questionner ? encourager à travailler telle ou telle étape ? etc.)

Le « référentiel de compétences du tuteur idéal en FSA » (Braibant et al., 2002b) met en évidence la complexité du rôle du tuteur, qui exerce simultanément trois macro-compétences. En effet, il doit avoir intégré, avant les séances tutorées, une série de données (les étapes du processus, les objectifs d'apprentissage, sa place dans le système de formation et son rôle de relais, etc.) D'autre part, il doit être capable d'utiliser ces « données préalables » en situation, de réagir sur le vif en séance. Enfin, il devra être au clair dans sa relation avec les étudiants et trouver une juste distance face aux trois groupes (ni « copain » ni « professeur *ex cathedra* ») et opter pour une attitude qui favorise l'autonomie des étudiants.

Le fait, pour un tuteur, de devoir accompagner plusieurs groupes simultanément rend la tâche à accomplir encore plus délicate : il lui faut nécessairement combiner les interventions au sein de chaque groupe avec le souci de ne pas perdre de vue ce qui se passe dans les autres groupes au même moment.

Ces attitudes ne sont, pour le tuteur, ni innées, ni spontanées, ni intuitives. Un programme de sensibilisation et de formation a été mis au point, comme explicité plus loin.

3.2. Quels ingrédients pour une telle démarche ?

Le programme de deux années est organisé en 6 trimestres de 11 semaines chacun. Chacune des deux années se clôture par 3 semaines d'évaluation (examens). Chaque trimestre comprend un projet pluridisciplinaire. En sus des situations problèmes décrites ci-dessus, le programme prévoit également des situations de travail en sous-groupes à partir d'exercices (apprentissage par exercices) et des temps de restructuration collectifs en plus grands groupes.

3.2.1. L'apprentissage par exercices

L'apprentissage par exercices (APE) est utilisé *en complément* d'autres dispositifs, tels que l'apprentissage par problèmes, et s'en distingue notamment par le fait que l'apprentissage est plus « guidé » et de durée plus limitée (généralement une seule séance). À lui seul, ce dispositif ne peut pas rencontrer tous les objectifs visés dans la réforme. (Méthodes et Outils, 2001).

La contextualisation peut être prévue dans les énoncés. Alternativement, ceux-ci peuvent porter sur une matière déjà « contextualisée » par d'autres activités (projet, problème, etc.)

L'activité se déroule essentiellement par petits groupes, dans le cadre d'une séance en présence d'un tuteur. Les étudiants reçoivent un « questionnaire d'exercices » auquel ils doivent répondre et à travers lequel ils découvrent de nouvelles notions (nouveaux concepts ou nouvelles méthodes, ou encore résultats théoriques, etc.) Idéalement, le questionnaire pourrait s'achever par une série de questions de réflexion devant guider l'étudiant dans son travail individuel de restructuration des concepts et méthodes acquises.

Le tuteur ne présente pas un « rappel » des méthodes à appliquer, puisque l'essentiel de ces méthodes est à découvrir par l'intermédiaire des exercices. Il veille à ce que l'ensemble des étudiants du groupe participe de manière effective à la séance. Il assure une dynamique de groupe efficace qui permet à chacun de confronter sa compréhension et ses difficultés avec les autres membres, afin d'atteindre les objectifs fixés.

3.2.2. Le cours « magistral » : (re-) structuration, en grands groupes

Dans un programme rythmé par des projets et des problèmes, les cours « magistraux » disposent d'un statut particulier. Il s'agit principalement d'introduire une activité à venir ou, plus fréquemment, de restructurer les compétences travaillées dans une activité passée.

Les cours sont souvent organisés **après** que les étudiants aient abordé une première fois les concepts qui seront présentés (pendant la résolution de problèmes ou pendant le travail sur le projet) : ces cours ont donc la **restructuration** comme objectif principal. Les étudiants participent donc aux cours en ayant déjà une première représentation mentale des notions abordées. Face à un tel public, l'enseignant peut focaliser son intervention sur la synthèse en mettant en évidence la structure et les liens entre les concepts. C'est aussi pour lui l'occasion de fournir une rétroaction sur le travail réalisé dans le cadre des problèmes précédents et donc de corriger certaines erreurs de compréhension ou d'application.

Comme tous les sujets ne peuvent nécessairement être abordés de manière efficace dans le cadre du processus d'apprentissage par problèmes, certains enseignants organisent également des cours magistraux **avant** le démarrage d'un nouveau problème afin d'y **introduire** des notions de base, des éléments complémentaires ou des concepts particulièrement délicats.

Il faut noter que, dans le système mis en place, le cours n'est plus un lieu où la totalité de la matière est présentée par l'enseignant.

3.2.3. L'évaluation

Le tableau ci-après propose une vision d'ensemble des activités d'évaluation des acquis des étudiants.

	Évaluation formative	Évaluation certificative
Évaluation continue <i>Prestations en cours de trimestre</i>	<p>Activités</p> <p>Prestations des étudiants au cours des différentes activités organisées pendant le trimestre (APP, exercices, laboratoires, travaux de groupes, etc.)</p> <p><i>En amphithéâtre, correction globale et commentée des évaluations écrites individuelles.</i></p>	<p>Activités</p> <ul style="list-style-type: none"> - Évaluations écrites individuelles à des moments clés du trimestre prévues en début de semaine 5 (ou 6) et 9 (ou 10). - Prestations en cours de trimestre (les étudiants en sont informés au plus tard 15 jours avant la prestation). <p>Production de la note</p> <p>Pour chaque matière, une note synthétisant l'évaluation continue est attribuée individuellement à l'étudiant.</p>
Évaluation des projets	<p>Activités</p> <p><i>Suivi et rétroaction de la part du tuteur tout au long de la gestion du projet. Pour certains projets, des « pré-jurys » ou « jurys d'orientation » sont prévus en cours de projet.</i></p> <p><i>Réunion de débriefing avec le tuteur du projet après la présentation et la défense du projet.</i></p>	<p>Activités</p> <ul style="list-style-type: none"> - Présentation orale du projet et sa défense par le groupe devant jury. - Production d'un rapport écrit par groupe. - Évaluation écrite individuelle réalisée en semaine 5 (ou 6) et 9 (ou 10). <p>Production de la note</p> <p>Évaluation des projets confiée à des jurys de projet qui prennent en compte le travail du groupe, le rapport écrit, l'évaluation individuelle et la présentation. Cette note comporte une composante de groupe et une composante individuelle. Utilisation de grilles critériées ainsi qu'une réunion de concertation des présidents de jurys visant à assurer la fiabilité des évaluations.</p>
Évaluation en fin d'année	<i>Sans objet.</i>	<p>Activités</p> <p>Examen écrit pour chacune des disciplines principales : mathématiques, physique, chimie et informatique.</p> <p>Production de la note</p> <p>Évaluation dans l'ensemble des matières, quelles que soient les formes d'apprentissage ; porte sur la familiarisation des étudiants avec les concepts et méthodes utilisés au cours de l'année, sur leur compréhension en profondeur et sur l'acquisition de compétences durables.</p>

Tableau 2. Activités d'évaluation des acquis des étudiants

« L'évaluation des acquis des étudiants comporte trois composantes obligatoires : l'évaluation continue, l'évaluation des projets, l'examen de fin d'année » (commission de premier cycle, 2002, article 1). Les notes de chacune de ces composantes interviennent lors de la délibération finale pour un tiers des points. L'évaluation continue et l'évaluation des projets réalisés en cours d'année visent le travail régulier de l'étudiant. L'inscription aux examens de fin d'année peut être conditionnée à la participation régulière et satisfaisante de l'étudiant aux activités de l'année.

4. UNE RÉFORME N'EST PAS UN LONG FLEUVE TRANQUILLE

Les sections précédentes de cet article présentent le constat à la base de la réflexion, les priorités fixées et les lignes directrices du programme mis en place à la FSA. Il nous paraît opportun de présenter les étapes principales de la mise sur pied de cette réforme et de préciser les écueils rencontrés.

Étape 0 : le questionnement

Le processus de réforme a commencé par un constat et une série de questions fondamentales telles que : « *Pourquoi voulons-nous changer ? Que voulons-nous changer ? Avons-nous les moyens du changement ?* »

Des réponses telles que « *Pourquoi changer, nous sommes déjà parmi les meilleurs. De toutes façons, nous n'avons pas les moyens d'un changement radical. Une pédagogie active n'est pas envisageable dans notre domaine* », ont servi de révélateur du souhait de l'institution (ou de ses membres) d'entamer réellement une réflexion en profondeur sur la question de la formation de nos étudiants.

Il paraît impossible d'amorcer un changement aussi radical sans avoir débattu préalablement de ces questions fondamentales et sans arriver à un consensus qui, même s'il n'est pas partagé par tous les acteurs, influence l'orientation du nouveau curriculum.

Notre démarche de questionnement a été facilitée, il faut le souligner, par une série d'observations et d'échanges avec d'autres institutions.

Étape 1 : les priorités

Comme nous l'avons souligné à la section 2, un certain nombre d'enseignants a travaillé à établir les priorités de la réforme et à clarifier la demande : les performances à atteindre, tant au niveau des objectifs que des méthodes pour y arriver. Ce travail est essentiel, car il permet de se doter d'un vocabulaire et d'objectifs communs pour la suite du processus.

Étape 2 : l'appropriation et la construction

Réaliser le constat et préciser les priorités fut le travail d'un petit groupe de personnes. Le nombre de personnes impliquées a ensuite été élargi afin de pouvoir entamer la construction du nouveau curriculum.

Il ne s'agissait pas de se borner à transmettre les résultats du travail d'un petit groupe de personnes mais, au contraire, d'impliquer le plus grand nombre possible d'acteurs du terrain et de leur **faire prendre conscience du changement de rapport au savoir et au pouvoir** impliqués par cette nouvelle démarche. Ce processus fut lent, difficile et douloureux !

Pour beaucoup d'enseignants, les difficultés majeures à surmonter consistent :

- à accepter la nécessité de mieux comprendre ce qu'est apprendre, donc ce qu'est enseigner, donc à accepter de se remettre à apprendre,
- à abandonner certains privilèges, à chercher un consensus et à s'y soumettre,
- à s'intéresser à ce qui « *sort de mon domaine de spécialité* »,
- à se familiariser avec des aspects de formation méthodologique.

On retrouve ici la démarche de construction « petit à petit » du curriculum, selon un principe long, en s'appuyant sur des démarches participatives d'élaboration de projets. Cette étape représente un accouchement parfois douloureux, parce qu'il y a un référentiel nouveau à construire entre les acteurs (Roegiers, 1997).

Dans cette perspective, nous avons pris beaucoup d'initiatives : visites de spécialistes étrangers, participation à des colloques et à des cours d'été, organisation de séances de formation sur la base d'une mise en situation, etc.

Concevoir les activités à destination des étudiants est également un travail important. Il s'agit de placer l'étudiant dans un contexte qui suscite le besoin d'apprendre et non plus simplement dans l'état de recevoir une formation.

Il ne suffit cependant pas de proposer un simple défi : il faut une série d'activités qui permettent effectivement d'acquérir de nouvelles compétences. Pour cela il faut, dès la conception des activités, placer l'acquisition des connaissances et des compétences au moins au même niveau de valeur que la production de la solution (par exemple : la rédaction d'un rapport ou la réalisation d'un prototype, etc.) Il faut également accorder une place à la réflexion sur le travail accompli (par exemple par des activités de bilan intermédiaire et final). Les concepteurs se sentent souvent mal à l'aise face à cette méta-réflexion. Il faut donc qu'ils en comprennent l'importance avant de commencer la construction proprement dite des activités. À l'issue de ce cheminement, les enseignants en viennent à se considérer comme des

architectes et des concepteurs d'occasions d'apprendre plutôt que comme des conférenciers...

L'importance, pour les enseignants, de la concertation et du travail en équipe apporte des modifications dans l'organisation structurelle de la faculté avec la création de nouvelles fonctions : « coordination de trimestres » et « coordination de matières ». Le mode de travail et de communication évolue donc également entre les enseignants.

Étape 3 : la formation des tuteurs

D'un point de vue organisationnel, une centaine de personnes (professeurs, assistants, chercheurs et étudiants tuteurs) accompagne, chaque trimestre, des groupes d'étudiants de première année.

Lors de la mise en place d'une démarche de pédagogie active, la formation des tuteurs à leur nouveau rôle est cruciale. En effet, le comportement du tuteur a un impact sur les résultats des étudiants. Wilkerson, qui a réalisé une revue de la littérature sur la place du tuteur dans l'apprentissage par problèmes, précise : « *Le modèle qui en résulte suggère qu'un tuteur efficace doit posséder trois qualités : une préoccupation et un intérêt pour les étudiants, une base de connaissances pertinente pour les objectifs du cours et la capacité de traduire ces connaissances en termes accessibles aux étudiants. Ces trois caractéristiques exercent des influences directes et indirectes sur le fonctionnement des groupes tutorés et, par conséquent, sur l'intérêt intrinsèque pour la matière et le temps consacré à l'étude individuelle, donc sur la réussite aux examens* » (Wilkerson, 1996, p. 28).

Parmi les facteurs considérés dans une étude statistique interne en vue de déterminer leur impact sur la réussite des étudiants, nous avons constaté une corrélation significative entre les notes obtenues par les étudiants à l'occasion d'évaluations certificatives et la personne qu'ils ont eue comme tuteur. Cette étude sera complétée et poursuivie afin d'identifier avec plus de précision les facteurs liés aux caractéristiques des tuteurs et ayant un impact significatif sur la performance des étudiants (Schmidt & Moust, 2000). Il nous apparaît néanmoins important, à la lumière des premières observations effectuées, de provoquer, notamment par le biais de formations, un changement de la représentation que les enseignants ont de leur rôle. Ainsi, ils sont plus à même de mettre en place des conditions propices à l'appropriation des connaissances, tant par le travail de groupe que par le travail individuel, à partir des problèmes et des projets.

Un préalable pour tout tuteur est d'intégrer les priorités du nouveau programme ainsi que les outils de base qui lui permettent d'assumer ses fonctions.

La formation peut donc prendre deux formes bien différentes :

- une initiation destinée à des néophytes, obligatoire pour tous les tuteurs,

organisée sur deux demi-journées et qui comporte des mises en situation, des jeux de rôle, des analyses de séquences vidéos ;

- une formation plus avancée pour des tuteurs ayant déjà une expérience pratique, dans laquelle on privilégie la supervision avec rétroaction (Braibant et al., 2002a), ainsi que la confrontation de situations vécues avec l'observation de séquences vidéos ou encore les réunions de préparation de séances tutorées. Ces démarches tablent sur un accompagnement interactif des tuteurs. Elles permettent de travailler « à chaud » les activités que les étudiants doivent effectuer en intégrant les concepts à aborder aux aspects méthodologiques. Elles se révèlent être de véritables moments de formation « *just in time* » des tuteurs, au lieu de l'approche « *just in case* » rencontrée précédemment (de Theux et al., 2002).

Étape 4 : entretenir la dynamique

Enfin, il ne suffit pas de lancer un nouveau programme, il faut le nourrir pour qu'il puisse évoluer, s'améliorer, s'adapter aux exigences de chacun, se renouveler. En un mot, il faut soutenir et préserver le dynamisme.

Après l'enthousiasme contagieux de la première année, durant laquelle tous (enseignants et étudiants) se sentent des pionniers, il faut faire face à des critiques (voire une franche hostilité) et à une certaine lassitude. La pédagogie active doit être en mesure de combattre la contre-information faite par des enseignants d'institutions « concurrentes », par certains parents d'étudiants, par des enseignants du secondaire, par des anciens étudiants, voire même par des collègues. Une énergie considérable doit être dépensée – alors même qu'il y a encore beaucoup à faire pour améliorer les dispositifs – pour rappeler le bien fondé et les avantages attendus des pédagogies actives.

Certains enseignants *a priori* peu intéressés par les pédagogies actives avaient initialement accepté de tenter l'expérience tout en étant convaincus « *que cela ne fonctionnerait pas* ». Réalisée dans une telle optique, l'expérience s'est évidemment avérée négative pour eux... et pour certains autres : « *J'avais dit que cela ne marcherait pas, j'ai essayé et maintenant je peux vous confirmer que cela ne marche pas.* »

Quoi qu'il en soit, après deux ans passés à imaginer les nombreuses activités de formation, à régler les problèmes logistiques, à former les tuteurs, etc., c'est seulement maintenant que nous pensons être en mesure de poser les bonnes questions, d'entamer un processus général de réduction de la matière, de mener à bien une réflexion sur la nature réelle de l'apprentissage et des outils à mettre en œuvre. « *Existe-t-il un autre apprentissage que l'apprentissage actif ?* »

Si la réforme n'est pas un long fleuve tranquille, elle n'en est pas moins passionnante. Les étudiants le perçoivent clairement : une enquête réalisée en octobre 2002 révèle que le choix de faire ses études à la FSA de l'UCL est largement motivé par la pédagogie qui y est pratiquée⁵.

5. CONCLUSION

Lancer une réforme de cette ampleur est source de très grandes espérances. Un article de la revue *The Economist* (décembre 2001) consacré aux réformes dans l'enseignement universitaire concluait que « *les deux pièges à éviter sont les attentes excessives et le découragement précoce* ».

Les initiateurs de la réforme pensaient pouvoir tout changer, tout de suite : ils n'avaient pas réalisé la longueur du chemin à parcourir. Face aux multiples problèmes de logistique, aux discussions houleuses avec les collègues, etc., il est difficile de garder le cap et de ne pas perdre courage. Il faut se rappeler constamment que cette réforme vise le long terme et que le bilan intermédiaire réalisé après un peu plus de deux années est, somme toute, plutôt positif : les étudiants s'approprient la réforme avec enthousiasme, de nombreux enseignants aussi... mais pas tous ! Un réel esprit d'équipe, inédit, s'est développé chez la plupart des enseignants responsables d'un trimestre (intégration des matières, principes d'évaluation, etc.)

Il reste encore bien du chemin à parcourir, notamment en ce qui concerne l'évaluation et, en particulier, le difficile équilibre entre ses facettes formative et certificative. L'harmonisation de l'enseignement supérieur européen (processus dit « de Bologne ») permettra peut-être de réaliser les ajustements nécessaires. Gardons en mémoire la déclaration d'un participant lors d'une réunion de concertation étudiants/enseignants : « *Toutes les critiques que nous émettons sur le nouveau système sont certes fondées, mais cela devait être encore bien pire auparavant* ».

Ce bref bilan rejoint le regard que posent Langevin & Bruneau sur les démarches d'innovation pédagogique : « *Changer de paradigme ne signifie pas maquiller des pratiques pour les rendre plus à la mode mais vivre sa tâche de professeur d'une manière particulière (...) Ce changement de posture se traduit au quotidien par des stratégies pédagogiques et évaluatives cohérentes, dans le choix du matériel didactique, dans le choix des mots, dans le mode de questionnement utilisé pour apprivoiser une discipline, pour faciliter l'apprentissage. Si tous les professeurs ont été conviés à repenser la mission de l'université et à initier un changement de paradigme, tous n'ont pas répondu à l'invitation avec la même sensibilité.* » (Langevin & Bruneau, 2000, pp. 21-22).

NOTES

1. Les formulations entre guillemets correspondent aux objectifs tels qu'ils ont été définis par les enseignants.

2. « *Une capacité, c'est le pouvoir, l'aptitude à faire quelque chose. C'est une activité que l'on exerce. Identifier, mémoriser, analyser, synthétiser, classer, sérier, abstraire, observer,... sont des capacités.* » (Roegiers, 2000, p. 50)

3. Lise Poirier-Proulx définit la situation problème comme une « *situation concrète décrivant à la fois le contexte le plus réel possible et la tâche face à laquelle l'élève est placé afin qu'il mette en œuvre les connaissances conceptuelles et procédurales nécessaires au développement et à la démonstration de sa compétence* » (Poirier-Proulx, 1999, p. 166).

4. Rivière des Ardennes belges.

5. 62,6 % des 129 étudiants ayant répondu à une enquête-sondage déclarent avoir choisi la FSA pour la méthode pédagogique utilisée ; 16,3 % choisissent la proximité par rapport au domicile ; 13 % suivent un avis, un conseil, une recommandation ; 4,1 % font un choix de nature philosophique tandis que 4,1 % suivent une tradition familiale.

BIBLIOGRAPHIE

AGUIRRE E. & RAUCENT B. (2002). L'apprentissage par projet. Vous avez dit projet ? non, par projet ! In A. Laloux (éd.), *Actes du 19^e colloque de l'AIPU, Association Internationale de Pédagogie Universitaire*, 29-31 mai 2002. Louvain-la-Neuve, cédérom édité par l'IPM de l'université catholique de Louvain.

BOURGEOIS E. & NIZET J. (1997). *Apprentissage et formation des adultes*. Paris, PUF.

BRAIBANT J.-M., de THEUX M.-N., AGUIRRE E. & WOUTERS P. (2002a). Sensibilisation des enseignants aux méthodes actives : quel impact et quelle efficacité sur le terrain ? In A. Laloux (éd.), *Actes du 19^e colloque de l'AIPU, Association Internationale de Pédagogie Universitaire*, 29-31 mai 2002. Louvain-la-Neuve, cédérom édité par l'IPM de l'université catholique de Louvain.

BRAIBANT J.-M., de THEUX M.-N., SMIDTS D. & WOUTERS P. (2002b). *Référentiel de compétences caractérisant un tuteur idéal dans un processus d'APP et pistes pour le dispositif de formation des tuteurs*. Document interne inédit de la faculté des sciences appliquées et de l'institut de pédagogie universitaire et des multimédias, université catholique de Louvain.

COMMISSION DE PREMIER CYCLE (2002). *Évaluation des acquis des étudiants, dispositions particulières pour FSA 11, ARCH 11, FSA 12, ARCH 12 en 2002-2003*.

http://www.fsa.ucl.ac.be/candis/commun/Reglement_examens_02-03.pdf

DELISLE R. (1997). *How to use problem-based learning in the classroom*. Alexandria VA, Association for supervision and curriculum development.

De THEUX M.-N., JACQMOT C. & WOUTERS P. (2002). Se former à son métier d'étudiant dans un contexte d'apprentissage actif en groupe. In A. Laloux (éd.), *Actes du 19^e colloque de l'AIPU, Association internationale de pédagogie universitaire*, 29-31 mai 2002. Louvain-la-Neuve, cédérom édité par l'IPM de l'université catholique de Louvain.

THE ECONOMIST (2001). *Please sir, can we have some more ?* Dec 20th.

THE EUROPEAN ROUND TABLE OF INDUSTRIALISTS (1995). *Education for Europeans – Towards the Learning Society*. <http://www.ert.be/pdf/edu2.pdf>.

JONNAERT P. & VANDER BORGHT C. (1999). *Créer des conditions d'apprentissage. Un cadre socioconstructiviste pour la formation didactique des enseignants*. Bruxelles, De Boeck.

- KAUFMAN D. (1995) Preparing Faculty as Tutor in PBL. In W.A. Wright. et al (éds), *Teaching improvement practices*. Bolton, Anker Publishing Company, pp. 101-126.
- LANGEVIN L. & BRUNEAU M. (2000). *Enseignement supérieur, vers un nouveau scénario*. Issy-les-Moulineux, ESF éditeur.
- MÉTHODES ET OUTILS (2001). *Une modalité d'apprentissage par petits groupes : l'apprentissage par exercices*. Louvain-la-Neuve, document interne inédit de la faculté des sciences appliquées de l'université catholique de Louvain.
- MILGROM E., JACQMOT C., WOUTERS P. & de THEUX M.-N. (2002). *L'apprentissage par problèmes*. <http://www.fsa.ucl.ac.be/candis/>
- POIRIER PROULX L. (1999). *La résolution de problèmes en enseignement*. Sherbrooke, de Boeck.
- RAUCENT B. (à paraître). What kind of project in a basic year of an engineering curriculum. *Journal of Engineering Design*, vol. 15, n° 1.
- ROEGIERS X (2000). *Une pédagogie de l'intégration. Compétences et intégration des acquis dans l'enseignement*. Bruxelles, de Boeck.
- ROEGIERS X. (1997). *Analyser une action d'éducation ou de formation*. Bruxelles, de Boeck.
- SCHMIDT H. & MOUST J. (2000). Factors affecting small-group tutorial learning : A review of research. In D.H. Evensen (éd.), *Problem-based learning : a research perspective on learning interactions*, [foreword by Howard Barrows]. Mahwah (N.J.), Erlbaum, Lawrence, Associates, pp. 19-51.
- WILKERSON L (1996). Tutors and small groups in problem-based Learning : lessons from the literature. In L Wilkerson & W.H. Gijsselaers (éds), *Bringing Problem-based Learning to Higher Education : theory and practice*. San Francisco, Jossey-Bass Publishers. pp. 23-32.

Cet article a été reçu le 10/12/2002 et accepté le 15/07/2003.

Entre savoir et savoir-être, du rôle des TIC dans le processus d'apprentissage du génie électrique : compte rendu d'innovation

From comprehension to analysis, the ICT's role in electrical engineering learning process : report of innovation

Sophie LABRIQUE, Damien GRENIER, Francis LABRIQUE

Université catholique de Louvain
Laboratoire d'électrotechnique et d'instrumentation
3 place du Levant, 1348 Louvain-la-Neuve, Belgique.

Résumé

Cet article présente comment les TIC ont été utilisées à la faculté des sciences appliquées de l'université catholique de Louvain pour l'enseignement du génie électrique et en particulier des convertisseurs électromécaniques et des circuits électriques. Il détaille les différents types d'outils pédagogiques interactifs qui ont été développés et expose la mise en œuvre de laboratoires virtuels auprès des étudiants dans deux contextes différents : une pédagogie relativement classique (basée sur l'interaction de cours, exercices et travaux pratiques) et une pédagogie active (faisant largement appel à des apprentissages par problèmes et par projets). Les réactions des étudiants ont été recueillies et synthétisées : elles se révèlent être un indicateur

intéressant pour l'évaluation de l'impact de tels outils dans le processus d'apprentissage. Ces nouveaux outils pédagogiques interactifs sont perçus comme facilitant l'acquisition rapide de compétences intermédiaires, entre la simple connaissance de la matière (mieux transmise par le cours magistral et les supports associés : syllabi, livres, etc.) et les compétences de haut niveau mieux développées dans le cadre d'un projet. Réussir à coaliser les cours magistraux, les TIC et l'apprentissage par projets est donc le prochain défi à relever pour parvenir à une formation moderne, véritablement efficace, des sciences de l'ingénieur en général, et du génie électrique en particulier.

Mots clés : *TIC, didacticiels interactifs, laboratoires virtuels, évaluation par les étudiants, processus d'apprentissage.*

Abstract

The aim of this paper is to present how the ICT have been used at the faculty of applied science of the catholic university of Louvain, for teaching of electrical engineering and more precisely of the electromechanical converters and electrical circuits. It retails the different types of interactive educational tools that have been developed. Some of these virtual laboratories have already been tested with students in two different contexts: a relatively classical pedagogy (based on the interaction of lectures, exercises and laboratories) and a active one (widely using problem and project based learning). Student reactions have been collected and synthesized: they reveal an interesting way for evaluating the impact of such tool in the learning process. These tools are seen as allowing a fast acquisition of intermediate ability, between the simple knowledge of the contents (better transmitted through lectures and associated media: syllabi, books...) and the high-level ability better developed through the project based learning. To succeed to combine lectures, ICT and project based learning is then the next challenge in order to obtain a modern training, really efficient, of generally speaking engineering sciences and particularly of electric engineering.

Key words : *ICT, interactive tutorials, virtual laboratories, student's reactions, learning process.*

1. INTRODUCTION

Depuis 1999, le département d'électricité de la faculté des sciences appliquées de l'université catholique de Louvain développe et présente sur la toile des didacticiels qui regroupent différents outils pédagogiques interactifs et font un large usage des technologies de l'information et de la communication (les TIC).

Les premiers outils qui ont été développés concernent l'enseignement des convertisseurs électromécaniques (les « machines électriques », qu'elles soient utilisées en tant que moteurs ou générateurs d'énergie électrique). Ce premier didacticiel s'adresse aux étudiants commençant une spécialisation en électricité ou en électromécanique (en 3^e année du cycle universitaire).

Le succès de cette expérience a incité les promoteurs de cette initiative à l'étendre à l'enseignement de base de l'électricité (1^{re} année), en particulier à l'apprentissage des circuits électriques.

Cet article présente brièvement le concept développé, qui associe étroitement un livre de référence et un site Internet qui regroupe différents types d'outils interactifs. Il synthétise les réactions des étudiants recueillies suite à la mise en œuvre de ces outils, et les enseignements que l'on peut en tirer. Mesurer l'efficacité de ces outils interactifs dans le processus d'apprentissage nécessite de les éprouver face aux objectifs poursuivis et aux approches pédagogiques (l'une classique, l'autre axée sur les méthodes actives) dans lesquelles ils s'insèrent.

Outre l'acquisition de compétences de niveau intermédiaire, nous verrons que les nouvelles technologies de l'information et de la communication ont également profondément modifié les relations au sein du triangle didactique (enseignants-savoirs-étudiants).

2. LES MOTIVATIONS DU PROJET

Le génie électrique est une matière difficile à enseigner, qui exige de la part des étudiants un niveau d'abstraction beaucoup plus élevé que d'autres disciplines. En mécanique les notions élémentaires de position, de vitesse, de forces, qu'elles soient de gravité, centrifuges, d'attraction, etc., sont des notions intuitives, correspondant à des expériences vécues par tout un chacun et sur lesquelles l'enseignant peut s'appuyer. Les lois qui régissent un dispositif mécanique sont faciles à visualiser, car elles peuvent être illustrées au moyen d'expériences qui montrent de manière directe les relations mises en jeu. En revanche, nul n'a jamais vu une charge, un courant ou un potentiel électrique autrement que par les effets qu'ils produisent. Il en va de même pour les notions de champs électriques et magnétiques ou de flux. Ces grandeurs ne peuvent être visualisées qu'au travers d'une instrumentation (voltmètre, ampèremètre, oscilloscope) qui mesure les valeurs de certains paramètres et ne donne qu'une vision indirecte des phénomènes physiques en jeu. Cela nécessite donc de la part des étudiants un niveau d'abstraction élevé. Quand en outre ces grandeurs évoluent simultanément dans le temps et dans l'espace, comprendre qu'elles peuvent interagir pour créer des efforts mécaniques est loin d'être immédiat.

En charge des ces enseignements à la faculté des sciences appliquées de l'université catholique de Louvain, nous étions conscients des problèmes de compréhension rencontrés par nombre d'étudiants. Nous étions également lucides quant aux limites de l'exposé oral ou du passage au laboratoire qui ne peut offrir à l'étudiant, pour des raisons de temps et de sécurité, l'occasion de procéder à toutes les expériences nécessaires à une compréhension en profondeur de la matière. C'est pourquoi nous avons voulu, par l'intégration des technologies de l'information et de la communication (les « TIC »), offrir à l'apprenant un espace de visualisation et d'expérimentation virtuelle des phénomènes qu'il étudie. L'interactivité proposée par ces nouveaux outils pédagogiques lui donne l'occasion de vérifier ses hypothèses, de comparer différents cas, de faire des erreurs (ce qui s'avère souvent plus formateur qu'une manipulation « réussie » en suivant rigoureusement un plan d'expérience que l'on ne comprend pas) sans risque de « casse » ou d'accident.

Notre ambition dépasse donc largement la migration brute du contenu traditionnel d'un cours vers le web : il s'agit de définir une démarche d'intégration des TIC au cœur de notre enseignement, démarche qui se base sur le processus d'apprentissage des étudiants dont on analyse le comportement et la perception.

3. LE CONCEPT

3.1. Association d'un livre et d'un site

L'apparition de l'écrit n'a pas rendu caduc l'exposé oral dans les pratiques d'enseignement. L'audiovisuel n'a pas supplanté le livre. Les TIC ne bouleverseront pas non plus complètement le processus d'apprentissage : elles ne s'implanteront que là où elles apportent un plus à l'étudiant, où elles s'avèrent plus efficaces ou agréables à utiliser que les supports pédagogiques classiques.

Conscients de cette réalité, nous n'avons pas souhaité développer un site multimédia autosuffisant, mais avons d'emblée choisi de construire un didacticiel qui soit complémentaire d'un livre de référence.

Le livre répond au besoin d'avoir un support structuré et confortable. Pour tout texte dépassant une certaine longueur (2 ou 3 écrans d'ordinateur) le médium papier est en effet systématiquement préféré. Le site est destiné à illustrer, visualiser et appréhender les concepts théoriques.

En concevant ce site en complément des supports plus traditionnels d'enseignement et non en lieu et place de ceux-ci, notre approche offre la possibilité d'évaluer l'apport spécifique des TIC et de vérifier si elles conduisent à un apprentissage plus efficace.

Pour le didacticiel sur les convertisseurs électromécaniques, le livre de référence a été écrit par la même équipe que celle qui a supervisé le développement du site (Grenier et *al.*, 2001). Pour le didacticiel sur les circuits électriques, nous avons utilisé un livre de référence extérieur à l'équipe, celui choisi par la faculté des sciences appliquées pour l'ensemble des matières du 1^{er} cycle universitaire (Young & Friedmann, 2000).

3.2. Le site Internet

Une série de rubriques offre à l'étudiant l'occasion d'appréhender de façon plus active et interactive les différents points de la matière :

- les leçons, davantage dans l'esprit d'un exposé au tableau que d'un cours rédigé sur un support papier, illustrent certaines notions théoriques au moyen d'animations, de photos et/ou de courtes séquences vidéo ;
- les « laboratoires virtuels » (figure 1) proposent des exercices résolus ou des expériences virtuelles par la simulation du fonctionnement des convertisseurs électromécaniques sous différentes conditions. Chaque laboratoire contient l'énoncé du problème et une série de questions. L'étudiant est invité à chercher lui-même la solution par un cheminement progressif. Ainsi, dans certains cas, un bouton d'aide rappelle un théorème ou une formule utiles, suggère des hypothèses simplificatrices. La réponse à la question est d'abord donnée sous forme d'un résultat brut, afin que l'étudiant qui n'a pas obtenu la bonne réponse puisse reprendre son raisonnement ou ses calculs. L'illustration de cette réponse au moyen d'un graphe animé ou d'un résultat de simulation aide à identifier d'éventuelles erreurs de raisonnement. Vient finalement la démonstration complète de la réponse, éventuellement par différentes méthodes (la méthode la plus élégante, car concise, présentée dans les ouvrages de référence n'est pas forcément la seule méthode acceptable). Enfin, une vérification de la réponse est parfois proposée, sous forme d'un résultat expérimental ou d'une simulation par un modèle moins simplificateur que celui considéré dans le calcul (par exemple une cartographie des champs électromagnétiques déterminée au moyen de la méthode des éléments finis) ;
- les questionnaires à choix multiple (figure 2), par le biais d'une correction automatique, permettent à l'apprenant de vérifier et de mesurer son niveau de connaissance et de compréhension de la matière traitée dans le chapitre. Ils sont aussi une occasion de se poser des questions qui sous une apparence parfois triviale cachent des problèmes plus compliqués qu'il n'y paraît à première vue ;
- les rubriques « Bibliographie » et « Questions avancées » proposent des articles et références bibliographiques en vue de l'approfondissement de certains points de la matière.

Laboratoires virtuels

Question 2 : aide

Le développement en série de Fourier d'une fonction $F(x)$ paire, périodique de période T , s'écrit :

$$F(x) = F_0 + \sum_{n=1}^{\infty} F_n \cos\left(\frac{2n\pi x}{T}\right) \quad (1)$$

avec :

$$F_0 = \frac{1}{T} \int_0^T F(x) dx$$

$$F_n = \frac{2}{T} \int_0^T F(x) \cos\left(\frac{2n\pi x}{T}\right) dx$$

La valeur absolue de F_n donne l'amplitude de l'harmonique de rang n .

Début du Didacticiel > Début du chapitre > Début des laboratoires

Chapitre Principes de fonctionnement des machines polyphasées à champ tournant
Laboratoire Réalisation d'un enroulement réparti assurant une répartition quasi sinusoïdale du champ dans l'entrefer

Enoncé du laboratoire

1. Aide Calculer en tout point de l'entrefer le champ H créé par une bobine située à la périphérie d'un entrefer (à $z=0$) et parcourue par un courant I (cf figure 1). On considérera dans cette étude que la perméabilité du fer est infinie, et on négligera les fuites de flux.

On choisira comme axe de référence pour repérer la position d'un point dans l'entrefer, l'axe magnétique de la bobine.

Réponse

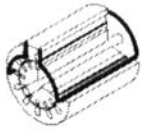


Figure 1

Question 5 : vérification

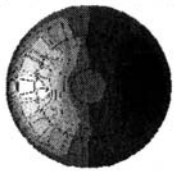


Figure 4 Valeurs du potentiel vecteur

Début du Didacticiel > Début du chapitre > Début des laboratoires

Chapitre Principes de fonctionnement des machines polyphasées à champ tournant
Laboratoire Réalisation d'un enroulement réparti assurant une répartition quasi sinusoïdale du champ dans l'entrefer

Question 1 : démonstration

Pour calculer le champ H en un point M de l'entrefer de position angulaire θ , il suffit d'appliquer le **théorème d'Ampère** à un contour fermé en θ et $\theta + \pi$.

La figure 4 représente la valeur de ce potentiel vecteur en tout point de la machine. On constate qu'il est négatif autour de l'encoche contenant des conducteurs parcourus par des courants vers l'avant dans le plan de la figure et positif autour de l'autre encoche. Les lignes d'équipotentiel du potentiel vecteur correspondent aux trajectoires suivies par le flux magnétique. On constate bien que ce flux entoure les deux encoches.

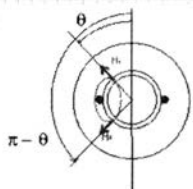


Figure 1

Si du fer infinie, le champ H est nul dans le fer (on a en effet $H = B / \mu$), les deux intéressants sont donc les traversées de l'entrefer.

Figure 1. Extraits d'un laboratoire virtuel relatif à la création par les techniques d'étalement des bobines d'un champ d'entrefer à répartition quasi-sinusoïdale

Évaluez vos connaissances

Chapitre 6 : Les machines à courant continu

Testez vos connaissances : Machine à courant continu à collecteur

Debut de l'exécution > Debut du chapitre

Question 1

La source qui alimente le circuit inducteur d'une machine à courant continu à collecteur et à excitation séparée fournit une puissance égale aux pertes Joule dans cet enroulement.

- c'est toujours vrai
- ce n'est vrai qu'en régime permanent
- c'est toujours faux

Évaluez vos connaissances

Chapitre 6 : Les machines à courant continu

Testez vos connaissances : Machine à courant continu à collecteur

Debut de l'exécution > Debut du chapitre

Réponse 1

La source qui alimente le circuit inducteur d'une machine à courant continu à collecteur et à excitation séparée fournit une puissance égale aux pertes Joule dans cet enroulement.

- c'est toujours vrai
- ce n'est vrai qu'en régime permanent.
- c'est toujours faux

Réponse erronée !

Question 2

Évaluez vos connaissances

Justification de la question 1

La source qui alimente le circuit inducteur d'une machine à courant continu à collecteur et à excitation séparée fournit outre l'énergie dissipée par effet Joule dans cet enroulement, une partie de l'énergie magnétique stockée dans la machine. Cette énergie magnétique étant constante en régime permanent, la puissance fournie par l'alimentation de l'inducteur se réduit alors (mais seulement dans ce cas) aux seules pertes ohmiques.

Figure 2. Extraits d'un questionnaire à choix multiple, et son module de correction automatique

3.3. Différents types d'outils interactifs

Ces différentes rubriques regroupent plusieurs types d'outils pédagogiques qui, tous, proposent à l'étudiant une plus ou moins grande interactivité :

- l'étudiant navigue à travers les pages web et aborde la matière à son propre rythme et éventuellement selon un cheminement qui lui est propre. La présentation progressive de chaque point de la matière, la résolution « étape par étape » des exercices, la possibilité d'obtenir une aide ponctuelle ou de consulter le glossaire des termes, les liens hypertextes vers d'autres points abordés précédemment et nécessaires à une bonne compréhension, sont autant de jalons qui aident l'étudiant à compléter et structurer ses connaissances, à mettre en évidence et combler les « zones d'ombres » qui subsistent dans son apprentissage de la matière ;
- l'étudiant teste et évalue son niveau de connaissance : il s'essaie à la résolution d'examens, le module de correction automatique des questionnaires à choix multiple repère ses erreurs et le renvoie vers un texte d'explication. Le score obtenu lui donne une indication de sa connaissance de la matière ;
- enfin et surtout, grâce aux animations (applets java¹) présentes à différents niveaux, l'étudiant manipule virtuellement les dispositifs qu'il est en train d'étudier (ou du moins leur simulation).

3.4. Les animations

Les animations programmées (figure 3) représentent la partie la plus innovante du dispositif pédagogique que nous avons mis en place. La notion d'interactivité y est maximale :

- alors qu'il est usuel dans un ouvrage sur support papier ou au tableau lors d'un cours, de tracer les courbes qui caractérisent le fonctionnement d'un dispositif pour un jeu de paramètres bien choisi, le support électronique permet à l'étudiant de voir comment celles-ci sont affectées (ou non) par une modification des paramètres internes ou externes du dispositif. Cette possibilité s'applique également à tous les diagrammes vectoriels (phasoriels) utilisés habituellement en électricité pour étudier les dispositifs à courant alternatif ;
- l'animation des figures est d'ailleurs un outil irremplaçable pour visualiser la manière dont les grandeurs caractéristiques des dispositifs étudiés évoluent simultanément dans le temps et dans l'espace ;
- les outils de simulation de dispositifs électriques contribuent à la réalisation de laboratoires virtuels. Ces laboratoires, s'ils ne prétendent pas remplacer la confrontation indispensable avec la réalité mais plutôt la préparer, multiplient les occasions offertes aux étudiants de manipuler les dispositifs étudiés et ainsi de se les approprier. Il leur est même possible d'apprendre en faisant des erreurs, en « cassant » virtuellement des machines, choses que pour des raisons de coût et surtout de sécurité² il est impossible de leur laisser faire

dans un laboratoire réel. Enfin et surtout, cela leur permet de manipuler des dispositifs dans des gammes de puissance qu'aucune installation didactique ne pourra jamais atteindre et de constater, par exemple, qu'un moteur de quelques watts ne se comporte pas toujours de la même façon qu'un moteur de plusieurs centaines de kilowatts.

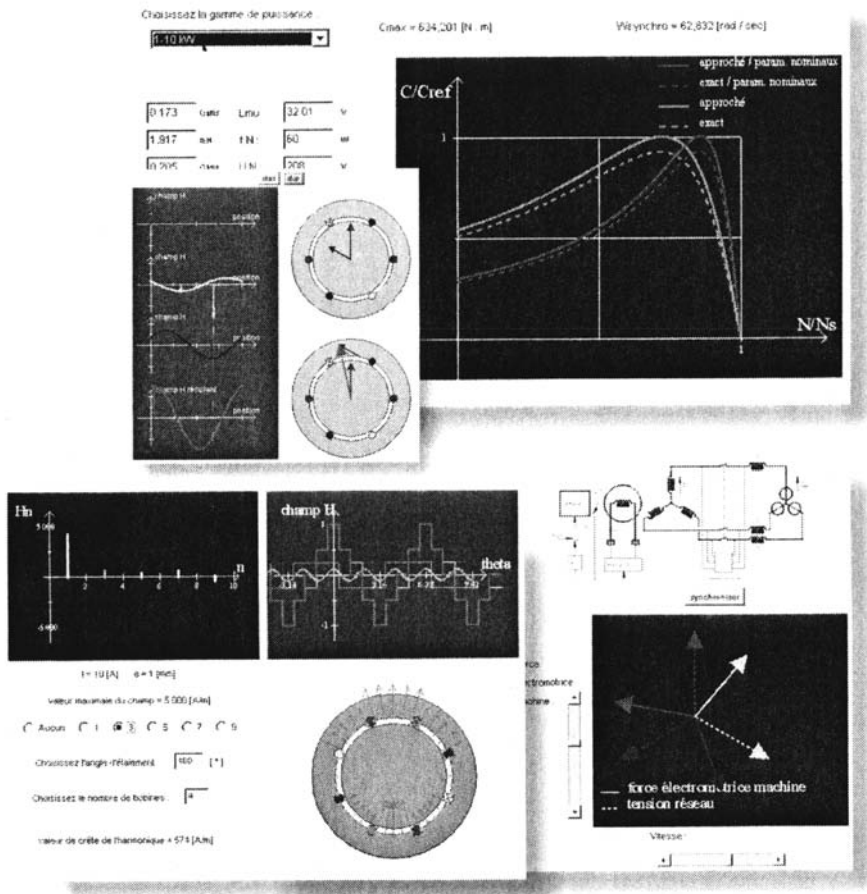


Figure 3. Exemples d'animations java destinées à la compréhension des convertisseurs électromécaniques

De haut en bas : caractéristique couple-vitesse des machines à induction, visualisation de la notion de champ tournant, synchronisation d'un alternateur sur le réseau, création d'un champ d'entrefer à répartition quasi-sinusoïdale par les techniques d'étalement de bobines

Considérons, à titre d'exemple, l'animation dont une séquence est visualisée sur la figure 4. Cette animation fait partie d'une série qui sert à introduire et illustrer la notion de champ tournant.

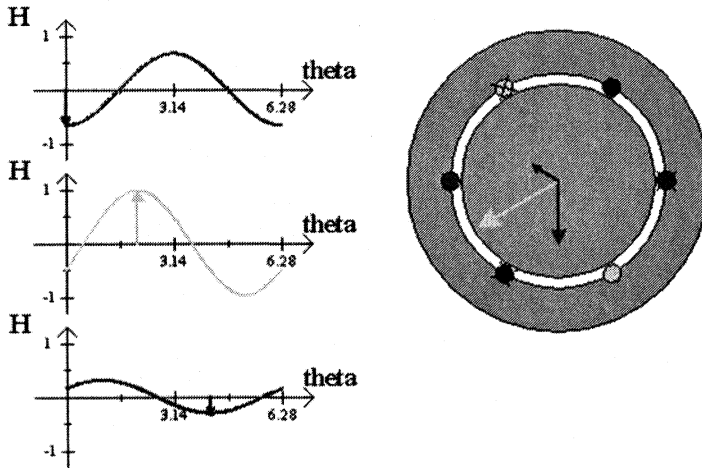


Figure 4. Champs magnétiques créés par trois bobinages spatialement et temporellement déphasés de 120°

Expliquer comment il est possible avec trois bobinages fixes décalés spatialement de 120° et alimentés par des courants déphasés temporellement de 120°, de créer un champ d'entrefer (entre le rotor et le stator) équivalent à celui que produirait un seul bobinage tournant, alimenté par un courant constant, est en effet fondamental pour la compréhension du cours sur les convertisseurs électromécaniques. Cette propriété est à la base du fonctionnement de la quasi totalité des moteurs électriques existant sur le marché.

Au cours de la leçon, on montre, dans un premier temps, qu'un bobinage fixe, alimenté par un courant alternatif, crée un champ pulsatoire de direction constante (la direction du champ est la direction pour laquelle l'amplitude du champ est maximale). L'amplitude et le sens (le signe) du champ H_a créé par le bobinage a varient avec ceux du courant $i_a = I \cdot \cos \omega t$ qui l'alimente :

$$H_a(\theta) = Kl \cos \omega t \cdot \cos \theta$$

(ω désigne la pulsation du courant, θ est la position du point de l'entrefer où le champ est évalué, K est une constante liée aux paramètres constructifs de la machine).

Les champs créés par les trois bobinages a , b et c sont spatialement déphasés de 120°. Les courants i_a , i_b , i_c qui les alimentent sont temporel-

lement déphasés de 120° . Quand on additionne les champs produits, on obtient un champ total H_t :

$$H_t(\theta) = H_a(\theta) + H_b(\theta) + H_c(\theta) \\ = Kl [\cos\omega t.\cos\theta + \cos(\omega t - 2\pi/3).\cos(\theta - 2\pi/3) + \cos(\omega t + 2\pi/3).\cos(\theta + 2\pi/3)]$$

Un simple calcul trigonométrique montre que ce champ total s'écrit encore :

$$H_t(\theta) = \frac{3}{2} Kl \cos(\theta - \omega t).$$

Cette égalité appelée encore théorème de Ferraris s'établit également graphiquement (figure 5).

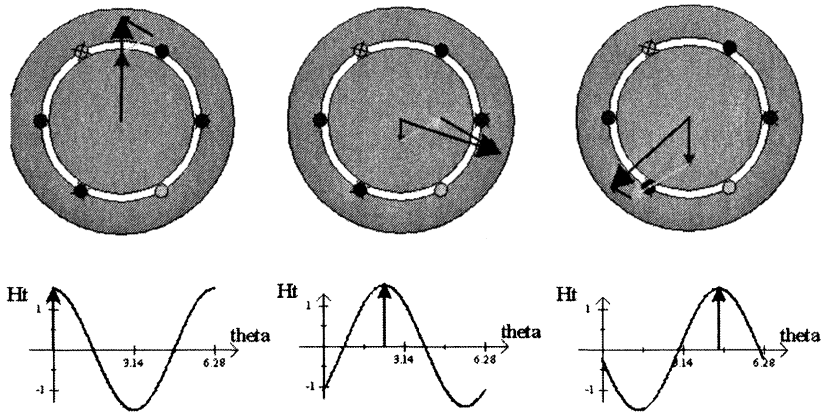


Figure 5. Champ tournant résultant représenté à différents instants

La somme des trois vecteurs représentatifs du champ magnétique est un vecteur d'amplitude constante mais dont la direction varie avec le temps³. C'est ce qu'on appelle un champ tournant.

Si on place un aimant permanent dans ce champ tournant, il suivra ce champ entraînant le rotor de la machine dans un mouvement de rotation (principe de fonctionnement des moteurs synchrones). Si on place un matériau conducteur au sein de ce champ, il sera le siège de courants induits dont on peut montrer, en vertu de la loi de Lenz, que les forces de Laplace qu'ils créent en interaction avec le champ magnétique sont telles qu'elles entraînent le rotor dans un mouvement de rotation à une vitesse nécessairement légèrement inférieure à celle du champ tournant (principe de fonctionnement des moteurs asynchrones).

On voit bien à travers cet exemple comment l'image peut aider à la compréhension du théorème fondamental qu'est, pour un électrotechnicien, le théorème de Ferraris. L'animation de cette image permet de visualiser les phénomènes physiques mis en jeu, fut-ce au travers d'une représentation symbolique. Elle développe chez l'étudiant une compréhension intuitive du fonctionnement des machines électriques sur laquelle l'enseignant peut s'appuyer pour la suite de son cours.

4. MISE EN ŒUVRE DES OUTILS PÉDAGOGIQUES INTERACTIFS

Apprécier et mesurer l'efficacité de ces outils interactifs nécessite de les éprouver face aux approches pédagogiques dans lesquelles ils prennent place et aux objectifs précis qui sous-tendent ces dernières.

4.1. Des contextes pédagogiques... très différents !

Les approches pédagogiques au cœur desquelles se sont insérés ces nouveaux outils diffèrent sensiblement pour les deux didacticiels.

Le didacticiel sur les convertisseurs électromécaniques s'adresse à un public de futurs ingénieurs électriciens et électromécaniciens en début de spécialisation (niveau bac +3 et bac +4). Ces étudiants ont suivi jusqu'ici un enseignement universitaire que l'on pourrait qualifier de « traditionnel » et qui repose principalement sur des exposés magistraux et sur des travaux pratiques d'application. Dans ce contexte, le didacticiel est avant tout un espace de visualisation et d'expérimentation de concepts souvent déjà largement explicités dans les cours magistraux.

Le didacticiel pour l'apprentissage des circuits électriques s'insère dans un contexte complètement différent. En effet, la faculté des sciences appliquées a entamé depuis bientôt quatre ans une révision complète des programmes de candidatures (1^{er} cycle universitaire) par l'introduction de diverses méthodes de pédagogie active, centrée sur le double apprentissage par problèmes et par projets (APP) (Aguirre et *al.*, 2001). Dans ce type d'approche, l'enseignement est conçu comme la mise à disposition de l'étudiant d'occasions propices pour apprendre, développer une attitude active et s'investir personnellement. Le projet et les problèmes sont utilisés comme le moteur de l'apprentissage : ils sont soumis aux étudiants alors que tous les éléments nécessaires à leur résolution n'ont pas été transmis. L'apprenant identifie alors ses propres objectifs en termes de nouveaux apprentissages à effectuer. Dans une telle approche, les cours magistraux ont pour but de permettre *a priori* l'acquisition rapide des nouveaux concepts (nécessaires pour

aborder le projet et les problèmes), et *a posteriori* une restructuration ou une généralisation des connaissances acquises par ailleurs.

4.2. Insertion du site dans le dispositif pédagogique

Pour le didacticiel sur les convertisseurs électromécaniques, des séances encadrées basées sur un laboratoire virtuel ont été organisées en lieu et place des séances d'exercices traditionnelles : les étudiants, par petits groupes, cherchent les réponses aux questions posées dans l'énoncé. Un enseignant est présent dans la salle pour répondre aux questions qu'ils se posent, relatives tant à l'exercice qu'à l'un ou l'autre point de la matière qu'ils ne comprennent pas (Labrique S. et *al.*, 2002).

Le didacticiel sur les circuits a par contre été présenté comme un complément du cours, en accès libre individuel. Certains tuteurs⁴ ont utilisé ce didacticiel devant le groupe pour expliquer des dispositifs similaires à ceux étudiés dans le cadre des problèmes ou du projet. D'autres l'ont simplement renseigné comme source d'information et de documentation pour les étudiants, les incitant à y chercher la réponse à certaines de leurs questions.

Les deux didacticiels sont par ailleurs totalement libres d'accès, et peuvent donc être consultés en dehors des activités évoquées ci-dessus (et nous verrons que les étudiants ne se sont pas privés de le faire).

5. ÉVALUATION : ÉTUDE D'IMPACT AUPRÈS DES ÉTUDIANTS

Les didacticiels ont fait l'objet d'études d'impact. L'objet de ces études n'était pas de mesurer l'impact de ces outils didactiques sur le niveau de compétence de nos étudiants. Cet impact est en effet difficile à isoler d'un certain nombre de facteurs exogènes qui en rendent la mesure difficile. L'enthousiasme (parfois le manque d'enthousiasme) des enseignants vis-à-vis des outils et leur capacité à les intégrer dans leur enseignement ont souvent plus d'influence sur les résultats des étudiants que les outils eux-mêmes. De plus, en prenant le parti d'un site en accès libre, nous nous interdisons toute possibilité d'effectuer des mesures avec des groupes tests ayant ou non l'outil à leur disposition.

L'enquête menée était donc essentiellement une enquête de perception par les étudiants. Elle comportait à la fois des questions prédéfinies avec cases à cocher et des questions ouvertes et de zones de commentaires libres. Les résultats des questions fermées sont présentés ici sous forme d'histogrammes dont les valeurs sont exprimées en % du nombre d'étudiants ayant répondu. Les indices ont la signification suivante :

- 3 Tout à fait d'accord ;
- 2 Plutôt d'accord ;
- 1 Plutôt en désaccord ;
- 0 En total désaccord ;
- X Sans opinion.

Nous le verrons, un certain nombre de divergences apparaissent entre les opinions données sur les deux didacticiels. Celles-ci s'expliquent en grande partie par la différenciation des objectifs pédagogiques qui sous-tendent les deux contextes d'enseignement dans lesquels ils se sont insérés.

5.1. S'il y avait une chose à garder ?

Dans le cas du site sur les convertisseurs électromécaniques, les animations sont plébiscitées par 85 % des étudiants qui les citent spontanément (question ouverte) comme étant l'apport essentiel du site : ils jugent ces animations « *bien pensées* »⁵, « *très claires* », « *très utiles* », « *interactives* », et estiment qu'elles leur permettent de mieux saisir les nuances, mais surtout de « *visualiser* » les concepts.

Les étudiants de 1^{re} année distinguent par contre la nécessité d'un support de cours et des exemples de résolution de circuits illustratifs. Le site actuel rencontre mal le premier besoin : les étudiants ont peur de s'être perdus dans les méandres des liens hypertextes et d'avoir omis de voir un point de la matière.

Dans une pédagogie active, les animations proposées peuvent en outre apparaître comme redondantes par rapport aux APP, et donc moins fondamentales pour l'étudiant, alors qu'elles comblent un vide dans l'enseignement plus classique.

5.2. D'autres types d'outils interactifs vous seraient-ils utiles dans votre processus d'apprentissage ?

Les demandes relatives au site sur les convertisseurs électromécaniques se concentrent essentiellement sur l'implémentation de FAQs (« Frequently Asked Questions ») qui reprennent les réponses aux questions les plus fréquemment posées par les étudiants. Ils regrettent d'avoir à attendre leur tour pour poser leurs questions à l'enseignant présent dans la salle et souhaiteraient que l'ordinateur réponde à toutes leurs questions. Ils plaident également pour un renforcement des QCM, tant d'un point de vue quantitatif que qualitatif (questions posées « aléatoirement », portant sur différents chapitres, graduation des questions de difficulté croissante) avec l'objectif clair et à court terme d'aider à la préparation de l'évaluation finale (qui

est également réalisée sous cette forme). L'idée d'implémentation de problèmes ou d'exercices non résolus pour encourager l'étudiant à chercher par lui-même est globalement bien acceptée par les étudiants mais sans enthousiasme excessif.

La demande des étudiants de première année se concentre plutôt sur l'implémentation de modules d'auto-évaluation et d'exercices corrigés, qui font effectivement cruellement défaut au stade actuel de développement du didacticiel sur les circuits.

On peut cependant noter que, dans les deux cas, la demande des étudiants porte sur la mise à disposition d'outils multimédias qui présente un caractère fortement interactif (QCM, animations, exercices) au détriment des leçons et exposés (même pour les étudiants insérés dans un dispositif de pédagogie active où les cours magistraux sont loin d'être abondants). Concernant ce type d'outils pédagogiques, ceci confirme bien que le principal apport perçu par les étudiants réside dans l'interactivité proposée.

5.3. Complémentarité texte de référence/outils interactifs

Bien que la lisibilité des pages et des équations, le découpage des pages et le rythme de lecture ne soient pas remis en cause par la majorité des étudiants, la lecture à l'écran pose un certain nombre de problèmes : les didacticiels sont plutôt vus comme complémentaires des livres de référence. Cette complémentarité est évidemment beaucoup plus évidente dans le cas du site sur les convertisseurs électromécaniques (figure 6), puisque le site et le livre de référence ont été conçus par la même équipe d'enseignants.

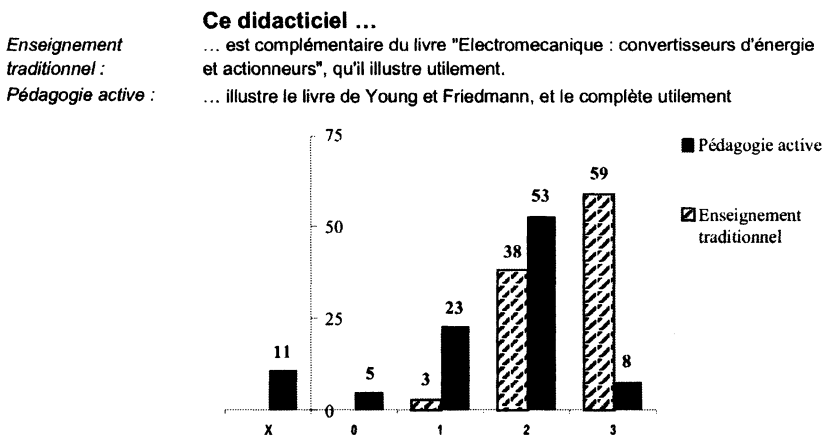


Figure 6. Résultats de l'enquête menée auprès des étudiants

Ceci confirme que les outils multimédias et interactifs ne se substituent pas à un texte de référence mais l'illustrent utilement. Le support papier reste indispensable. Comme le dit un étudiant, les textes imprimés « *donne(nt) une meilleure vue d'ensemble et il est plus simple de comparer deux feuilles de papier que 2 pages web* ». Les livres, syllabi, photocopiés apportent également une réponse à l'angoisse exprimée par certains étudiants de ne pas avoir tout vu, et à leur difficulté de se faire une vue d'ensemble de la matière. Notre postulat de départ sur l'intérêt d'associer étroitement un livre et un site Internet est donc validé par les étudiants.

5.4. Utilisation du didacticiel

La possibilité d'utiliser ce site Internet pour l'auto-apprentissage ou la formation à distance est rejetée par les étudiants évoluant au sein d'un enseignement traditionnel

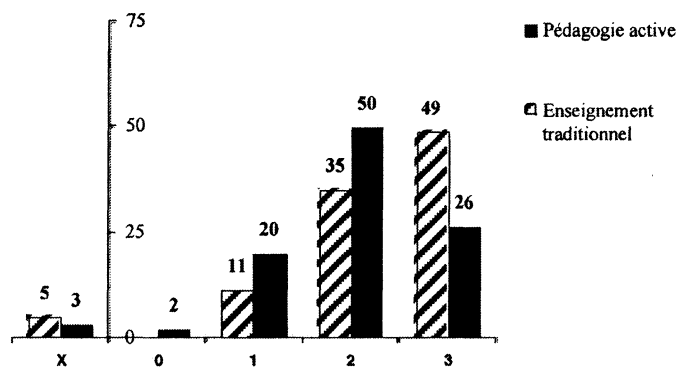
- qui soulignent l'importance du travail en groupes, avec la possibilité d'échanges à 2 ou 3 étudiants devant un même écran ;
- qui jugent essentielle la présence d'un enseignant dans la salle, car ce dernier peut répondre aux questions suscitées par l'exercice, mais qui s'éloignent du spectre des réponses implémentées dans le laboratoire virtuel.

Pourtant, beaucoup d'étudiants se connectent hors séance ou envisagent de le faire⁹ : cet accès ne se substitue pas aux séances encadrées, mais leur permet de préparer les laboratoires réels et surtout de les refaire virtuellement, de mieux comprendre les notions vues en cours. À la lecture des statistiques de fréquentation du site, ce travail de relecture se fait essentiellement à la veille des périodes d'évaluation.

Les étudiants intégrés dans le cadre d'une pédagogie active, ont plutôt utilisé ce didacticiel individuellement. Il n'est dès lors pas intervenu dans le travail de groupe et le dialogue avec l'enseignant. Il est vrai que dans le cadre de la pédagogie mise en place, l'apprentissage par projets et le travail de groupe sont déjà fortement présents. Par contre, le didacticiel semble avoir joué un rôle essentiel pour la compréhension des notions vues en cours, de nouveau plus particulièrement en période d'évaluation (figure 7).

Utilisation du didacticiel

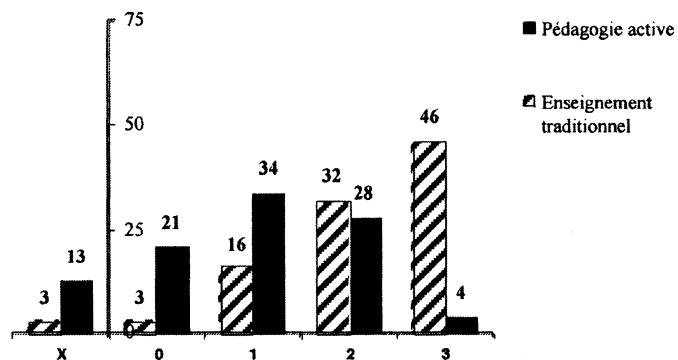
- 1 Le didacticiel est complémentaire du cours : il m'a été utile pour mieux comprendre les notions vues aux cours



- 2 Je me suis servi du didacticiel pour ...

Ens. traditionnel : ... préparer ou mieux comprendre les laboratoires réels

Péd. active : ... résoudre les problèmes ou dans le déroulement du projet



- 3 Je me suis servi du didacticiel pour préparer les évaluations

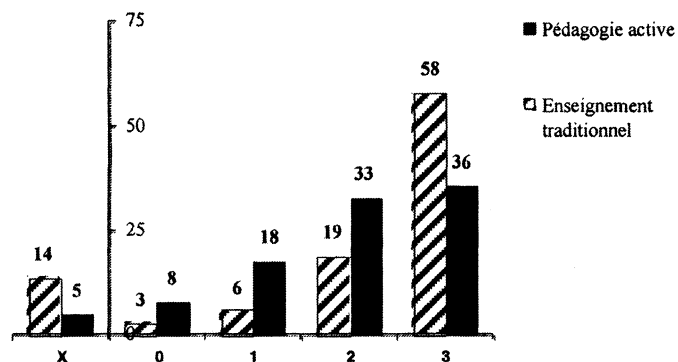


Figure 7. Résultats de l'enquête menée auprès des étudiants

5.5. Utilité de ce type de didacticiels

Pour les étudiants au sein d'un enseignement traditionnel, plusieurs facteurs d'efficacité des outils interactifs ont été relevés dans leurs réactions :

- l'ordinateur facilite une approche progressive, « à son propre rythme » ;
- l'attitude de l'étudiant est plus active, et plus orientée vers la compréhension que vers le calcul ;
- la mise à disposition d'un corrigé de l'exercice libère l'enseignant présent en séance qui se consacre alors aux questions de fond relatives à la compréhension de la matière.

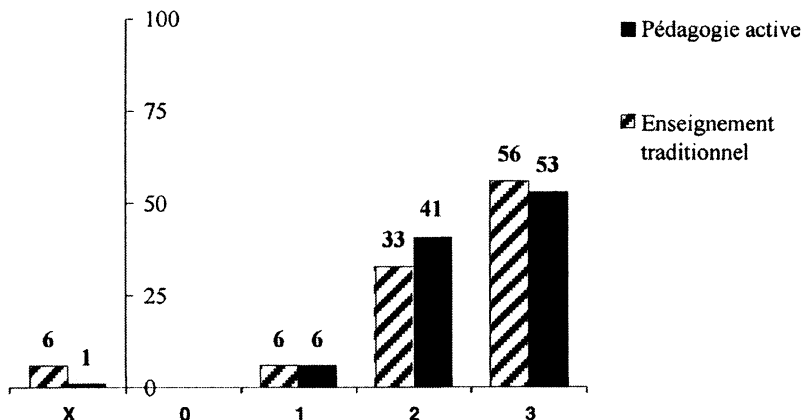
Les étudiants de candidature ont plutôt ressenti ce didacticiel comme complémentaire de la nouvelle pédagogie, comblant l'impression de manque de « bases théoriques et scientifiques solides », et de « supports de cours adéquats et suffisants » ressentis par leurs prédécesseurs⁷. Cette complémentarité a été spontanément relevée dans leurs commentaires : aucune question prédéfinie ne faisait allusion à ce point.

Par contre, tous les étudiants, quel que soit le contexte pédagogique, confirment que ces didacticiels, et en particulier les outils interactifs, favorisent une meilleure compréhension et une approche plus intuitive de la matière. Tous soulignent le bon rapport « *compétences acquises/temps investi* ».

Autre résultat très important à nos yeux : le souhait massif exprimé par les étudiants que ce type d'initiative pédagogique soit étendue à d'autres domaines enseignés aux ingénieurs, ce qui prouve que ce type d'outils leur apporte une aide véritable dans leur processus d'apprentissage (figure 8).

Cette initiative pédagogique...

1 ... est très utile



2 ... mériterait d'être étendue à d'autres domaines enseignés aux ingénieurs

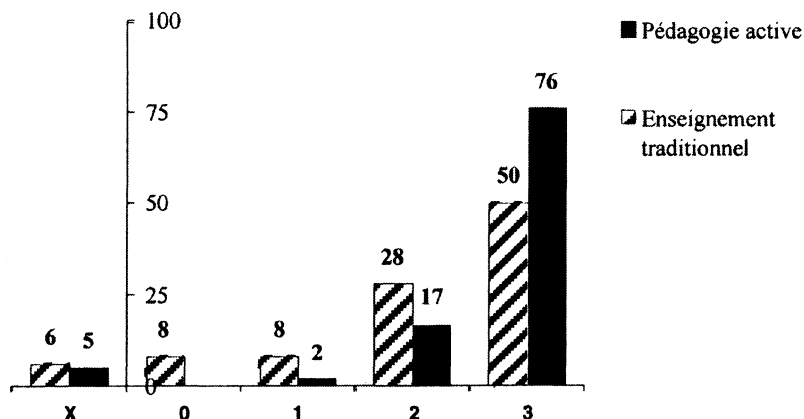


Figure 8. Résultats de l'enquête menée auprès des étudiants

On remarquera, à ce titre, que les étudiants issus d'une pédagogie active, s'ils sont moins enthousiastes sur les outils, sont plus demandeurs d'une extension à d'autres domaines que les étudiants au sein d'un enseignement traditionnel.

5.6. Un public exigeant...

À la lecture des commentaires libres, on notera que les étudiants se montrent très exigeants. Ils demandent toujours plus en quantité et en qualité et ne pardonnent aucune erreur. Il s'agit d'un public d'étudiants ingénieurs, habitués aux nouvelles technologies, dont les réactions sont exemptes d'une certaine fascination liée à la nouveauté de ces outils. Cependant, conscients de la quantité de travail nécessaire à la réalisation de tels outils, leurs remerciements sont nombreux, et l'initiative pédagogique est généralement très appréciée.

6. APPORT DES TIC

Ces réactions sont un outil précieux pour alimenter notre réflexion sur le dispositif pédagogique mis en place et apporter des pistes de réponses aux questions que nous nous posons : les TIC représentent-elles un réel apport au niveau de l'apprentissage ? Induisent-elles une nouvelle attitude de l'étudiant et/ou de l'enseignant ? Redéfinissent-elles les relations entre les trois pôles du triangle didactique : savoir, apprenant, enseignant ?

En nous appuyant sur les résultats de l'étude d'impact décrits plus haut ainsi que sur les observations faites sur le terrain (attitude des étudiants

et des formateurs lors des séances, statistiques d'accès au site, résultats obtenus aux examens), nous sommes en mesure de tirer de notre expérience quelques premières conclusions sur le rôle des TIC dans le processus d'apprentissage de nos étudiants.

6.1. Acquisition de compétences de haut niveau

Selon la taxonomie de Bloom, l'apprentissage cognitif serait un processus comportant plusieurs niveaux. Les objectifs éducationnels y sont présentés comme un ensemble hiérarchisé de types de savoir et de capacités allant du comportement simple et concret jusqu'au comportement complexe et abstrait.

Les catégories de comportement établies par Bloom pour chaque niveau se révèlent extrêmement utiles non seulement pour énoncer les objectifs de l'enseignant sur le plan cognitif, mais également pour évaluer la réalisation des objectifs que nous nous étions fixés.

Six niveaux d'apprentissage sont définis, allant de la simple acquisition de connaissances à l'acquisition de compétences d'évaluation (figure 9).

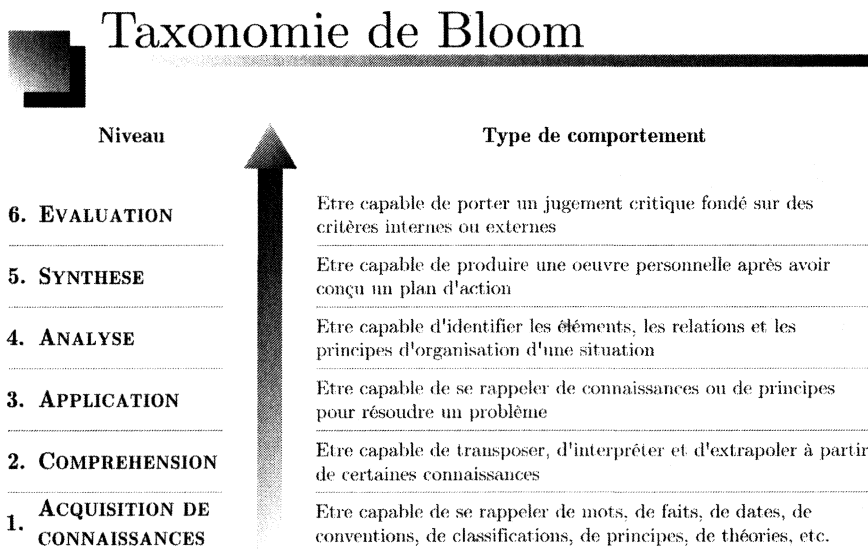


Figure 9. La taxonomie de Bloom

Au travers tant des réactions des étudiants que de notre propre vécu d'enseignant, il est très rapidement apparu que les TIC facilitent, voire rendent possible l'acquisition de compétences de niveau intermédiaire (figure 10).

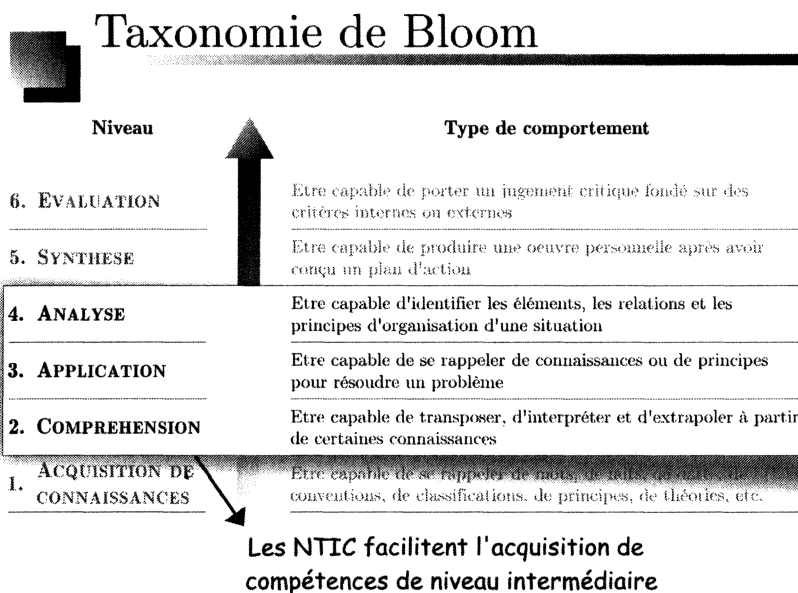


Figure 10. **Les TIC facilitent l'acquisition de compétences de niveau intermédiaire**

- Par rapport à l'approche classique (cours et travaux pratiques), souvent très mathématique, l'approche de la matière par le biais de ces outils multimédias est plus intuitive, et se traduit par une meilleure compréhension des phénomènes étudiés : les données présentées sous forme d'animations sont acquises plus facilement, ce qui permet d'accéder plus rapidement au niveau de la compréhension. En particulier pour les étudiants au cœur d'une pédagogie active, les TIC facilitent un apprentissage rapide des notions de base : ce point est crucial car les étudiants doivent, en quelques heures, assimiler les notions fondamentales indispensables pour pouvoir aborder les problèmes et le projet (au terme du projet, ils devront être capables de concevoir, construire et tester un circuit électrique pour une application donnée, tel que le flash d'un appareil photo), alors que la notion même de circuit électrique est totalement nouvelle pour la plupart d'entre eux.
- L'interactivité proposée par ces outils développe chez l'étudiant le sens de la recherche, de l'expérimentation : loin de se cantonner à l'étude de cas qui leur est suggérée, nous voyons les étudiants tester l'influence des valeurs de différents paramètres, même celles irréalistes (conduisant à des valeurs de courants ou de tension destructrices pour la machine, et signifiées comme telle dans l'applet java). Il a d'ailleurs fallu, par rapport aux premières versions, canaliser le choix des paramètres et imposer des limites (physiques et géométriques) pour que cet espace d'expérimentation reste proche des conditions réelles.

• On remarque un souci de profondeur de la part des étudiants : libérés de leur rôle de « *gratte-papier* », les étudiants concentrent leurs efforts à une compréhension plus profonde, à une analyse beaucoup plus fine, que dans une séance de travaux pratiques traditionnelle, ce que traduit la qualité des questions posées à l'enseignant. Par rapport à un laboratoire réel, les étudiants se focalisent sur la compréhension des phénomènes, sur les compétences à acquérir, au-delà du fait d'obtenir « *des résultats numériques corrects* ».

Ces observations, qui tendent à prouver que les TIC facilitent l'acquisition de compétences de niveau intermédiaire, que sont la compréhension, l'application et l'analyse, confirment l'étude de l'« hypertextualité » faite par Fastrez (2002). Selon lui, l'« hypertextualité » modifie le rapport au savoir : là où l'étudiant peut voir le contenu d'un livre comme un propos ayant sa cohérence globale propre, formant un tout à appréhender, le contenu hypertexte induirait une conception du savoir comme quelque chose à construire par soi-même, à partir de sa propre exploration. La restitution de la structure voulue par l'auteur cède la place à un savoir reconstruit par l'utilisateur. Cette analyse, qui s'applique à la réticulation, spécificité de l'hypertexte, nous semble également pertinente si nous l'appliquons à l'espace d'exploration offert à l'étudiant au travers des applets java.

L'acquisition de ces compétences de niveau intermédiaire que nous avons observées tant au cours des séances encadrées que lors des évaluations finales, découlerait donc d'une plus grande implication de l'étudiant dans la construction de son savoir, car, toujours selon Fastrez (2002), les hypermédias sont des outils plus exigeants envers l'utilisateur que les médias traditionnels.

6.2. De nouvelles relations au sein du triangle didactique

La manière de mettre en œuvre les outils interactifs que nous avons développés est déterminante pour la réalisation des objectifs pédagogiques que nous nous fixons : l'utilisation que les étudiants ont jugée la plus efficace de ces outils multimédias interactifs s'est faite en salle, par petits groupes autour d'un ordinateur, en présence d'un professeur, d'un assistant ou d'un tuteur. L'enseignant est disponible pour guider les étudiants dans leur démarche, approfondir certains points et répondre, comme l'expriment eux-mêmes les étudiants, « *aux questions auxquelles l'ordinateur ne répond pas* ».

Dans le cas des étudiants provenant d'un enseignement traditionnel, saturés de cours théoriques et de séances d'exercices classiques, ces outils sont l'occasion d'échanges entre les étudiants, incités à travailler par petits groupes. Les interactions et les débats s'enrichissent autour de ces nouveaux outils. L'espace offert d'expérimentation et d'application des concepts théoriques jusque là introduits et savamment agencés par le professeur, est également un véritable moteur dans le processus d'apprentissage de ces étudiants.

L'attitude des étudiants change d'ailleurs radicalement : ils sont beaucoup plus actifs qu'à une séance d'exercices classique. L'aspect « ludique » des animations, la navigation à travers le site, suscitent une participation accrue des étudiants. Les nouvelles technologies influent donc également dans la relation de l'apprenant au savoir : par l'hypertextualité et l'interactivité qu'elles proposent, nous l'avons vu, elles influencent la manière dont l'apprenant va acquérir des connaissances.

L'attitude des enseignants est également appelée à changer. La qualité des questions posées et le dialogue qui s'instaure les condamnent à renoncer à une transmission unidirectionnelle du savoir pour devenir véritablement partenaires dans le processus d'apprentissage.

Alors que les méthodes traditionnelles se focalisent sur le processus d'enseignement, axé de façon privilégiée sur la relation savoir-enseignant, et sur la transmission structurée de ce savoir aux étudiants, l'introduction des nouvelles technologies devient le catalyseur de nouvelles relations au sein du triangle didactique, et induit une focalisation sur l'apprenant. Le processus d'apprentissage, qui porte sur le rapport direct savoir-apprenant est privilégié. L'enseignant devient l'organisateur de situations et de conditions externes d'apprentissage par lesquelles il met en relation savoir et apprenant en jouant un rôle de médiateur (figure 11).

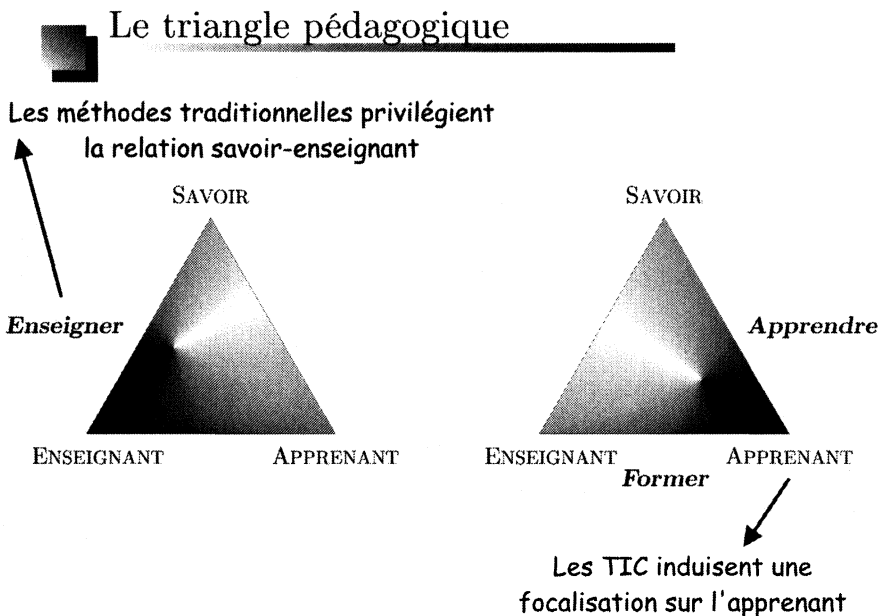


Figure 11. Les méthodes traditionnelles privilégient la relation savoir-enseignant, les TIC induisent une focalisation sur l'apprenant

Cette focalisation sur l'apprenant est également révélée par l'utilisation à distance de ces outils. En effet, la disponibilité des didacticiels en dehors des heures de cours permet idéalement aux étudiants de préparer la séance encadrée, mais surtout de revenir par la suite sur des points qu'ils n'avaient pas parfaitement compris. C'est dans ces conditions que la capacité offerte à l'apprenant de progresser à son propre rythme est la mieux exploitée. Le site Internet joue alors un rôle essentiel dans le processus de restructuration des connaissances acquises au cours ou lors du projet : les étudiants peuvent « expérimentalement » voir ce que ces connaissances avaient de général ou de particulier lorsqu'elles s'appliquent à d'autres dispositifs ou systèmes électriques.

Cette focalisation sur l'apprenant doit donc être au cœur de la conception même des outils multimédias, qui doivent, ainsi que le résume très justement Linard (2002) :

- lui laisser assez d'autonomie pour qu'il puisse lui-même explorer le nouveau domaine et « essayer pour voir » ;
- lui fournir les repères cognitifs nécessaires pour juger, évaluer et corriger les résultats de ses actes, en référence aux savoirs établis mais aussi dans l'interaction avec les partenaires (enseignants, pairs, institution).

6.3. Le rôle des TIC dans le processus d'apprentissage, entre savoir-faire et savoir-devenir

Parce qu'elles offrent à l'étudiant la possibilité de travailler par expérimentation, essais et erreurs, les TIC permettent d'atteindre en peu de temps des niveaux relativement élevés du savoir. Parce que le processus d'apprentissage se focalise sur l'étudiant lui-même, elles modifient fondamentalement sa relation au savoir : de simples réceptacles de connaissances (savoir, savoir-faire) dans une pédagogie traditionnelle, il s'élève au savoir-être en s'impliquant davantage dans la construction de son propre savoir.

Il serait vain cependant d'imaginer que ce type d'outils pédagogiques suffit pour atteindre les niveaux de savoir les plus élevés (savoir-devenir) : ils ne permettent pas, pris isolément, d'acquérir les niveaux de synthèse et d'évaluation, grâce auxquels l'étudiant pourra produire une œuvre personnelle et porter un jugement critique. C'est là le rôle du projet, qui est présent dans notre dispositif de formation de nos étudiants tant dans l'enseignement traditionnel (Grenier et *al.*, 2000) que dans l'approche active.

Chaque méthode d'enseignement répond à la réalisation d'objectifs différents dans la taxonomie de Bloom (figure 12). Les cours magistraux se révèlent efficaces dans l'apprentissage aux niveaux élémentaires de la taxonomie (le savoir). L'apprentissage par le projet est indispensable pour atteindre les niveaux les plus élevés (capacité de synthèse et d'évaluation,

savoir-devenir). Entre les deux, il est indispensable de fournir à l'étudiant des lieux propices où il puisse acquérir les compétences intermédiaires. C'est le rôle traditionnellement dévolu aux séances d'exercices et de laboratoires encadrées. Or le volume de ces heures de travaux dirigés a régulièrement été revu à la baisse dans les programmes de formation. D'une part parce que ce type d'enseignement est coûteux en termes de ressources humaines et d'autre part parce qu'il était nécessaire de faire de la place aux enseignements par projets.

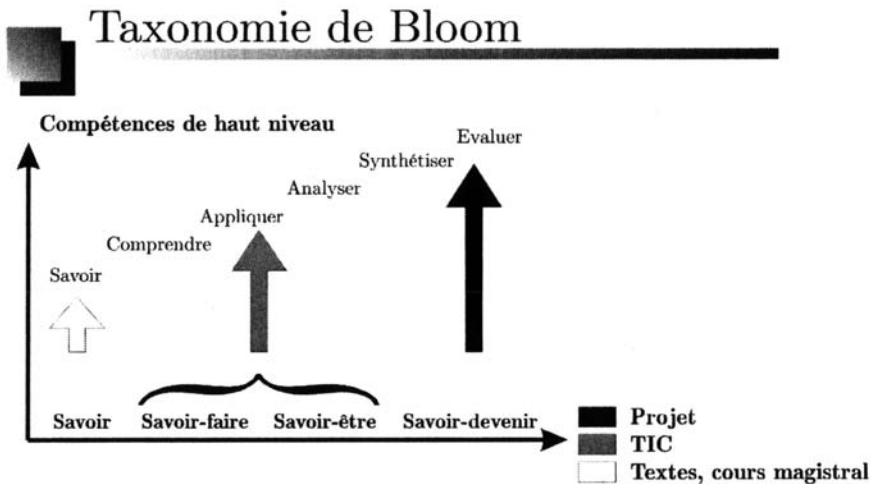


Figure 12. Le rôle des TIC dans le processus d'apprentissage : entre savoir et savoir-devenir

Négliger l'apprentissage de ces niveaux intermédiaires de savoir serait cependant une erreur. L'apprenant, « constructeur de son savoir », ne peut se borner à recevoir passivement les connaissances transmises par l'enseignant : pour s'élever aux niveaux de savoir les plus élevés, il doit assembler et structurer les matériaux (les savoirs) que l'enseignant lui a fournis. Ils ne doivent pas seulement s'accumuler dans son esprit mais s'ordonner correctement. Devenir une construction et ne pas simplement rester un tas de briques et de poutres. Passer cette étape, c'est souvent perdre du temps ensuite à corriger ou compléter une mauvaise perception d'une notion, à réparer et consolider des fondations mal posées. Et comme l'enseignant ne dispose pas d'assez de temps pour effectuer ce travail pour chacun de ses étudiants, il en est réduit à sélectionner ceux qui ont réussi à construire correctement leurs savoirs inférieurs avant de pouvoir continuer à bâtir. Que deviennent alors ceux qui ont échoué dans cette étape ? Dans nos sociétés où l'accès à la connaissance est souvent le moteur du progrès économique et social, où l'enseignement de masse a l'impérieuse nécessité d'élever un

maximum de personnes vers les plus hauts niveaux de compétence, cette sélection par l'échec est-elle encore acceptable ?

Les nouvelles technologies de l'information peuvent aider les étudiants à structurer leurs savoirs. Parce qu'elles facilitent la compréhension des notions théoriques par une approche plus intuitive, offrent aux étudiants un espace de recherche et d'expérimentation et suscitent un renouvellement du dialogue apprenant/enseignant, elles sont jugées plus efficaces par les étudiants que les traditionnelles séances encadrées pour atteindre les mêmes objectifs cognitifs. Elles ne peuvent cependant pas les remplacer totalement. D'une part parce qu'il serait dangereux de remplacer tous les laboratoires réels par des laboratoires virtuels et former ainsi des étudiants en ingénierie qui ne soient jamais confrontés à l'expérimental (à moins bien sûr que cette confrontation ne soit prévue à l'occasion d'un projet). D'autre part et surtout parce que notre pratique d'enseignement a montré que les outils multimédias s'avéraient d'autant plus efficaces qu'ils étaient justement utilisés au cours de ces séances encadrées. Leur efficacité accrue, la possibilité offerte aux étudiants de manipuler davantage, parce que virtuellement, les concepts fondamentaux et d'ainsi se les approprier, à leur propre rythme, permettent cependant de réduire le nombre de ces séances encadrées. Elles libèrent ainsi du temps pour que l'étudiant aille plus loin tant dans la qualité que dans l'étendue de ses connaissances.

Les trois méthodes d'enseignement que nous avons évoquées (cours magistral, TIC, projet) ne doivent donc pas se comprendre dans le cadre classique de l'application de plus en plus précise et circonstanciée de concepts théoriques généraux, mais bien dans un processus d'interaction permanente entre trois types d'enseignement, qui apportent chacun leur contribution spécifique dans le processus d'apprentissage. C'est dans cette interaction bien comprise qu'une intégration harmonieuse des TIC au cœur de notre enseignement permettra d'en exploiter au mieux le potentiel.

7. CONCLUSION

Recueillir les réactions des étudiants est utile pour appréhender comment ils perçoivent et s'approprient les outils pédagogiques multimédias. Deux sites ont été testés, conçus par la même équipe, mais destinés à des publics immergés dans deux contextes pédagogiques différents : une pédagogie relativement classique (cours magistraux, exercices et laboratoires) pour le site sur les convertisseurs électromécaniques (machines électriques), une pédagogie active basée sur l'apprentissage par problèmes et par projets pour le site sur les circuits électriques.

Les premiers résultats font apparaître une très bonne réceptivité des étudiants à l'introduction des TIC. Le site ne se substitue cependant pas dans

leur esprit aux cours magistraux et aux supports qui leur sont associés (syllabi, photocopiés, livres). Ils restent demandeurs d'une revue exhaustive et structurée de la matière sur laquelle ils seront interrogés (des connaissances qu'ils doivent acquérir). Le confort de lecture du support papier est également déterminant.

En dépit de l'aspect ludique des animations et de la possibilité de manipulation qu'elles leur offraient, les étudiants n'ont pas trouvé dans l'utilisation du site la même motivation à progresser par eux-mêmes que leur apporte un projet.

Les TIC semblent donc avoir essentiellement leur place pour l'acquisition des compétences intermédiaires entre le savoir (la simple acquisition de connaissances) et le savoir-être (capacité de synthèse et d'évaluation). Le champ d'exploration qu'elles offrent, allant de la simple navigation de concepts en concepts à l'étude de ces concepts par manipulation virtuelle de leur représentation, développent les compétences de compréhension, d'application et d'analyse.

Ces outils deviennent également le catalyseur de relations nouvelles entre les trois pôles du triangle didactique en focalisant le dispositif pédagogique autour de la relation étudiants/savoirs. Cette focalisation sur l'apprenant doit donc être au cœur de la conception même des outils multimédias, qui doivent :

- laisser à l'étudiant assez d'autonomie pour qu'il puisse lui-même explorer le nouveau domaine et « essayer pour voir » ;
- lui fournir les repères cognitifs nécessaires pour juger, évaluer et corriger les résultats de ses actes : en référence aux savoirs établis mais aussi dans l'interaction avec les partenaires (enseignants, pairs, institution).

Coaliser les cours magistraux, les TIC et l'apprentissage par projets nous semble donc ouvrir la voie à une formation moderne, véritablement efficiente, des sciences de l'ingénieur. C'est dans cette interaction bien comprise qu'une intégration harmonieuse des TIC au cœur de notre enseignement permet d'en exploiter au mieux le potentiel.

Forts de cette première expérience, nous souhaitons continuer le développement de tels outils, étendre le public concerné et poursuivre l'étude entamée de leur perception par les étudiants.

Il serait notamment utile de pouvoir corréler cette perception avec le profil individuel des étudiants (leurs résultats lors de l'évaluation portant sur les cours où les TIC ont été introduits, leur parcours et leur taux de réussite antérieurs et d'autres critères sociaux économiques). Cela permettrait de pouvoir adapter ces outils (ou du moins certains d'entre eux) à des catégories beaucoup plus ciblées d'étudiants. Les TIC ouvriraient ainsi la porte à une certaine individualisation de l'enseignement, abandonnée depuis trop longtemps faute de moyens dans l'enseignement de masse et qui seule augmentera de façon significative le taux de réussite des études universitaires.

Notes

1. Les applets sont des programmes écrits en langage java, encapsulés dans une page HTML. L'exécution de ce code java se fait *via* la « machine virtuelle » contenue dans les navigateurs compatibles (tel Microsoft Internet Explorer, Netscape ou Mozilla). Les étudiants peuvent donc, en salle didactique ou depuis leur ordinateur personnel, visualiser ces animations grâce à un simple navigateur Internet, sans l'installation d'aucun programme spécifique.

2. Les puissances manipulées en électrotechnique peuvent dépasser plusieurs kilowatts et s'avérer dangereuses, voire mortelles.

3. Le fait que l'amplitude du champ résultant est effectivement maximale dans la direction donnée par la somme des vecteurs représentatifs des champs créés par chacun des trois bobinages n'est pas démontrée mathématiquement dans le site. Ce résultat est cependant intuitivement admis par les étudiants : aucune question ne nous a été posée à ce sujet.

4. Dans le dispositif de pédagogie active mis en place pour le premier cycle, le tuteur est un enseignant qui « *accompagne le groupe d'étudiants durant une partie de son travail, suscite la réflexion théorique sur base de l'expérimentation pratique, propose des étapes de restructuration* » (Aguirre et al., 2001).

5. Les expressions en italique entre guillemets correspondent aux propres termes mentionnés par les étudiants dans leurs commentaires.

6. La possibilité de ne pas disposer chez soi d'une connexion Internet rapide peut constituer un frein pour certains étudiants

7. Ces deux commentaires entre guillemets sont extraits de l'enquête de la délégation étudiante à la commission permanente d'évaluation Candi 2000, qui a été menée au terme de la première année de mise en place de la pédagogie active, première année au cours de laquelle le didacticiel « circuits » n'était pas encore disponible.

BIBLIOGRAPHIE

- GRENIER D., LABRIQUE F., BUYSE H. & MATAGNE E. (2001). *Électromécanique : convertisseurs d'énergie et actionneurs*. Paris, Dunod.
- YOUNG H. D. & FREEDMAN R. A. (2000). *Sears and Zemansky's University Physics*. Addison Wesley, Longman Inc.
- JACQMOT C., MILGROM E., RAUCENT B., SOUCISSE A., TRULLEMANS C. & VANDER BORGHT C. (2001). Devenir ingénieur par apprentissage actif. In *Actes du premier colloque de Pédagogie par Projet dans l'enseignement supérieur : enjeux et perspectives, Brest-ENST 27-29, GLAT (27-29 juin 2001)*.
- LABRIQUE S., GRENIER D. & LABRIQUE F. (2002). Outils interactifs pour l'enseignement des convertisseurs électromécaniques : développement et mise en œuvre. *Journal sur l'enseignement des sciences et technologies de l'information et des systèmes*, vol. 1, n° 6, pp. 1-15.
- GRENIER D., FISETTE P. & RAUCENT B. (2000). Fédérer des activités pédagogiques pour constituer un projet intégré en mécatronique : compte rendu d'innovation. *Didaskalia*, n° 16, pp. 163-178.
- FASTREZ P. (2002). Conception de dispositifs et changement de paradigme de formation. *Éducation permanente*, n° 152, pp. 31-41.
- LINARD M. (2002). Conception de dispositifs et changement de paradigme de formation. *Éducation permanente*, n° 152, pp. 143-153.

Cet article a été reçu le 07/11/2002 et accepté le 04/10/2003.

Séquence d'enseignement de l'électricité construite à partir de données épistémologiques et didactiques : compte rendu d'innovation

Construction of a teaching sequence of electricity from epistemological and didactical data : report of innovation

Abdelmadjid BENSEGHIR

Département de physique, université Ferhat Abbas
19000, Sétif, Algérie.

Résumé

Cet article a trait à une séquence d'enseignement visant à amener des élèves de collège novices à s'approprier un modèle circulatoire partiel du circuit électrique par le biais d'une démarche hypothético-déductive. L'accent est mis sur la consolidation du rôle de la contradiction empirique par optimisation du degré d'implication des élèves dans la phase de conception de l'expérience-test. À cet effet, une importance particulière est attribuée au cadre de référence des élèves dans le choix et dans la mise en œuvre du dispositif expérimental correspondant. L'essai en classe met en évidence des effets jugés probants concernant tant la libération d'un espace d'initiative pour les élèves que le changement conceptuel escompté.

Mots clés : *circuit électrique, conceptions, contradiction empirique, expérience-test, enseignement.*

Abstract

This paper deals with a teaching sequence aiming to make uninformed middle school pupils appropriate a preliminary circulatory model of simple electric circuit. Using a hypothetico-deductive approach, we focused the attention on the consolidation of the empirical contradiction role, by optimizing the learners' implication degree in the conception phase of test experiment. For this purpose, we attributed a particular importance to the pupils' reference frame in the choosing and in the use of the correspondent experimental device. A testing class has brought into evidence effects considered as probative concerning both the freeing of an initiative space for the pupils and the expected conceptual change.

Key words : *electric circuit, conceptions, empirical contradiction, test experiment, teaching.*

INTRODUCTION

L'élaboration et la réalisation d'un enseignement élémentaire sur le circuit électrique, fondé sur une approche constructiviste de l'apprentissage, ont fait l'objet de nombreuses recherches ces dernières décennies (Cosgrove et al., 1985 ; Arnold & Millar, 1987 ; Johsua & Dupin, 1987 ; Tiberghien et al., 1995). Les activités proposées visent en particulier l'introduction du « débat scientifique » en classe comme gage d'un renforcement de l'implication des élèves dans la construction de leur propre savoir. Dans les processus de modélisation engagés, associés généralement à l'idée de démarche hypothético-déductive, la contradiction empirique produite au moyen d'expériences-tests est supposée jouer un rôle décisif. En réalité, l'examen des séquences d'enseignement en cause incite à nuancer ce jugement. En effet, la part d'initiative des élèves dans la conception de l'expérience-test ou de ce qui en tient lieu est parfois réduite à la portion congrue, l'attention de ceux-ci n'étant le plus souvent sollicitée que pour l'anticipation des résultats correspondants.

Il est admis que, dans le processus de production de la connaissance scientifique, l'effort créatif ne se limite pas à l'élaboration d'hypothèses ou de modèles comme solutions conjecturales aux problèmes posés. La mise au point de modalités de mise à l'épreuve de ces hypothèses ou de ces modèles, loin de se ramener à une opération de déduction mécanique, relève aussi de l'effort inventif (Bunge, 1975 ; Oléron, 1982). Faisant l'hypothèse que

de telles considérations sont transposables dans le domaine de l'apprentissage, il nous semble pertinent d'insister davantage sur l'implication des élèves dans la mise au point de la « preuve » expérimentale comme facteur de réussite des démarches de modélisation de type hypothético-déductif. La prise en charge d'une telle préoccupation suppose qu'une attention conséquente soit portée à l'élaboration de la situation didactique correspondante.

Dans cet esprit, nous avons entrepris la construction et l'essai d'un ensemble de séquences d'enseignement visant une modélisation qualitative graduelle du circuit électrique par des élèves de collège novices. Le présent article concerne la première de ces séquences, laquelle a pour objectif l'adhésion à l'idée que « quelque chose » circule dans le circuit électrique d'un pôle à l'autre du générateur (une pile) en traversant le récepteur (une ampoule, un moteur électrique, etc.) qu'il fait « fonctionner ». Il s'agit d'une explication qui, bien que partielle (dans la mesure où elle n'explicite pas l'idée de circulation complète, ni celle de conservation du courant), n'en constitue pas moins un jalon important dans l'élaboration d'un modèle de courant compatible avec les connaissances scientifiques actuelles.

Cette séquence s'adresse précisément à des élèves de huitième année de l'école fondamentale (EF) (cursus d'enseignement obligatoire de neuf ans en Algérie). À ce niveau (âge moyen 14 ans, grade 8), les élèves n'ont encore eu aucun enseignement systématique sur les circuits électriques, à l'exception d'éléments descriptifs sur les conducteurs et les isolants et d'activités sporadiques au cycle primaire portant sur la règle opératoire de fermeture.

Avant d'exposer les résultats de l'essai en classe, nous explicitons les traits essentiels du travail préparatoire engagé.

1. ÉLABORATION DE LA SÉQUENCE

1.1. Prise en compte des conceptions préalables des élèves

Il est notoire que les élèves disposent très tôt d'idées intuitives structurées sur le circuit électrique simple (Tiberghien & Delacôte, 1976 ; Benhamida, 1980 ; Closset, 1989). De telles « conceptions » évoluent avec le niveau scolaire, tout en montrant, pour certaines d'entre elles, une certaine résistance à l'enseignement. Au niveau concerné par la présente étude, seules les conceptions « bifilaires » supposant la maîtrise de la règle opératoire de fermeture prévalent chez les élèves. Dans l'inventaire correspondant (figure 1), la conception (B), dite des « courants antagonistes », est celle qui a habituellement la prépondérance. Sa résistance assez tenace à un premier enseignement de type ordinaire (par opposition à un enseignement d'inspiration constructiviste) est rapportée par différents auteurs (Cosgrove et *al.*,

1985 ; Shipstone, 1985 ; Johsua & Dupin, 1987). La conception circulatoire a, selon les données de la littérature, très peu cours chez de jeunes élèves novices. Le cas échéant, elle se réduirait selon toute probabilité à la forme partielle (C) assimilable au modèle de courant décrit plus haut. La conception (A) admettant l'existence d'un « courant » dans un seul des deux fils de connexion (Shipstone, 1985) ne persisterait, en raison de son caractère fruste, qu'à l'état de traces dans la population visée.

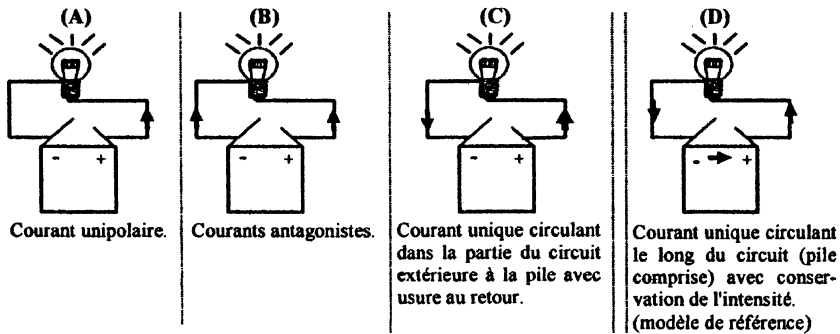


Figure 1. Conceptions bifilaires du circuit électrique simple

La mise en échec de la conception (B) et la promotion concomitante de la conception (C) par l'entremise d'une démarche hypothéico-déductive constituent le principe de la stratégie d'apprentissage adoptée. La mise en pratique de celle-ci se conforme principalement à la procédure dite de « validation explicite » (Johsua & Dupin, 1993 ; Robardet, 2001) dont nous évoquons ci-après les aspects relatifs à l'activité expérimentale.

1.2. Nature des situations expérimentales mises en jeu

Dans sa plus simple expression, la procédure précitée fait appel à deux situations à caractère expérimental, se différenciant par leur fonction épistémologique et didactique. La première, intervenant au « départ » de l'opération d'enseignement, sert de support à la « dévolution du problème », c'est-à-dire l'action par laquelle le maître conduit les élèves à assumer un problème autour duquel est construit le projet d'apprentissage (Brousseau, 1986). La seconde est à visée de validation ou d'objectivation. Sa fonction didactique est double : permettre l'exercice du jeu hypothéico-déductif et favoriser le franchissement de l'obstacle représenté par une ou des conceptions « préalables ».

Au titre de la mise au point d'une telle situation problème, nous avons eu recours au procédé des deux boussoles dont nous précisons les caractéristiques et les modalités de mise en œuvre dans la présentation qui suit.

1.3. Emploi du procédé des deux boussoles

On place de part et d'autre d'une ampoule faisant partie d'un circuit électrique simple ouvert une boussole sur (ou sous) le fil conducteur, lequel est orienté parallèlement au méridien magnétique. En fermant le circuit, les deux aiguilles aimantées dévient, en sens contraire, d'un certain angle par rapport à leur direction initiale.

L'utilisation de cette situation vise à induire des prévisions à propos du comportement des aiguilles, compatibles avec la conception (B) (déviation de même sens). Il est attendu qu'une prise de conscience de la contradiction entre une telle anticipation et l'observation expérimentale ait lieu chez les élèves et conduise à la remise en cause de cette conception. L'intérêt de ce procédé pour la réalisation de l'objectif poursuivi tient à deux aspects. Le premier a trait à l'emploi de la boussole. À la différence d'autres « détecteurs » de courant (ampèremètre, diode électroluminescente), celle-ci a l'avantage d'être un objet à la fois simple, dépouillé, plus ou moins familier pour des élèves de collège et se disposant hors du circuit. Ces atouts sont susceptibles d'être mis à profit pour favoriser une large initiative chez les élèves, notamment dans la phase de conception de l'expérience-test. En particulier, la fonction détectrice de courant impartie à la boussole peut être avantageusement prise en soi comme objet d'investigation avant de constituer un moyen de mise à l'épreuve des conceptions en débat. Le second aspect consiste dans la possibilité offerte aux élèves de « penser » la démarche de preuve dans leur propre système d'idées, cela étant supposé propre à affermir leur adhésion au processus d'objectivation envisagé.

Le procédé en question a été essayé dans des classes de sixième et quatrième françaises (12 et 14 ans), après celui des « deux ampèremètres », ce dernier n'ayant pas permis aux élèves de changer de conception (Johsua & Dupin, 1987). À part le fait que peu d'informations sont données sur le déroulement et donc sur le niveau d'implication des élèves, la présentation d'emblée de la boussole comme un **détecteur de sens de courant** a sans doute limité l'effort d'investigation de ceux-ci. Il nous a semblé préférable d'associer à la boussole seulement l'idée de **détecteur éventuel de courant**, laissant aux élèves la possibilité d'investir eux-mêmes celle de discrimination des courants (par le biais du sens).

1.4. Schéma des activités

La séquence s'étale sur une séance unique de deux heures, organisée selon le schéma suivant :

- réalisation de l'expérience de départ (allumage d'une ampoule) et dévolution du problème (explication de l'allumage de l'ampoule) ;

- expression des conceptions grâce à un questionnaire papier-crayon ;
- dépouillement collectif des réponses avec mise en place d'un groupe de tri ;
- débat axé sur la défense de chacune des conceptions exprimées avec possibilité de réaliser les expériences proposées par les uns et les autres.

À ce débat contradictoire mené jusqu'à saturation succède toute une phase tournant autour de l'expérience-test : concertation à propos d'une alternative pour trancher la question en discussion, présentation de l'objet boussole, recherche de la fonction détectrice de courant, mise au point du « projet » d'expérience-test et mise à l'épreuve des conceptions. Dans cette dernière étape un questionnaire-outil est soumis par écrit à tous les élèves. Enfin, une évaluation finale de la séquence est prévue au moyen d'un questionnaire papier-crayon.

2. CONDITIONS DE RÉALISATION DE LA SÉQUENCE

Huit groupes d'une vingtaine d'élèves chacun (représentant au total 149 élèves) prennent part à la séquence. Les essais sont insérés dans le schéma horaire réservé à l'éducation technologique (ET), une discipline couvrant des thèmes de physique et de technologie. L'enseignement de la séquence est assuré par les trois professeurs habituels de cette discipline. Adhérant à titre individuel à l'expérimentation, ceux-ci bénéficient pour la circonstance d'une formation préalable comprenant des séances d'information et de concertation relatives au projet de séquence (problématique, protocole des activités, aspects techniques, préparation des conditions d'enseignement). La langue d'enseignement est l'arabe classique ; toutefois, pour favoriser la fluidité d'expression chez les élèves, une dérogation est faite en faveur de l'arabe parlé durant les discussions.

Le déroulement de la séquence obéit à un certain nombre de contraintes faisant l'objet de consignes destinées aux professeurs :

- nécessité de réserver une place importante aux débats en faisant des interventions les moins informatives et suggestives possibles (le professeur ne donne pas la « bonne réponse », ne fait usage que des termes « techniques » repris aux élèves, il essaie d'amener ceux-ci à faire eux-mêmes des regroupements, à justifier le plus possible leurs arguments, etc.) ;
- nécessité d'admettre une part de tâtonnement dans les activités manipulatoires avec prise en compte de l'économie temporelle globale de la séquence.

Compte tenu du nombre important de groupes d'élèves engagés, l'exposé des résultats est présenté sous une forme synthétique, ce qui n'exclut pas de faire mention, le cas échéant, d'événements ou de faits singuliers significatifs.

3. DESCRIPTION DE LA SÉQUENCE ET RÉSULTATS

3.1. Dévolution du problème et expression des conceptions

Au début de la séquence, le professeur demande aux élèves d'allumer une ampoule à l'aide de fils et d'une pile. Il s'applique ensuite à créer chez eux le besoin de rendre compte du phénomène produit en les incitant à s'interroger sur ce que celui-ci est susceptible de soulever pour eux comme questions. Une question (Q1) formalisant la préoccupation suscitée est posée à tous les élèves (annexe 1). Les réponses s'apparentent en forte majorité à la conception (B), c'est-à-dire une explication en termes de « courants antagonistes » (tableau 1, 2^e ligne).

	A	B	C	Divers
8 ^e AF N=149	8	79	12	1
9 ^e AF N=245	0	47	50	3

Tableau 1. Fréquence des conceptions en pourcentages (question Q1)

À titre de prise de repères, nous avons posé la même question Q1 à 245 élèves en 9^e AF, en fin d'année scolaire. C'est à ce dernier niveau de l'EF que se concentre habituellement l'enseignement de l'électricité. Celui-ci prenant pratiquement tout le volume horaire annuel réservé à l'ET, est de consistance « classique », c'est-à-dire introduisant l'électrocinétique à partir d'éléments d'électrostatique interprétés en termes de structure de la matière. On observe dans ce cas une prégnance encore forte de la conception (B) (tableau 1, dernière ligne), avec le plus souvent une différenciation « électrostatique » des « courants antagonistes » : les deux courants sont des courants de charges positives et de charges négatives, issues des pôles + et – de la pile. Une élève, désignée comme « très bonne » dans sa classe, écrit : « *Lorsqu'on relie les deux fils aux bornes de la pile, dans le premier fil se déplacent des électrons positifs alors que dans le deuxième fil se déplacent des électrons négatifs. Puisqu'ils ont des signes différents, il est évident qu'il y aura attraction ; chaque signe + s'unit avec un signe – dans le filament et la lampe s'allume.* »

Ces données permettent de réaffirmer l'intérêt d'envisager un traitement didactique « différent » pour la conception en cause.

3.2. Débats contradictoires

Après avoir répondu à la question Q1 les élèves procèdent au tri des réponses en s'aidant des dessins annotés de flèches. Ensuite s'engage entre

eux un débat contradictoire dont les aspects réglementaires sont proposés par le professeur. Malgré la disparité numérique entre les partisans respectifs des conceptions en lice, (B) et (C) essentiellement, les discussions sont en général très vives et soutenues pendant une grande partie du temps imparti. Le confinement strict au rôle d'animateur du professeur n'est pratiquement affecté que dans deux groupes où la conception (C) n'apparaît pas lors du dépouillement des réponses. Le professeur participe dans ce cas à introduire cette conception de manière indirecte dans une formule du genre : « *Dans un autre groupe, certains élèves considèrent que... Qu'en pensez-vous ?* » On constate alors un à deux cas seulement d'adhésion à la conception intruse.

Dans les commentaires échangés, on retrouve en substance les arguments rapportés dans la littérature, avec en outre des éléments de justification complémentaires ou inédits, notamment des propositions d'expériences-tests que les élèves réalisent séance tenante (annexe 2). La répétition des mêmes arguments marque, avec l'atténuation de l'ardeur à convaincre des protagonistes, la saturation des débats. Finalement, le professeur constate que les élèves ne changent pratiquement pas de point de vue : un ou deux élèves seulement par groupe, toutes tendances confondues, reviennent explicitement sur leur conviction initiale, que ce soit de l'explication (B) vers (C) ou l'inverse. Les élèves restent donc sur leur faim, ne sachant pas vraiment qui a raison. C'est alors que, faisant le point sur la situation du débat, le professeur leur propose de trouver une « vraie » expérience-test, ce qui entre en résonance avec leur attente.

Afin de favoriser l'initiative des élèves dans cette recherche, deux étapes distinctes ont été prévues. La première a trait à l'investigation de la fonction détectrice de courants de la boussole (hypothèse-instrument) ; la seconde concerne l'exploitation de cette fonction pour la mise à l'épreuve des conceptions concurrentes (hypothèses-cibles).

3.3. Mise en évidence de la fonction détectrice

Les élèves abordent cette étape à partir d'une suggestion du professeur : trouver, pour trancher la question, un dispositif propre à révéler l'existence d'un courant en un endroit donné du circuit. En l'absence prévisible de solutions « sérieuses » émanant des élèves, le professeur prend l'initiative de présenter la boussole au titre éventuel de dispositif recherché. Cette proposition recueille l'approbation générale dans tous les groupes où l'on oublie, pour un moment, l'enjeu principal pour s'apprêter à l'investigation de la fonction visée.

Autour de la paillasse, sur laquelle se trouve le circuit complété et vérifié par les élèves puis laissé ouvert, une discussion s'engage alors sur les

conditions d'utilisation de la boussole. La manière dont sont appréhendés les différents aspects de cette investigation est décrite ci-après.

3.3.1. *Emplacement de la boussole*

Ce point suscite spontanément dans chaque groupe l'idée de rapprocher la boussole de l'endroit sujet à la détection. Poussés à préciser la solution préconisée, les élèves proposent le plus souvent de mettre la boussole sur l'une des portions du fil conducteur reliant le pôle + de la pile à l'ampoule. Le choix de ce fil qui semble lié au statut accordé par les élèves au pôle + (pourvoyeur principal ou exclusif d'« électricité ») permet incidemment d'éviter de précipiter le rejet de la conception (A) avant la réalisation de l'expérience-test. En dernier ressort et après concertation, la disposition de la boussole sur la portion du fil parallèle à l'axe médian du circuit passant par la pile et l'ampoule est retenue.

3.3.2. *Position relative aiguille aimantée-fil conducteur*

L'évocation de cet aspect est le fait exclusif de l'enseignant, mais l'inventaire des positions possibles (perpendicularité, intersection quelconque, parallélisme), est établi avec succès par les élèves. Pour concrétiser la position souhaitée, ceux-ci focalisent de prime abord leurs efforts opératoires sur la boussole (en fait sur le boîtier). Après une courte période de tâtonnement collectif, ils réalisent, sans l'aide du professeur, qu'il faut faire tourner la planche portant le circuit pour atteindre le but visé.

3.3.3. *Nature de l'effet de détection*

L'idée de déviation de l'aiguille, sans spécification de sens ou d'amplitude, comme indice éventuel du passage d'un courant dans le fil, est avancée à l'unanimité dans chaque groupe. À titre marginal est évoquée également l'hypothèse d'une « vibration » de l'aiguille.

3.3.4. *Réalisation des essais*

L'ordre des manipulations pour positionner l'aiguille par rapport au fil conducteur varie d'un groupe à l'autre. Bien que son amplitude soit faible avec l'usage d'une seule ampoule (dans les conditions expérimentales préalables de parallélisme, figures 2a et 2b), la déviation observée fait l'effet d'une « découverte » dans tous les groupes. L'emploi d'un ensemble d'ampoules (montées en dérivation, figure 2c), suggéré par le professeur, permet de renforcer cet effet et d'induire une mise en relation qualitative entre amplitude de la déviation et intensité de courant (au sens intuitif ou métaphorique) exploitable ultérieurement.

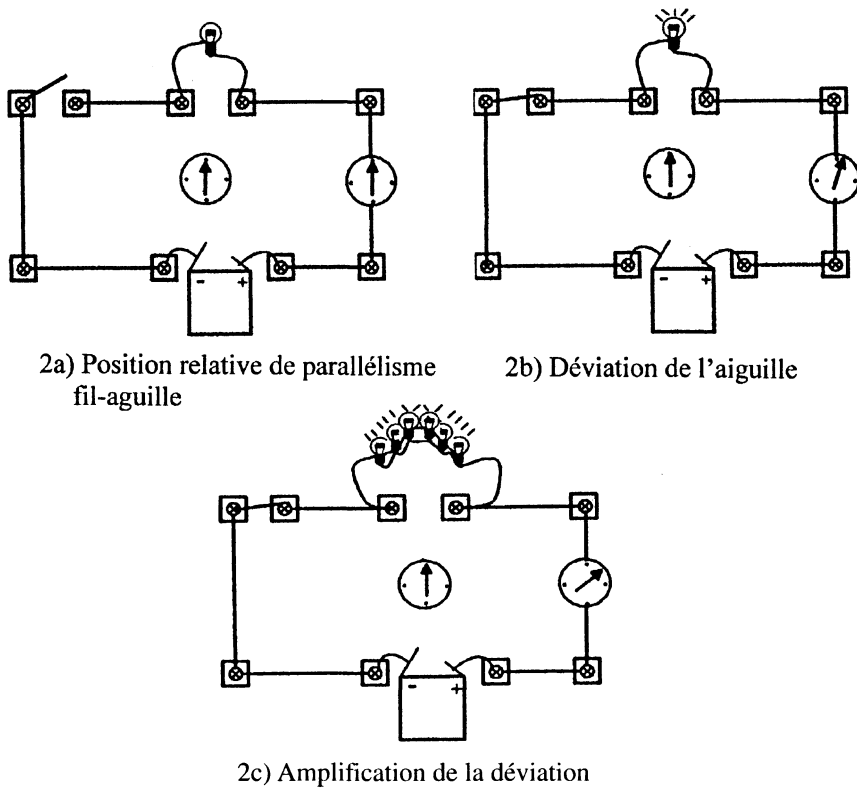


Figure 2. Mise en évidence de l'effet de détection

3.4. Mise au point de l'expérience-test

La procédure, permettant de trancher en faveur de l'une des conceptions rivales, apparaît d'une évidence telle que certains élèves la proclament avant même que le professeur n'engage la discussion à son propos. À cet effet, la solution de déplacer la première boussole sur l'autre fil reliant la pile à l'ampoule ou celle de disposer d'une seconde boussole et de voir leur « comportement » ressortent quasi spontanément.

L'initiation à la fonction détectrice permet de graduer l'effort prévisionnel sollicité des élèves dans le cadre de la procédure de validation retenue. Elle rend particulièrement aisée leur implication dans la dernière étape de la mise au point de l'expérience-test. Ainsi, dans l'opération d'explicitation des anticipations rapportées à chaque conception (voir la question Q2 en annexe 1), les élèves font preuve, en général, d'une prise de distance réelle par rapport à leur conviction propre. Un large consensus est alors vite réalisé en faveur des prévisions attendues (figure 3). À cet égard, l'anticipation

relative à la conception (A) leur semble triviale ; celle concernant la conception (B) répond au motif que la deuxième boussole doit « se comporter » de la même façon que la première en raison de la « *similitude de sens des deux courants* », le sens d'orientation pile-ampoule étant plus ou moins affirmé comme référence. Enfin, à propos de la conception (C), les élèves admettent une différence de « comportement » des deux boussoles qu'ils traduisent plus ou moins facilement en termes de différence de déviation des aiguilles. À ce sujet, deux variantes de direction finale de la deuxième aiguille sont le plus souvent proposées : Nord-Ouest (correcte) et Sud-Ouest. Cette dernière, bien qu'erronée, est retenue au même titre que la première, avec l'assentiment « forcé » du professeur.

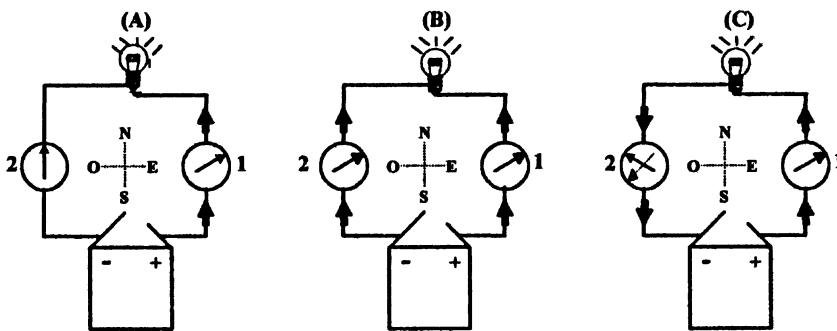


Figure 3. Déviation des aiguilles en fonction des conceptions

Avant le passage à l'expérience un questionnement, relatif au degré de confiance accordé au procédé en jeu pour la réalisation de l'objectif poursuivi, donne lieu à une approbation collective des élèves dont certains font preuve d'impatience à connaître la « réponse » du montage.

3.5. Verdict expérimental et attitude des élèves

Le résultat de la manipulation (figure 4) reconnu comme nettement favorable à la conception (C) produit surprise et satisfaction manifestes dans tous les groupes. Passé ce moment, certains élèves, partisans de la conception « déchuée » (c'est-à-dire (B)), surtout les tenants de cette conception dans les débats, reprennent avec vigueur la question de l'usure de la pile sans toutefois mettre en cause le verdict expérimental. Dans certains groupes, où de telles réactions sont très fortes, les élèves demandent expressément des clarifications sur le sujet et posent cela comme condition à leur adhésion définitive à la conception circulaire. En général cependant de telles hésitations n'apparaissent pas propres à susciter de nouveaux débats. L'argument de l'usure du courant, opposé auparavant par les partisans de la conception (C), devient

conjoncturellement très persuasif et permet l'établissement d'un consensus provisoire dans l'attente d'une prise en charge annoncée du problème en suspens.

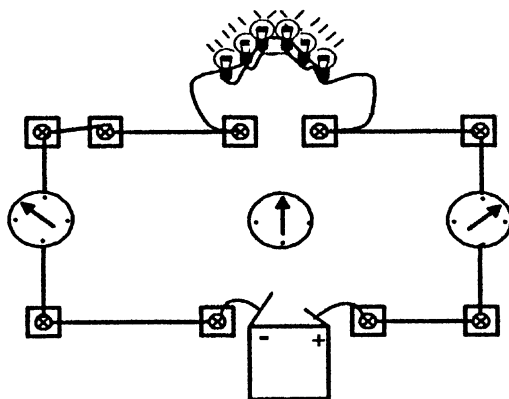


Figure 4. Verdict expérimental

4. ÉVALUATION FINALE DE LA SÉQUENCE

4.1. Modalités d'évaluation

Un questionnaire papier-crayon mettant en jeu des situations d'interprétation et de prévision relatives au fonctionnement d'un petit moteur électrique est soumis aux fins d'évaluation aux 149 élèves ayant participé à la séquence. Le questionnement a la particularité d'être progressif et de faire appel à un support expérimental (annexe 1). Il s'agit, en premier lieu, d'expliquer le fonctionnement du moteur mis effectivement en marche (question Q3), puis de prévoir ce qu'advientra ce fonctionnement si l'on procède à une intervention des pôles de la pile dans le circuit considéré (question Q4), et enfin, de rendre compte *a posteriori* de l'inversion du sens de rotation du moteur (question Q5). La passation du questionnaire a lieu en classe (réunion de deux groupes d'élèves), une semaine après la séance de formation. Pour permettre une certaine comparaison des résultats le même questionnaire est posé dans les mêmes conditions à 115 élèves « témoins » de 8^e AF.

4.2. Résultats

4.2.1. Explication du fonctionnement du moteur

Lorsqu'il faut expliquer le fonctionnement du moteur, la conception (C) est explicite dans la plupart des réponses fournies dans les classes expé-

riméntales (tableau 2). Les commentaires sont assez riches et font le plus souvent référence à un lien causal entre circulation du courant et rotation du moteur comme l'indique cet exemple : « *La cause de la rotation est le déplacement de l'électricité, c'est-à-dire l'énergie, dans le moteur (...) Lorsque l'énergie entre dans le moteur, elle tourne dedans et par sa rotation le moteur tourne.* » De même, sans être suggérée, l'idée d'usure du courant après le passage dans le moteur, exprimée diversement, revient fréquemment, confirmant ainsi la tendance observée à ce sujet en fin de séquence. Un élève écrit : « *L'énergie emmagasinée au pôle positif de la pile se met en mouvement à travers le fil (1) vers le moteur ; celui-ci tourne puis les charges mortes retournent à travers le fil (2) au pôle négatif.* » Dans les classes témoins, les explications présentées ne diffèrent sensiblement pas, tant en nature qu'en répartition, de celles qu'inspire ordinairement la situation de l'ampoule (question Q1) chez des élèves du niveau considéré. Toutes ces données laissent penser que la participation à la séquence a provoqué dans chaque groupe un véritable basculement en faveur de la conception circulatoire.

	A	B	C	Divers
8° AF (exp.) N=149	0	14	82	4
8° AF (tém.) N=115	2	89	8	1

Tableau 2. Fréquence des conceptions (question Q3)

4.2.2. Prévisions relatives au fonctionnement du moteur

La majorité des élèves réagit à la proposition d'intervertir les bornes de la pile (question Q4) par le choix de la prévision d'un « fonctionnement différent » du moteur, c'est-à-dire de changement de sens de rotation. Les tenants de la conception (C), qui ont admis cette prévision, mettent clairement en relation sens de parcours de « l'électricité » et sens de rotation du moteur. Ce réinvestissement de la conception circulatoire est ainsi traduit par un élève : « *Car c'est le fil positif qui transmet l'énergie de la pile au moteur tandis que le fil négatif prend l'énergie restante. L'hélice tournera en sens inverse par apport à la première fois car on a renversé la pile ; le positif est passé du côté gauche et le négatif du côté droit (...); l'énergie agira alors du côté gauche.* » Les tenants de (B), qui ont opté pour la même prévision, font prévaloir l'argument d'« échange de place des fils », conjugué parfois avec l'idée de dissymétrie des deux courants. Un élève écrit : « *Car on retourne la pile, c'est-à-dire qu'on met le négatif à la place du positif (et vice-versa) ; car le pôle + a une énergie plus grande que celle du pôle -, ce qui fait que le moteur tournera selon le sens du +.* » Concernant l'éventualité d'un « arrêt du moteur », l'argument de « défaut de correspondance des bornes » prévaut indifféremment dans les commentaires des partisans de (B) ou de (C). Enfin, l'alternative d'un « fonctionnement identique » est retenue essentiellement

par des partisans de (B) avec une justification centrée sur l'idée d'interchangeabilité des pôles de la pile comme l'illustrent ces propos : « *Car l'énergie ne se trouve pas dans le positif seulement ; les bornes du moteur reçoivent l'énergie du + et du -* » ; « *Car la façon de transmettre l'énergie au moteur reste la même.* »

En définitive, la confrontation des élèves à la situation de prévision induit une certaine mobilisation des conceptions sans affecter notablement la répartition initiale de celles-ci.

4.2.3. Explication a posteriori de l'inversion du sens de rotation

L'observation effective de l'inversion du sens de rotation du moteur n'entraîne pas, non plus, de modifications significatives de la distribution des conceptions comme le laissent voir les réponses des élèves à la question Q5 posée après réalisation de l'expérience (tableau 3). Seulement un ou deux élèves par classe délaissent à l'occasion leurs idées sur le sujet. Il s'agit précisément de tenants de la conception (B) ayant opté pour les prévisions « arrêt » ou « fonctionnement identique » en réponse à la question Q4. En outre, ces revirements ne correspondent pas tous à la présentation d'une explication cohérente relevant de la conception (C).

	A	B	C	Divers
8 ^e AF (exp.) N=149	0	5	86	9
8 ^e AF (tém.) N=115	1	82	11	6

Tableau 3. Fréquence des conceptions (question Q5)

À la lumière de ces résultats on peut considérer le questionnaire utilisé comme un indicateur peu « déformant » des conceptions des élèves (expérimentaux ou témoins) concernant le domaine étudié. D'autre part, eu égard à la consistance des situations d'évaluation mises en jeu et dans la limite permise par l'échéance de passation du questionnaire (court terme), il est plausible de conclure à la fois au caractère massif et à la solidité des changements de conception réalisés au moyen de la séquence.

CONCLUSION

Nous avons présenté une séquence d'enseignement visant chez des élèves de collège novices à faire évoluer la conception des « courants antagonistes » vers une conception circulatoire partielle comme première étape de la construction d'un modèle de courant électrique plus élaboré. À cet effet, l'usage du procédé des deux boussoles a permis de dégager un espace d'initiative notable pour les élèves, notamment lors de la mise au point de l'expé-

rience-test, phase privilégiée dans la démarche de type hypothético-déductif adoptée. Les résultats probants enregistrés ont pu être reliés à des considérations « épistémologiques » : simplicité et caractère dépouillé de l'objet boussole, non insertion de cet objet dans le circuit, inscription de la démarche de preuve dans le cadre de la conception familière, etc. Par ailleurs, le changement de conception produit s'est accompagné d'une mutation du problème de départ (explication de l'allumage de l'ampoule) en une préoccupation insistante chez les élèves (explication de l'usure de la pile), propice à la poursuite du processus de modélisation engagé.

BIBLIOGRAPHIE

- ARNOLD M. & MILLAR R. (1987). Being constructive : an alternative approach to the teaching of introductory ideas in electricity. *International Journal of Science Education*, vol. 9, n° 25, pp. 553-563.
- BENHAMIDA J. (1980). *Modèle de fonctionnement de circuits simples chez des enfants de 12 ans*. Thèse, université Paris 7.
- BROUSSEAU G. (1986). Fondements et méthodes de la didactique des mathématiques. *Recherches en didactique des mathématiques*, vol. 7, n° 2, pp. 33-115.
- BUNGE M. (1975). *Philosophie de la physique*. Paris, Seuil.
- CLOSSET J.-L. (1989). Les obstacles à l'apprentissage de l'électrocinétique. *Bulletin de l'Union des Physiciens*, n° 716, pp. 931-950.
- COSGROVE M., OSBORNE R. & CARR M. (1985). Children's intuitive ideas on electric current and the modification of those ideas. In R. Duit, W. Jung & C. von Rhöneck (éds), *Aspects of Understanding Electricity : The proceedings of an International Workshop*. Kiel, IPN, pp. 247-256.
- JOSHUA S. & DUPIN J.-J. (1987). Taking into account student conceptions in instructional strategy : an example in physics. *Cognition and instruction*, vol. 4, n° 2, pp. 117-135.
- JOHNSUA S. & DUPIN J.-J. (1993). *Introduction à la didactique des sciences et des mathématiques*. Paris, PUF.
- OLÉRON P. (1982). *Le raisonnement*. Paris, PUF.
- ROBARDET G. (2001). Quelle démarche expérimentale en classe de physique ? Notion de situation problème. *Bulletin de l'Union des Physiciens*, n° 836, pp. 1173-1190.
- SHIPSTONE D. M. (1985). On children's use of conceptual models in reasoning about current electricity. In R. Duit, W. Jung & C. von Rhöneck (éds), *Aspects of Understanding Electricity : The proceedings of an International Workshop*. Kiel, IPN, pp. 73-93.
- TIBERGHEN A. & DELACOTE G. (1976). Manipulations et représentations de circuits électriques simples par des enfants de 7 à 12 ans. *Revue Française de Pédagogie*, n° 34, pp. 32-44.
- TIBERGHEN A., PSILLOS D. & KOUMARAS P. (1995). Physics instruction from epistemological and didactic bases. *Instructional Science*, n° 22, pp. 423-444.

ANNEXE 1

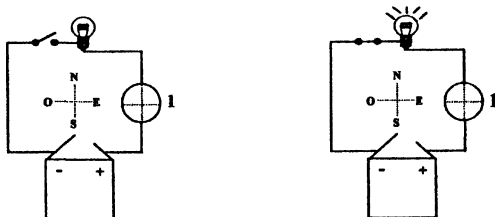
Question Q1

Pour allumer une petite ampoule électrique, on relie ses deux bornes à celles d'une pile. Expliquer par écrit et au moyen d'un dessin* pourquoi l'ampoule s'allume.

Question Q2

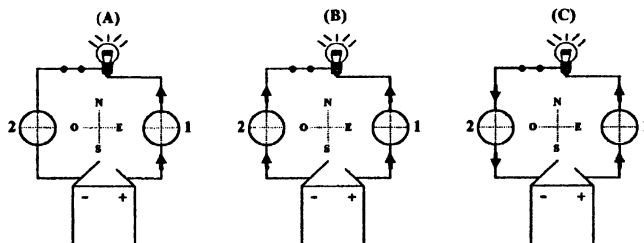
1 Rappel du résultat expérimental relatif à la 1^{re} boussole.

Indiquer la position de l'aiguille aimantée de la boussole dans les deux montages suivants :



2 Anticipations relatives au comportement de la 2^e boussole.

a) Indiquer la position de l'aiguille de la boussole 1 dans les trois cas de figure :



b) Pour chacune des trois conceptions que vous considérez à tour de rôle comme étant la meilleure, indiquer la position que prendrait l'aiguille de la boussole 2.

Question Q3

Pour faire fonctionner un petit moteur électrique on relie ses deux bornes à celles d'une pile. Expliquer par écrit et au moyen d'un dessin* pourquoi le moteur tourne.

Question Q4

On intervertit dans le montage précédent (fig. 1) les bornes + et - de la pile (fig. 2). Que se passera-t-il ?

- Le moteur s'arrêtera.
- Le moteur continuera à fonctionner mais différemment.
- Le moteur continuera à fonctionner de la même façon qu'auparavant.

Cochez la réponse qui vous semble correcte et justifiez-la.

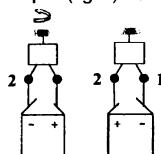


Figure 1 Figure 2

Question Q5

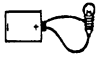
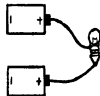
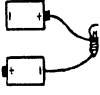
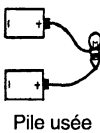
Expliquer pourquoi l'inversion des bornes de la pile produit une inversion du sens de rotation du moteur.

**Lorsque l'enseignant constate qu'un élève mentionne le mouvement de quelque chose dans le circuit (électricité, énergie, force, lumière, etc.), alors il demande à cet élève d'utiliser au besoin de petites flèches pour clarifier le dessin proposé.*

ANNEXE 2 : Synthèse des débats contradictoires

Éléments du débat	Conception (B)	Conception (C)
Traits caractéristiques	Nécessité d'utilisation de deux fils conducteurs. La pile fournit « quelque chose » à l'ampoule (électricité, énergie, force, etc.) qui le consomme entièrement. Le courant positif est plus fort que le courant négatif.	Nécessité d'utilisation de deux fils conducteurs. La pile fournit « quelque chose » à l'ampoule (électricité, énergie, force, etc.) par le fil « positif » (fonction d'acheminement). Une partie est consommée, le reste retourne par le fil « négatif » (fonction de régulation). Compartimentage de la pile : partie + chargée d'électricité, partie - vide (dépotoir de charges usées).
Interrogations suscitées par la conception	Ne pourrait-on pas se passer du courant - puisque le courant + est assez fort ? Où iraient les charges « usées » si les deux fils apportaient l'électricité à l'ampoule ?	Quel intérêt y a-t-il d'avoir un 2 ^e fil qui n'apporte pas l'électricité à l'ampoule ? Quel intérêt y a-t-il dans le retour de l'électricité à la pile ? Comment expliquer l'usure de la pile ?
Arguments en faveur	Il faut les deux courants pour donner à l'ampoule l'énergie suffisante.	Le pôle - assure le retour du courant Le courant ne retourne pas en entier, s'use. La pile s'use car le courant s'use. Il y a « consommation ».
Arguments en défaveur	L'arrivée de deux courants simultanément à l'ampoule la ferait exploser. La fourniture d'électricité par les deux pôles userait vite la pile.	S'il y avait un seul courant, un seul fil suffirait. Il n'y a pas de retour à la pile car l'électricité est consommée par l'ampoule. Il n'y a pas de frottement, de collision entre les courants permettant à l'ampoule de s'allumer.

PROPOSITIONS D'EXPERIENCE-TEST

Montage	Origine	But	Pronostic (*)	Remarques	Réaction au verdict expérimental
 (Fréquente)	Partisans de (C)	Voir : si le pôle - a la même fonction que le pôle + : fournir l'électricité à l'ampoule	Négatif (correct)	Hypothèse mise en doute : interchangeabilité des pôles + et - Principe : utilisation double d'un pôle +	Partisans de (B) : la quantité d'électricité arrivant à l'ampoule est insuffisante, c'est celle du pôle +, simplement dispersée
 (Fréquente)	Partisans de (C)	Idem	Négatif (correct)	Proposée après réaction des partisans de (B) au verdict de l'expérience 1 Principe : utilisation de deux pôles +	Partisans de (B) : mutisme Partisans de (C) : satisfaction
 (Fréquente)	Partisans de (C)	Montrer que le pôle - a un rôle propre : retourner l'électricité restante ou usée	Positif (faux)	Proposée souvent en tandem avec l'expérience 2 Principe : utilisation d'un pôle + d'une pile et d'un pôle - d'une autre pile identique	Consternation dans les deux camps
 Pile neuve Pile usée (rare)	Partisans de (B)	Voir si le pôle - a pour fonction de recueillir les charges usées (dépotoir)	Négatif (correct)	Hypothèse mise en doute : différence de fonction entre les pôles + et - Reformulation de cette hypothèse par des partisans de (B) : pôle - d'une pile neuve ≡ pôle vide ≡ pôle + d'une pile usée	Partisans de (B) : satisfaction Partisans de (C) : mutisme

(*) des auteurs de la proposition, concernant l'allumage de l'ampoule.

Cet article a été reçu le 23/10/2001 et accepté le 11/09/2003.

Book reviews

CLÉMENT P. (dir.), (2001). *Didactique de la biologie. Recherches, innovations, formations. Actes du colloque international d'Alger, décembre 2000.*

Cet ouvrage rassemble des contributions de didacticiens « méditerranéens » de la biologie (France, Algérie, Maroc, Tunisie, Liban, Syrie, Sénégal) et présente un panorama des problèmes didactiques que pose dans ces pays l'enseignement de la biologie, problèmes parfois génériques, parfois spécifiques. Il s'agit d'ailleurs davantage que d'actes de colloque, dans la mesure où les contributions présentées à Alger ont été enrichies d'articles originaux. L'ouvrage s'organise en six parties. La première développe différents « regards épistémologiques » sur l'enseignement de la biologie. Les uns sont liés au contenu (modélisation de l'origine du vivant, d'autres sont à caractère psychologique (dimension affective des apprentissages), ou méthodologique (question de la problématisation, de l'interdisciplinarité, etc.), ou encore programmatique (contenus d'enseignement de l'histoire des sciences et de l'épistémologie).

Le chapitre « *Conceptions et obstacles* » présente les problèmes de représentation du cerveau humain ainsi que les obstacles mathématiques à la compréhension du vivant (déterminisme vs aléatoire).

Le thème « *Programmes et curricula* » examine différents problèmes liés à la définition et à la transposition des contenus d'enseignement, en Algérie, au Sénégal et au Liban (génétique, botanique, environnement, épreuves d'examen, etc.).

Le thème « *Discours et images* » évoque aussi bien les questions de lecture des images

(molécules organiques) que d'utilisation de schémas didactiques (reproduction humaine) et de production rédactionnelle par les élèves.

Quant aux thèmes « *Évaluation* » et « *Remédiation* », ils présentent diverses contributions assez éclectiques.

Le livre s'organise assez largement autour des travaux de l'équipe de Pierre Clément (université Claude Bernard, Lyon 1), auteur du texte introductif. On ne s'étonnera donc pas de retrouver ici l'affirmation du caractère « conjecturel » des représentations des élèves et étudiants (*situated conceptions*). On ne peut certes que souscrire à cette idée que les conceptions ne sont pas des « choses mentales », passivement disponibles en mémoire à long terme, et que les techniques d'entretien et de questionnaire ne feraient que faire « émerger ». Mais, à la vérité, qui défend aujourd'hui un tel point de vue ? Moscovici n'expliquait-il pas déjà, il y a longtemps (1976), que l'homme est une « machine à inférer ». Que ses réponses transmettent un message autant qu'elles indiquent un choix d'items, le sujet étant souvent conscient que son message pourrait être différent dans d'autres contextes. Cette approche sensibilise utilement à la nécessité de multiplier les modalités du questionnement et de les croiser. Mais ne peut-elle pas laisser penser que chaque réponse produite serait une production nouvelle et originale, ce qui, à l'évidence, ne rend pas compte des fortes régularités dont rendent compte les recherches didactiques ?

Cette publication présente les avantages et limites du genre « colloque ». Mais, en regroupant préférentiellement de nombreuses contributions d'actuels et anciens étudiants du LIRDHIST, elle permet de brosser un panorama utile des acquis de cette direction de recherche.

J.-P. Astolfi

CHARTRAIN J.-L. (2003). *Rôle du rapport au savoir dans l'évolution différenciée des conceptions scientifiques des élèves. Un exemple à propos du volcanisme au cours moyen 2. Thèse de doctorat, université Paris 5, 434 p.*

La thèse de Jean-Louis Chartrain étudie le « rôle du rapport au savoir dans l'évolution différenciée des conceptions scientifiques des élèves » à partir du cas de l'apprentissage du volcanisme au cours moyen. C'est donc un travail de didactique différentielle qui ne veut pas se limiter aux seuls facteurs macro-sociologiques : l'auteur cherche à « articuler des points de vue psychologique, sociologique et didactique en recourant notamment à la notion de rapport au savoir ». Une telle approche croisée n'est pas habituelle et fait tout l'intérêt de cette recherche.

Dans un premier temps Jean-Louis Chartrain explicite l'idée de différenciation à partir des approches sociologiques et psychologiques habituelles, complétées par un point de vue didactique, dont il dit justement qu'il est grandement à construire, et par le concept de rapport au savoir.

Les variables utilisées pour étudier la différenciation des apprentissages sont donc des variables sociologiques (âge, genre, profession et catégorie sociale, niveau de qualification des parents), des variables didactiques (conceptions des élèves avant et après enseignement) et une variable « rapport au savoir ».

Les conceptions des élèves, analysées selon une grille (conceptions locales, centrales, globales) construite à partir de travaux didactiques disponibles, sont peu différenciées au départ (essentiellement locales). Elles semblent l'être beaucoup plus après enseignement, alors que celui-ci a tenté de les prendre en compte ; ce qui n'est pas sans poser des « questions assez redoutables à l'enseignement des sciences et au champ didactique ».

La construction d'une variable « rapport au savoir » est une des innovations de cette recherche. Jean-Louis Chartrain utilise pour la définir quatre écrits des élèves : deux « bilans de savoir » dans l'année, un texte sur les décisions prises pour réussir l'année de CM2 et un autre sur les intentions avec lesquelles ils viennent à l'école. À partir de l'analyse de

contenu de ces écrits, il procède à des « analyses factorielles des correspondances » et dégage deux facteurs principaux : le premier oppose une logique de compréhension et de plaisir à une approche floue des apprentissages scolaires ; le second oppose le plaisir d'apprendre et le développement personnel à un rapport au savoir « en tension ».

Finalement, l'étude montre une influence de la PCS (profession et catégorie sociale) et du genre, les garçons paraissant davantage progresser que les filles. La variable « rapport au savoir » est nettement corrélée à la différenciation des apprentissages, essentiellement pour son facteur 1, mais elle ne rend pas compte de toutes les différences individuelles.

Cela conduit à poser la question de l'existence de dimensions au rapport au savoir : la dimension générale (le rapport à l'apprendre), seule prise en compte ici, et des dimensions locales (les rapports aux savoirs) qui s'établissent avec des objets de savoir particuliers.

La thèse de Jean-Louis Chartrain est donc nouvelle par plusieurs aspects :

- par la méthode proposée pour l'étude du rapport au savoir des élèves,
- par le croisement qu'elle tente entre les différences d'apprentissages, étudiées didactiquement par l'évolution des conceptions, et des variables sociologiques et psychosociologiques.

C'est un travail qui convoque des références plurielles et met en oeuvre des méthodes variées, ce qui ne va jamais sans difficultés et explique certaines imprécisions. Sa richesse tient à toutes les relations explorées. Reste que la signification de la variable « rapport au savoir » interroge. Quelle part du concept représente-t-elle ?

C. Orange

MASCLET E. (2003). *L'explication du phénomène des saisons chez les élèves de cycle III. Test d'une séquence d'enseignement et ingénierie didactique. Thèse de doctorat, université Denis Diderot-Paris VII, 262 p.*

L'auteur fait un choix avec lequel on peut être aisément d'accord. Pour étudier la faisabilité de séquences d'enseignement d'astronomie pour le cycle 3 de l'école primaire française

(niveaux internationaux 3-4-5, âges 8 à 11 ans), il utilise des dispositifs non innovants, largement présentés dans la littérature : maquettes classiques du système Soleil - Terre, expériences avec plaques et thermomètres plus ou moins inclinés par rapport à la direction des rayons solaires, etc. Il fixe des objectifs d'apprentissage très limités, sans surenchère : le phénomène des saisons peut s'expliquer par l'inclinaison de l'axe de rotation diurne de la terre par rapport au plan de l'écliptique. Il favorise une démarche faisant appel aux idées « spontanées » des élèves, en les confrontant entre elles et aux modélisations proposées. Il confie cet enseignement à des stagiaires en IUFM, non spécialisés *a priori* en sciences, à l'issue d'une formation très légère. Le temps consacré à cet enseignement est de l'ordre de ce qui est pratiqué habituellement. Il prend donc en compte les contraintes drastiques imposées par le système, tournant ainsi le dos aux tentatives parfois rencontrées chez les innovateurs : promouvoir des dispositifs ambitieux dont la faisabilité et la diffusion restent hautement aléatoires, se fixer des objectifs d'apprentissage peu compatibles avec ce qu'un enseignant standard peut construire avec ses élèves.

Le protocole expérimental compare trois types de classes :

- vingt et une classes expérimentales avec un enseignement associant débat scientifique et utilisation des maquettes, assuré par l'auteur lui-même ou par des stagiaires qu'il a formés ;
- deux classes « classiques » sans débat ni manipulation ;
- des classes « intermédiaires » avec expression des conceptions des élèves, mais sans manipulations.

Les apprentissages sont essentiellement évalués à partir d'un questionnaire papier-crayon. Les mêmes tests sont proposés trois mois après la fin des séances puis un an après aux élèves des trois types de classe. Indéniablement, des résultats spectaculaires sont obtenus. Les performances des classes expérimentales sont nettement supérieures à celles des autres classes et les effets sont durables. À l'autre extrême, on trouve les élèves des classes « classiques » dont les résultats sont faibles et régressent largement dans le temps. Les classes « intermédiaires » occupent une position intermédiaire avec des

acquis non négligeables mais une durabilité plus faible. Incontestablement, les séances proposées par l'auteur semblent produire un effet.

Au passage, et il s'agit là d'un apport original, l'auteur met en relation les performances des élèves et leurs réponses à des « tests piagetiens » classiques ou construits par lui-même. Un élève jeune, « égorgement », réussit très rarement les tests. La maîtrise des tests projectifs semble avoir les effets les plus importants : un élève qui répond correctement au test projectif a 95 % de chances de réussir l'évaluation. Un élève qui a réussi les évaluations à 85 % de chances d'avoir réussi le test projectif. À l'inverse, 90 % des élèves qui n'ont pas réussi les évaluations n'ont pas réussi non plus le test projectif ! L'âge des élèves est alors à prendre en compte et la classe de CE2 apparaît comme peu propice pour développer ces enseignements.

Il est cependant dommage qu'un certain nombre de défauts viennent ternir l'intérêt de ce travail. Il semble bien que toutes les précautions nécessaires au travail du chercheur n'aient pas toujours été prises. Par exemple, l'analyse *a priori* des contenus d'enseignement sous-estime les difficultés réelles. On peut se demander le sens qui est donné par les élèves sur les schématisations utilisées (représentations planes de systèmes à dimension trois), les notions de plan de la trajectoire, d'inclinaison de l'axe de rotation (« vers l'extérieur, vers l'intérieur »), d'inclinaison ou de parallélisme des rayons, de relativité des mouvements et de changements de référentiels, de passage d'un point de vue terrestre à un point de vue extra-terrestre, etc. Peut-être que tout cela est ici secondaire. Ce serait mieux de s'en assurer. L'auteur ne questionne pas réellement ce que les élèves ont appris : une analyse plus critique de ses propres tests manque. En outre, l'on ne sait pas vraiment ce qui se passe dans les classes. Il est difficile de se persuader que le caractère « socio-constructiviste » - discutable - des séquences soit la cause prépondérante indiscutable (si tant est qu'il y en ait une seule) du succès. On pourrait tout aussi bien penser que ce qui a été ici déterminant, c'est le recours à un modèle sous forme de maquettes. Il faut se méfier de la sur-interprétation.

J.-J. Dupin

MISTRIOTI G. (2003). *Optique géométrique et interprétation de la vision par les étudiants universitaires : un modèle d'interprétation de la vision d'une image virtuelle*. Thèse de doctorat, université Denis-Diderot-Paris 7, 215 p.

Le mémoire de thèse de M^{me} Mistrioti porte sur la façon dont des étudiants s'y prennent pour résoudre des problèmes d'optique concernant la vision. Cette problématique peut surprendre par sa simplicité puisque les étudiants disposent normalement des connaissances nécessaires en optique géométrique, connaissances acquises lors de leur cursus. Et pourtant, le mémoire de M^{me} Mistrioti comporte trois chapitres qui vont mettre à mal cette idée que des problèmes supposés élémentaires ne présentent aucune difficulté. Ces chapitres sont précédés d'une analyse de contenus développant, dans un premier temps, les mécanismes optiques mis en œuvre dans la vision et dans, un deuxième temps, un modèle, désigné sous le terme de « rayon-rail », permettant d'interpréter les résultats obtenus. Ce modèle est construit en s'appuyant sur une analyse bibliographique exhaustive. On trouve enfin un dernier chapitre qui présente une synthèse des résultats obtenus.

D'un point de vue méthodologique, M^{me} Mistrioti utilise des exercices judicieusement choisis, variés et bien construits et comportant des demandes d'explications ou de commentaires. Cependant si les « éléments repérés dans l'ensemble des réponses des étudiants », les « réponses analysées en composantes » ou les « analyses des cohérences entre schémas et explications » qui, remarquablement menés, permettent le plus souvent une étude des explications des réponses des étudiants, quelques entretiens complémentaires auraient permis de lever certaines ambiguïtés (par exemple les schémas sur lesquels des étudiants ont placé un œil entre des rayons de lumière).

Ce mémoire est correctement écrit (peu de coquilles ou fautes de frappe) et agréable à lire et, s'il présente certaines redondances, elles sont les bienvenues car l'importance des données analysées justifie des synthèses. Il est construit de manière fort logique puisqu'il progresse d'une approche ouverte à un questionnaire enfermant l'étudiant dans l'obligation de

préciser ses conceptions de la vision d'une image virtuelle.

Bien sûr, on peut se poser la question de savoir si le fait de présenter le modèle des « rayons-rails » au premier chapitre ne conditionne pas le lecteur à accepter par la suite une interprétation en quelque sorte obligée des modes de raisonnements des étudiants. Mais M^{me} Mistrioti sait éviter cet écueil, en justifiant, chaque fois que cela est nécessaire, le recours à ce modèle, en le complétant par un concept bien connu des didacticiens, celui « d'image voyageuse », et même en essayant d'imposer aux étudiants l'utilisation des faisceaux de Kepler nécessaires pour traiter correctement les exercices

On ne reprendra pas ici tous les résultats fournis dans le mémoire de M^{me} Mistrioti, mais lorsqu'elle s'intéresse à la vision d'une image formée par un miroir plan, elle n'obtient que 11 % de bonnes réponses. Et ce n'est pas réconfortant de constater que si 80 % des étudiants de licence interrogés connaissent et respectent les lois de la réflexion, ils les mettent en œuvre de manière erronée, en utilisant, pour la plupart d'entre eux, le modèle de l'image voyageuse pilotée par des « rayons-rails ». Ainsi ils n'ont pas à distinguer la vision d'un objet de la vision de son image. Le travail de M^{me} Mistrioti pose indirectement mais de manière claire la question fondamentale de l'utilité d'un savoir acquis mais non opératoire.

Ceci est renforcé dans le chapitre C du mémoire (questionnaire « images ») où l'on observe que les étudiants, pour contourner le principe de formation d'une image, vont échapper parfois à la contrainte de prendre en considération les deux rayons imposés sur les schémas et utiliser le modèle des « rayons-rails ». Et la plupart de ceux qui obéissent à cette contrainte ne le font plus pour interpréter la vision de cette image.

Enfin, dans le très important chapitre D (questionnaire « vision »), M^{me} Mistrioti cherche à comprendre le rôle des rayons dans les explications des étudiants relatives à la vision en général et à la formation de l'image rétinienne en particulier. Pour cela elle utilise des schémas incomplets mais présentant tous un œil recevant deux rayons. Les résultats montrent que le principe de conjugaison, nécessaire à la conceptualisation d'images optiques, n'est utilisé que par 10 % des étudiants.

J.-M. Dusseau

POURPRIX B. (2003). *La fécondité des erreurs. Villeneuve d'Ascq, Presses Universitaires du Septentrion, 187 p.*

En écrivant une histoire des idées dynamiques de la physique au XIX^e siècle, Bernard Pourprix invite son lecteur à emprunter, selon ses termes, les voies sinueuses de la construction scientifique. Principalement deux fils conducteurs permettent d'aborder ce cheminement. Le premier concerne l'avènement de ce qui est qualifié de paradigme dynamique et qui s'impose au détriment du paradigme statique, repoussant ainsi la physique laplacienne et les présupposés qu'elle entraîne. Ainsi, au présupposé statique s'ajoute les présupposés substantialistes (la chaleur, la lumière, l'électricité sont nécessairement constituées de fluides impondérables) et mécanistes (l'ensemble des phénomènes physiques relèvent d'une explication mécanique analogue à celle mise en avant par Laplace dans sa mécanique céleste). Si la théorie dynamique ouvre des perspectives indéniables, comme en témoigne la constitution de la thermodynamique, de l'électromagnétisme, etc., il n'en demeure pas moins que les erreurs résultant des essais, des tâtonnements, ou celles provenant de cet héritage laplacien constituent un terreau fertile que l'auteur propose d'examiner. Cette approche constitue le second fil conducteur.

L'ouvrage s'organise selon trois parties. La première partie aborde la construction de l'électrodynamique, durant la première moitié du XIX^e siècle en soulignant les difficultés mais également les avancées constituées par l'adoption d'une philosophie dynamique. Les travaux de quelques-uns des principaux acteurs de cette construction sont examinés à travers le prisme de ce changement de paradigme qui conduit donc à l'adoption d'un point de vue dynamique au détriment des conceptions statiques. Quelques études de cas étayent le raisonnement. L'auteur souligne par exemple la nécessaire réinterprétation en termes statiques des célèbres travaux de Volta qui ne s'inscrivent pas dans un cadre conceptuel classique, les réticences affichées autour de la loi d'Ohm qui impose une relation entre un phénomène statique et un phénomène dynamique (respectivement l'électricité de tension et l'électricité de courant) ou encore, les difficultés rencontrées par Faraday lorsqu'il

s'agit d'accorder au mouvement (celui d'un aimant au voisinage d'un circuit électrique par exemple) un rôle majeur permettant d'expliquer le phénomène de l'induction.

C'est la même approche qui permet d'appréhender les deux autres parties de cet ouvrage consacrées respectivement aux fondements et au développement du concept d'énergie, ce dernier apparaissant comme le concept central des théories dynamiques en cours de constitution.

Les fondements de ce concept, examinés dans le cadre des conversions nouvellement réalisées entre les grands domaines de la physique (conversion entre des phénomènes électriques, mécaniques, calorifiques, etc.), reposent sur l'impossibilité, pour la mécanique, de justifier ces conversions et la nécessité d'apporter des réponses. Le choix d'illustrer les avancées réalisées vers l'émergence du principe de conservation de l'énergie avec les travaux de H. Helmholtz et W. Thomson est extrêmement pertinent car les réponses apportées par ces deux auteurs renseignent particulièrement sur les difficultés rencontrées (Thomson par exemple achoppe sur le fait que la « transformation » de chaleur en travail est limitée) et les erreurs commises (par exemple l'adoption par Helmholtz d'une vision laplacienne de la structure de la matière), mais également sur le style de chaque auteur ainsi que sur les philosophies dont ils sont des représentants (Helmholtz est allemand et Thomson écossais).

Le *Traité de philosophie naturelle* de Thomson et Tait qui consacre le principe de conservation de l'énergie constitue une introduction « naturelle » à la dernière partie de l'ouvrage. Comme précédemment, le contexte de la dynamique constitue une trame fructueuse. Ainsi, la construction de l'électromagnétisme de Maxwell, qui est une théorie dynamique du champ électromagnétique centrée sur l'énergie, permet d'appréhender les divers mécanismes étudiés sans faire appel à d'autres explications qu'aux transformations d'énergie, évitant ainsi les questionnements liés aux mécanismes cachés. Cette démarche est originale car elle ne s'élabore pas contre le modèle mécanique. En effet, bien que Maxwell ne donne pas d'explication mécanique de l'électromagnétisme, il reste néanmoins attaché aux conceptions mécaniques comme en témoigne le lien qu'il souligne entre les phénomènes électromagnétiques et le principe de

moindre action (l'un des principes centraux de la mécanique).

S'il soulève des interrogations concernant la nature de l'énergie (son écoulement, sa localisation, etc.), l'importance du développement du concept et sa généralisation à tous les domaines interrogent les fondements même de la physique. Cet épisode, qui aboutit à une crise majeure de la physique moderne, oppose les partisans d'une conception mécanique de la nature ancrée sur les concepts de force et de masse, aux partisans d'une énergétique dont l'objectif est de fondre l'ensemble de la physique sur le concept d'énergie en récusant prétendument toute hypothèse. La sortie de la crise, avec notamment l'avènement de la physique statistique, repose sur l'analyse des avancées mais également sur l'analyse critique des erreurs et les positions de Planck vis-à-vis de Mach sont, à cet égard, très instructives.

Bien que l'ensemble présente un panorama constructif de l'histoire des idées dynamiques, le texte souffre parfois d'absence de précision concernant le contexte. Il aurait été intéressant de souligner davantage le rôle joué par les « ingénieurs théoriciens » dont l'apport, tant d'un point de vue des concepts que des méthodes, est incontestable, d'explicitier les spécificités liées aux philosophies écossaise ou allemande concernant l'approche dynamique et de s'attacher parfois à détailler quelque peu les principales orientations prises dans les travaux des auteurs cités. Il est par exemple très difficile d'appréhender l'adoption par Thomson d'une théorie dynamique sans connaître ses travaux antérieurs à l'étude de la chaleur, ses réflexions mathématiques, sa connaissance des problèmes d'ingénierie, etc.

Cependant, on ne peut qu'inciter tout scientifique (enseignant, chercheur, ingénieur, etc.), à lire ce livre. En effet, cet ouvrage constitue une illustration particulièrement éclairante sur la construction de la science, sur l'intérêt voire la nécessité qu'il y a à interroger les essais, les erreurs, les hésitations, etc. Par ailleurs il est essentiel de noter que cette remise en cause du statut de l'erreur intéresse fondamentalement le domaine de la didactique. En effet, le questionnement provoqué par l'évocation de difficultés rencontrées par les auteurs et la recontextualisation des connaissances, peuvent d'une part permettre aux élèves d'aborder plus facilement certains concepts « délicats » de la physique (et l'énergie en est un !) et

d'autre part, en donnant à la science un visage plus humanisé, susciter davantage d'intérêt pour des enseignements aujourd'hui quelque peu délaissés. En ce sens aussi le pari sur la fécondité des erreurs est réussi.

M. Guedj